

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Государственное образовательное учреждение
высшего образования
Пермский национальный исследовательский политехнический университет

В.С. КИРЧАНОВ

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ
ФОТОНИКИ И ОПТОИНФОРМАТИКИ**

*Утверждено
Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия
для студентов специальности «Фотоника и оптоинформатика»*

Издательство
Пермского национального исследовательского политехнического университета
2020

УДК 621.383+535]:620.3 (075.8)

ББК 30.3

К 43

Рецензенты:

Профессор кафедры физика металлов Пермского национального исследовательского государственного университета

д.ф.-м.н., проф. *Л.В. Спивак*.

Доцент кафедры общей физики Пермского национального исследовательского политехнического университета к.т.н., доц. *В.С. Постников*

Кирчанов В.С.

К 43 Физические основы нанотехнологий фотоники и оптоинформатики:

учебное пособие /В.С.Кирчанов – Пермь. Изд-во Перм. нац. иссл. политех. ун-та 2019- 221с.

Пособие написано на основе лекций, по дисциплине «Физические основы нанотехнологий фотоники и оптоинформатики», которые автор читает на протяжении ряда лет на факультете прикладной математики и механики для студентов магистров специальности «Фотоника и оптоинформатика». Изложен основной материал необходимый для изучения этой дисциплины, приведены тематический план, примерный список вопросов для экзамена.

Рекомендовано студентам бакалаврам и магистрам специальности «Фотоника и оптоинформатика», а также лицам, которые интересуются новыми материалами и технологиями, используемыми в наномире.

Табл. 2, Ил.199 , Библиогр.98

УДК 621.383+535]:620.3 (075.8)

ISBN 978-

□ ПНИПУ, 2020

Оглавление

ЧАСТЬ I. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ ФОТОНИКИ...	9
Глава 1 НАНОФОТОНИКА	9
1.1. Фотоника	9
1.2. Нанопотоника [1,2]	9
1.2.1. Направления нанопотоники	10
1.2.2. Задачи нанопотоники	11
1.2.3. Другие разделы фотоники.....	11
1.3. Оптикоинформатика.....	12
1.4. Оптические наноструктуры и их свойства [5].....	13
1.4.1. Фотонные кристаллы [5]	13
1.4.2. Фотонный фрактал [5]	17
Глава 2 ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ	21
2.1. Полупроводниковые наноструктуры и нанопустройства. Источники фотонов [1]	21
2.1.1. Материалы и структуры полупроводниковых устройств.....	21
2.2. Квантово-размерные лазеры и лазеры с микрорезонаторами [1].....	25
2.2.1. Лазеры на квантовых ямах*).....	26
2.2.2. Лазеры на квантовых точках.....	26
2.2.3. Полупроводниковые вертикально излучающие лазеры (VCSEL) [1,3,4]	28
2.2.4. Фотонно-кристаллические лазеры с микрорезонаторами [1]	29
2.3. Случайные лазеры [1]	31
Глава 3 ФОТОПРИЕМНИКИ	33
3.1. Источники излучения.....	33
3.2. Полупроводниковые детекторы фотонов для оптических приемников [1,2]	33
3.3. Солнечные фотоэлементы [3]	36
3.3.1. Классификация солнечных элементов.....	37
3.3.2. Солнечные элементы на основе металлоорганических перовскитов (МОП).....	41
3.4. Приборы с зарядовой связью (ПЗС)	42
3.4.1. Технология изготовления ФПЗС	43
Глава 4 МОДУЛЯТОРЫ	46
4.1. Электрооптические модуляторы.....	46
4.1.1. Электрооптические модуляторы света	46
4.1.2. Интегрально-оптические модуляторы света.....	48
4.1.3. Электропоглощающие модуляторы на основе эффекта Келдыша-Франца и квантоворазмерного эффекта Штарка [1]	50
4.2. Магнитооптические модуляторы света.....	52
4.3. Акустооптические модуляторы света	53
4.4. Пространственные модуляторы света (ПМС)	54

4.5. Оптроны [1,2]	56
Глава 5 ОПТИКА НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД	58
5.1. Волоконный световод (ВС)	58
5.1.1. Характеристики волоконных световодов	58
5.1.2. Технология изготовления и применения световодов	61
5.1.3. Специальные волноводы. Фокон, градан, сельфок	61
5.2. Мутные среды	64
5.3. Интегральная оптика	65
5.3.1. Активные элементы интегральной оптики	66
5.3.2. Технология интегральной оптики	66
Глава 6 ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ	67
6.1. Волоконно-оптические системы связи [1,2]	67
6.2. Волноводные оптические усилители и лазеры [3]	68
6.2.1. Волоконный усилитель легированные эрбием (EDFA)	69
6.2.2. Волоконные ВКР-усилители (Raman fider amplifiers, RFA)	74
6.3. Нанополаризаторы [5-8]	75
Глава 7 ТЕХНОЛОГИИ НАНОПЛАЗМОНИКИ	77
7.1. Плазмоника	77
7.1.1. Плазмоны	78
7.1.2. Плазмонный резонанс [1,2,3]	78
7.2. Наноплазмоника [4,5,6]	79
7.2.1. Плазмонный нанолазер [19]	81
7.2.2. Применения устройств наноплазмоники [19,7]	88
7.3. Метаматериалы	97
7.3.1. «Правые» и «Левые» изотропные среды [8]	99
7.3.2. Оптика материалов с отрицательным показателем преломления	100
7.3.3. Оптические плазмонные метаматериалы [12,13,14]	102
7.3.4. Применение оптических метаматериалов для волнового обтекания предметов [12,15]	110
7.3.5. Метаповерхности [20]	113
7.3.6. Гибридные наноантенны [21]	118
ЧАСТЬ II. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ	
ОПТОИНФОРМАТИКИ	122
Глава 8 ОПТИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ, ХРАНЕНИЕ И СЧИТЫВАНИЕ	
ИНФОРМАЦИИ	122
8.1. Устройства памяти [1]	122
8.1.1. Элементы памяти на макроскопических структурных изменениях (нарушениях формы) носителя	122
8.1.2. Магнитные элементы памяти	123
8.1.3. Электрические элементы памяти	123
8.2. Оптические элементы памяти	124
8.2.1. Амплитудная бистабильность в пассивном кольцевом оптическом резонаторе [2]	125
8.2.2. Бистабильные оптические устройства [3]	127

8.3. Голографические элементы памяти.....	130
8.3.1. Оперативные запоминающие голографические устройства (ЗГУ) ...	130
8.4. Запоминающие устройства на одноквантовых джозефсоновских элементах памяти [4].....	132
8.5. Сегнетоэлектрические энергонезависимые запоминающие устройства [5]	134
8.6. Новые научные разработки около 2010 года.....	136
Глава 9 ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ	142
9.1. Оптические технологии	144
9.1.1. Оптические логические устройства на основе оптической бистабильности [1].....	144
9.1.2. Первые цифровые оптические компьютеры	148
9.1.3. Аналоговые оптические вычисления.....	152
9.1.4. Аналоговые процессоры	155
9.2. Коммерческий оптический компьютер EnLight 256 [6,7]	157
9.2.1. Элементная база Enlight256	161
9.2.2. Принцип действия вычислительного ядра Enlight 256	162
9.3. Оптические процессоры нечеткой логики [8]	163
9.4. Оптические нейронно-сетевые компьютеры [1]	165
9.5. Программа Нейронет	166
9.5.1. Мемристор[11].....	167
9.5.2. Российские ученые создали проект инновационного биоморфного нейропроцессора [9].....	173
9.5.3. Нейронный процессор TrueNorth Neurosynaptic System [американская «истинный север» нейросинаптическая система]	175
9.5.4. Европейский нейроморфный суперкомпьютер [SpiNNaker][12].....	176
Глава 10 ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ НАНОТЕХНОЛОГИИ	188
10.1. Квантовая нанотехнология	188
10.2. Теоретические элементы для построения квантового компьютера.....	189
10.2.1. Постулаты квантовой механики [1,2]	189
10.2.2. Квантовая суперпозиция состояний.....	191
10.3. Получение запутанных квантовых состояний [5.6].....	193
10.3.1. Спонтанное параметрическое рассеяние света [3]	193
10.4. Мысленный эксперимент (ЭПР) Эйнштейна-Подольского-Розена в интерпретации Боба.....	195
10.5. Неравенства Белла [4,5]	197
10.5.1. Формализм	197
10.5.2. Неравенства Белла	198
10.5.3. Экспериментальная проверка неравенств Белла	200
Глава 11 КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ И ОПЕРАЦИИ	207
11.1. Измерение (наблюдение)	208
11.1.1. Кубиты [3,4].....	209
11.2. Вычисление на квантовом компьютере	214
11.2.1. Однокубитовые вентили	214

11.2.2. Трехмерная визуализация кубита -- сферы Блоха	216
11.2.3. Логические элементы, действующие на два кубита	217
11.2.4. Логические элементы, действующие на три кубита	219
11.2.5. Универсальные квантовые вентили	220
11.3. Теорема о запрете клонирования	223
11.4. Квантовая телепортация состояний [3,4]	224
11.5. Квантовая коммуникация [3,4]	226
11.6. Квантовая криптология [3,4]	228
11.7. Квантовые алгоритмы [3,4,5]	228
11.8 Энтропия фон Неймана- характеристика запутанности двухкубитовых систем[6]	230
Глава 12 КВАНТОВЫЙ КОМПЬЮТЕР	232
12.1. Структура квантового компьютера [1]	232
12.1.1. Идеальный квантовый компьютер	233
12.2. Сравнение квантового компьютера с оптическим компьютером	236
12.3. Физические проблемы квантовых компьютеров [1,3]	236
12.3.1. Методы подавления декогеренции	237
12.3.2. Фазовая декогеренция кубита	237
12.4. Общие требования для реализации квантового компьютера	239
12.5. Квантовый компьютер на основе спектрометра ядерного магнитного резонанса (ЯМР) [1]	240
12.6. Квантовые компьютеры на различной физической основе	242
12.7. Состояние квантовых компьютеров до 2012 г.	245
12.8. Разработки квантовых компьютеров после 2012 г.	245
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	260
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	261
NV-центр [П1]	261
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	266
Тематический план	266
Примерные вопросы к экзамену по дисциплине	267

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие для дисциплины «Физические основы нанотехнологий фотоники и оптоинформатики» предназначена для магистров по направлению «Фотоника и оптоинформатика» в течение одного семестра обучения. Предполагается, что бакалавры данного направления прослушали семестровый курс «Наноматериалы и нанотехнологии». См., например, учебное пособие В.С.Кирчанова «Наноматериалы и нанотехнологии», которое можно рассматривать в качестве вводной части к предлагаемому пособию.

Сделана попытка в рамках одного семестра собрать материал по основным направлениям устройств фотоники, в которых происходит различные превращения энергии, и приборов оптоинформатики, предназначенных для обработки информации. Наше внимание фокусировалось на наномасштабе физических, физико-химических, технологических процессов, использованных для получения этих приборов и устройств, которые приобрели новые функциональные возможности, ранее недоступные в микромасштабе.

Книге полностью соответствующей дисциплине для магистров в известной нам литературе найти не удалось. Наиболее близким является отдельные главы из фундаментальной книги Б.Салеха, М.Тейха «Оптика и фотоника. Принципы и применения» в двух томах для студентов физических и технических специальностей. Также использовалась ценное учебное пособие А.Н. Игнатова «Оптоэлектроника и нанофотоника». Использовались статьи пятитомной Физической энциклопедии. Представляет интерес русский перевод (2013 г.) японского «Справочника по технологии наночастиц» с большим списком полезных приложений. По квантовым технологиям полезными оказались книги Р.Перри «Элементарное введение в квантовые вычисления» и Ф.Кайле, Р.Лафлами, М.Моска «Введение в квантовые вычисления», учебное пособие Ю.А. Байкова, В.М. Кузнецова «Квантовая механика» для студентов технических специальностей. Вторым видом источников являются обзоры физических журналов: «Успехи физических наук» и др. Третий вид источников информации - различные электронные ресурсы типа википедии, рекламные сайты о новых научных достижениях, требующие дополнительной проверки и фильтрации.

Целью учебного пособия являются рассмотрение физических основ нанотехнологий различных частей фотоники: волоконно-оптических линий связи, нанофотоники, компьютерной фотоники, и оптоинформатики, включая оптические компьютеры, квантовые технологии, особенно квантовый компьютер. В приложениях рассмотрены физические основы нанотехнологии современных солнечных элементов, метаматериалы, и технологии невидимости объектов. Исследования в этих областях ведутся интенсивно и количество информации возрастает экспоненциально. Поэтому представления автора на предмет курса уточняются при получении и отборе нового материала.

Материал пособия состоит из двух частей, организованных в виде отдельных глав. В первой части рассматриваются физические основы нанотехнологий фотоники. В первой главе, которая является вводной напоминаются основные цели, задачи нанофотоники и оптоинформатики, рассматриваются примеры

фотонных кристаллов и фотонные фракталы. Во второй главе рассмотрены наноматериалы, используемые в источниках излучения, применяемые в устройствах фотоники и оптоинформатике. В третьей главе обсуждаются материалы для оптических детекторов, солнечных элементов, В четвертой главе рассмотрены модуляторы и оптоэлектронные устройства. Пятая глава посвящена волоконным световодам, мутным средам и интегральной оптике полупроводниковых оптических детекторов, солнечных элементов, модуляторов и оптоэлектронных устройств. В шестой главе рассмотрены применение наноматериалов в волоконнооптических усилителях и лазерах и различные нанополяризаторы. Метаматериалам и технологиям наноплазмоники посвящена седьмая глава.

Во второй части рассматриваются физические основы нанотехнологий оптоинформатики. В восьмой главе представлены различные устройства памяти (записи, хранения и считывания информации). Девятая глава посвящена оптическим технологиям и оптическим компьютерам, модели мемристора и нейροкомпьютеру. В десятой главе представлен материал о квантовых технологиях, в частности о получении запутанных квантовых состояниях, квантовой телепортации. В одиннадцатой главе рассмотрены квантовые вычисления и логические квантовые операции. Двенадцатая глава содержит обзор о реализациях квантового компьютера на основе различных физических материалах и явлениях.

В этой книге нет ничего, что не было ранее сказано другими, поэтому заранее выражаю благодарность за указание возможных неточностей и дельные замечания, способные улучшить изложение.

ЧАСТЬ I. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ ФОТОНИКИ

Глава 1 НАНОФОТОНИКА

1.1. Фотоника

Мы будем рассматривать физические основы наноматериалов и нанотехнологий только для фотоники и оптоинформатики, поэтому кратко напомним, что изучают эти дисциплины.

Фотоника - область науки и техники, связанная с использованием светового излучения (потоков фотонов) в оптических элементах, устройствах и системах, в которых генерируются, усиливаются, модулируются, распространяются и детектируются оптические сигналы.

Фотоника (англ. photonics) –технология, которая включает излучение света, его передачу, отклонение, усиление и детектирование при помощи оптических компонент и устройств, лазеров и других источников, оптического волокна, электрооптических метрологических устройств и других сложных нанофотонных систем.

Задачи фотоники:

- Миниатюризация оптических элементов, устройств и систем.
- Интеграция оптических элементов, устройств и систем на единой базе (чипе.)
- Сверхбыстродействие оптических систем (в полностью оптических устройствах управление сигналом может осуществляться за 1 фемтосекунду $= 10^{-15} \text{сек}$).
- Сверхскоростная передача больших массивов информации $1 \text{Tbit} / \text{сек} = 10^{12} \text{бит} / \text{сек}$.
- Низкий уровень управляющих сигналов (современное переключение энергия управляющего сигнала $1-5 \text{фемтодж} = 10^{-15} \text{Дж}$).
- Полифункциональность оптических материалов.

Нанооптика-раздел оптики, в котором изучаются особенности взаимодействия излучения наноразмерных полей с атомами, молекулами и нанотелами.

1.2. Нанофотоника [1,2]

Нанофотоника- раздел нанооптики, в котором исследуются нанополь со считанным количеством фотонов и поведение света на нанометровой шкале.

Нанофотоника- (англ. nanophotonics) — раздел фотоники, занимающийся изучением физических явлений, возникающих при взаимодействии фотонов с объектами нанометровых размеров, и практическим применением указанных явлений.

Нанофотоника - область фотоники, связанная с разработкой архитектур и технологий производства наноструктурированных устройств генерации, усиления, модуляции, передачи и детектирования электромагнитного излучения и приборов на основе таких устройств, а также с изучением физических явлений, определяющих функционирование наноструктурированных устройств и протекающих при взаимодействии фотонов с наноразмерными объектами.

Цели и материалы / устройства нанофотоники.

Цель нанофотоники - разработка материалов, имеющих нанометровые размеры (1-100 нм.) с новейшими оптическими свойствами и создание на их основе фотонных устройств. В настоящее время нанофотоника рассматривается как альтернатива современной электроники. Использование фотонов при передаче и обработке информации позволит добиться существенных преимуществ, благодаря высокому быстродействию и устойчивости фотонных каналов связи к помехам.

К нанофотонным устройствам относятся устройства, использующие структуры размерами 100 нм и менее. Такие устройства решают проблемы миниатюризации многих оптических систем. Нанофотонные устройства не только значительно превосходят электронные аналоги, но и позволяют успешно решать проблемы, связанные с тепловыделением и электропитанием. Слабым местом приборов на основе нанофотоники остается обеспечение надежности электрооптических переключателей, позволяющие преобразовывать электрические сигналы в оптические и наоборот.

Изделия кремниевой нанофотоники достаточно малы, поэтому многие из них легко вводятся в электронные чипы. В настоящее время многие оптические наноустройства можно изготавливать на основе стандартных материалов полупроводниковой электроники, так что нанофотоника развивается главным образом за счет сочетания электронных и фотонных компонентов, позволяющего использовать все преимущества и того и другого. Возможность использования в нанофотонике кристаллических пластин из кремния на изоляторе имеет огромное значение, если вспомнить о технологии кремниевой электроники. Созданные на основе таких материалов фотонные наноустройства могут быть легко интегрированы в существующие системы на кристаллах и быстро освоены производством.

1.2.1. Направления нанофотоники

К направлениям нанофотоники можно отнести:

-Исследования физических основ генерации и поглощения излучения в оптическом спектре в гетероструктурах с квантовыми слоями, нитями и точками. Это разработка

- полупроводниковых и сверхпроводниковых источников и детекторов электромагнитного излучения,
- светодиодов на основе полупроводниковых гетероструктур и на органической основе.
- твердотельных и органических лазеров,
- элементов солнечной энергетики,
- наноструктурированных оптических волокон и устройств на их основе,
- элементов фотоники и коротковолновой нелинейной оптики.

К перспективным направлениям миниатюризации фотонных устройств и их интеграции в сложные системы относится использование фотонных кристаллов. Изготовление и исследование свойств наноразмерных оптических резонаторов сейчас является одним из самых интересных направлений развития нанофотоники, представляющих большую практическую и научную ценность.

Предметом изучения нанофотоники является распространение, преобразование, испускание и поглощение оптического излучения и сигналов в наноструктурах, с целью использования особенностей процессов взаимодействия излучения с веществом при таких масштабах, для создания различных функциональных устройств. Нанофотоника возникла на стыке оптики, лазерной физики, квантовой электроники, физики и химии твердого тела, материаловедения, физической химии.

1.2.2. Задачи нанофотоники

Основная задача нанофотоники — разработка наноматериалов с улучшенными или принципиально новыми оптическими, электрооптическими и оптоэлектронными свойствами для создания на их основе фотонных функциональных устройств нового поколения. К таким устройствам относятся в частности следующие:

- эффективные источники когерентного и некогерентного излучения с управляемыми характеристиками;
- устройства отображения информации, включая дисплеи портативных приборов и большие цветные экраны;
- приемники излучения и детекторы нового поколения;
- оптоэлектронные (фотоэлектронные) преобразователи, в том числе компактные фотоэлектрические источники питания и солнечные батареи повышенной эффективности;
- фотонная (оптическая) оперативная и долговременная память;
- устройства оптической обработки сигналов, в том числе оптические регенераторы;
- оптические переключатели и коммутаторы, в том числе для оптической коммутации пакетов;
- оптические соединения между элементами электронных вычислительных машин (между блоками, платами, чипами и элементами чипов);
- оптические вычислительные устройства, в том числе квантовые;
- интегрированные сенсорно-диагностические системы для контроля окружающей среды и состояния человека;

К новым перспективным *материалам нанофотоники* относятся следующие:

- полупроводниковые квантово-размерные материалы, в том числе материалы с квантовыми ямами, квантовыми нитями и квантовыми точками;
- фотонные кристаллы, фотонно-кристаллические пленки и волокна;
- метаматериалы с отрицательным показателем преломления и металл-диэлектрические плазмонные наноматериалы.

Важными средствами исследования материалов в нанофотонике являются ближнепольная сканирующая оптическая микроскопия, сканирующая туннельная микроскопия с применением возбуждающих фотонов (PASTM, photon-assisted scanning tunnel microscopy) и плазмонная оптика поверхности [3].

1.2.3. Другие разделы фотоники

Компьютерная фотоника объединяет современную физическую и квантовую оптику, математику и компьютерные технологии.

Микроволновая фотоника[3] изучает взаимодействие между оптическим сигналом и высокочастотным (больше 1 ГГц) электрическим сигналом. Эта область включает основы оптико-микроволнового взаимодействия, работу фотонных устройств при сверхвысоких частотах (СВЧ), фотонный контроль СВЧ-устройств, линий высокочастотной передачи и использование фотоники для выполнения различных функций в микроволновых схемах.

Радиофотоника[3] объединяет современную микроволновую фотонику и нанофотонику. Основные направления радиофотоники:

- управление фазированными антенными решетками радиолокационных станций (РЛС).
- обработка радиосигналов оптическими методами.
- аналого-цифровые сверхбыстрые преобразователи (АЦП и ЦАП).
- радиотехнические системы оптического диапазона с применением микроантенн и метаматериалов для приема сигналов терагерцового (ТГц) –диапазона и инфракрасных сигналов.
- гетеродинные оптические приемники.

1.3. Оптиинформатика

Оптоинформатика –область науки и техники, связанная с исследованием, созданием и эксплуатацией новых материалов, технологий и устройств передачи, приема, обработки, хранения и отображения информации на основе оптических технологий.

Основные источники излучения в оптиинформатике:

- Полупроводниковые лазеры,
- Лазеры на гетероструктурах,
- Лазеры и усилители на основе квантоворазмерных эффектов (на квантовых точках)
- Вертикально излучающие полупроводниковые лазеры
- Волоконные лазеры и усилители
- Планарные лазеры и усилители
- Фотоприемные устройства

Элементная база волоконно-оптических линий связи.

Оптическая запись, хранение и считывание информации:

- Оптические дисковые системы записи и хранения информации,
- Магнитооптические технологии
- Голографические технологии
- Регистрирующие среды и механизмы записи.
- Пространственно-временные модуляторы на электрооптическом, магнитооптическом и акустоэлектрическом эффектах.

Оптические технологии в вычислительной технике

- Оптические компьютеры аналоговые и цифровые.

Плазмонные технологии

- Наноплазмонный лазер
- Оптические плазмонные метаматериалы
- Плазмонные нановолноводы в качестве межсхемных соединений в системах на кристалле.

Квантовая нанотехнология

- Квантовая телепортация состояний
- Квантовые вычисления и операции
- Квантовые вентили(кубиты)
- Квантовые компьютеры на различной физической основе

Нанотехнологии, которые широко применяются в фотонике и оптоинформатике:

Формирование периодических наноструктур в диэлектрических и полупроводниковых средах с различной размерностью путем воздействия на них потоками атомов, фотонов, ускоренных заряженных частиц. В основном используются методы молекулярно-пучковой эпитаксии, электронно-лучевой литографии.

Технологии изготовления элементов фотонных схем лазеров, волноводов, СВЧ-оптических фильтров.

1.4. Оптические наноструктуры и их свойства [5]

XX век был веком «синтеза новых материалов». Синтез новых веществ приводил к получению новых свойств материалов. В XXI веке стремятся к получению материалов с заданными свойствами, которые контролируются структурой материала. В нанотехнологии при осуществлении контроля структуры «процесс» важнее, чем «синтез». Например, при производстве наночастиц размер и форма частиц зависят от рабочих условий процесса кристаллизации. При одинаковой длине волны возбуждения получается более широкий цветовой спектр излучения, если изменять размер квантовых точек CdSe, CdTe, CdS.

В процессе создания устройств, путем программируемой сборки наноструктурированных материалов, «производство» и «обработка» являются основными этапами. Например, фотонный кристалл образуется самосборкой наноматериала из параллельно расположенных на подложке нанокристаллов ZnO методом лазерной молекулярно-лучевой эпитаксии под контролем ультрафиолетового лазера или светоизлучающего диода.

Если сборкой и разложением структурированных материалов управлять изменением условий получения наночастиц, то возникает возможность разработки материала с динамично меняющейся структурой.

Так как размер, форма и структура наноматериалов оказывают влияние на их функции, то анализ на наноуровне необходим при реализации этапов «производства» и «обработки». Особое значение приобретает разработка методов точного анализа наноструктуры на атомарном уровне. Химическое соединение атомов и вид связи, дефекты, примеси являются ключами к пониманию наноэффектов. Передовые методы исследования нанонаноструктуры функциональных материалов на атомарном уровне с помощью аналитической аппаратуры основаны на физических явлениях атомной и ядерной физики. см. например гл.10 Методы исследований и измерений наноструктур [4].

1.4.1. Фотонные кристаллы [5]

Фотонные кристаллы состоят из диэлектрических решеток, образующих энергетические щели для электромагнитных волн. Эти искусственные кристаллы могут полностью отражать свет или микроволны при длине волны, сравнимой с

периодом решетки, за счет берегового преломления. На рис.1.1 показаны типичные структуры фотонного кристалла. (см.также [4]с.67.

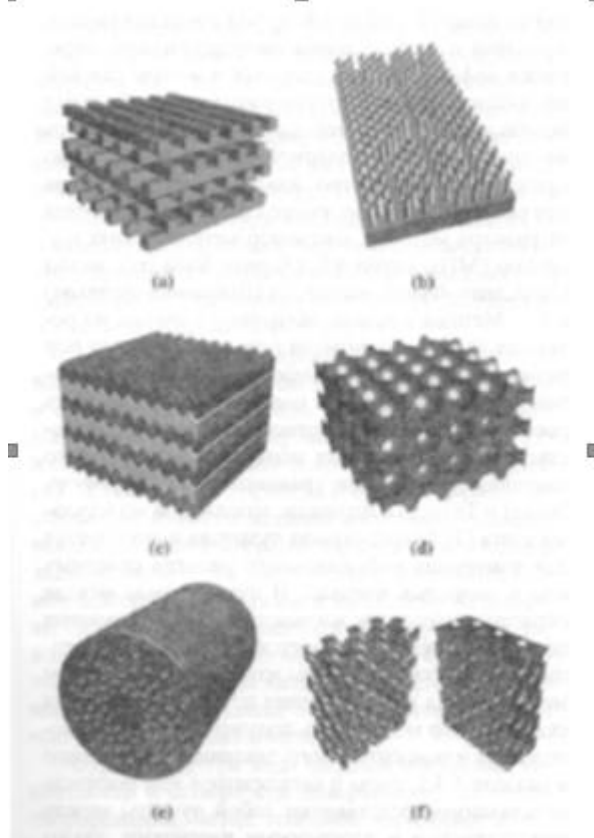


Рис.1.1 Типичные фотонные кристаллы. [1] а) Структура в виде поленницы с простой структурой параллельно уложенных брусков в каждом слое с поворотом на 90° в новом слое. б) Периодическая структура вертикально расположенных штырей. в) Слоистая структура, уложенная в штабель, составленная из кремния и окиси кремния. г) Структура состоит из воздушных сфер с ГЦК-структурой в матрице д) Оптоволокно с фотонной кристаллической структурой е) Фотонные кристаллы алмазного типа.

В фотонных кристаллах из GaAs и InP, полученных по технологии полупроводникового процесса, со структурой в виде поленницы (а) можно сформировать идеальную фотонную энергетическую щель. Периодическая структура штырей из AlGaAs (б) получена электроннолучевой литографией и технологией травления. Слоистая структура (в), составленная из кремния Si и SiO₂ с различными диэлектрическими постоянными, дает поляризацию световой волны и эффект суперпризмы. Структура (г) состоит из воздушных сфер с гранецентрированной кубической ГЦК-структурой в матрице TiO₂, Si, Ge, CdS. ГЦК-структура получается так. В начале полистирольные сферы располагают при самоорганизации в коллоидных растворах. Затем суспензия этой диэлектрической среды инфильтруется (просачивается) в периодическую структуру и спекается. Оптоволокно (д) с фотонной кристаллической структурой может эффективно направлять свет вдоль центральной части. Фотонные кристаллы алмазного типа (е) составленные из TiO₂, SiO₂, Al₂O₃ изготавливаются стереолитографией и спеканием.

На рис.1.2 показано образование энергетической щели в фотонном кристалле. Две стоячие волны, колеблющиеся в воздухе и диэлектрическая матрица образуют высшую и низшую полосу частот в первой и второй зонах Бреллюэна см рис с). Ширина щели может контролироваться путем изменения структуры, коэффициента заполнения и диэлектрической постоянной решетки. Структурные изменения за счет ввода нарушений периодичности или изменения шага решетки могут контролировать распространения излучения через фотонный кристалл.

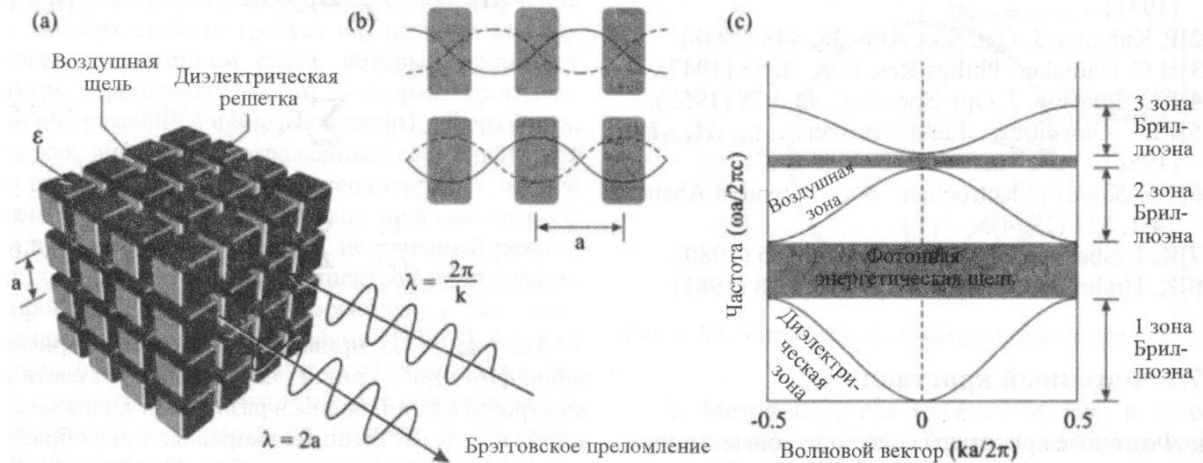


Рис.1.2. Схема образования энергетической щели в фотонном кристалле. [1]

- а) Брегговское преломление электромагнитной волны в фотонном кристалле.
 б) Стоячие волны при периодическом расположении диэлектрических материалов
 с) Запрещенные зоны на диаграмме зависимости частоты от волнового вектора. Темная полоса – фотонная энергетическая щель.

Для описания взаимодействия электромагнитных волн, падающих на фотонный кристалл состоящий из воздушных промежутков и диэлектрической решетки используем уравнения Максвелла. Уравнения Максвелла для электромагнитного поля в СГС -системе следующие

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \nabla \cdot \vec{E} = 0, \\ \nabla \times \vec{B} &= \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0.\end{aligned}\quad (1.1)$$

Материальные уравнения

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu \vec{H}, \quad \mu = 1. \quad (1.2)$$

Уравнения Максвелла для комплексных фурье-амплитуд полей $\vec{D}_\omega = \int \vec{D}(t) e^{i\omega t} dt$, $\vec{H}_\omega = \int \vec{H}(t) e^{i\omega t} dt$ принимают вид

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{E}_\omega &= -i \frac{\omega_0}{c} \vec{B}_\omega \\ \nabla \times \vec{H}_\omega &= i \frac{\omega_0}{c} \vec{D}_\omega\end{aligned}\quad (1.3)$$

Поддействуем оператором ротором на уравнения (3) получим волновые уравнения

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E}_\omega = -i \frac{\omega_0}{c} \nabla \times \mu \vec{H}_\omega = -i^2 \left(\frac{\omega_0}{c} \right)^2 \varepsilon(r) \vec{E}_\omega \quad (1.4)$$

$$\nabla \times \frac{1}{\varepsilon(r)} \nabla \times \vec{H}_\omega = i \frac{\omega_0}{c} \nabla \times \vec{E}_\omega = -i^2 \left(\frac{\omega_0}{c} \right)^2 \mu \vec{H}_\omega = k^2 \vec{H}_\omega$$

Используя формулу

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E}_\omega \equiv \nabla (\nabla \cdot \vec{E}_\omega) - \nabla^2 \vec{E}_\omega = -\nabla^2 \vec{E}_\omega \quad (1.5)$$

получаем волновое уравнение

$$\frac{1}{\varepsilon(r)} \nabla^2 \vec{E}_\omega - k^2 \vec{E}_\omega = 0 \quad (1.6)$$

В приближении плоской волны с условием периодичности, получаем для амплитуд электрического и магнитного поля выражения для плоской волны монохроматической волны

$$\vec{E}_{k,n}(r) = \sum_b \vec{E}_{k,n}(\vec{b}) \exp(ikb + ibr) \quad (1.7)$$

$$\vec{H}_{k,n}(r) = \sum_b \vec{H}_{k,n}(\vec{b}) \exp(ikb + ibr) \quad (1.8)$$

Для неоднородной немагнитной двухкомпонентной среды (воздух, диэлектрическая решетка) имеем

$$\frac{1}{\varepsilon(r)} = \sum_b \frac{1}{\varepsilon(b)} \exp(ibr) \quad (1.9)$$

где $b = \frac{2\pi}{a}$ - вектор обратной решетки. $k = |\vec{k}| = \frac{\omega}{c}$ волновой вектор

Периодическое расположение диэлектрической постоянной получается из созданной кристаллической структуры. При падении световой волны на границу раздела двух сред, во вторую среду проникает преломленная бегущая волна. Если во второй среде существует волна с такой же частотой и постоянной распространения, то световые волны из запрещенной для двухслойной среды зоны отражаются от периодической структуры. Во второй среде будет возникать неоднородная экспоненциально убывающая волна. Механизм образования запрещенных зон состоит в интерференционном сложении парциальных волн, отраженных от периодически повторяющихся границ слоев.

На рис.1.3 приведены возможное применение фотонного кристалла для контроля света и электромагнитных волн в различных диапазонах длин волн. Направленные антенны и фильтры из фотонных кристаллов применяются в радарных установках с миллиметровой длиной волны для умных систем управления движением транспорта и беспроводных систем связи. Фотонные кристаллы микромасштаба применяются для резонаторов терагерцовых волн, фильтров и антенн. Терагерцовые волны с длиной волны порядка микрометра используются в датчиках для определения взрывчатых веществ, наркотиков, бактерий в пище, микротрещин в электрических устройствах, раковых клеток в человеческой коже и др.

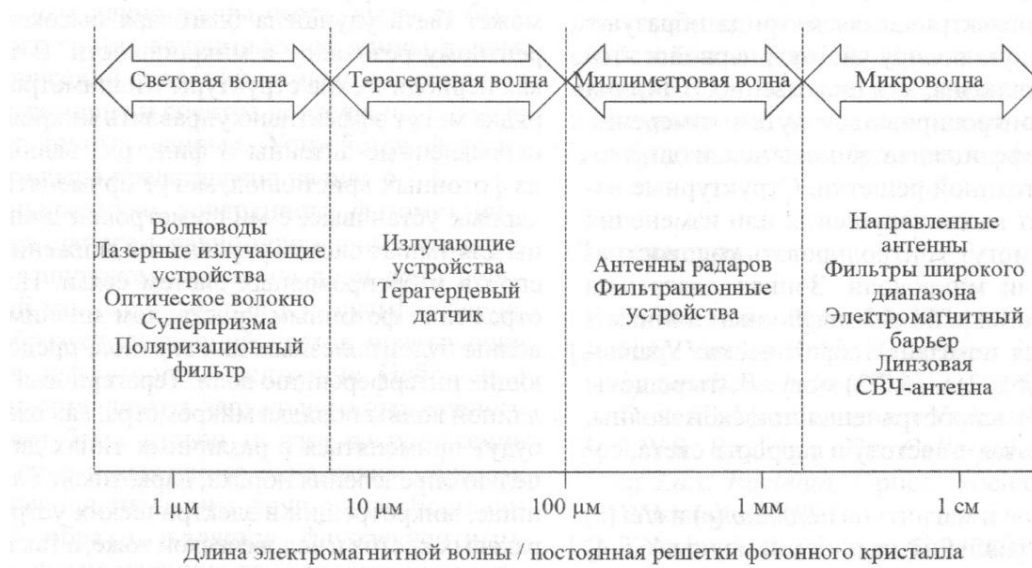


Рис.1.3. Ожидаемые сферы применения фотонного кристалла при различных значениях частоты электромагнитных волн.[1]

1.4.2. Фотонный фрактал [5]

Фрактал-сложная геометрическая фигура, обладающая свойствами самоподобия, т.е. каждая часть фигуры подобна всей фигуре. В одномерном случае Из отрезка $[0,1]$ выбрасывается центральная часть равная $1/3$, из оставшихся отрезков выбрасывается снова $1/3$ часть и т.д. фрактальная (хаусдорфа) размерность этого полученного *канторова множества* $D = \frac{\ln 2}{\ln 3} = 0,631$. В

двумерном случае единичный квадрат разбивается на девять квадратов со стороной $1/3$ и центральный квадрат выбрасывается. Затем процедура повторяется с каждым оставшимся квадратом. В пределе получается плоский дырявый квадрат, называемый *ковром Серпинского*. См верхнюю грань губки Менгера на рис.1.4.d. Плоский фрактал ковер Серпинского имеет фрактальную размерность

$$D = \frac{\ln 8}{\ln 3} = 1,89.$$

Если каждую грань куба разделить на три грани, то начальный куб будет состоять из $3 \times 3 \times 3 = 27$ одинаковых кубов меньшего размера. Если в таком кубе удалить из центров граней по кубу и центра куб, т.е удалить эти семь кубиков, то останется дырявый куб. Это кубический фрактал, называемый *губкой Менгера 1-го уровня*. Он имеет фрактальную размерность $D = 2,73$.

Фрактальная размерность определяется по формуле $N = S^D$, где D - размер, N - число самоподобных единиц при уменьшении размера начальной единицы до $1/S$. Если $N=27-7$, $S=3$, то уравнение имеет вид $20 = 3^D$. После логарифмирования

$$D = \frac{\ln 20}{\ln 3} = 2,726.$$

Японские исследователи в 2003 г. первыми получили кубические фракталы, имеющие структуру губки Менгера из диэлектрических материалов и исследовали прохождение через них электромагнитных волн.

Фотонными фракталами называются кубические фракталы. Они обладают свойством локализации электромагнитных или световых волн. на рис.1.4 представлены модельные структуры губки Менгера с тремя итерациями.

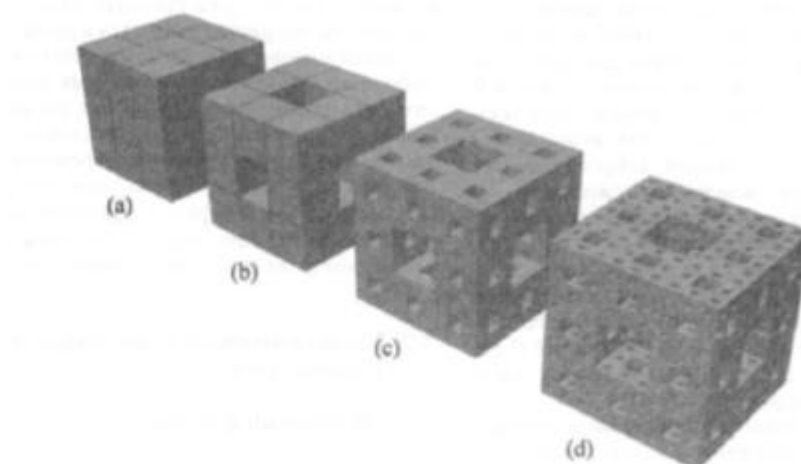


Рис.1.4 Модельные структуры губки Менгера: а)исходный куб, б)1-я итерация с извлечением срединного кубика из каждого слоя с) 2-я итерация д)третья итерация.[5]

Для разработки фотонных фракталов использовалась программа 3D-CAD[1]. Она позволяет осуществлять операции модификации, обращения и сочетания фрактальных структур и создание срезов в заданных плоскостях или соединений. Разработанная структура конвертировалась в формат быстрого протокопирования (файл STL) разделялась на тонкие срезы и передавалась в стереолитографическую машину. Она послойно формирует трехмерный объект путем сканирования УФ-лазером на основе жидкой фотополимеризующейся смолы. Диэлектрическая постоянная ϵ получаемого объекта может быть увеличена путем включения в смолу керамических частиц.

На рис.1.5 показана губка Менгера 4 уровня изготовленная из композитного материала состава 10 объемных % $\text{TiO}_2 - \text{SiO}_2$ /эпоксидная смола.Диэлектрическая постоянная была увеличена до 8,8 по сравнению 2,8 для чистой смолы.

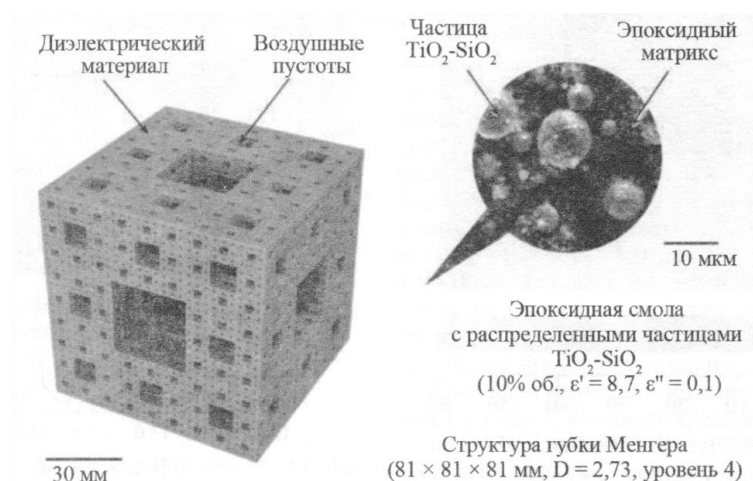


Рис.1.5. Губка Менгера 4 уровня с размерностью $D = 2,73$ созданная методом стериолитографии из эпоксидной смолы с распределенными частицами $TiO_2 - SiO_2, 10\%$, $\epsilon' = 8,7$, $\epsilon'' = 0,1$, $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$ Длина ребра куба 81 мм. На каждой грани есть квадратные отверстия с длиной ребра 27 мм, 9мм. 1мм. [5]

На рис.1.6 показаны спектры пропускания и отражения для образца, изображенного на рис.1.5. при облучении его электромагнитными волнами в режиме TE₁₀. Амплитуды спектра пропускания и спектра поглощения демонстрируют затухание ниже 1/1000 при частоте 13,5 ГГц. Это свидетельствует о локализации электромагнитной волны при этой частоте. Наблюдается относительно высокая интенсивность электрического поля в полостях губчатого куба, по сравнению с низкой интенсивностью вокруг губки.

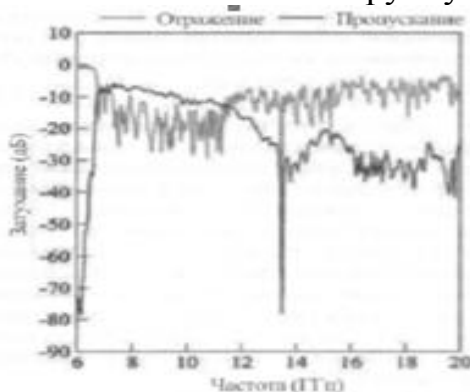


Рис.1.6. Спектры пропускания (нижняя кривая с двумя пиками) и отражения (верхняя кривая выходящая из 0) электромагнитными волнами для структуры губки Менгера 4 уровня. Пик локализации второго порядка появляется при частоте 13,5 ГГц. Сильное затухание пропускания на частоте 6 ГГц соответствует частоте отсекающей рупорной антенны [5].

Длина волны в режиме локализации для диэлектрической губки Менгера определяется по эмпирической формуле

$$\lambda = \frac{2^I a \sqrt{\epsilon_{eff}}}{3^{2I-1}}$$

Где λ - длина волны для режима локализации в воздухе. a - длина стороны куба губки Менгера.

I - порядковый номер для режимов локализации. $\epsilon_{eff} = V_f \epsilon_A + (1 - V_f) \epsilon_B$ - усредненная по объему эффективная диэлектрическая постоянная губки Менгера. ϵ_A - диэлектрическая проницаемость воздуха, ϵ_B - диэлектрическая проницаемость материала.

$V_f = \left(\frac{N}{S^n}\right)^m$ - объемная доля материала в губке Менгера, где $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ размерность структуры, m - уровень структурирования губки Менгера.

Локализованная длина волны для первого режима $I = 1$ равна

$$\lambda = \frac{2a \sqrt{\epsilon_{eff}}}{3}$$

Локализованная волна рассеивается по всем направлениям, Часть её энергии поглощается материалом компонента во время локализации.

На рис.1.7. показан спектр рассеяния на 90 градусов относительно падающего луча на губку Менгера 4 уровня. Появление пика рассеяния излучения на частоте 13,5 ГГц и пика поглощения на той же частоте означает, что поглощенная энергия поглощается локализуется задерживается, и переизлучается на частоте 13,5 ГГц. Показатель качества (добротность) $Q \approx 180$ вычислен на полуширине пика, расчетное время удержания составляет 2 нс являются очень низкими для данного материала.

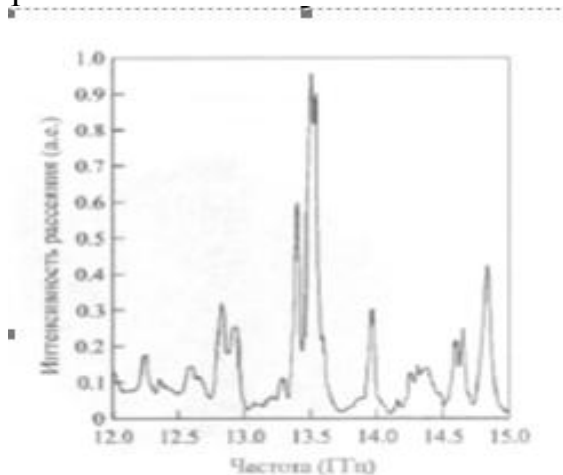


Рис.1.7. Спектр рассеяния на 90 градусов для губки Менгера 4 уровня.[5]

На рис.1.8. показан фотонный фрактал из оксида алюминия. Он изготовлен выплавлением восковой модели и последующим спеканием фрактала, изготовленного из наноразмерных частиц оксида алюминия, диспергированных в акриловой смоле 40 объемных %.

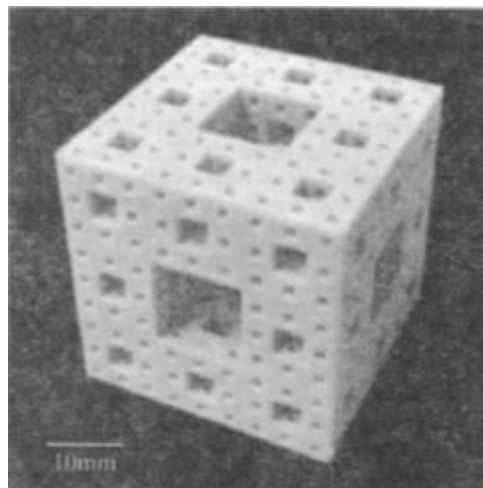


Рис.1.8. Фотография губки Менгера 3 уровня, изготовленного из спеченного оксида алюминия.[5]

Применение фотонных фракталов в топологии губки Менгера возможно в средствах связи в качестве фильтров, резонаторов, делителей мощности, антенн.

Из-за способности удерживать электромагнитные волны определенной частоты в течении ограниченного времени, фотонные фракталы микрометровых размеров могут применяться в устройствах с террагерцевыми волнами и нанометровых размеров в оптических устройствах.

Литература

- 1 Nanophotonics // Wikipedia, the free Encyclopedia. — Chris Monroe, University of Maryland <http://en.wikipedia.org/wiki/Nanophotonics> .
- 2.Игнатов А.Н. Оптоэлектроника и нанофотоника: Учебное пособие.-СПб.: Изд-во «Лань», 2011,-544 с.
- 3.Ю.В.Гуляев, А.С.Бугаев, Р.П.Быстров, С.А.Никитов, В.А.Черепенин. Микро и Наноэлектроника в системах радиолокации. Монография. - М.: Радиотехника, 2013.-480 с.
- 4.В.С. Кирчанов Наноматериалы и нанотехнологии. Учебное пособие..Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политех.ун-та-.2016.-241с. Гл.10.
5. Справочник по технологии наночастиц. / пер. с англ., науч ред. Ярославцев А.Б., Максимовский С.Н.- М.:Научный мир. 2013.-730 с.; 5.1 Наноструктура и её свойства 331-332.; 6.7.2. Фотонный кристалл.с.455-457; Фотонный фрактал с.227-231.

Глава 2 ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

2.1. Полупроводниковые наноструктуры и наноустройства. Источники фотонов [1]

Свет может излучаться полупроводником в результате электронно-дырочной рекомбинации. *Инжекционная электролюминесценция* - излучение, возникающее при рекомбинации инжектированных электронов и дырок в *p-n*-переходе полупроводника, подключенном в прямом направлении к источнику постоянного электрического поля.

Светоизлучающий диод (СИД) – содержит *p-n*-переход, изготовленный из прямозонного полупроводника, который излучает свет за счет инжекционной электролюминесценции. Если прямое напряжение превышает некоторое значение, число электронов и дырок становится большим и достигается инверсия заселенностей. Вынужденное излучение начинает преобладать над поглощением. Область *p-n*-перехода начинает работать как *полупроводниковый усилитель* (ПОУ). Если полупроводниковый усилитель обеспечить положительной обратной связью, он превратится в *лазерный диод* (ЛД). Полупроводниковые источники фотонов в виде СИД или ЛД служат эффективными электронно-оптическими преобразователями. Рассмотрим материалы и структуры этих устройств.

2.1.1. Материалы и структуры полупроводниковых устройств

Современное производство СИД связано с трех и четырехкомпонентными соединениями III-V групп таблицы элементов, особенно InGaAsP, AlInGaP, AlInGaN. С помощью СИД генерируется свет высокой яркости всех цветов радуги от инфракрасного до ультрафиолетового. СИД с поверхностным излучателем

испускает свет перпендикулярно плоскости активного слоя. Сид с торцевым излучателем испускает свет параллельно плоскости активного слоя.

На рис.2.1а показаны ширины и длины волн запрещенной зоны и постоянные решетки для кремния Si, германия Ge, карбида кремния SiC и 12 двухкомпонентных соединений $A^{III}B^V$. Сплошные линии соответствуют прямозонным полупроводникам, штриховые линии-- непрямоzonным полупроводникам. Один и тот же материал может быть прямозонным или непрямоzonным в зависимости от соотношения компонентов. Трехкомпонентные материалы представлены линиями, соединяющими два двухкомпонентных материала. Четырехкомпонентным материалам соответствуют участки поверхности, образованные их двухкомпонентными составляющими. $In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}P_y$ -материал важный в ближнем инфракрасном диапазоне(ИК). Материал $(Al_xGa_{1-x})_yIn_{1-y}P$ используется в видимом диапазоне.

GaAs-первый материал классов III-V –двухкомпонентный прямозонный полупроводник. В1962 г. из него изготовили первый лазерный диод, который излучал с длиной волны $\lambda_g = 0,873 \text{ мкм}$. СИД из GaAs был побочный продукт разработки этого лалерного диода.

Электролюминесцентные свойства и лазерный эффект наблюдаются у других двухкомпонентных полупроводников с прямой зоной с длиной волны GaSb (1,7 мкм), InP (0,919 мкм), InAs (3,44 мкм), InSb (7,29 мкм).

GaAsP-трехкомпонентный полупроводник. Длина волны, соответствующая ширине запрещенной зоны трехкомпонентного полупроводника $GaAs_{1-x}P_x$ сдвигается в видимый диапазон с увеличением молярного содержания фосфора. Это обеспечивает излучение в красной части спектра.

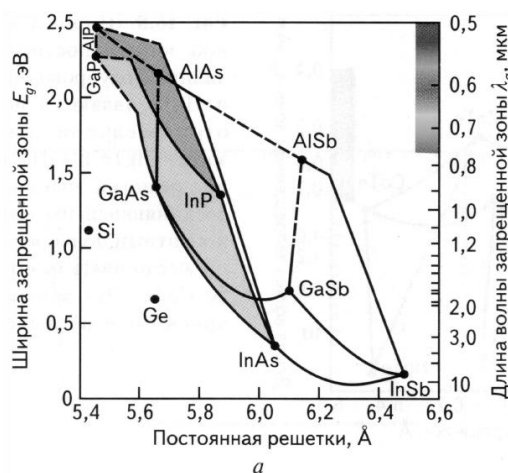


Рис.2.1.а Четырехкомпонентный материал $In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}P_y$ представлен участком, окрашенным в светло-серый цвет, вершины его границы представляют InP, InAs, GaAs и GaP.

$(Al_xGa_{1-x})_yIn_{1-y}P$ -участок окрашен в темно-серый цвет и имеет вершины, представляющие AlP, InP и GaP.

Трехкомпонентный материал $Al_xGa_{1-x}As$ представлен точками. При изменении x от 0 до 1 изображающая точка движется вдоль линии от GaAs к AlAs. Эта линия почти вертикальна, решетка $Al_xGa_{1-x}As$ такая же как у GaAs.[1]

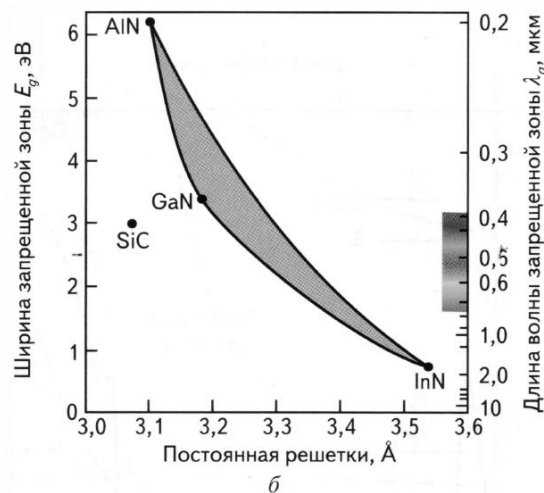


Рис.2.1.б. Трехкомпонентный $In_xGa_{1-x}N$, используется в зеленой, синей и фиолетовой области. Трехкомпонентный $Al_xGa_{1-x}N$ представлен линией, соединяющей AlN с GaN используется в ультрафиолетовой области.[4]

Четырехкомпонентный $Al_xIn_yGa_{1-x-y}N$ представлен темно-серым участком используется в ультрафиолетовой области выше 0,4 мкм. Все эти соединения являются прямозонными полупроводниками[4].

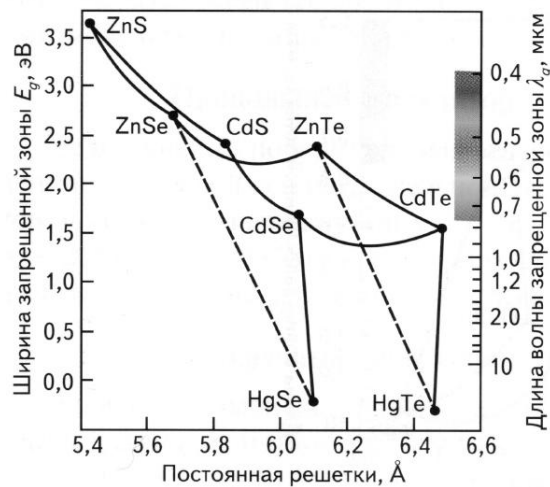


Рис.2.2. Ширины и длины волн запрещенной зоны и постоянные решетки для различных полупроводников II-VI групп ($HgSe$ и $HgTe$ являются полуметаллами с малой отрицательной шириной запрещенной зоны). $HgTe$ и $CdTe$ имеют почти одинаковые решетки. Вертикальная линия их соединяющая в проекции на ось абсцисс дает почти одинаковое значение постоянной решетки. Поэтому трехкомпонентный полупроводник $Hg_xCd_{1-x}Te$ можно выращивать без напряжений на подложке $CdTe$. Материал $Hg_xCd_{1-x}Te$ является основным для фотоприемников в средней инфракрасной области.[1]

$InGaAsP$ -четыре компонентный полупроводник. Добавления индия уменьшает ширину запрещенной зоны $GaAsP$. Соединение $In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}P_y$ функционально гибкий сплав используется в ближней инфракрасной области спектра. Ширина его запрещенной зоны за счет изменения состава может

существенно перестраиваться $[0,549 \text{ мкм}(GaP) \leq \lambda_g \leq 3,44 \text{ мкм}(InAs)]$ согласование решетки с подложкой из InP сохраняется при разумном композиционных отношений x и y (см. участок, покрытый точками на рис.2.1а).

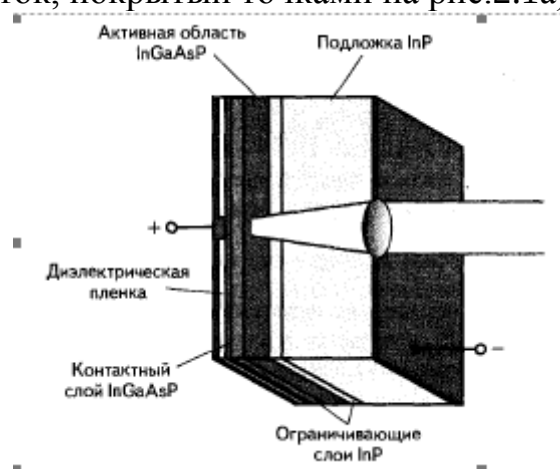


Рис.2.3. СИД на InGaAsP с поверхностным излучателем, разработанный для применения в системе волоконно-оптической линии связи, работающей на длине волны 1,3 мкм. Активная область согласована по решетке с подложкой из InP. прибор монтируется методом перевернутого кристалла. Свет выходит через подложку. Интегрированная в прибор линза коллимирует свет для ввода в волокно. В СИД для систем связи свет излучается с одной поверхности.[1]

AlGaAs –трехкомпонентный сплав. Добавления алюминия в *GaAs* увеличивает ширину запрещенной зоны. Сплав $Al_{1-x}Ga_xAs$ является прямозонным полупроводником в красной и ближней инфракрасной областях. Он согласуется с *GaAs* при любой молярной доле алюминия, и служит источником красного света высокой интенсивности. Красные светодиоды дают светоотдачу 30-50 лм/Вт, желто- оранжевые в максимуме 100 лм/Вт.

GaN-нитрид галлия предшественник нового семейства нитридных полупроводников. Нитрид галлия- двухкомпонентный прямозонный полупроводник с длиной волны $\lambda_g = 0,366 \text{ мкм}$ в ближней ультрафиолетовой области спектра. Он выращивается методами молекулярно-пучковой эпитаксии, химического осаждения из паровой фазы, методом разложения металлоорганических соединений или эпитаксии из газовой фазы гидрида. Материал выращивают на сапфировой подложке, которая имеет существенное рассогласование решетки с *GaN*.

InGaN-III-нитридный сплав. $In_xGa_{1-x}N$ - прямозонный материал с шириной запрещенной зоны соответствующей диапазону $[366 \text{ нм}(GaN) \leq \lambda_g \leq 1,61 \text{ мкм}(InN)]$. *InGaN*-материал для СИД высокой яркости в диапазоне длин волн $[366 \text{ нм} \leq \lambda_g \leq 580 \text{ нм}]$, включающем ближнюю ультрафиолетовую, фиолетовую, синюю и зеленую области спектра рис 2.1.б. (Накамура 1990 г.) Он дополняет *AlInGaP*, покрывающий красную,оранжевую и желтую область. Повышение квантового выхода до 20% достигается с использованием структур *GaN/ InGaN* с квантовыми ямами показанных на рис.2.4. световая отдача люминесцентных ламп 70-90 лм/Вт)

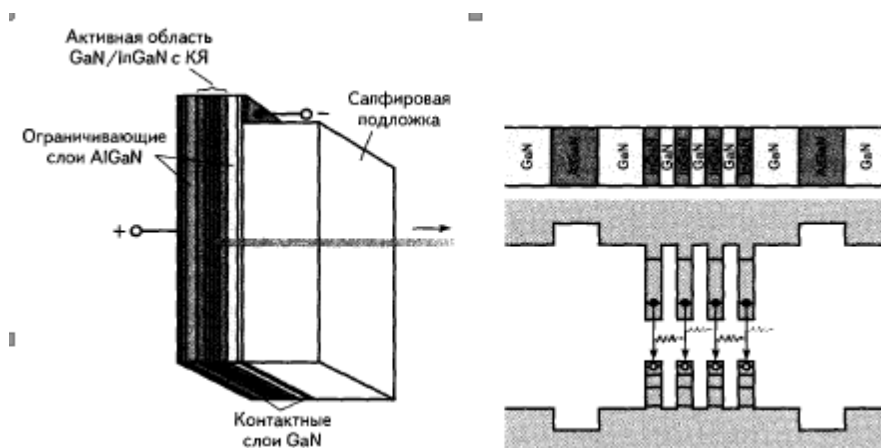


Рис.2.4. СИД на $GaN / InGaN$ с квантовыми точками, излучающий с поверхности на $\lambda_0 = 420$ нм фиолетовой области спектра. Активная область включает барьеры из GaN шириной 5 нм и четыре ямы из $In_xGa_{1-x}N$ шириной по 2,5 нм. Свет выводится через подложку GaN на сапфире, которая прозрачна на 420 нм.[1]

СИД белого света. Для получения белого света СИД ближнего УФ и синего диапазона, изготовленные из III-нитридов освещают фосфора, которые фотолюминесцируют и дают излучение других цветов. Полупроводниковый кристалл $InGaN$, излучающий на длине волны 460-470 нм (синий цвет) покрывают люминофором на основе YAG (иттрий-гадолинийевый гранат), активированный ионами германия Ge^{3+} , который излучает с максимумом в желтом цвете. Человеческий глаз воспринимает комбинацию синего цвета с желтым как белый свет.

Другой способ состоит в смешивании света красного, зеленого и синего отдельных светодиодов с образованием белого цвета с отличной цветопередачей. СИД-ы белого света вытесняют лампы накаливания (15 лм/Вт) своим высоким кпд, светоотдачей (30 лм/Вт), долговечностью, низкой стоимостью и компактностью.

Светоизлучающие диоды являются источниками для аналоговых волоконно-оптических лазеров и низкоскоростных систем передачи информации с использованием многомодовых волоконных световодов.

2.2. Квантово-размерные лазеры и лазеры с микрорезонаторами [1]

В квантоворазмерных лазерах носители заключены в областях с размерами меньше длины волны де Бройля теплового электрона (50 нм в арсениде галлия GaAs). Дефект в двумерном фотонном кристалле создает резонатор, который удерживает свет. Удержание носителей в одном, двух и трех измерениях соответствует конфигурациям типа квантовой ямы, квантовой проволоки и квантовой точки. Эти структуры обеспечивают квантовое ограничение движения носителей заряда. С уменьшением размерности полупроводниковой структуры спектральный контур коэффициента усиления становится выше и уже. Это обеспечивает меньший пороговый ток. больший внешний дифференциальный

квантовый выход и более узкую линию излучения см рис.2.5. Однако, при этом уменьшается объем зоны взаимодействия, что снижает выходную мощность лазеров на квантовых точках и квантовых проволоках.

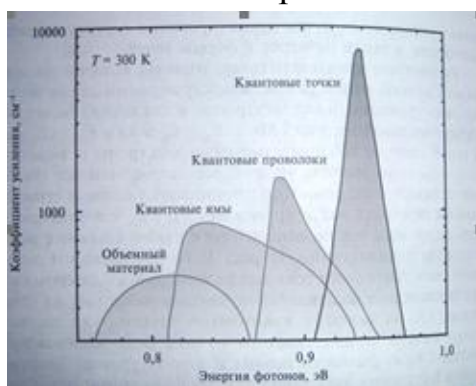


Рис.2.5. Спектр коэффициентов усиления для лазеров на идеальных, объемных полупроводниках, квантовых ямах, квантовых проволоках и квантовых точках.[2]

2.2.1. Лазеры на квантовых ямах*)

Лазер на квантовых ямах имеет лучшие характеристики, чем прибор с двойной гетероструктурой. Выигрыш получается из-за малой толщины отдельной квантовой ямы, которая меньше 10 нм, в сравнении с 100 нм для диода с двойной гетероструктурой.

Преимущества лазера с квантовыми ямами перед лазером с двойной гетероструктурой:

Меньше пороговая плотность тока,

Большой коэффициент преобразования электрической мощности в световую,

Меньшая ширина лазерных мод,

Малое время отклика, позволяющее использовать большие частоты модуляции,

Меньшая зависимость от температуры.

Лазеры на квантовых проволоках

Пример. Активный слой из 5 квантовых проволок длиной 1 мм и толщиной 23 нм из InGaAsP погружен в оболочку из IP на расстоянии 89 нм друг от друга. При комнатной температуре устройство работает как лазер в непрерывном режиме на длине волны 1550 нм. пороговый ток 140 мА, коэффициент преобразования мощности 2%. Он уступает лазеру на квантовых ямах на том же чипе.

2.2.2. Лазеры на квантовых точках

Метод самоорганизации квантовых точек на поверхности раздела двух материалов с разными параметрами кристаллической решетки. Материал *InAs* выращивается химическим осаждением паров из газовой фазы на подложке из кристалла с большой постоянной кристаллической решетки и большой шириной запрещенной зоны *GaAs*.

Квантовые точки, называемые иногда нанокристаллами, обычно имеют форму кубов, сфер или пирамид. Их размеры составляют 1-10 нм (Кубик с ребром 10 нм содержит около сорока тысяч атомов *GaAs*. Удержание носителей в активной области обеспечивается окружением квантовой точки оболочкой из полупроводника с большей шириной запрещенной зоны или погружением ее в

стекло или полимер. Энергетическими уровнями квантовой точки являются уровни её экситона. Уровни энергии дискретные, и зависят от размера квантовой точки. Квантовые точки часто самоорганизуются в пространственно – упорядоченные структуры. Это позволяет создать лазер на сверхрешетке квантовых точек в активной зоне.

На рис.2.6 представлено устройство лазера на квантовых точках. Структура состоит из нескольких слоев материалов образующих pin -диод. Эти слои включают (снизу вверх) подложку $n-GaAs$, слой $n-AlGaAs$, слой $GaAs$ с собственной проводимостью, содержащий квантовые точки $InAs$, слой $p-AlGaAs$ и верхний слой $p-GaAs$. Металлические контакты на подложке и верхнем слое соединяют структуру с внешней электрической цепью.

*) Квантовые ямы, проволоки и точки рассмотрены нами в [5].

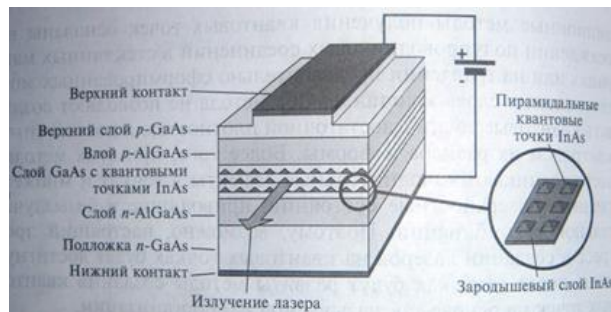


Рис.2.6. Схема устройства лазера с краевым излучением на самоорганизованных квантовых точках. На вставке показан зародышевый слой с пирамидальными квантовыми точками. [2]

На рис.2.7. видно, что длина волны излучения лазера с излучением на квантовых точках растет с увеличением размера квантовых точек.

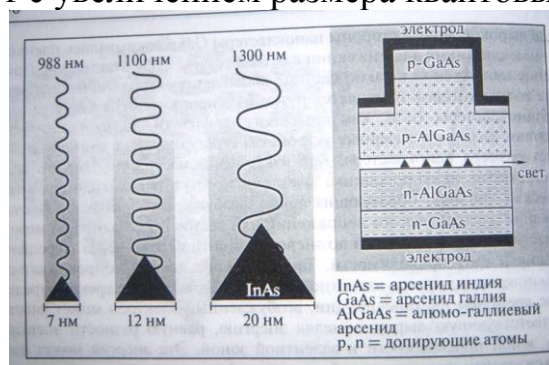


Рис.2.7. Показана зависимость длины волны излучения лазера от размера пирамидальных квантовых точек в зародышевом слое.[3]

При подаче прямого смещения электроны и дырки инжектируются (впрыскиваются) во внутренний слой $GaAs$, они попадают в квантовые точки с меньшей запрещенной зоной, где происходит рекомбинация и излучение. Длин волны излучения соответствует межзонным переходам в квантовых точках $InAs$. Слой $GaAs$ с квантовыми точками находясь между примесными слоями $p, n-AlGaAs$ с меньшим коэффициентом преломления, локализует излучение.

Зародышевый слой $InAs$ повышает эффективность диффузии носителей в квантовые точки. Его ширина запрещенной зоны меньше, чем в $GaAs$. Для увеличения поверхностной плотности квантовых точек используют массив с несколькими зародышевыми слоями с пирамидальными квантовыми точками.

Изменение размера кластера приводит к сдвигу энергии поглощения и люминесценции оптического излучения полупроводниковых нанокластеров. В качестве примера рассмотрим оптические наноустройства -светоперестраиваемые диоды на основе селенида кадмия $CdSe$. В светоизлучающей ячейке нанокластеры $CdSe$ находились в тонком слое на поверхности люминесцирующего полимера (поли-п-фениленвинилена). Полимер был выращен на слое оксида индия I_2O и олова Sn , способном пропускать носители в виде дырок. С другой стороны нанокластеры $CdSe$ покрывались пленкой магния Mg и алюминия Al для инжекции в нанокластеры $CdSe$ электронов. Приложение электрического напряжения к такой системе вызывает электролюминесценцию, длина волны которой, изменяется путем изменения размера кластера.

2.2.3. Полупроводниковые вертикально излучающие лазеры (VCSEL) [1,3,4]

Из лазеров с микрорезонаторами наиболее распространены поверхностно-излучающие лазеры с вертикальным резонатором (VCSEL--vertical-cavity surface-emitting laser). Свет выходит через верхнюю грань одномерного планарного микрорезонатора, не вдоль, а перпендикулярно активному слою.

Упорядоченные наноструктуры на основе вертикально связанных квантовых ям или квантовых точек $InGaAs$ позволяют создать лазерные устройства. На рис.5 показана схема лазера, который излучает с поверхности вертикально связанных нанокластеров $InGaAs$ в матрице $GaAs$.

Лазер включает активную зону на основе упорядоченной наноструктуры в виде нанокластеров $InGaAs$ в матрице $GaAs$, среду для инжектирования электронов и дырок, распределенные $AlGaAs / AlO$ береговые рефлекторы в качестве зеркал и электроды. Резонатор образован решетками Брэгга с большим коэффициентом отражения. Отражаясь между ними, свет многократно проходит через активный слой. Ключевым элементом лазера VCSEL является диэлектрическая пленка AlO , которая локализует инжекцию носителей и ограничивает оптическую моду в поперечном направлении.

При комнатной температуре в случае оптимального количества слоев верхнего берегового рефлектора максимальная эффективность составила 16%, а минимальный пороговый ток 68 мкА. На рис.2.9 представлены технические данные такого лазера- выходная мощность и коэффициент полезного действия.

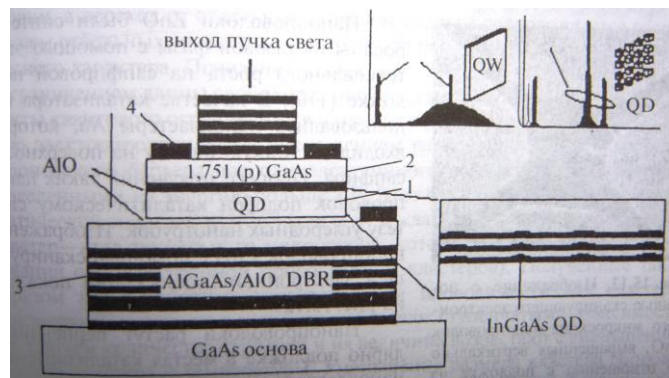


Рис.2.8. Схема лазера на вертикально связанных нанокластерах InGaAs в матрице арсенида галлия GaAs. На вставке справа приведено поперечное сечение активной зоны лазера. QW -- квантовые ямы, QD –квантовые точки. AlO –диэлектрическая пленка. [3]
1-нанокластерная полость содержащая квантовые точки.2- (p)GaAs спейсер содержит арсенид галлия с акцепторной проводимостью.3.-брегговские рефлекторы.4.-электроды.

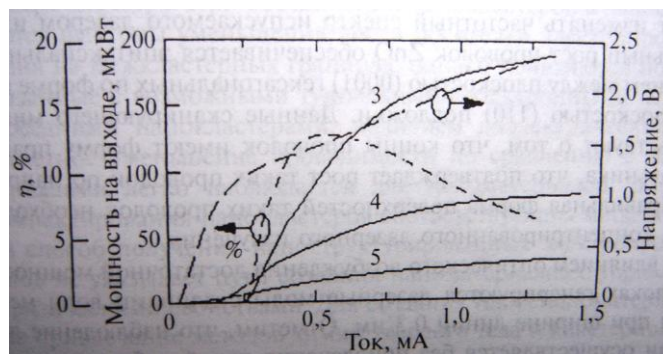


Рис.2.9. Зависимость выходной мощности и КПД лазера на вертикально связанных нанокластерах InGaAs в матрице арсенида галлия GaAs от тока инжекции. Сплошные линии – мощность лазера, короткий пунктир – КПД лазера, длинный пунктир – вольт-амперная характеристика. Кривые мощности приведены в зависимости от числа отражающих слоев брегговских рефлекторов (3,4,5) [3].

Полупроводниковые вертикально излучающие лазеры находят широкое применение в быстродействующих оптоволоконных системах для передачи информации. Подобные лазеры работают в диапазоне ближнего инфракрасного излучения (ИК) длин волн 850 нм и 980 нм. Имеют различный диаметр пучка до 1 мкм. Разработаны лазеры в диапазоне дальнего ИК 1,2 -1,5 мкм.

2.2.4. Фотонно-кристаллические лазеры с микрорезонаторами [1]

Лазеры с микрорезонаторами включают ограничение свободы фотонов пространственной областью, размеры которой порядка оптической длины волны 1 мкм. Ограничение пространственной свободы фотонов и носителей заряда – это различные свойства приборов фотоники. Конструктивно микрорезонаторы имеют вид микростолбиков, микродисков и микросфер. На практике большинство лазеров с микрорезонаторами имеют в активной области квантово-размерные структуры.

Микрорезонаторы состоят из дефектов в двумерных фотонных кристаллах. Дефект в двумерном фотонном кристалле создает резонатор, который удерживает свет. Квантово-размерные источники света с такими микрорезонаторами являются основой беспороговых лазеров с размерами порядка длины волны. Длину волны и пространственное распределение моды дефекта таких лазеров можно перестраивать. Они допускают высокие скорости прямой модуляции.

Пример1: одномодовый фотонно-кристаллический лазер, работающий при комнатной температуре. Электрическая накачка лазера осуществляется через субмикронный штырь из InP, пороговый ток равен 260мкА. Активная область включает шесть квантовых ям из InGaAsP с компенсацией за счет напряжения. Генерация происходит на длине волны 1520 нм. Выходная мощность равна 2 нВт при токе 0,5 А. Добротность около 2500. Модовый объем $V \approx 0,06 \text{ мкм}^3$. см. рис.2.10.а)

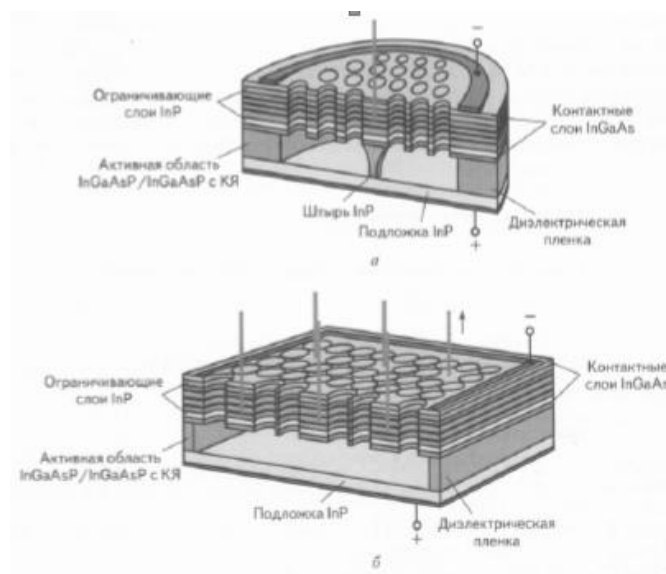


Рис.2.10. а) Фотонно-кристаллический лазер на квантовых ямах InGaAsP/ InGaAsP.

б) Матрица когерентно связанных фотонно-кристаллических лазеров на квантовых ямах[1]

Когда ширина линии излучения $\Delta\nu$ меньше ширины элементарной моды $\delta\nu$, спонтанное излучение в микрорезонаторах с высокой добротностью можно усилить за счет эффекта Перселла. Фактор Перселла для данного прибора составляет

$$\frac{3}{4} \pi^2 \frac{\lambda^3}{V} Q = 400$$

Нановатный уровень мощности отдельного прибора можно повысить за счет использования матриц связанных микрорезонаторов.

Пример 2. Фотонно-кристаллический лазер с матрицей нанорезонаторов. Четыре квантовые ямы из материала InGaAsP/InP. Длина волны излучения 1534 нм. Каждый из $9 \times 9 = 81$ резонаторов. Образующих матрицу занимает площадь $1,5 \text{ мкм}^2$, площадь матрицы составляет 15 мкм^2 . (См рис.2.11.б).

Прибор имеет оптическую накачку от импульсного диодного лазера на 808 нм, излучение которого фиксируется в пятно размера матрицы. Пиковая пороговая мощность для матрицы связанных резонаторов составляет 2,5 мВт. Коэффициент связи спонтанного излучения 0,1. Наблюдалась пиковая выходная мощность 12 мкВт в одномодовом режиме. Прибор допускает очень высокие скорости модуляции.

Парселл- фактор[1]

В свободном пространстве вероятность нахождения первоначально возбужденной двухуровневой системы (ДУС) в верхнем состоянии $|e\rangle$ экспоненциально убывает $|C_e(t)|^2 = \exp(-\Gamma t)$, с характерным временем жизни $\tau = 1/\Gamma$, где Γ - скорость распада возбужденного состояния двухуровневой системы. Зависимость характерного времени возбужденного состояния от окружения был рассмотрен Парселлом. Для количественного описания явления вводится фактор Парселла, величина которого равная отношению скоростей спонтанной релаксации в заданном окружении Γ_{rel} к скорости распада в вакууме Γ ,

$$P = \frac{\Gamma_{rel}}{\Gamma}.$$

Поместим двухуровневую систему в резонатор размера L с собственными частотами $\omega = c\vec{k}$ $\vec{k} = \frac{2\pi}{L}(m, n, l)$ тогда фактор Парсела равен

$$P \equiv \frac{\Gamma_{rel}}{\Gamma} = \frac{3\lambda Q}{4\pi^2 V},$$

$$Q = \frac{\omega_{MP}}{\gamma_{MP}}$$

где V -объем резонатора, Добротность Q , длина волны в резонаторе $\lambda = \frac{2\pi c}{\omega_{MP}} \Leftarrow \kappa = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega_{MP}}{c}$.

Для микроволнового диапазона длин волн, когда длина волны излучения сравнима с длиной резонатора $\lambda^3 \approx V$ и $Q \approx 10^4, \Gamma_{rel} \approx 400\Gamma$. Существенное увеличение скорости спонтанного распада возникает также вблизи открытых металлических нанорезонаторов в оптическом диапазоне $V \propto (\lambda/2)^3$ и $Q \approx 10, \Gamma_{rel} \approx 400\Gamma$.

2.3. Случайные лазеры [1]

Случайные лазеры (порошковые лазеры, плазеры) работают на основе обратной связи, обеспечиваемой многократным рассеянием внутри неупорядоченной усиливающей среды, которая служит закрытым трехмерным резонатором. Фотоны внутри среды совершают случайные блуждания в трех измерениях. (См рис.210.а). Сильное рассеяние связано с неупорядоченностью среды. в отличие от обычных лазеров излучение, отраженное назад в каждую точку активной среды, имеет случайную фазу. Обратная связь некогерентна и осуществляется через интенсивность. В обычном лазере обратная связь

когерентна и реализуется через амплитуду поля. Центральная частота генерации определяется спектральным профилем усиления активной среды. Из-за большой длины пробега фотона при многократном рассеянии в активной среде достигается значительное усиление. Чем сильнее рассеяние, тем больше обратная связь и ниже порог генерации.

Отличительными признаками случайного лазера является отсутствие направленности и пространственной когерентности испускаемого света. Пространственная картина лазерного излучения с торца кюветы, содержащей прошковую активную среду похожа на картину от светодиода с поверхностным излучателем. Накачка случаных лазеров может быть оптической, электрической или электронным пучком. Генерация излучения происходит от инфракрасного до ультрафиолетового диапазонов.

Пример: Случайный микролазер на окиси цинка ZnO . Плотная упаковка нескольких тысяч нанокристаллитов ZnO каждый диаметром порядка десятков нанометров, может образовывать микрокластер диаметром $\sim 1 \text{ мкм}$ (см. рис.2.11.б). Нанокристаллиты служат усиливающей средой и рассеивающими элементами обратной связи случайного микролазера. Длина волны излучения $\lambda = 380 \text{ нм}$ лежит вблизи длины волны запрещенной зоны ZnO . Удерживая свет рассеянием, такие микролазеры не нуждаются в правильной форме и гладкой поверхности микрокластера.

Обратная связь через рассеяние важна также в наблюдаемой лазерной генерации молекулярными облаками H_2O, OH, SiO в космосе. Рассеяние в качестве обратной связи может заменить зеркальную обратную связь в рентгеновском диапазоне.

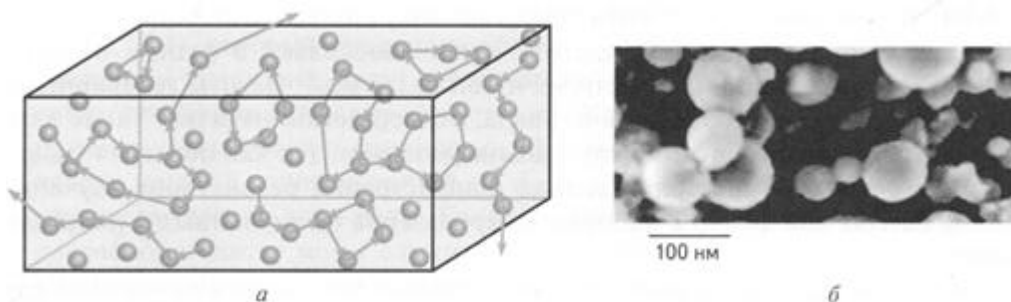


Рис.2.11. а) Многократное рассеяние фотонов в активной среде случайного лазера. Замкнутые локальные петли, которые проходят фотоны поля служат локальными резонаторами, обеспечивающими когерентную и резонансную обратную связь. б) Показаны плотноупакованные нанокристаллиты ZnO . [1]

Литература

1. Б.Салех, М.Тейх Оптика и фотоника принципы и применения. Учеб пособие. В 2 т., Т.2. –Дологопрудный: Изд. Дом «Интеллект», 2012.-784 с. Цв вкл. С.384; с.152
2. Мартинес-Дуарт Дж. М. и др. Нанотехнологии для микро-и оптоэлектроники М.Техносфера 2009.-368с.
3. Суздалев И.П. Нанотехнология: Физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. М.: ЛИБРОКОМ, 2009.-592 с.

4. Игнатов А.Н. Оптоэлектроника и нанофотоника: Учебное пособие.-СПб.: Изд-во «Лань»,2011,-544 с.
5. Кирчанов В.С. Наноматериалы и нанотехнологии. Учеб пособие. –Пермь: Изд-во Перм.нац. исслед.ун-та. 2016.-241 с.

Глава 3 ФОТОПРИЕМНИКИ

Введение

Оптоэлектроника – область физики и техники, использующая эффекты взаимного преобразования электрических и оптических сигналов.Оптоэлектроника подразделяется на когерентную оптоэлектронику, и оптронику, изучающую замену электрических связей оптическими. Когерентная оптоэлектроника включает оптическую связь, запоминание и обработку информации, голографию и интегральную оптику.

Основными элементами оптоэлектроники являются источники излучения когерентные и некогерентные, фотоприемники, модуляторы, дефлекторы, волоконные световоды, и согласующие элементы, мультиплексоры, и демультиплексоры, пространственно-временные модуляторы света (управляемые транспаранты), используемые для двумерного динамического отображения и обработки информации.Таким образом, базовые элементы оптической электроники совпадают с устройствами фотоники и оптоинформатики.

3.1. Источники излучения

Источники излучения рассмотрены ранее в главе 1. Некогерентные источники - светодиоды на основе гетероструктур, AlGaAs, с рекордным кпд 20%. Когерентные источники излучения –инжекционные лазеры с шириной линии порядка 0,1 нм, расходимость пучка не более30 градусов, кпд до 50%. Освоен диапазон волн от 0,78 мкм - до 1,55 мкм. Частота модуляции излучения инжекционных лазеров достигает 20 ГГц.

3.2. Полупроводниковые детекторы фотонов для оптических приемников [1,2]

Большинство фотоприемников работает на основе внутреннего фотоэффекта, когда происходит фотогенерация подвижных носителей заряда. Возбужденные светом носители заряда (электроны и дырки) остаются внутри образца. Полупроводниковый фотодиодный приемник –это структура с *p-n*-переходом, обратный ток которого возрастает при поглощении фотонов. Фотоны, поглощаемые в обедненном слое, генерируют электроны и дырки, которые под действием локального электрического поля слоя дрейфуют в противоположных направлениях.

Существует три режима работы фотодиода: режим холостого хода (фотогальванический), короткозамкнутый и обратнопроводящий (фотопроводящий). В режиме холостого хода свет генерирует электронно-дырочные пары в обедненном слое

Дополнительные электроны, высвобожденные со стороны *n*-слоя рекомбинируют с дырками с *p*-слоя и наоборот. В результате повышается

электрическое поле, что создает на приборе фотоЭДС, величина которого растет с увеличением потока фотонов. Этот режим используется в солнечных фотоэлементах, в качестве преобразователей световой энергии в электрическую энергию.

В качестве приемника $p-i-n$ -фотодиод содержит $p-n$ -переход со слоем собственного слаболегированного полупроводника между p - и n -слоями. Схема энергетических зон, распределение заряда и электрического поля в обратносмещенном $p-i-n$ - фотодиоде показан на рис.3.1.

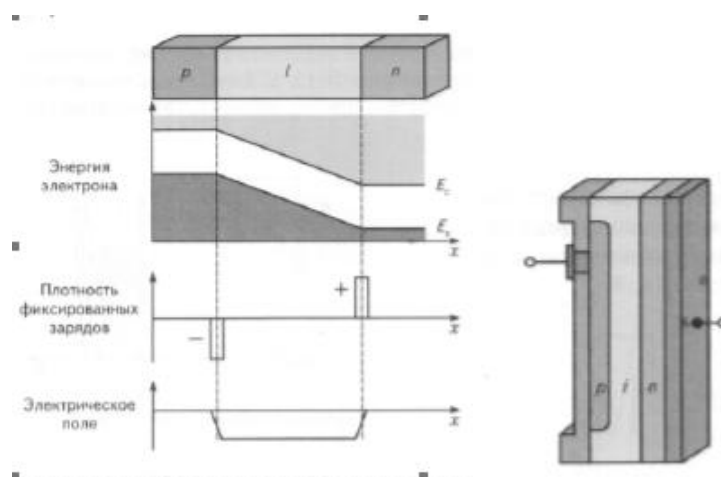


Рис.3.1. Слева показана схема энергетических зон, распределение заряда и электрического поля. Справа - структура $p-i-n$ -фотодиода. Прибор может освещаться либо перпендикулярно, либо параллельно плоскости перехода.[1]

Эта структура служит для расширения обедненного слоя, в котором существует электрическое поле. Преимущества $p-i-n$ -фотодиода перед $p-n$ -фотодиодом: увеличивается объем, с которого собирается свет. Время дрейфа увеличивается с ростом толщины обедненного слоя. Большая часть генерируемого тока переносится быстрым дрейфовым процессом, чем медленным диффузионным. Фотодиод представляет собой $p-n$ -переход, обратный ток которого возрастает при поглощении фотонов. Фотодиоды не обладают усилением.

Гетероструктурные фотодиоды, образованные двумя полупроводниками с разной шириной запрещенной зоны, обладают преимуществом перед диодами на $p-n$ -переходах из одного материала. Гетероструктуры, которые используются для фотодетекторов (см. рис.2.1а):

- $Al_xGa_{1-x}As / GaAs$ (решетка $AlGaAs$ согласуется с подложкой $GaAs$) соединение используется в области длин волн 0,7 - 0,87 мкм.

- $Al_xGa_{1-x}As / InP$ (решетка $AlGaAs$ согласуется с подложкой InP). Соединение можно перестраивать за счет состава в ИК-диапазоне длин волн 1300-1600 нм оптоволоконной связи. Типичный $p-i-n$ -фотодиод, работающий на 1550 нм. имеет квантовую эффективность 0,75 и толковую чувствительность 0,9 А/Вт.

- $In_xGa_{1-x}As / InP$ - перестраивается за счет состава в диапазоне длин волн 1300-1600 нм для оптоволоконной связи (решетка $InGaAs$ согласуется с подложкой InP). Типичный $p-i-n$ -диод работающий на 1550 нм имеет квантовую эффективность

$\eta = 0,75$ и токовую чувствительность фотоприёмника $\square \approx 0,9 \text{ A/Bm}$. Квантовая эффективность $\eta = (1-R)\zeta[1-\exp\{-\alpha d\}]$, где R - оптический коэффициент отражения от поверхности, ζ -доля электронно- дырочных пар, которые вносят вклад в ток приемника, α -коэффициент поглощения материала, d -толщина фотопримника. *Токовая чувствительность* фотоприемника это коэффициент пропорциональности между электрическим током и оптической мощностью приемника(A/Bт) :

$$\square = \frac{\eta e}{h \nu}.$$

- $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te} / \text{CdTe}$ -материал используется в средней инфракрасной области спектра.Соединения HgTe и CdTe имеют почти одинаковые постоянные решетки и согласуются по постоянной решетки почти при любом составе. Ширина запрещенной зоны перестраивается за счет состава и работает в диапазоне 3-17 мкм. Это приборы ночного видения, тепловизоры и длинноволновая ИК-оптическая связь (см рис.2.2).

- $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y / \text{InP}$ и $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}_y\text{S}_y$ -четырёхкомпонентные материалы применяются в диапазоне длин волн 0,92-1.7 мкм. Четвертый материал (фосфор или сурьма) обеспечивает дополнительную степень свободы для согласования постоянных решетки при различных значениях ширины запрещенной зоны, которая определяется составом соединения.

Фотодиоды p - i - n -диоды и фотодиоды на барьерах Шоттки. В p - i - n -диодах быстродействие меньше 1 нс, квантовая эффективность до 90%, усиление фототока практически отсутствует, материалы: GaAs ($\lambda \leq 0,8 \text{ мкм}$) , InGaAs ($\lambda \leq 1,3 \div 1,5 \text{ мкм}$). В фотодиодах Шоттки (структуры «металл-полупроводник» содержат гетеропереходы между металлом и полупроводником. быстродействие $\leq 1 \text{ нс}$, квантовая эффективность до 40%, материалы: n — GaAs , GaAs-AlGaAs , InGaAs ($\lambda = 0,82 \div 1,6 \text{ мкм}$).

В оптических системах связи обычно используются два типа детекторов для фотоприемников: p - i - n –фотодиод и *лавинный фотодиод* (ЛФД). Детекторы в области 870 нм используются кремниевые фотодиоды и ЛФД. В современных предусилителях кремниевые ЛФД имеют преимущество в 10-15 дБ по обнаружительной способности по сравнению с p - i - n –фотодиодами. Детекторы в области 1300-1500 нм используют p - i - n –фотодиоды из InGaAs и Ge . Материал InGaAs имеет меньший темновой шум и большую температурную устойчивость чем германий.

Лавинные фотодиоды на гетероструктурах в области поглощения используют материал с узкой запрещенной зоной InGaAs , плавный переход материалом InGaAsP к материалу с широкой запрещенной зоной InP в области умножения.см. рис.3.2.

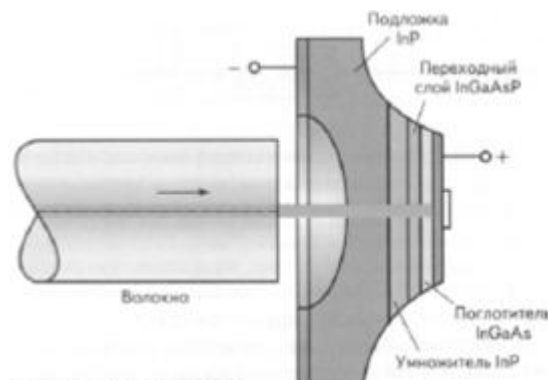


Рис.3.2. Структура лавинного фотодиода (ЛФД) с поглотителем и умножителем, разделенными переходным слоем (SAGM)[1]

Селенид ртути $HgSe$ и теллурид ртути $HgTe$ являются полуметаллами с малой отрицательной шириной запрещенной зоны и имеют почти одинаковые решетки. Трехкомпонентный полупроводник $Hg_xCd_{1-x}Te$ можно выращивать без напряжений на подложке $CdTe$. Этот материал является основным для фотоприемников в средней инфракрасной области. См. рис.2.2 в гл.2.

В качестве фотоприемников используются также планарные фотосопротивления с малым зазором между омическими контактами и экстрагирующими электродами. Быстродействие 80-200 пс, материалы $InGaAs$, $p-GaAs$, у которого $\lambda \leq 0,85 \mu m$.

3.3. Солнечные фотоэлементы [3]

Солнечные фотоэлементы (СЭ) — устройства, преобразующие солнечную энергию в электрический ток. Действие солнечного элемента основано на использовании явления внутреннего фотоэффекта, т.е. возникновение свободных носителей заряда электронов и дырок в твердом теле при поглощении в нем квантов электромагнитного поля (фотонов).

Основные характеристики солнечных фотоэлементов.

Напряжение холостого хода V_{xx} — напряжение на СЭ при бесконечном сопротивлении внешней нагрузки.

Ток короткого замыкания $I_{кз}$ — максимальный ток, возникающий под действием солнечного света, когда освещенный СЭ замкнут накоротко во внешней цепи. Он зависит от площади элемента, от числа падающих фотонов, разных энергий, от оптической эффективности.

Коэффициент заполнения $FF = I_n U_n / I_{кз} V_{xx}$ — отношение максимальной мощности СЭ к произведению $I_{кз} V_{xx}$ и равен максимальной площади прямоугольника, который можно вписать в вольтамперную характеристику СЭ см рис.4.3.а.

Коэффициент полезного действия КПД $\eta = I_n U_n / P_c$ — отношение мощности, вырабатываемой СЭ к мощности падающего на него солнечного излучения.

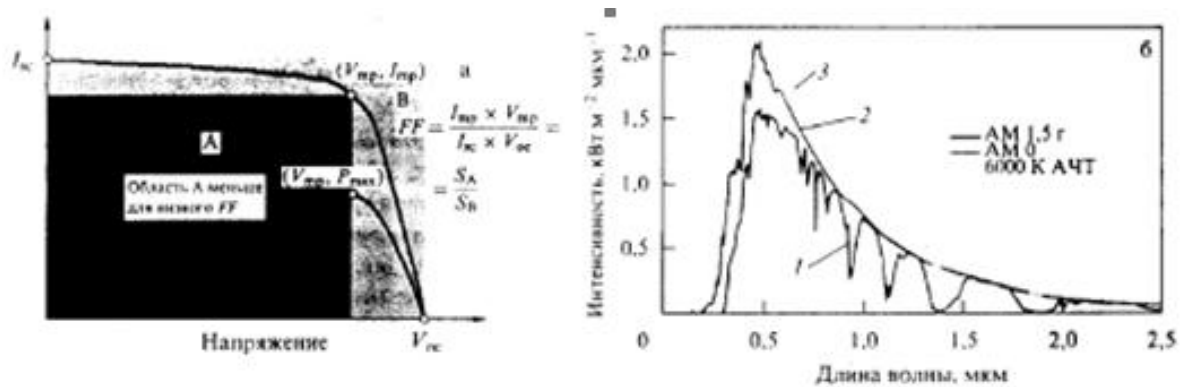


Рис.3.3. а) Вольтамперная характеристика солнечного элемента. б) Спектры солнечного излучения у поверхности Земли. Кривая 1 -воздушная масса AM1,5G на широте 50°. Кривая 2 - воздушная масса AM0 на околоземной орбите. Кривая 3-спектр абсолютно черного тела с температурой фотосферы Солнца 6000 К. Кривые 2 и 3 практически совпадают.[3]

Спектральные характеристики СЭ:

1. *Квантовая эффективность* –отношение числа носителей заряда собранных фотоэлементом к числу падающих фотонов данной энергии в единичном интервале спектра. Квантовая эффективность идеального СЭ не зависит от фотонов с энергией, большей, чем ширина запрещенной зоны, а для фотонов с энергией меньшей ширины запрещенной зоны квантовая эффективность равна нулю.

2. *Спектральная чувствительность SR* –отношение фототока, генерируемого в фотоэлектрическом слое к мощности поглощенного в нем излучения в единичном интервале частот. Для германия, кремния и основных многокомпонентных полупроводников идеализированная зависимость: $SR=0$ для фотонов с энергией ниже ширины запрещенной зоны $E_g = \hbar\omega_g$ и $SR = \frac{e}{\hbar\omega}$ для фотонов с энергией выше E_g .

КПД равен произведению интегральной (по спектру) квантовой эффективности на коэффициент заполнения, интегральную оптическую эффективность, предельную эффективность.

Оптическая эффективность определяется потерями мощности падающего света на отражение и на паразитное прохождение света сквозь фотоэлектрический слой.

Предельная эффективность USE зависит от спектральной чувствительности, которая уменьшается в высокочастотной области солнечного спектра. USE задает максимально достижимый КПД для широкополосных СЭ в 30% (предел Шокли - Квайссера).

3.3.1. Классификация солнечных элементов

Солнечные элементы диодного типа используют разделение зарядов, созданных внешним освещением, на границе раздела двух сред с p - и n -типом проводимости. В зависимости от толщины активной области СЭ диодного типа подразделяются на системы с объемными кристаллическими подложками (Si, Ge, GaAs) и системы с тонкими пленками кристаллической, микрокристаллической или аморфной структурой.

Простой СЭ диодного типа на основе кремния показан на рис.3.4. Сетчатый верхний электрод запрессован в стекло. 2 слой –просветляющее покрытие. 3 слой,

легированный кристаллический кремний *c-Si* *n*-типа. 4 слой *p-n*-переход. 5 слой, легированный *c-Si* *p*-типа. 6-слой нижний металлический контакт.



Рис.3.4. СЭ диодного типа на основе кремния. А простейший вариант с сетчатым верхним электродом. б) эквивалентная схема СЭ. Ток в нагрузке R_L состоит из темнового тока диода I_d и фототока I_{ph} [3]

Исторически первыми СЭ стали элементы на основе кристаллического кремния (*c-Si*) и кристаллического германия (Ge). Они составляют 90% всего рынка и имеют в среднем КПД 20%. Недостатки: высокая стоимость, токсичность производства.

СЭ тонкопленочные, второго поколения изготавливаются из аморфного (*a-Si*) микрокристаллического ($\mu c-Si$), поликристаллического (*multi-cSi*), многокомпонентных полупроводников группы A_3B_5 (*GaP*, *InP*, *GaAs*) и A_2B_6 (*CdTe*) многокомпонентных полупроводников типа $CuInS_2$, $Cu(In,Ga)(Se,S)_2$, $Cu_2ZnSn(Se,S)_4$. Это прямозонные полупроводники с шириной запрещенной зоны 1,1 эВ. Имеют высокие коэффициенты поглощения (от 10^4 см^{-1}).

Структура всех СЭ на основе халькоперитов $Cu(In,Ga)(Se,S)_2$ сокращенно *CIGS* и кестеритов $Cu_2ZnSn(Se,S)_4$ диодная. Они выступают как полупроводники *p*-типа, осажденные на стеклянную подложку с тонким слоем, окисла металла *Mo* в качестве нижнего контакта. *P-n*-структура формируется нанесением тонкого (порядка 50 нм) слоя широкозонного полупроводника *Cd* с допированием *n*-типа. Наносимые поверх слоя *CdS*, тонкие слои прозрачного оксида цинка *ZnO* и проводящего индий оксид титана $InTiO_2$ (*ITO*), играющие роль верхнего контакта завершают с диодную структуру. СЭ на основе халькоперитов имеют КПД около 20%, - кестеритов 10%. См. Рис.3.5. Солнечные батареи на основе таких СЭ являются гибкими или пластичными тонкими пленками заняли 10% рынка с 1980-х годов.

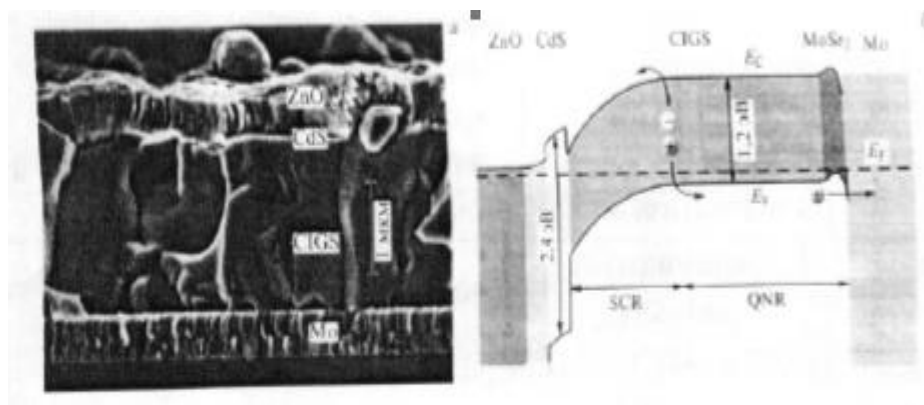


Рис.3.5. а) Изображение структуры СЭ на основе CIGS в разрезе, полученное сканирующим электронным микроскопом. б) Структура р-п-перехода в оптимизированном тонкопленочном СЭ на основе CIGS, где SCR—область с пространственным разделением заряда и QNR—квазинейтральная область.[3]

СЭ третьего поколения — это СЭ на основе пигментов (органических красителей), органо-неорганических полупроводников, квантовых точек, на горячих электронах. Все СЭ имеют ограничение в земных условиях на КПД 30%, возникающий из-за большого диапазона частот солнечного света (кроме рассмотренных ниже каскадных СЭ).

В каскадных СЭ с разделением солнечного спектра фотоэлектрический материал образован многослойной структурой с толщиной 1-5 мкм, содержащей 2-4 полупроводниковых р-п переходов. Каждый фотоэлектрический слой рассчитан на поглощение определенной части диапазона солнечного света. Расширение полосы частот сопровождается повышением предела для КПД, так как фотоны с энергией ниже ширины данного слоя проходят в следующий слой. Это позволяет конвертировать спектр фотонов солнечного света от 0,6 эВ до 2 эВ. Существуют два метода изготовления многопереходных СЭ — это рост слоев молекулярно-пучковой эпитаксией или осаждением из газовой фазы.

Материалы для СЭ это полупроводниковые соединения A_3B_5 или плотные решетки квантовых точек. Главным критерием является согласование кристаллической структуры каждого слоя с соседями. Для СЭ с двумя слоями оптимальной структурой является (*InGaP/GaAs*) с с максимальным КПД в земных условиях равным 31% при его 200 кратной концентрации. Для структуры из трех слоев *InGaP/GaAs/Ge* КПД на Земле достигает 38%. Для многослойной структуры состоящей из верхнего СЭ легированного Al *InGaP* с шириной зоны 1,86 эВ, среднего СЭ легированного *InGaAs* с шириной 1,4 эВ, нижнего СЭ содержащего подслои *Ge* с шириной 0,65 эВ получен рекордный КПД 45-46% (См рис.3.6). Стоимость многопереходных СЭ велика (на порядок превышает стоимость СЭ первого и второго поколений) и наполовину определяется стоимостью германия как основного элемента нижнего слоя СЭ. Применяются в основном для стабильного электропитания космических аппаратов в жестких условиях солнечной радиации, солнечного ветра (протоны) и космического гамма-излучения.

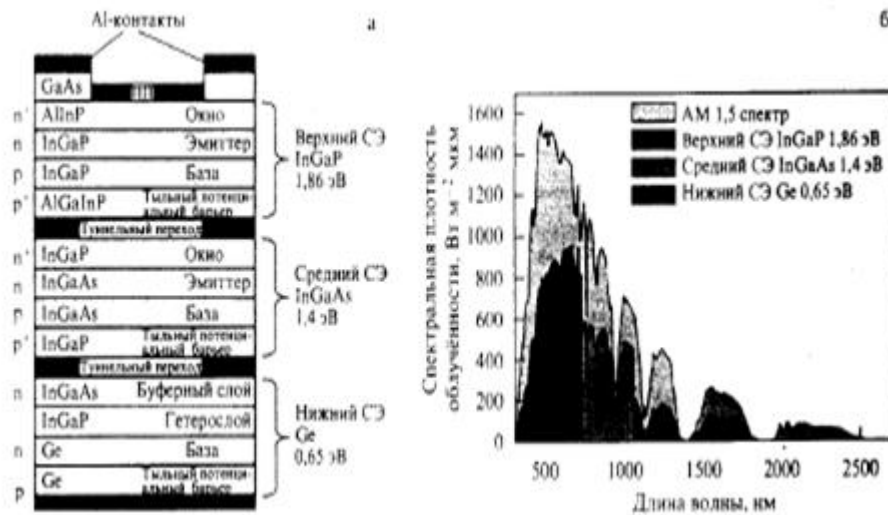


Рис.3.6. а) Структура типичного многопереходного элемента с тремя фотоэлектрическими слоями. б) Схематическое изображение поглощения элементом в определенных частях солнечного спектра.[3]

СЭ с параллельным разделением солнечного спектра состоят из узкополосных СЭ разнесенных в плоскости, но имеющих общие токосъемные шины для всех ячеек. Имеют рекордный КПД 43%, но требуют фазовых голограмм для разделения солнечного света на спектральные поддиапазоны. Они позволяют добиться такой спектральной зависимости дисперсии прошедшего света, при которой 80-90% энергии сосредоточенной в данном диапазоне направляется на соответствующий СЭ, см рис.3.7.

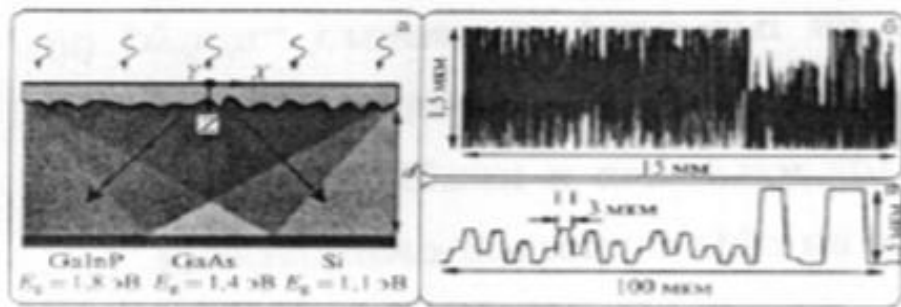


Рис.3.7. Солнечная батарея из трех параллельно соединенных СЭ первого поколения в которой параллельное разделение спектров осуществляется плоской фазовой голограммой. а) Общая схема. б) Распределение высот вступов голограммы. в) То же распределение в увеличенном горизонтальном масштабе. Расстояние $d=1 \text{ см}$. [3]

Солнечные элементы третьего поколения экситонного типа работают как фотоэлектрические преобразователи не диодного, а фотоэлектрохимического типа. Они состоят из слоя органического полимера (донора), поверх которого нанесен слой прозрачного для солнечного света материала с электронным типом проводимости (акцептора). В фотоэлектрическом донорном слое под действием солнечного излучения генерируются экситоны. Разделение экситонов на свободные электроны и дырки, создающие фототок, происходит при достижении экситонами границы донорного слоя и электронного акцептора.

3.3.2. Солнечные элементы на основе металлоорганических перовскитов (МОП)

Перовскит — минерал, титанат кальция. Эмпирическая формула: CaTiO_3 . Перовскит — источник Ti, Nb и ряда других элементов. Перовскит светлых цветов прозрачен. Твёрдость по минералогической шкале: 5,5 — 6, плотность: 3,97 — 4,0 г/см³. Кальций может замещаться на Се, Ti на Nb и Та. Атомы титана в перовските расположены в узлах слабо искажённой кубической решётки. В центрах псевдокубов располагаются атомы кальция. Атомы кислорода образуют вокруг атомов титана практически правильные октаэдры, которые немного развёрнуты и наклонены относительно идеальных положений. Среди соединений, имеющих структуру перовскита, оксиды, галогениды, интерметаллиды.

МОП — это материалы с химической формулой ABX_3 и определенным типом кристаллической структуры, показанной на рис.3.8.а. А и В катионы, X-анеон. Например, для перовскита $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$: катеон А - метил-аммоний (CH_3NH_3^+) ионный радиус 0,18 нм, меньший катеон В тяжелый металл свинец Pb (ионный радиус 0,07 нм). Анеон- йод I (ионный радиус 0,13 нм). Энергетическая структура электронных состояний металлоорганического перовскита показана на рис.3.8.б. Валентная зона формируется σ -связями Pb 6s—I 5p, зона проводимости π -связями Pb 6p—I 5p и σ -связями Pb 6p—I 5s.

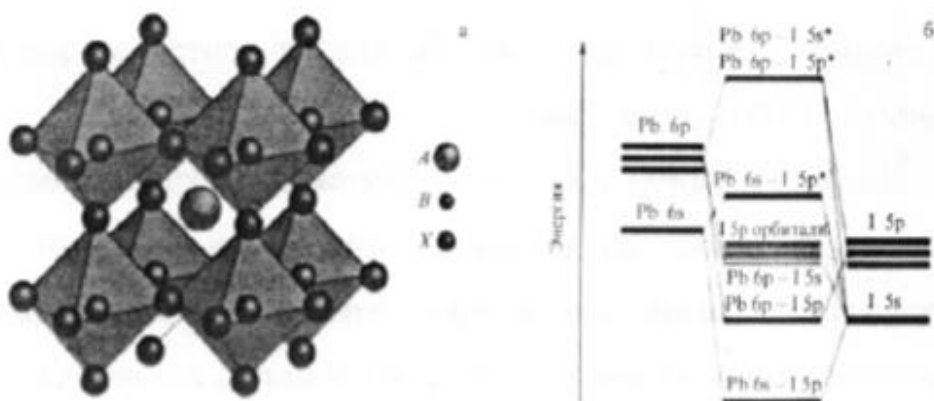


Рис.3.8. а) Кристаллическая структура синтетических перовскитов с металлоорганическими катионами (А, В) и анеонами (Х). б) Энергетическая структура электронных состояний в металлоорганическом перовските $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, сформированная катеон-анеонного кластера $[\text{PbI}_3]_4$. [3]

Главное достоинство галогенидов со структурой перовскита МОП это высокое оптическое поглощение до 10^6 см^{-1} в ближнем ультрафиолете и большое в диапазоне солнечного излучения. Экспериментальные значения показателей поглощения указывают на прямозонные электронные переходы. Значения статической диэлектрической проницаемости МОП подтверждают ионную структуру кристаллов и низкую энергию кристаллической решетки. Интегральный коэффициент поглощения МОП в солнечном спектре сравним с коэффициентом поглощения легированных многокомпонентных полупроводников типа CdTe, что уникально для экситонного СЭ. Наибольший вклад в изменение ширины запрещенной зоны вносит вариация состава

неорганической части МОП. Изменение в 0,4 эВ дает комбинация катионов свинца Pb и олова Sn в одном кристалле. Изменение в 1,6 эВ дает комбинация анионов.

На рис.3.9. показана современная тонкопленочная гетеропереходная структура *p-i-n* типа с перовскитом: 1-слой- алюминий Al; 2-слой- оксид титана TiO_2 ; 3-слой- PCBM ((6,6)-фенил- C_{61} -бутировой кислоты метиловый эфир); 4-слой-*i*-слой (МОП) перовскит; 5-слой PEDOT-PSS (натриевая соль сульфанированного полистирола+поли-3-4-этилендиокситиофена); 6-слой $SnO_2:F$ (FTO) анод.

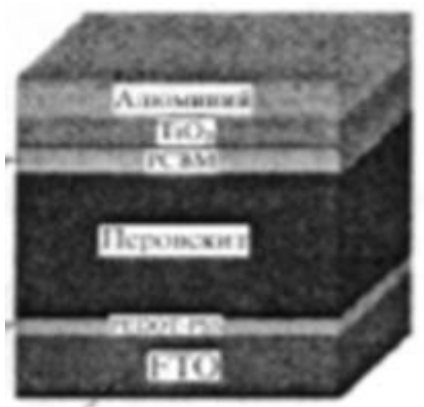


Рис.3.9. Солнечный Элемент –современная тонкопленочная гетеропереходная структура *p-i-n* типа с перовскитом.[3]

Предположительный механизм работы СЭ на основе МОП. Падающее излучение вызывает в прямозонном полупроводнике перовските электронные переходы на энергетические уровни высокой плотности состояний. Некоторые возбужденные электроны в зоне проводимости оказываются свободными. Остальные электроны связываются с дырками и формируют экситоны с энергией связи от 0,02 эВ до 0,55 эВ в зависимости от структуры МОП (размерность кристалла 3D,2D,1D,0D) и его статических электрических свойств.

Для перовскита $CH_3NH_3PbI_3$ энергия связи экситонов лежит в интервале 0,02 эВ до 0,05 эВ. Это пограничная область между экситонами Ванье-Мотта 0,02 эВ и экситонами Френкеля 0,1 эВ. Это диодный СЭ, у которого в фототоке преобладают свободные носители. В других видах МОП экситоны имеют энергию связи больше 0,1 эВ и в центральной части слоя МОП в фототоке преобладают экситоны. После диссоциации экситонов в МОП длины свободных пробега составляют для электронов 0,5 мкм и дырок 1 мкм. Это позволяет использовать *i*-слои перовскита толщиной 350-500 нм. Оптимальный тонкопленочный *p-i-n* СЭ на основе МОП имеет также толщину слоя материала с электронной проводимостью (ЭПМ) и толщину слоя материала с дырочной проводимостью (ДПМ) от десятков до трех сотен нанометров. Их экспериментальный КПД составляет около 20%.

3.4. Приборы с зарядовой связью (ПЗС)

Особое значение для оптроники имеют строчки и матрицы, использующие эффект зарядовой связи в полупроводниках.

Приборы с зарядовой связью (ПЗС) - это интегральные микросхемы, состоящие из совокупности МДП-структур, сформированных на общей полупроводниковой подложке. Полоски электродов образуют линейчатую или матричную регулярную структуру. Расстояние между соседними электродами малы, так, что становятся существенными их взаимовлияние. Из-за пространственного перекрытия заряда между краями соседних электродов. См рис.3.10.

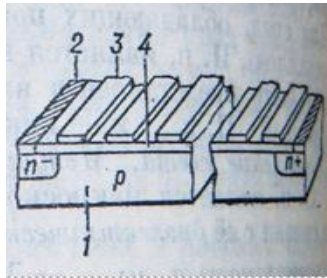


Рис.3.10. Структура прибора с зарядовой связью. 1-кристалл кремния, 2 –вход и выход. 3-металлические электроды. 4 –диэлектрик (окись кремния).[4]

В ПЗС осуществляется направленная передача заряда от электрода к электроду путем манипуляции электрическими напряжениями на этих электродах. Используются термины (ФПЗС) «фоточувствительный прибор с зарядовой связью».

3.4.1.Технология изготовления ФПЗС

Изготавливают на основе монокристаллического кремния. На поверхности кремневой пластины методом термического окисления создается тонкая (0,1-0,15 мкм) диэлектрическая пленка окиси кремния SiO_2 . Обеспечивается совершенство границы раздела полупроводник-диэлектрик и минимальна концентрация рекомбинационных центров на границе. Электроды отдельных МДП –элементов производятся из алюминия, их длина 3-7 мкм, зазор между электродами составляет 0,2 -3 мкм. Типичное число МДП-элементов составляет 500-2000 в линейном и $10^4 - 10^6$ в матричном ПЗС, площадь пластины $\approx 1\text{см}^2$. Под крайними электродами каждой строки изготавливают *p-n*-переходы, для вывода и вывода порции зарядов фотоэлектрическим способом ПЗС освещают с фронтальной или тыльной стороны. При фронтальном освещении во избежание затеняющего действия электродов алюминий заменяют пленкой сильнолегированного поликристаллического кремния, прозрачного в видимой и ближней ИК-области спектра.

Принцип действия ПЗС на примере фрагмента строки ФПЗС, управляемой трехфазной схемы показан на рис. 3.11.

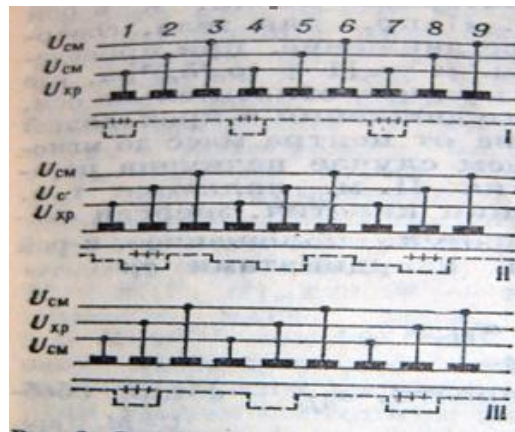


Рис.3.11. Схема работы трехфазового прибора с зарядовой связью – сдвигового регистра.

I, II, III рабочие такты. $U_{см}$ - напряжение смещения, $U_{с}$ - напряжение считывания, $U_{хр}$ - напряжение хранения.

В течение такта 1 восприятие, накопление и хранение видеоинформации к электродам 1,4,7 прикладывается напряжение хранения $U_{хр}$. Оно оттесняет основные носители дырки к в глубь проводника и образующие обедненные слои глубиной 0,5-2мкм потенциальные ямы для электронов. Освещение поверхности ФПЗС порождает в объемк кремния избыточные электрон-дырочные пары. Электроны стягиваются в потенциальные ямы и локализуются в тонком приповерхностном слое под электродами 1,4,7, образуя сигнальные зарядовые пакеты.

Во время такта 11 перенос зарядов напряжение на электродах 2,5,8 прикладывается напряжение считывания $U_{с}$ более высокое чем $U_{хр}$. Под электродами 2,5,8 возникают более глубокие потенциальные ямы чем под под электродами 1,4,7 и вследствие близости электродов 1и2, 4и5, 7и8 барьеры между ними исчезают и электроны перетекают в соседние более глубокие потенциальные ямы.

Во время такта 111 напряжение на электродах 2,5,8 снижается до $U_{хр}$ а с электродов 1,4,7 снимается. Так осуществляется перенос всех зарядовых пакетов вдоль строки ПЗС вправо на один шаг, равный расстоянию между соседними электродами.

Во все время работы на электродах не подключенных к потенциалам $U_{хр}$ или $U_{с}$ поддерживается небольшое напряжение смещения $U_{см}$ равное 1-3 В обеспечивающее обеднение носителями заряда всей поверхности полупроводника и ослабление рекомбинационного эффекта.

Повторяя процесс коммутации напряжений многократно, выводят через крайний p - n - переход последовательно все зарядовые пакеты, возбужденные светом в строке. В выходной строке возникают импульсы напряжений, пропорциональные величине заряда данного пакета. Картина освещенности трансформируется в поверхностный зарядовый рельеф, который после продвижения вдоль всей строки преобразуется в последовательность электрических импульсов.

В линейном ФПЗС рис.3а заряды, накопленные в строке 1 за один цикл, передаются в регистр 2 (из четных элементов) и в регистр 3 (из нечетных). В то время, как по этим регистрам информация передается через выход 4 в схему объединения сигналов 5, в строке 1 накапливается новый видеокадр.

В ФПЗС с кадровым переносом рис. 3.12.б информация, воспринятая матрицей накопления 1 быстро сбрасывается в матрицу хранения 2 из которой последовательно считывается ПЗС-регистром 3, в это же время матрица 1 накапливает новый кадр.

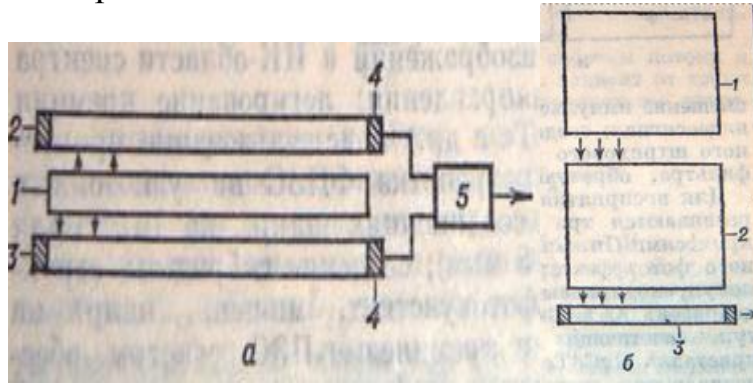


Рис.3.12. Накопление и считывание информации в а) линейном ФПЗС, б) В матричном фоточувствительном приборе с зарядовой связью. 1-строка, 2—четный регистр, 3-нечетный регистр. 4-выход, 5-схема объединения.

Основные параметры ПЗС. $U_{xp}, U_c \approx 5-20V$, относительная потеря заряда при одном переносе $\frac{\Delta q}{q} \approx 10^{-3} \div 10^{-5}$, максимальная тактовая частота 10 -100 МГц, максимальная плотность зарядового пакета $Q_{n,max} \approx 50 nKл / см^2$, минимальная - $Q_{n,min} \approx 50 nKл / см^2$, динамический диапазон $D = 20 \lg Q_{n,max} / Q_{n,min} \approx 60-80 \text{ дБ}$, плотность темнового тока $I_t = 10^{-10} \div 10^{-9} A / см^2$. Для характеристики ФПЗС указывают спектральный диапазон $\Delta \lambda = 0,4-1,1 \text{ мкм}$, фоточувствительность $S_\phi = 0,1 \div 0,5 A / Bm$, разрешающую способность $r = 10 \div 50 \text{ линий / мм}$.

На рис. 3.13.а показаны приборы с поликремневыми перекрывающимися электродами Приборы с асимметрией приповерхностных свойств, например, со слоем диэлектрика переменной толщины на рис.3.13.б, работающие в двухтактном режиме. На рис. 3.13.в. показана структура ПЗС с объемным каналом, образованным диффузией примесей.

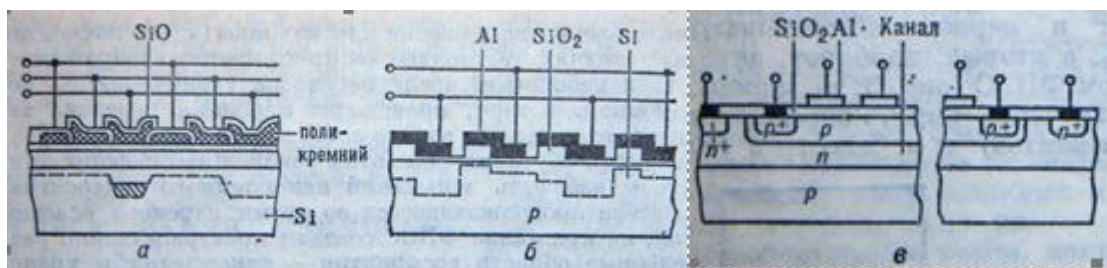


Рис.3.13. а), б) -Разновидности приборов с зарядовой связью с поверхностным каналом, в) ПЗС с объемным каналом.

Особенность ФПЗС является введение в кристалл и хранение без искажений большие массивы цифровой или аналоговой информации. Использование оптического способа ввода информации, направленное распространение информации в кристалле и неразрушающий доступ к ней, позволяет проводить последовательный и параллельный принцип обработки информации. От видеоконов ФПЗС отличается жесткой геометрическим растром, позволяющим фиксировать координаты элементов разложения и исключить дисторсию искажения раstra, долговечностью, меньшей потребляемой мощностью, нечувствительностью к внешним магнитным и электрическим полям.

Основное функциональное назначение фоточувствительных ПЗС – это преобразование оптических изображений в последовательность электрических импульсов (формирование видео сигнала). Эти приемники позволяют принимать, хранить некоторое время и последовательно передавать при считывании оптические сигналы.

Глава 4 МОДУЛЯТОРЫ

4.1. Электрооптические модуляторы

4.1.1. Электрооптические модуляторы света

Электрооптический эффект – это изменение показателя преломления, вызванное наложением постоянного или низкочастотного электрического поля. Модуляторы света – устройства для управления параметрами световых потоков, т.е. амплитудой, частотой, фазой, поляризацией.

Фазовые электрооптические модуляторы на основе эффекта Поккельса.

Модуляторы используют линейное изменение показателя преломления нецентральносимметричных кристаллов в зависимости от величины электрического поля, в котором находится кристалл.

$$n(E) = n_0 - \frac{1}{2} r n_0^3 E, \quad (4.1)$$

где n_0 – показатель преломления кристалла без поля, r – электрооптический коэффициент, зависящий от свойств и ориентации кристалла, направления поля E и поляризации проходящего света. Типичные значения лежат в интервале $10^{-12} < r < 10^{-10} \text{ м/В}$. Например, для $E = 10^6 \text{ м/В}$ (10 кВ приложено к ячейке толщиной 1 см). второе слагаемое в (3.1) порядка $10^{-4} \div 10^{-6}$.

В ячейках Поккельса используют кристаллы $NH_4H_2PO_4$ (ADP), KH_2PO_4 (KDP), $LiNbO_3$, $LiNbO_3$, $CdTe$. В скобках сокращенное обозначение кристалла.

Световой пучок, прошедший путь в кристалле, помещенном в электрическое поле, приобретает фазовый сдвиг.

$$\varphi = \frac{2\pi n L}{\lambda} = \varphi_0 - \frac{\pi n_0^3 r E}{\lambda}, \quad (4.2)$$

Здесь λ – Длина волны света в вакууме, φ_0 – начальный сдвиг фаз света в кристалле без поля, L – длина ячейки Поккельса.

Наличие фазового сдвига $\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0 \propto E$ означает фазовую модуляцию света. Линейный эффект позволяет изменять фазу за $\sim 10^{-12}$ с.

При приложении электрического поля поперек к направлению распространения света внешнее электрическое напряжение $U = Eh$, где h - размер кристаллического элемента по направлению силовых линий электрического поля E .

Полуволновое напряжение – напряжение, которое необходимо приложить к фазовому модулятору света для получения сдвига фаз на угол $\pi = 180^\circ$ равно $U_{\lambda/2} = h\lambda / L n_0^3 r$.

Полуволновое напряжение используется как характеристика модулятора света на низких частотах модуляции.

На высоких частотах сдвиг фазы удобно определять, как функцию мощности P управляющего сигнала.

$$\varphi = \varphi_0 + \sqrt{qP}, \quad (4.3)$$

где q – величина, характеризующая качество модулятора света, зависящее от кристалла, его геометрии и отношения длины кристалла к площади его поперечного сечения.

На высоких частотах фаза модулирующего сигнала меняется за время прохождения светом кристалла:

$$\varphi = \frac{\pi}{U_{\lambda/2}} \int_0^l E_0 \cos(\Omega t - k_M z) dz, \quad (4.4)$$

где E_0, Ω, k_M – амплитуда, частота, волновое число модулирующего электрического поля, z – направление распространения света в кристалле.

$$L = \frac{\pi}{\Omega} \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{v_m} \right)^{-1},$$

Длина модулирующего элемента не должна превышать величины

где v – скорость света в кристалле, v_m – фазовая скорость управляющего сигнала.

В качестве фазовых модуляторов света используют кристаллы ADP ($NH_4H_2PO_4$), KDP (KH_2PO_4), DKDP (KD_2PO_4), ниобат лития ($LiNbO_3$), танталат лития ($LiTaO_3$). Полуволновые напряжения модуляторов меняются от 100 В для длинных и тонких кристаллов в поперечном поле, до 5 кВ в модуляторах, использующих широкие кристаллы в продольном поле.

Амплитудные модуляторы с поляризационной ячейкой отличаются от фазовых модуляторов наличием двух скрещенных поляризаторов, между которыми находится кристалл. См. рис.4.1.

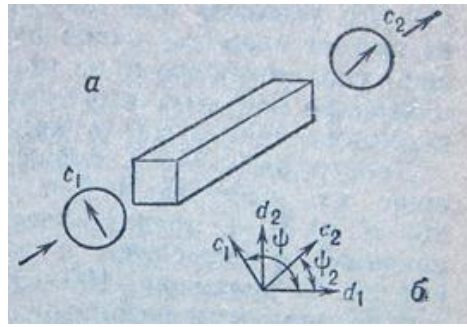


Рис.4.1. Амплитудный модулятор света с поляризационной ячейкой.

Интенсивность света на выходе поляризационной ячейки определяется законом Малюса

$$I = I_0 \sin^2 \left(\frac{\Gamma}{2} \right) \quad (4.5)$$

Разность фаз $\Gamma = \varphi_1 - \varphi_2 = \Gamma_0 + \Gamma_{\square}$,

где разность фаз за счет естественной анизотропии

кристалла $\Gamma_0 = \varphi_{01} - \varphi_{02} = \frac{2\pi l}{\lambda} (n_1 - n_2)$,

переменная разность фаз, наведенная электрическим полем $\Gamma_{\square} = \frac{\pi U}{U_{\lambda/2}}$,

полуволновое напряжение $U_{\lambda/2} = \frac{h\lambda}{l} (n_2^3 r_2 - n_1^3 r_1)$.см. рис. 4.2.

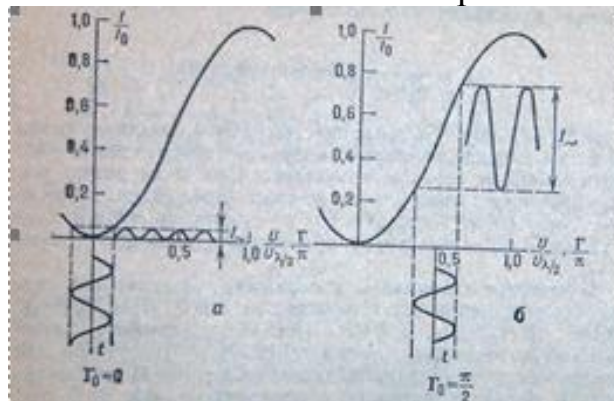


Рис.4.2. Амплитудная характеристика модулятора света. а) Работа на нелинейном участке при $\Gamma_0 = 0$. б) Работа на линейном участке при $\Gamma_0 = \pi/2$.

В светодиодах и инжекционных лазерах внутренняя модуляция осуществляется путем изменения питающего тока. Для внешней модуляции используется электрооптический эффект в кристалле LiNbO_3 . Полуволновое напряжение в этом кристалле более 1 Кв.

4.1.2. Интегрально-оптические модуляторы света

На поверхности ниобата лития LiNbO_3 методом диффузии титана создают необходимую световодную конфигурацию. Между световодами напыляют электроды. Прикладывая напряжение к электродам, изменяют скорость распространения света по световодам. Используют модифицированный

интерферометр Маха-Цендера и электрооптический фазовый модулятор изображенный на рис. 4.3.

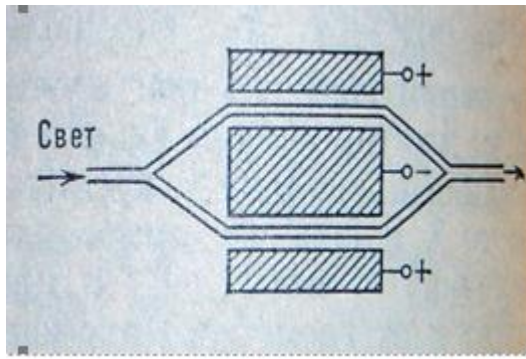


Рис.4.3. Пленочный (волноводный) интерференционный модулятор света

Ширина световода не должна превышать нескольких мкм, чтобы волновод был одномодовым. Роль светоразделительных элементов играют Y-образные разветвления. Если пришедшие к выходу интерферометра волны оказываются в фазе, то они складываются, если в противофазе - то образуют волну второй моды, которая не может распространяться по световоду и излучается в подложку. При распространении по световоду свет не дифрагирует, поэтому длина интегрально-оптических модуляторов света может достигать нескольких см. Полуволновое напряжение составляет 0,3 В. При длине модулятора из LiNiO_3 $l=1\text{ см}$, полоса частот равна 1 ГГц.

Интегрально –оптический переключатель на два положения показан на рис.4.4.

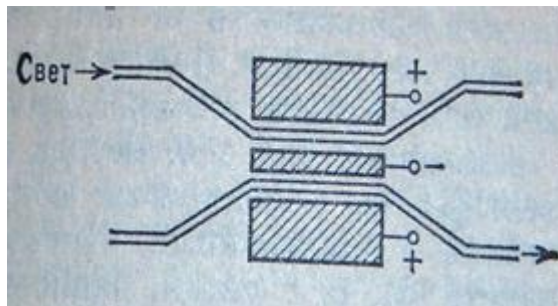


Рис.4.4. Интегрально-оптический переключатель света на два положения.

Модулятор состоит из двух близко расположенных световода на поверхности ниобата лития. Длина световодов и расстояние между ними подобраны так, чтобы без внешнего поля свет из первого световода перекачивался в второй за счет туннельного эффекта. При подаче на электроды внешнего напряжения скорости распространения волн в световоде становятся различными. Перекачка энергии прекращается и свет на выходе появляется. Такие модуляторы являются переключателями света на два положения. Для получения туннельной перекачки энергии расстояние между световодами должно составить около 5 мкм при длине световода в несколько мм.

Дефлекторы лазерного излучения –приборы отклоняющие световое излучение от прямолинейного распространения. Они могут применяться как модуляторы излучения. Дефлекторы на основе электрооптического эффекта в

двулучепреломляющих кристаллах быстродействующие. Дефлекторы, использующие дифракцию на акустических волнах более эффективны.

Пространственно–временные модуляторы света (ПВМС)–матрицы светоклапанных устройств, позволяющие создавать и обрабатывать двумерные изображения. Управление пропусканием осуществляется электрическими транспарантами или магнитооптическими. Для слабых сигналов используют оптические управляемые транспаранты.

Электропоглощение– это изменение поглощения света в среде под действием приложенного внешнего электрического поля.

4.1.3. Электропоглощающие модуляторы на основе эффекта Келдыша-Франца и квантоворазмерного эффекта Штарка [1]

Эффект Келдыша-Франца. При приложении электрического поля к освещаемому полупроводнику в области его прозрачности, когда энергия фотона меньше ширины запрещенной зоны ($\hbar\omega < E_g$) наблюдается *поглощение* света. В области, где энергия фотона больше ширины запрещенной зоны ($\hbar\omega > E_g$) возникают *осцилляции* коэффициента поглощения и отражения, как функции приложенного электрического поля и частоты света.

Объяснение эффекта. В электрическом поле энергетические зоны наклоняются. См рис.4.5.а). Если суммарная энергия электрона и дырки, равная $\hbar\omega$ больше ширины запрещенной зоны E_g ($\hbar\omega > E_g$), волновые функции электрона и дырки перекрываются. Коэффициент поглощения велик, осцилляции объясняются интерференцией падающей и отраженной электронной волны от потенциального барьера.

Если суммарная энергия электрона и дырки, меньше ширины запрещенной зоны ($\hbar\omega < E_g$) классически доступные области для электрона и дырки пространственно разделены. Однако волновые функции электрона и дырки перекрываются экспоненциальными хвостами под барьером. В электрическом поле поглощение при ($\hbar\omega < E_g$) пропорционально вероятности туннелирования электрона и дырки под барьером.

В объемном полупроводнике наложение внешнего электрического поля приводит к туннелированию электронов, благодаря которому край поглощения сдвигается в запрещенную зону. Энергетическая зона в электрическом поле искажается линейно, и ширина эффективной зоны уменьшается по сравнению с шириной без поля. Спектр поглощения смещается в сторону более длинных волн. Приложенное электрическое поле приводит к уширению и исчезновению экситонных пиков поглощения. см.рис.4.5.б.

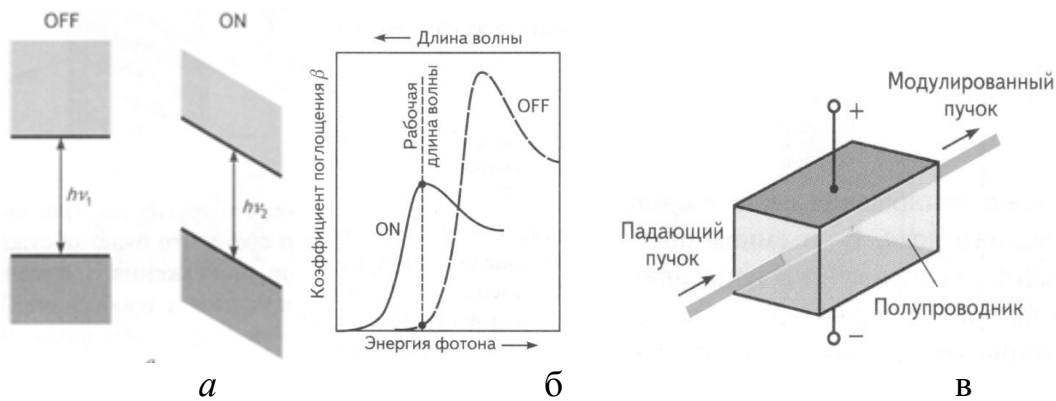


Рис.4.5. Эффект Келдыша-Франца. а) запрещенная зона без поля (OFF). В поле (ON) запрещенная зона сокращается из-за искажения. б) пик поглощения сдвигается в сторону длинных волн. в) волноводный модулятор на основе электропоглощения.

В электропоглощающих модуляторах и переключателях без поля падающий пучок света на рабочей длине волны, большей ширины запрещенной зоны, проходит свободно. При приложении электрического поля свет поглощается за счет уменьшения ширины запрещенной зоны. Такие модуляторы выполняются в волноводах, на который электрическое поле накладывается в перпендикулярном направлении рис.4.5.в. Эти модуляторы работают с большими скоростями и меньшим напряжением. Они интегрируются в единый чип с полупроводниковыми источниками света и используются в оптоволоконных системах связи.

Эффект электропоглощения ярче выражен в полупроводниковых структурах с множественными квантовыми ямами. Электрическое поле в направлении перпендикулярном плоскости квантовой ямы вызывает **квантоворазмерный эффект Штарка**:

- Разность энергий между уровнями энергии зоны проводимости в валентной зоне уменьшается с ростом электрического поля ($\hbar\nu_2 < \hbar\nu_1$);
- Наклон зон вызывает сдвиг локализации волновых функций в сторону краев ямы;
- Ионизация экситонов подавляется, а экситонные уровни энергии остаются неуширенными даже при высоких значениях поля.

Схемы энергетических зон полупроводника без поля и с полем, смещение экситонного пика в зависимости от напряжения, схема модулятора с электропоглощением показаны на

Рис.4.6. а), б), в) соответственно.

840

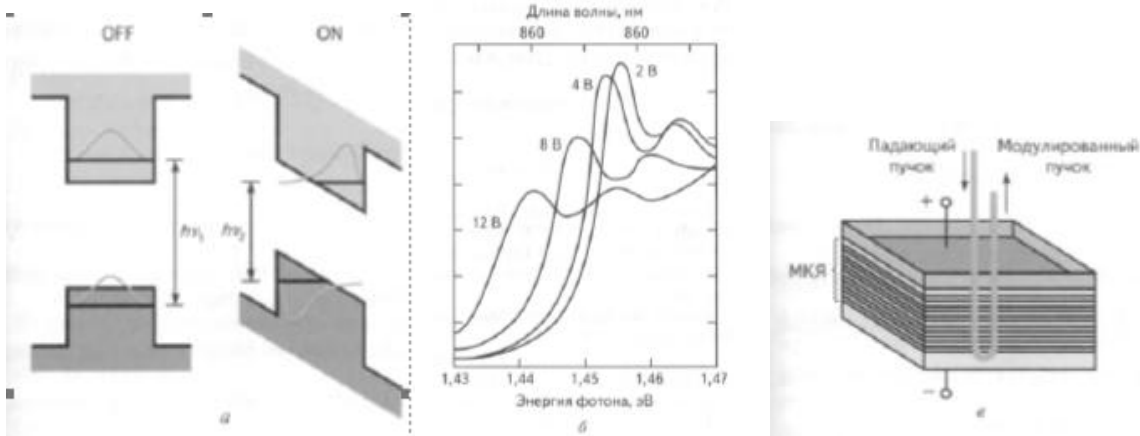


Рис.4.6 а) Поле вызывает уменьшение межзонной разности энергий и сдвиг фолновых функций от центра ям к противоположным краям. OFT -схема энергетических зон в отсутствие внешнего электрического поля, ON –в присутствии поля.

б) При увеличении внешнего напряжения экситонный пик поглощения смещается в сторону более длинных волн. 860 нм при 12 В, 850 нм при 1.45 эВ, 840 нм при меньше 2 В. **(ошибка в рис.вверху справа! 840)**

в) Схема модулятора с электропоглощением структурой с множественными квантовыми ямами (МКЯ) поверхностно-нормальной конструкции.[1]

Электропоглощающие модуляторы на основе квантоворазмерного эффекта Штарка имеют больший сдвиг пика поглощения и более крутой край поглощения, чем объемные полупроводники. Они обладают высокими скоростями, большими коэффициентами контрастности, низкими управляющими напряжениями и малым чирпом (импульс имеет *чирп*, если мгновенная частота импульса меняется со временем (частотная модуляция: $\exp(i\pi t^2) = \cos \pi t^2 + i \sin \pi t^2$).

При распространении сверхкоротких лазерных импульсов сквозь диспергирующую среду (оптическое стекло) импульс изменяется: Центр импульса прошедшего через среду смещается относительно прошедшего через вакуум из-за разницы между фазовой и групповой скоростью сверхкороткого импульса. Во-вторых, высокочастотные компоненты смещаются относительно длинноволновых, это смещение частоты называют «чирп». Чирп легко представить, как модуляцию фазы электромагнитного поля при представлении фемтосекундного импульса в частотном диапазоне.

4.2. Магнитооптические модуляторы света

Для модуляции света используется эффект Фарадея.

Эффект Фарадея заключается во вращении плоскости поляризации линейнополяризованного света. Свет распространяется вдоль постоянного магнитного поля, в котором находится вещество. Фарадей открыл его в 1845 г. под действием магнитного поля показатели преломления n_+ для циркулярно правополяризованного света и n_- для левополяризованного света становятся различными. Эти компоненты распространяясь с разными фазовыми скоростями приобретают разность хода, которая зависит от оптической длины пути. Плоскость поляризации линейнополяризованного монохроматического света поворачивается на угол

$$\theta = \pi l (n_+ - n_-) \lambda. \quad (4.6)$$

В области несильных магнитных полей угол фарадеевского вращения равен

$$\theta = \pi l (n_+ - n_-) \lambda = V H l. \quad (4.7)$$

Постоянная Верде V зависит от свойств вещества, длины волны излучения и температуры.

Знак угла поворота не зависит от направления прохождения свет (по полю или против поля). Поэтому многократное прохождение света через среду, помещенную в магнитное поле приводит к возрастанию угла поворота плоскости поляризации в соответствующее число раз.

Принципиальная схема фарадеевского модулятора света приведена на рис.4.7. Изменение магнитного поля катушки 2 приводит к периодическому углу вращения плоскости поляризации света в магнитооптическом элементе 1.

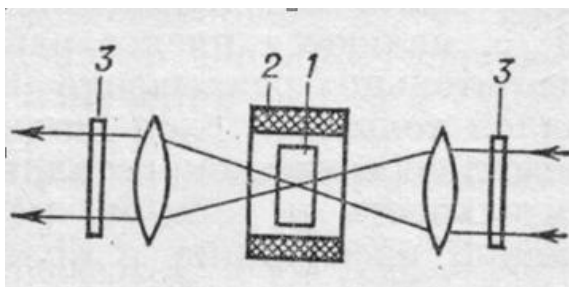


Рис. 4.7. Магнитооптический модулятор света. 1-магнитооптический элемент. 2-катушка. 3-поляризаторы.

Интенсивность света, прошедшего через такую систему равна $I = I_0 \cos^2(\varphi_0 + \theta_1 \sin \Omega t)$,

где φ_0 - угол поворота между первым и вторым поляризаторами 3, θ_1 - максимальный угол вращения плоскости поляризации в элементе, Ω -частота приложенного магнитного поля. В ферромагнетиках эффект Фарадея пропорционален намагниченности образца J_s . Форма ферромагнитного элемента в виде длинного тонкого цилиндра, намагниченного вдоль позволяет значительно уменьшить величину управляющего магнитного поля. Коэффициент удельного вращения плоскости поляризации в ИК-диапазоне постоянен. $V(\lambda) = \text{const}$.

Пример: при использовании ферромагнитного монокристаллов $Y_3F_5O_{12}$, $CrBr_3$, $RbNiF_3$ и др. примагнитных полях 10^4 А/м удается достичь глубины модуляции 40% на частотах до 200 МГц при управляющей мощности в 0,1 Вт.

4.3. Акустооптические модуляторы света

Изменение показателя преломления вещества возможно при механической деформации упругой среды (фотоупругость). Разность фаз возникает под действием механических напряжений, созданных специальным пьезовозбудителем. Разность фаз

$$\Gamma = \frac{2\pi l \Delta n}{\lambda} = \frac{\pi n^3 l p u}{\lambda}, \quad (4.8)$$

где p -упругооптический коэффициент, u -деформация среды.

Акустооптические модуляторы света на основе двулучепреломления эффективны на низких частотах. На высоких ультразвуковых частотах эффективны модуляторы света, использующие дифракцию света на ультразвуке. Если акустическая волна распространяется в оптически прозрачной среде, то она сопровождается появлением в этой среде бегущей периодической последовательностью изменения показателя преломления. Образуется структура, аналогичная дифракционной решетке. Если период этой структуры меньше ширины светового пучка, то на ней происходит дифракция света. См рис.4.8.



Рис.4.8. Схема дифракции света на звуковой волне. а) --при большом l (пространственная решетка). б) -- при малом l (плоская решетка).

При большой области взаимодействия света и звука - (рис.4.7.а) дифракционная решетка является трехмерной, характер дифракции подобен дифракции рентгеновских лучей на кристаллической решетке. Угол падения света должен быть близок к углу Брэгга, где Λ -длина волны ультразвука.

При дифракции Брегга обычно наблюдается один боковой дифракционный максимум.

При малой области взаимодействия l решетка может считаться плоской. Дифракционная картина представляет собой набор дифракционных максимумов, расположенных симметрично относительно направления падающего света (дифракция Рамана-Ната). Она происходит при любом угле падения света на ультразвуковой столб. Частота света в m -дифракционном максимуме равна $\omega + m\Omega$, где ω -частота света, Ω -частота ультразвука.

Таким образом, акустооптическое взаимодействие позволяет изменять частоту света. Фаза света в нулевом дифракционном максимуме зависит от амплитуды акустической волны: происходит перераспределение интенсивности света между нулевым и боковыми максимумами.

Практическое применение нашли модуляторы интенсивности света с бегущей и стоячей акустической волной, и пространственные модуляторы света, являющиеся основой акустооптических процессоров.

Принципиальная схема акустооптического модулятора света показана на рис.4.9.

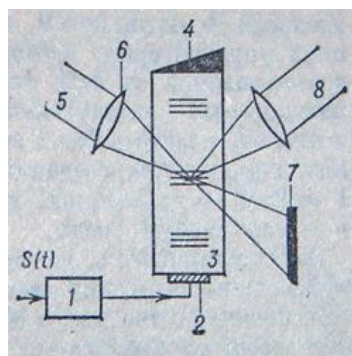


Рис.4.9. Схема акустооптического модулятора света на бегущей волне. $S(t)$ - модулирующий сигнал. 1-генератор электрических колебаний. 2-пьезопреобразователь. 3-звукопровод. 4-поглотитель. 5 -световой пучок. 6-линзы. 7-экран. 8-боковой дифракционный максимум.

4.4. Пространственные модуляторы света (ПМС)

Оптический луч способен переносить значительно больший объем информации, если осуществить пространственную модуляцию света различную в каждой точке поперечного сечения луча. Минимальные размеры площадки в поперечном сечении светового луча, способной переносить независимую информацию, ограничены вследствие дифракции света площадью $s > \lambda^2$. Информационная ёмкость пространственных модуляторов света пропорциональна площади поперечного сечения светового луча. На основе ПМС можно создать управляемые голографические транспаранты, устройства ввода и обработки информации и оперативной памяти оптических вычислительных машин.

Пространственный модулятор света -это прибор, который модулирует интенсивность света так, чтобы в каждой заданной точке она была изменена в заданное число раз. Конструктивно это плоский оптический элемент с управляемым коэффициентом пропускания интенсивности $T(x, y)$. Интенсивность прошедшего света $I_0(x, y)$ связана с интенсивностью падающего света $I_i(x, y)$ формулой $I_0(x, y) = I_i(x, y)T(x, y)$. В пространственном модуляторе коэффициент пропускания является управляемым в различных точках, например, электрическим сигналом $T(x_i, y_i, E(x_i, y_i))$ $i = 1, 2, 3...$

Основным элементом ПМС является слой, обладающий продольным электрооптическим эффектом. На его поверхности записывается определенный потенциальный рельеф. Проходящий через этот слой, широкий пучок света оказывается промодулированным в каждой точке поперечного сечения, в соответствии с потенциальными рельефом, записанным на поверхности. При этом в зависимости от направления поляризации света его модуляция может быть амплитудной или фазовой.

Принципиальная схема ПМС с оптической записью информации приведена на рис.4.10. На оптически прозрачной подложке размещают электрооптический и фотопроводящий слои, разделенные диэлектрическим зеркалом. Снаружи располагаются прозрачные электроды, к которым приложено постоянное напряжение. В отсутствие света это напряжение приложено к к фотослою, обладающему высоким темновым сопротивлением. Падающий слева свет уменьшает сопротивление фотопроводника, и напряжение в освещенной точке оказывается приложенным к электрооптическому слою. Таким образом, изображение, проецируемое слева на модулятор, создает пространственный рельеф на электрооптическом слое. Падающий справа свет используется для считывания информации.

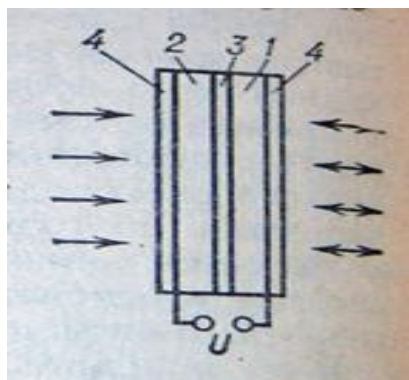


Рис.4.10. Пространственный модулятор света с оптической записью информации. 1-электрооптический кристалл, 2- фотопроводник. 3-диэлектрическое зеркало. 4-прозрачные электроды.

В качестве электрооптического слоя применяют электрооптические или жидкие кристаллы. Жидкий кристалл обладает оптической анизотропией. Диэлектрическая проницаемость вдоль оси молекул $\epsilon_{\parallel}$ и в направлении перпендикулярном оси $\epsilon_{\perp}$ различны. При наложении электрического поля молекулы стремятся повернуться так, чтобы иметь наибольшую диэлектрическую проницаемость вдоль поля. Упругие силы стремятся вернуть их в исходное положение. Показатель преломления ЖК в электрическом поле меняется. Полуволновое напряжение в ЖК составляет несколько вольт. Характерное время электрооптического переключения ЖК составляет 10^{-3} с.

Достоинствами ЖК ПМС являются низкое рабочее напряжение и удовлетворительное разрешение 60-100 линий / мм. малая толщина слоя жидкого кристалла 2-50 мкм.

Недостатки — высокая чувствительность к температуре, малое время хранения записанной информации и большое время записи.

Применение. ПМС используются для преобразования некогерентного изображения в когерентное, для сложения и вычитания изображений, выделения движущейся части изображения.

4.5. Оптроны [1,2]

Оптрон- оптоэлектронный прибор, состоящий из оптического излучателя и фотоприемника, объединенных один с другим в оптические и электронные связи и помещенных в общем корпусе.

Физическую основу работы оптрона составляют процессы преобразования электрического сигнала в оптические в излучателе и оптических сигналов в электрические в фотоприемнике, а также передача этих сигналов по оптическим каналам и электрическим цепям. Излучателем в оптроне обычно служит светодиод на основе $AlGaAs$ или $GaAsP$, материалом оптического канала — прозрачные полимеры, стекла, волоконные световоды, воздух. В цепи электрической связи могут дополнительно включаться микросистемные блоки.

Типы связей между излучателем и фотоприемником определяют функциональные возможности оптрона. На рис.4.11.а) показана схема прямой электрической связи прибор с оптическим входом и оптическим выходом.

Обеспечивающий преобразование излучения например из инфракрасного в видимое. На рис.4.11.б) показана прямая оптическая связь электрических входа и выхода играющая роль гальванической развязки. На рис.4.11.в) показан регенеративный оптрон с прямой электрической и положительной обратной оптической связью. На рис.4.11.г) оптрон с открытым оптическим каналом связи. На рис.4.11.д) оптрон с управляемый оптическим каналом связи.

Наибольшее распространение получили *оптопары* –оптроны с прямой оптической связью рис.4.11.б). Они обладают полной гальванической развязкой входа и выхода, высокой электрической прочностью, однонаправленностью потока информации по оптическому каналу, отсутствие обратного воздействия фотоприемника на излучатель, широкая полоса пропускания, большой срок службы. Малые габариты и масса. К выходу оптрона подключают усилители и преобразователи фотосигналов, обычно в интегральном исполнении.

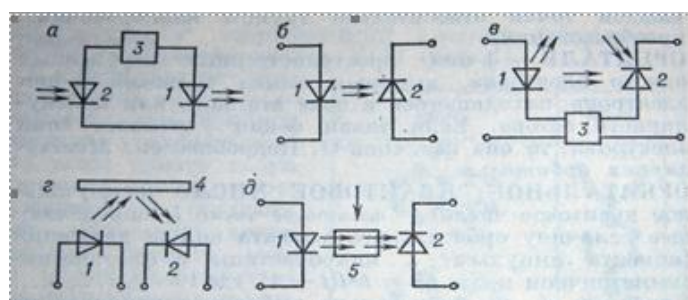


Рис.4.11. Электрические и оптические связи в оптронах. 1-излучатель. 2-фотоприемник. 3-микроэлектронный блок. 4-отражатель. 5- управляемая оптическая среда.

На рис.4.12. показан пример конструкции диодной оптопары. В качестве фотоприемника используется фотодиод на основе кремния, излучателем служит инфракрасный излучающий диод с длиной волны 1 мкм.

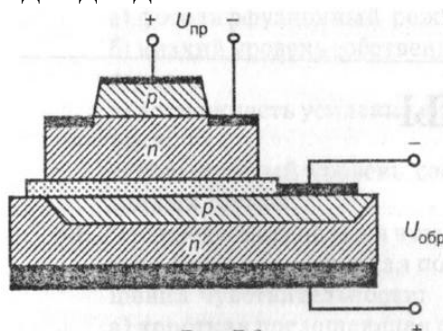


Рис.4.12. Диодно-диодный оптрон с внутренней оптической связью. [2]

Литература

- 1.Б.Салех, М.Тейх Оптика и фотоника принципы и применения. Учеб пособие. В 2 т., Т.2. –Долгопрудный: Изд. Дом «Интеллект»,2012.-784 с. Цв вкл. С.384; с.152, с.402.
- 2.Игнатов А.Н. Оптоэлектроника и нанофотоника: учебное пособие.- СПб.: Изд-во «Лань»,2011,-544 с.
- 3.В.А. Миличко, и др. Солнечная фотовольтаика: современное состояние и тенденции развития.// УФН, т.186, №8, с.801-852, 2016 г.

4. Кирчанов В.С. Наноматериалы и нанотехнологии. Пермь. Изд-во ПНИПУ. 2016. 241 с.

Глава 5 ОПТИКА НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД

5.1. Волоконный световод (ВС)

Световод (волновод оптический) - закрытое устройство для направленной передачи света.

Волоконный световод (ВС) - представляет собой длинную гибкую нить из оптически прозрачного материала. Сердцевина нити с радиусом a_1 имеет показатель преломления. В зависимости от назначения световода диаметр сердцевин составляет от нескольких мкм до сотен мкм. Диаметр оболочки от нескольких десятков мкм до тысячи мкм. Оболочка радиуса a_2 имеет показатель преломления n_2 меньший n_1 . Число типов колебаний (мод), которые могут распространяться по ВС пропорционально квадрату диаметра сердцевин и разности показателей преломления сердцевин и оболочки $\Delta n = n_1 - n_2$. Уменьшая произведение $4a_1^2 \Delta n$ получаем одномодовый режим.

Распространены три типа ВС многомодовые, со ступенчатым профилем показателя преломления, одномодовые, и многомодовые с градиентным профилем показателя преломления. См рис.5.1.

В одномодовых ВС обычно $2a_1 \approx 5 \div 10 \text{ мкм}$ (для ближнего инфракрасного диапазона), в многомодовых – несколько десятков до нескольких сотен мкм. Разность $\Delta n \approx 1 \div 2\%$ для многомодовых световодов, для одномодовых – несколько долей процента.

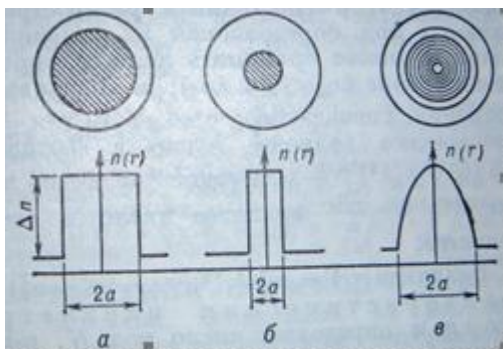


Рис.5.1. Поперечное сечение и профиль показателя преломления посечению световодов а) многомодовый ступенчатый. б) одномодовый ступенчатый. в) многомодовый градиентный волновод (градиент).

5.1.1. Характеристики волоконных световодов

Важнейшие характеристики: оптические потери, дисперсия групповой скорости, оптическая нелинейность и механическая прочность.

Минимальные возможные оптические потери составляют $\approx 0,16 \text{ Дб/км}$ для волны $\lambda = 1,55 \text{ мкм}$. Материалом служит кварцевое стекло, различие показателей преломления сердцевин и оболочки служит легирование стекла фтором, германием, фосфором.

Потери в волоконном световоде:

-К фундаментальным механизмам оптических потерь в кварцевых стеклах относятся поглощение, обусловленное электронными переходами на длине волны 0,8 мкм, которое не превышает 1 Дб/км.

-ИК-поглощение обусловленное колебаниями решетки. Оно составляет несколько Дб/км при длинах волн $>1,8$ мкм.

-Релевское рассеяние света на неоднородностях состава и плотности стекла меньших длины волны. На длинах $\lambda = 0,8 \text{ мкм}$ не превышает нескольких Дб/км.

Таким образом, наибольшей прозрачностью кварцевое стекло имеет в диапазоне 0,8--1,8 мкм см. рис.5.2

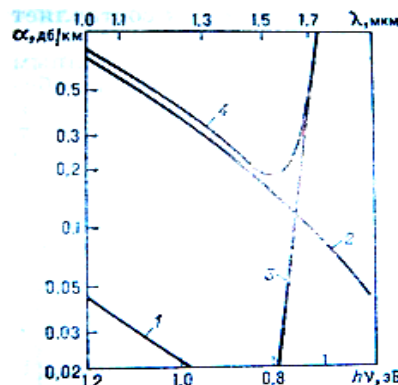


Рис.5.2. Спектральные зависимости оптических потерь в кварцевом стекле, легированном германием. Кривые обозначены цифрами: 1-поглощение, обусловленное электронными переходами. 2-релевское рассеяние. 3-поглощение, обусловленное колебаниями решетки. 4-суммарные потери.

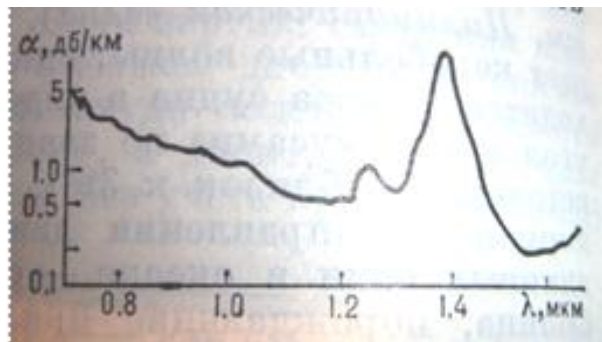


Рис.5.3. Спектр оптических потерь одномодового волоконного световода.

Для одномодового кварцевого световода кривая дисперсии групповой скорости проходит через нуль вблизи $\lambda \approx 1,3 \text{ мкм}$. В этом диапазоне информационная полоса пропускания одномодовых волоконных световодов максимальна и составляет $\approx 10^{11} \text{ Гц} \cdot \text{км}$. См. рис.5.3-4.

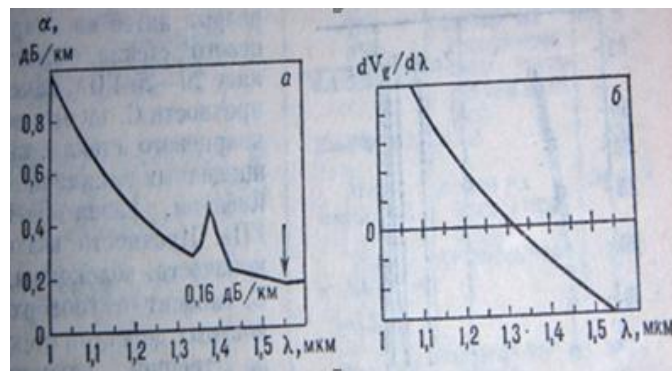


Рис.5.4. а) Спектр оптических потерь. Минимальные возможные потери составляют 0,16 Дб/км на волне 1,55 мкм, показано вертикальной стрелкой. б) График зависимости дисперсии групповой скорости от длины волны.

Оптическая нелинейность в стеклянных волноводах возникает из-за зависимости показателя преломления от интенсивности лазерного излучения $n = n_0 + n_3 I$. Вследствие изотропии материала сердцевины стеклянных волноводов младший нелинейный член в разложении по полю – кубический. Нелинейная поляризация $P_n = \chi^{(3)} EEE$. Нелинейный показатель преломления $n_3 = \frac{2\pi}{n} \chi^{(3)} \approx 10^{-13}$ в системе CGSE. В Системе СИ $n_3 = 3,2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2 / \text{Вт}$. Уменьшение диаметра сердцевины до 10 мкм и низкие оптические потери позволяют поддерживать высокую интенсивность излучения порядка $10^{10} \text{ Вт} / \text{см}^2$ на длинах световода порядка 1 км. 1-ая стоксова компонента вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) наблюдается при мощности накачки в несколько сотен милливатт. Спектр комбинационного рассеяния в кварцевых стеклах широк и с помощью дисперсионного элемента можно получать перестройку частоты порядка 300 см^{-1} .

Нелинейным эффектом, имеющим практическое применение, является солитонный режим распространения оптических импульсов. В волоконном световоде в спектральной области отрицательной дисперсии групповой скорости при $\lambda > 1,3 \text{ мкм}$ см рис.5.4. В идеальном световоде без потерь оптический солитон распространяется без изменения формы.

Теоретическая механическая прочность ВС из кварцевого стекла на разрыв составляет 20-25 ГПа. Для покрытых полимерной пленкой 5-6 ГПа. Покрытые герметичной металлической пленкой лабораторные образцы 12-15 ГПа. См рис.5.5.

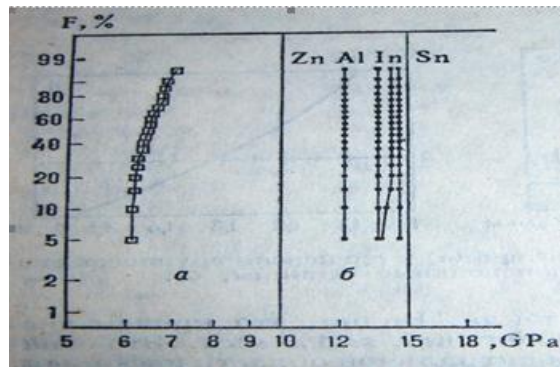


Рис.5.5. Функции распределения прочности волоконных световодов на основе кварцевого стекла. а) С полимерными покрытиями. б) С металлическими покрытиями. Наиболее прочным является покрытие оловом.

5.1.2. Технология изготовления и применения световодов

Волоконные световоды изготавливаются методом химического осаждения из газовой фазы. В качестве исходных материалов используют кислород и хлориды кремния, германия фосфора и др. Получаемая заготовка диаметром 20-30 мм и длиной 400-1000 мм перетягивается в волоконный световод диаметром 100 мкм с одновременным нанесением на него защитно-упрочняющей оболочки. К новым методам относятся вытягивание из расплава нитевидных кристаллов или экструзия (выталкивание) поликристаллических волоконных световодов.

Для передачи изображений применяются жгуты с регулярной укладкой ВС. Разрешающая способность таких жгутов определяется диаметром сердцевины световода, числом волокон и составляет 10-50 линий на 1 мм в поперечнике. Широкое применение получили волоконно-оптические диски, вырезанные поперек из плотно спеченных ВС. Такие диски, на внутреннюю поверхность которых наносится люминофор, используются в электроннолучевых трубках вместо входного стекла. Это дает возможность контактно фотографировать. Высококачественные вакуум-плотные волоконные диски диаметром до 150 мм, содержащие несколько сотен миллионов ВС, обладают разрешающей способностью до 100 линий на 1 мм^2 .

Для интегральной оптики разработаны планарные волноводы-световоды, в виде тонкой пленки, толщиной порядка длины волны, нанесенную на подложку. Условие волноводного режима заключается в том, что показатель преломления пленки больше показателей преломления подложки и среды над волноводом. Диэлектрический световод изготавливают методом катодного распыления материала волновода на подложку, методом эпитаксиального наращивания из жидкой или газообразной фазы, методом ионной имплантации.

5.1.3. Специальные волноводы. Фокон, градан, сельфок

Оптика неоднородных сред -- раздел физической оптики, где изучаются явления, сопровождающие распространение оптического излучения в оптически неоднородных средах, показатель преломления которых не постоянен, а зависит от координат.

Характер явления и методы их исследования существенно зависят от характера изменения n масштаба неоднородностей по сравнению с длиной волны

света λ . Оптическими неоднородностями являются поверхности или объемы внутри среды, на которых изменяется показатель преломления n . Независимо от природы неоднородности она всегда отклоняет свет от его первоначального направления. На поверхностях, разделяющих среды с различными n , происходят отражение света и преломление света.

В среде с непрерывно изменяющимся n , когда относительное изменение n на расстояниях, сравнимых с λ очень мало (градиентная среда). Световой луч, задаваемый величиной градиента $grad S = n \frac{d\vec{r}}{dS}$, в каждой точке поверхности $S(x, y, z)$ меняет направление в зависимости от неоднородностей пространства, что приводит к его искривлению (рефракции).

Кривизна луча при этом равна

$$n\vec{c} = grad n - \frac{\partial n}{\partial S} \cdot \frac{\partial \vec{r}}{\partial S} \quad (5.1)$$

и луч загибается в область с большим показателем преломления n .

В градиентнооптической среде уравнение эйконала имеет вид

$$(grad S)^2 = n^2(x, y, z) \quad (5.2)$$

Его решение позволяет определить волновые поверхности $S(x, y, z)$ и ортогональные к этой поверхности лучи $\vec{r}(x, y, z)$.

Из этого уравнения получается соотношение для траектории светового луча

$$\frac{d}{dS} \left(n \frac{d\vec{r}}{dS} \right) = grad n(x, y, z) \quad (5.3)$$

Это уравнение допускает ряд частных решений, удовлетворяющих принципу «абсолютного прибора».

Абсолютным прибором называется оптическая система, дающая стигматическое т.е. резкое без аббераций (искажений) изображение трехмерного предмета.

Фокон (фокусирующий конус) – конусообразный единичный ВС или жгут из спеченных вместе ВС с плоскими торцами используется для изменения масштаба передаваемого изображения, или концентрации света в оптической системе с малой угловой апертурой.

Градан (Грин) Gradient index – оптический элемент из прозрачного материала с определенным законом распределения коэффициента преломления n .

Простым примером абсолютного прибора является сферический градан с распределенным показателем преломления по радиусу (линза Луненберга.)

$$n(r) = n_0 \sqrt{2 - \left(\frac{r}{r_a} \right)^2} \quad (5.4)$$

В этом случае неоднородная сфера собирает каждый падающий пучок параллельного света в единый фокус.

В приборе – «рыбий глаз» Максвелла отображение осуществляется преобразованием инверсии

$$n(r) = \frac{n_0}{1 + \left(\frac{r}{a}\right)^2}. \quad (5.5)$$

Для аксиальной симметрии принципу абсолютного прибора удовлетворяет градан с распределением $n(z)$, зависящим от формы сферической поверхности. Этот градан эквивалентен по абберациям асферической линзе.

При радиальной симметрии принципу «абсолютного прибора» удовлетворяет распределение обратного гиперболического косинуса:

$$n(r) = \operatorname{sech}(gr) = \frac{1}{\operatorname{ch}(gr)} = 1 - \frac{g^2 r^2}{2!} + \frac{5}{4!} g^4 r^4 - \dots \quad (5.6)$$

В этом случае неоднородная среда соответствует периодически фокусирующему

волноводу с длиной периодичности $L = \frac{2\pi}{g}$, где $g = \frac{1}{R} \sqrt{2 \frac{\Delta n}{n}}$ – постоянная распространения, R – радиус волновода, $\Delta n = n_0 - n(R)$ – перепад показателя преломления по сечению волновода.

Радиальные граданы в виде цилиндрического отрезка с таким распределением n эквивалентны линзе, свободной от аббераций, фазовых и амплитудных искажений. Варьируя длину отрезка, можно менять фокусное расстояние и получать в одном элементе объектив и оборачивающую систему.

Оборачивающая система – оптическая система, предназначенная для поворота изображения на 180° вокруг оптической оси.

Сельфок – (радиальный градан) безоболочечный одножильный многомодовый световод способен самостоятельно формировать и транслировать изображение. В нем все возбуждаемые моды имеют равные скорости распространения. В практически реализованных сельфоках на основе кварцевого стекла с параболическим распределением показателя преломления вида

$$n(r) = n_0 (1 - g^2 r^2 / 2) \quad (5.7)$$

Он соответствует первым двум членам разложения гиперболического секанса (5.6) в диапазоне 1,26-1,32 мкм. В диапазоне 1,26-1,32 мкм, где дисперсия стекла близка к нулю, скорость передачи информации на расстоянии 1 км составляет 13,8 Гбит км/сек. Такие сельфоки, состоящие из одного световода, способны передавать изображение, как целое, с разрешающей способностью 500 лин/мм, с сохранением фазы, плоскости поляризации и малыми потерями 1 Дб/км. Длина сельфоксов достигает 1 км при диаметре 100 мкм. Кроме применения для дальней оптической связи, сельфоки используются как согласующие элементы, элементы жестких эндоскопов, в медицине оптические наконечники волоконно-оптических фиброгастроскопов, используются в устройствах для оптического контроля глубоких скважин.

Технология получения сельфоксов

Заданный градиент показателя преломления в граданах из стекол получают под действием потоков нейтронов ($\Delta n = 0,02$). Другой путь – это различные модификации ионного обмена, когда замена в матрице стёкол одних ионов на

другие приводит к изменению её плотности и соответственно меняется n ($\Delta n = 0,04$).

Граданы из полимеров получают в результате обмена мономеров в частично заподимеризованной матрице. Для них достигнуты максимальные ($\Delta n = 0,1$) при диаметре 100 мм.

Возможно получение граданов при направленном выращивании кристаллов с ($\Delta n = 0,04$) диаметром до 20 мм.

Кроме конденсированных сред возможно использование в роли граданов газовых линз, возникающих при ламинарном течении через равномерно нагретые трубы. Градиентные среды возникают под действием мощного лазерного излучения и приводят к самофокусировке света.

На микрооднородностях, показатели преломления которых отличаются от показателя преломления окружающей среды, происходит рассеяние света. Оптически неоднородными являются мутные среды.

5.2. Мутные среды

Мутные среды - среды в которых распространения света сопровождается значительным рассеянием, влияющим на условия распространения, вследствие чего нарушается прозрачность среды. Рассеяние света в среде происходит на оптических неоднородностях. Это установлено Л.И. Мандельштамом в 1907 г. Среда может быть мутной вследствие неоднородности структуры. Наличие в ней посторонних макроскопических частиц и включений (дымы, туманы, облака, коллоидные растворы). В мутных средах оптические неоднородности распределены хаотически.

Задача рассеяния:

1. Определить поле, рассеянное отдельным элементом мутной среды, предполагая внешнее поле, в котором находится внешний элемент, суперпозицией облучающего поля и поля, создаваемого всеми остальными элементами тела.

2. Просуммировать действие все элементов (частиц) тела.

Длина волны λ сравнивается с линейными величинами:

d - Расстояние между элементами (молекулами, микровключениями внутри частицы).

a - Размер частиц.

l - Среднее расстояние между центрами частиц в мутной среде.

R - Размер мутной среды.

Конкретная задача и метод её решения определяются величинами четырех безразмерных параметров.

$$x_1 = d / \lambda, x_2 = a / \lambda, x_3 = l / \lambda, x_4 = R / \lambda.$$

Параметры удовлетворяют очевидным неравенствам

$$x_1 < x_2 < x_3 < x_4, \quad x_4 \gg 1, \quad x_1 \ll 1.$$

Если параметр $x_3 \gg 1$, т.е. расстояние между частицами много больше длины волны, $l \gg \lambda$ то отдельные частицы среды рассеивают свет некогерентно. Задача

сводится к анализу однократного рассеяния на частице, которое зависит от размера частицы $x_2 \gg 1$, например, песок в нефти.

Четыре параметра достаточны для классификации мутных сред в поле бесконечно плоской когерентной волны. Реальные пучки частично когерентны. Их рассеяние зависит от длины когерентности и возникает пятый параметр $x_5 = r / \lambda$. *Длина когерентности* $r = \lambda^2 / \Delta\lambda$, где $\Delta\lambda$ -спектральная ширина излучаемой линии.

5.3. Интегральная оптика

Интегральная оптика – раздел современной оптики, изучающий процессы генерации, распространения и преобразования света в тонкопленочных диэлектрических волноводах, а также разработку принципов и методов создания на единой подложке (интеграция оптических и оптоэлектронных устройств (лазеров, модуляторов, дефлекторов, переключателей).

Основой интегральных оптических устройств являются планарные волноводы (тонкопленочные и диффузионные.).

Планарные волноводы—световоды, в виде тонкой пленки, толщиной h порядка длины волны λ , нанесенную на подложку. Диэлектрический световод изготавливают методом катодного распыления материала волновода на подложку, методом эпитаксиального наращивания из жидкой или газообразной фазы или методом ионной имплантации.

Диффузные или градиентные волноводы отличаются плавным распределением показателей преломления по сечению. В этих волноводах нет четко выраженной границы между волноводным слоем и подложкой. Изготавливаются они диффузией каких-либо примесей в подложку.

Локализация света в волноводе обусловлено полным внутренним отражением на граничных поверхностях. Условие волноводного режима заключается в том, что показатель преломления пленки больше показателей преломления подложки и среды над волноводом. Энергия в волноводе распространяется в виде волноводных мод. Моды характеризуются определенным распределением электромагнитного поля по сечению волновода и собственными значениями

волнового вектора $k = \frac{2\pi n^*}{\lambda}$, Параметр $n^* = n_0 \sin \theta$, где θ -угол падения луча на отражающую среду, определяющий фазовую скорость поверхностной волны, играет роль показателя преломления для данной волны.

В диэлектрическом волноводе с заданными параметрами показателей преломления диэлектрического волновода n_0 , подложки n_1 , среды над волноводом n_2 и толщины h волновода существует конечное число волноводных мод, определяемое дискретным рядом значений n_m^* ($m = 1, 2, 3 \dots M$). Чем выше порядок m поверхностной волны тем меньше её эффективный показатель преломления и тем сильнее она проникает из пленки в подложку.

В тонкопленочных волноводах определяющую роль играет волноводная дисперсия.

Волноводная дисперсия - это зависимость показателя преломления для данной волны от относительной толщины пленки kh . Для поверхностной волны m -го порядка существует критическая толщина пленки, критическая частота и длина волны. С увеличением m на 1 критическая толщина пленки возрастает на $\frac{\lambda}{2} \sqrt{n_0^2 - n_1^2}$. При превышении критических параметров волноводный режим отсутствует.

Нелинейные оптические явления в оптических микроволноводах возникают при больших значениях напряженности электрического поля даже при небольшой мощности возбуждения. Толщина волноводной пленки порядка длины волны, поэтому плотность световой энергии в оптическом микроволноводе достигает $10^5 \div 10^6 \text{ Вт/см}^2$ по всей длине взаимодействия даже от маломощных газовых лазеров $\sim 10^{-1} \div 10^{-2} \text{ Вт}$.

В оптических микроволноводах фазовый синхронизм взаимодействующих мод возможен за счет волноводной дисперсии. Для разных мод одной поляризации. Это позволяет использовать для нелинейных взаимодействий изотропные среды с большой нелинейной восприимчивостью. Для эффективного нелинейного преобразования необходима достаточная величина интеграла перекрытия полей взаимодействующих мод. Для нелинейных преобразований применяются титан-диффузные волноводы в ниобате лития.

Широко применяется генерация второй гармоники для передачи ИК-излучения гетеролазера в видимое излучение. Процесс генерации второй гармоники представляется как связь двух волноводных мод равных частот и значений волновых векторов с одной из мод удвоенной частоты и значением волнового вектора. Условия синхронизма имеют вид

$$\omega + \omega = 2\omega, \quad k_\omega + k_\omega = k_{2\omega}, \quad (5.8)$$

с учетом $\lambda_{2\omega} = \lambda_\omega / 2$ и $k_\omega = 2\pi n_\omega / \lambda_\omega$, получаем важное условие для условия синхронизма:

$$n_\omega = n_{2\omega}. \quad (5.9)$$

Для пленки ZnS толщиной 0,314 мкм выращенной на подложке ZnO отклонение толщины пленки Δh составляет всего 0,006 мкм (2%).

5.3.1. Активные элементы интегральной оптики

Модуляторы, переключатели, сканеры используются для управления параметрами лазерной волновой моды. Это амплитуда, фаза, поляризация моды. Принцип работы этих устройств основан на изменении показателя преломления материала микроволновода под действием электрического или магнитного полей, или упругой деформации. Наибольшее распространение получили электрооптические и акустооптические устройства управления светом. Они основаны на брегговской дифракции на фазовых решетках, индуцируемых электрическим полем или акустоповерхностными волнами.

5.3.2. Технология интегральной оптики

Наиболее важным является получение волноводных слоев и формирование требуемой конфигурации планарных элементов.

Волноводные слои получают нанесением на подложку пленок из другого материала, либо увеличением показателя преломления приповерхностных слоев подложки радиационным, химическим, термическим или другим воздействием. Для нанесения пленок используют методы термического и катодного распыления. При создании монокристаллических слоев применяются различные способы эпитаксиального выращивания. Повысить показатель преломления приповерхностного слоя можно за счет ионообменной диффузии, электродиффузии, имплантации ионов. Применяются методы получения волноводов путем термодиффузии из напыленной на подложку металлической пленки.

Для формирования требуемой конфигурации отдельных планарных элементов и составленных из них оптических интегральных узлов применяется фотолитография. Для создания монокристаллических схем интегральной оптики применяют полупроводниковое соединения, монокристаллы диэлектриков, ниобат и танталат лития широко используются для изготовления различных типов интегрально-оптических модуляторов, дефлекторов, переключателей, акустооптических устройств обработки информации.

Литература

- 1.Маркузе Д. Оптические волноводы. Пер англ м.1974г.
- 2.Ильин В.Г. и др Оптика градиентов в книге Успехи научной фотографии. Т23, М1985 г.
- 3.Содха м.С. Гхатак А.К. Неоднородные оптические волноводы пер. М.1980 г.
- 4.Ильин В.Г. и др. Оптика градиентов УФН 1985 т.23,с106.
- 5.Moore D. GRIN-4: gradient index optical imaging systems “Applied Optics” 1984v.23,p.1699.
- 6.Marchand E.W. Gradient index optics N.Y. 1978.
- 7.ПарыгинВ.Н. Балакший В.И. Оптическая обработка информации. М. 1984.
- 8.Гауэр Д. Оптические системы связи М. 1989
- 9.Хинрикус Техника оптической связи . Фотоприемники. М.1988.
- 10.Б.Салех,М.Тейх Оптика и фотоника принципы и применения. Учеб пособие. В 2 т., Т.1. –Долгопрудный: Изд. Дом «Интеллект»,2012.-784 с.
- 11.Игнатов А.Н. Оптоэлектроника и нанофотоника:Учебное пособие.-СПб.: Изд-во «Лань»,2011,-544 с.
- 12.Кирчанов В.С. Наноматериалы и нанотехнологии. Учеб пособие. –Пермь: Изд-во Перм.нац. исслед.ун-та. 2016.-241 с.

Глава 6 ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

6.1. Волоконно-оптические системы связи [1,2]

Волоконно-оптические компоненты--оптические волокна, источники для оптических передатчиков, оптические усилители, детекторы для оптических приемников являются основными элементами волоконно-оптических систем связи.

Волоконно-оптические системы связи состоят из оптических линий и сетей. Сеть связи включает набор линий связи, соединяющих множество пользователей, распределенных по географической области.

Оптическая линия связи (двухточечное коммуникационное соединение) состоит из компактного источника света, модулируемого электрическим сигналом, оптического волокна с низкими потерями и малой дисперсией и фотоприемника, преобразующего оптический сигнал обратно в электрический (см. Рис.6.)¹ Фотоприемники рассмотрены в главе 3.

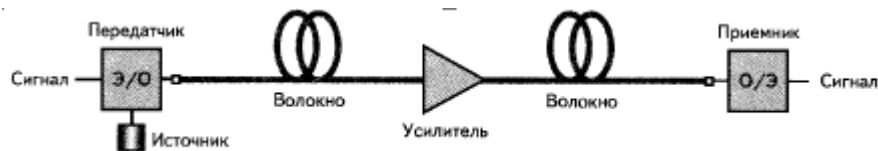


Рис.6.1. Аналоговая оптическая волоконная система связи. Электрический сигнал преобразуется в оптический сигнал путем модуляции источника света. Оптический сигнал передается по волокну, проходит через усилитель к приемнику. Приемник преобразует оптический сигнал обратно в электрический.[1]

Другие оптические элементы: сращивание оптических волокон, коннекторы, разветвители, коммутаторы и мультиплексоры также необходимы для работы оптических линий и сетей. Оптические волокна с фотоннокристаллической структурой рассмотрены в [4.с.195]. Оптические потери магистрального оптического волокна в настоящее время составляют 0,2 дБ/км.

Мультиплексер – оптическое устройство объединяющее несколько спектральных каналов с длинами волн $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ в один оптический канал (WDM wavelength division multiplexing) число спектральных каналов может достигать 40.

Демультиплексер – оптическое устройство разъединяющее оптические каналы на спектральные.

В когерентных оптических системах связи свет используется не как носитель управляемой мощности, а как электромагнитная волна с управляемой амплитудой, фазой или частотой. Эти системы являются естественным обобщением радиочастотных и микроволновых систем связи на оптический диапазон. Они существенно увеличивают чувствительность приема сигналов, увеличивают расстояние между ретрансляторами и повышают скорость передачи данных.

6.2. Волноводные оптические усилители и лазеры [3]

Оптические усилители применяются как усилители мощности, усилители на линии и предусилители. Усилители мощности повышают оптическую мощность перед закачкой её в оптическое волокно. Усилители на линии поддерживают уровень сигнала при передаче его по волокну. Предусилители обеспечивают усиление перед фотоприемником. Мы рассмотрим оптические волоконные усилители и волоконные ВКР усилители, как наиболее подходящие для волоконной связи.

Существует два типа оптических усилителей лазерного типа полупроводниковый (SOA semiconductor optical amplifier) и волоконный эрбиевый (EDFA) или празеодимовый (PDFA Praseodymium Doped fiber Amplifiers).

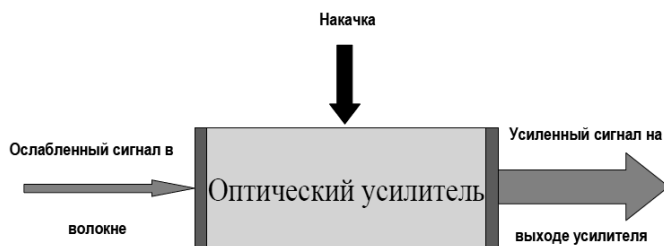


Рис.6.2. Оптический усилитель основан на принципах работы лазера[5]

Полупроводниковые оптические усилители

Полупроводниковые оптические усилители (ПОУ) для передачи в ближней инфракрасной области изготавливаются на основе InGaAsP, InGaAs. Они имеют малые размеры, компактны и интегрируются с другими полупроводниковыми компонентами. Источник питания -- электрический ток. ПОУ применяются как нелинейно-оптические устройства и оптические переключатели, редко в качестве усилителей на линии.

Характеристики:

Относительно высокое усиление 15 Дб

Предел выходной мощности 5-10 Дб/м,

Широкий рабочий диапазон. 1300-1600 нм телекоммуникационная полоса.

Работают в области 0,8 , 0,9 ,1,0 ,1,3 ,1,5 нм

Ширина полосы усиления $\Delta\lambda = 50 \text{ нм}$ в частотном диапазоне $\Delta\nu = 10 \text{ ТГц}$ при $\lambda_0 = 1300 \text{ нм}$.

Используются как преобразователи длин волн.

Несколько усилителей могут объединяться в массив.

Недостатки:

Высокий фактор шума.

Температурная зависимость длин волн

Большие перекрестные потери.

Несовместимость с геометрией оптоволокон.

6.2.1. Волоконный усилитель легированные эрбием (EDFA)

Полупроводниковый оптический усилитель с множественными квантовыми ямами конструируется в виде оптического волновода. Работает на основной оптической моде с повышением выходной насыщающей мощности. Использует прямое содинение в стык с одномодовым волокном. Пример: Усилитель с квантовыми ямами из InGaAsP/InP длиной 1 см, работающий на длине волны 1550 нм, обеспечивает усиление «волокно-волокно» в 13 дБ.

Эрбиевый волоконный усилитель используется в оптических линиях связи с большим спектральным уплотнением. Ионы эрбия возбуждаются длинами волн 514, 532, 667, 800, 980 и 1480 нм. Усилители работающие в диапазоне 1525-1565 нм называются C-band --усилители. В диапазоне 1568-1620 нм L-band -усилителями. Преимущества эрбиевых усилителей:

- Возможность одновременного усиления сигналов с разными длинами волн.
- Прямое усиление оптических сигналов без преобразования в электрический сигнал и обратно.
- Практически точное соответствие рабочего диапазона усиления области минимальных оптических потерь световодов из кварцевого стекла.
- Низкий уровень шума и простота включения в волоконно-оптические системы передачи.
- Высокая выходная мощность,

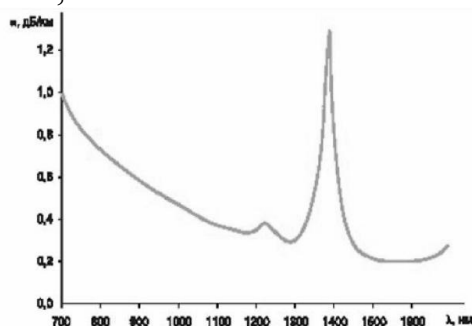


Рис.6.3. Оптические потери кварцевого волокна. Окно 1170 нм область работы полупроводниковых усилителей.[3]

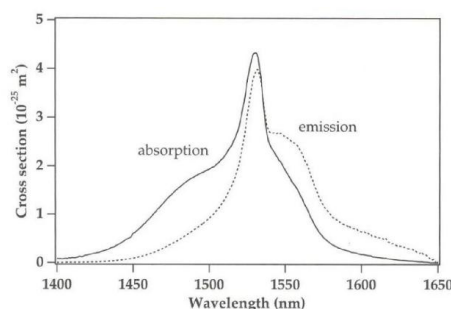


Рис.6.4 Спектры сечений излучений и поглощений эрбиевого волокна.

Сплошная линия –кривая поглощения. Пунктирная линия –кривая вынужденного излучения.[3]

Сечение вынужденного излучения эрбия имеет достаточные значения до 1600 нм, а сечение поглощения быстро падает, что позволяет использовать этот диапазон (1570 -1610 нм) для усиления сигналов. Стандартный диапазон усиления составляет 1530-1560 нм. См рис.6.4.

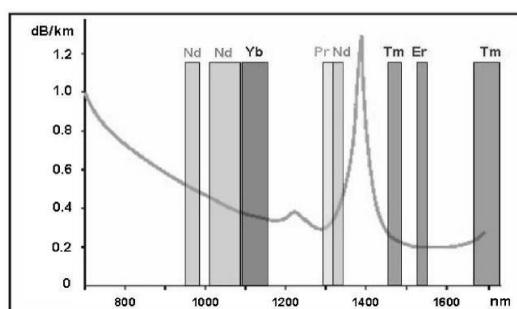


Рис.6.5 Оптические потери кварцевого волокна –коричный пик максимальные потери.

Диапазон работы усилителей на основе редкоземельных ионов (лантаноидов): Nd-неодим, Yb-иттербий, Pr-празеодим, Tm-тулий, Er-эрбий.[3]

Эрбий Er - мягкий серебристый металл с гексагональной плотнейшей упаковкой кристаллической структуры. Температура плавления 1522°C . Ферромагнетик. Радиус иона Er^{+3} 85 пикометров (10^{-12} м). Компонент магнитных сплавов, входит в состав ферритов и специальных стекол.

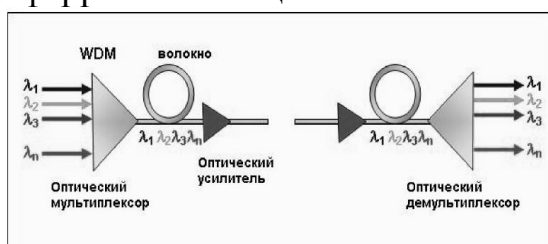


Рис.6.6. Топология оптической сети с эрбиевым оптическим усилителем.[3]

Энергетическая трехуровневая схема усилителя основана на переходах трехвалентного иона эрбия Er^{+3} в кварцевом стекле (SiO_2) между уровнями $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$. Уровни иона эрбия расщепляются на подуровни внутркристаллическим полем стекла за счет эффекта Штарка. Основной уровень $^4I_{15/2}$ имеет 8 подуровней, метастабильный уровень $^4I_{13/2}$ имеет 7 подуровней, возбужденный уровень 4 подуровня. Ширина между штарковыми подуровнями порядка тепловой энергии $\sim kT$. см рис.5.7. $^{2S+1}L_J = ^4I_{15/2}$ - терм многоэлектронного иона. Сильная jj-связь. Вектор полного момента электрона: $\vec{J}_i = \vec{L}_i + \vec{S}_i$, $\vec{J} = \sum_{i=1}^N \vec{J}_i$ - суммарный полный момент $J = \frac{15}{2}$ - полное квантовое число атома. $2S+1=4$ - мультиплетность атома.

Коротковолновая накачка с длиной волны 980 нм осуществляется с основного уровня на возбужденный уровень, где ион имеет время жизни 1 мкс, затем безызлучательным переходом переходит на метастабильный уровень. Здесь ионы накапливаются за время жизни 10 мсек. Длинноволновая накачка с длиной волны 1480 нм переводит ионы эрбия с основного уровня сразу на метастабильный уровень.

Мощность накачки, при которой населенности основного и метастабильного уровня равны называется пороговой мощностью. При этом возникает «просветление» активного волновода (потери становятся нулевыми).

Условия усиления ослабленного сигнала в сердцевине волокна с ионами эрбия возникает, когда половина ионов находится на метастабильном уровне и возникает инверсия населенности (превышение числа ионов на метастабильном уровне над основным). Вынужденное излучение происходит в диапазоне 1520 нм - 1570 нм. См.рис.6.7.

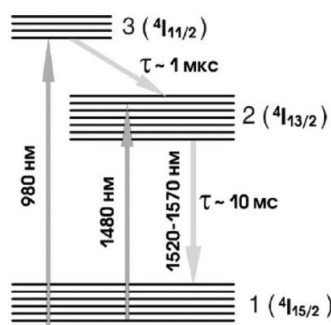


Рис. 6.7 Упрощенная энергетическая схема уровней энергии иона эрбия Er в кварцевом стекле.[3]

Конструктивно эрбиевый волоконный усилитель состоит:

- из источника оптической накачки 980 нм,
- соединительного устройства –спектрального мультиплексера соединяющего канал накачки 980 нм и канал полезного сигнала 1550 нм,
- активированного эрбием волокна длиной 5-8 м с концентрацией эрбия $\approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$,
- Двух оптических изоляторов на концах усилителя. См рис.6.8.

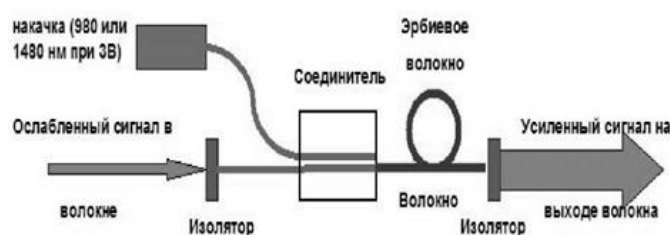


Рис.6.8 Эрбиевый волоконный усилитель состоит из лазерной накачки, соединителя, активированного эрбием кремниевое волокна и двух оптических изоляторов на концах.[6]

На рис.6.9 изображена упрощенная схема эрбиевого волоконного усилителя для попутного направления подключения источника накачки.



Рис.6.9. Упрощенная схема эрбиевого волоконного усилителя накачка в попутном направлении[3]

Первый оптический изолятор подавляет отраженный от соединителя сигнал обратно в линию. Второй изолятор подавляет отраженный сигнал обратно в активированное волокно. Лазер накачки помещен в блок размером $20 \times 15 \times 8 \text{ мм}^3$ и подсоединен одномодовым волокном к усилителю. Мощность накачки составляет от 100 мВт до 250 мВт. В многомодовых усилителях накачка осуществляется светодиодом мощностью до 1Вт.

Преимущества волноводного усилителя

- 1.Плоский профиль спектра усиления.
- 2.Рабочий диапазон эрбиевого усилителя случайно совпадает с диапазоном минимальных оптических потерь кварцевого волокна.

3. Низкий уровень шумов.

Оптический эрбиевый волоконный усилитель EDFA усиливает сигнал в инфракрасном диапазоне 1,53 -1,58 мкм. Коэффициент усиления составляет 10 Дб/мВт.см рис.5.10.

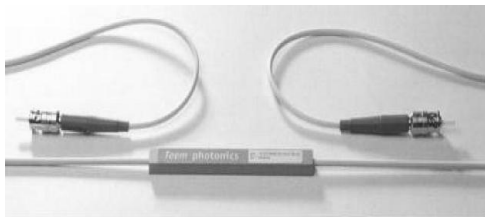


Рис.6.10. Волоконный эрбиевый оптический усилитель[3]

Существует также коммерческий планарный оптический эрбиевый усилитель длиной 5-8 см, с концентрацией эрбия в волноводе $10^{20} - 10^{21}$ ионов / см³. (EDWA сокращенно от Erbium doped waveguide amplifier).см рис.6.11.

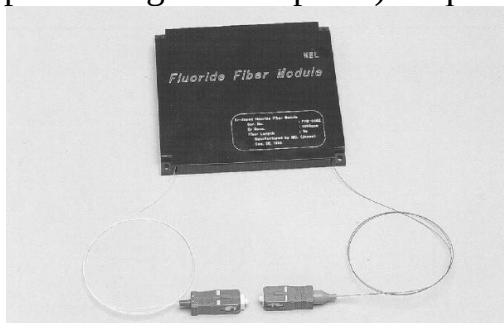


Рис.6.11. Планарный эрбиевый оптический усилитель[3]

Особенности технологии

Усилительной средой является эрбиево волокно волоконного световода. Технология такая же, как при изготовлении световода для информационного сигнала.[6]. Дополнительной операцией является пропитка не проплавленного материала сердцевины световода раствором солей эрбия. Или добавляется операция легирования ионами эрбия из газовой фазы непосредственно в процессе осаждения сердцевины. Волноводные параметры эрбиевого волокна световода специально делают сходными с параметрами обычного световода для уменьшения потерь при соединении.

Принципиальным является выбор легирующих добавок, формирующих сердцевину активного световода и подбор концентрации ионов эрбия. Добавки меняют характер спонтанного расщепления, что изменяет спектры излучения и поглощения. Верхний предел концентрации активных ионов определяет возникновение нелинейного тушения люминесценции (или кооперативной ап-конверсии).

При большой концентрации возникают кластеры из двух ионов эрбия. В возбужденном состоянии за счет обмена энергией один ион переходит в ещё более высокоэнергетическое состояние, другой безизлучательно релаксирует на основной уровень. Возникает паразитное поглощение энергии накачки.

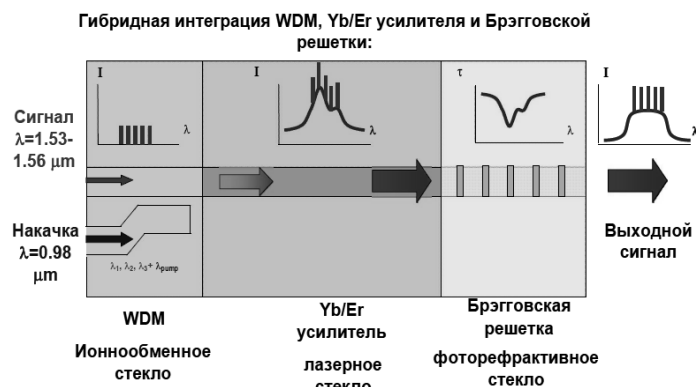
При низкой концентрации энергии увеличивается длина световода, что не удобно при изготовлении и экономически не выгодно. Обычно концентрация ионов эрбия составляет $10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$, что приводит к длине активного световода от нескольких метров до нескольких десятков метров.

Планарный эрбиевый оптический усилитель с береговой решеткой применяется для сглаживания спектра усиления. В схему усилителя вводят спектрально селективные поглощающие фильтры. Примером фильтра является фотоиндуцированная длиннопериодическая решетка (long-period grating).

Технология изготовления

Пространственно периодическое облучение сердцевины световода через его поверхность. Решетка с периодом в диапазоне 0,1 -1 мм обеспечивает резонансное взаимодействие фундаментальной моды с модами оболочки. Часть энергии основной моды волоконного световода с резонансной длиной волны преобразуется в энергию оболочечных мод с последующим их затуханием.

Спектр и интенсивность поглощения задаются периодом решетки и временем облучения световода. Сглаживающие фильтры уменьшают вариацию коэффициента усиления до нескольких долей Дб в пределах рабочего диапазона. См рис.6.12.



волны и совместимость с существующими системами являются преимуществом ВКР-усилителей.

6.3. Нанополяризаторы [5-8]

Нанополяризатор (англ. panowire-grid polarizer) — синтетический объемный или пленочный композитный материал, обладающий анизотропией пропускания и/или отражения, обусловленной структурой его компонент.

Объемные поляризаторы для ближнего инфракрасного диапазона изготавливаются из стекла, содержащего металлические наночастицы вытянутой формы, ориентированные вдоль некоторой оси. Поляризаторы Polar Cor производства компании Corning, США изготавливаются из боросиликатного стекла, содержащего анизотропные наночастицы серебра, а в поляризаторах производства фирмы HOYA Corp., Япония, вместо частиц серебра используются частицы меди.

Недавно разработано два типа пленочных поляризационных материалов, использующих различные механизмы создания анизотропии отражения [1-3]. В пленочном поляризаторе, разработанном компанией NanoOpto Corporation (США), используется анизотропия отражения от металлического зеркала, изготовленного в виде периодической решетки нанометрового размера (см. рис.6.13).

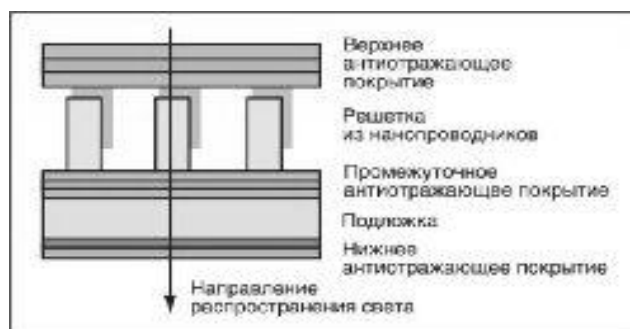


Рис.6.13. Металло-диэлектрический нанополяризатор представляет собой решетку периодически расположенных (с периодом порядка ста нанометров) нитевидных проводников на поверхности диэлектрика. Излучение, поляризованное так, что электрическое поле параллельно нитевидным проводникам, отражается от наноструктуры, а излучение, поляризованное ортогонально нитям, проходит через наноструктуру почти без потерь. [9]

Пленочный поляризатор, созданный фирмой Photonic Lattice Inc. (Япония), использует анизотропию отражения от гофрированной многослойной диэлектрической пленки, структура которой показана на рис. 6.14.

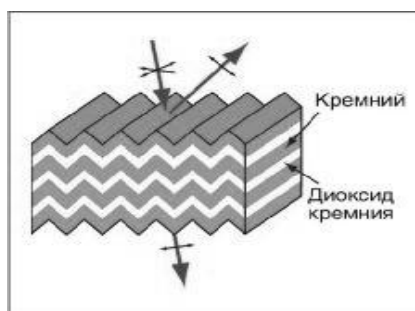


Рис.6.14. Диэлектрический отражательный нанополяризатор представляет собой гофрированную многослойную диэлектрическую пленку. В качестве материалов с большим и малым показателями преломления используются кремний (Si) и его двуокись (SiO_2).[9]

Принцип действия поляризаторов на основе многослойных структурированных пленок основан на том, что периодические диэлектрические структуры обладают двулучепреломлением формы. Это значит, что эффективный показатель преломления слоев зависит от поляризации света. При этом спектр отражения многослойного диэлектрического зеркала зависит от значений показателей преломления в слоях. Следовательно, если из анизотропных структур создать многослойное покрытие, то спектр отражения такого зеркала будет обладать сильной анизотропией. Спектры пропускания типичного многослойного диэлектрического зеркала на основе периодической наноструктуры для двух ортогональных поляризаций приведены на рис.6.15. Отметим, что многослойная структурированная пленка фактически является анизотропным одномерным фотонным кристаллом.

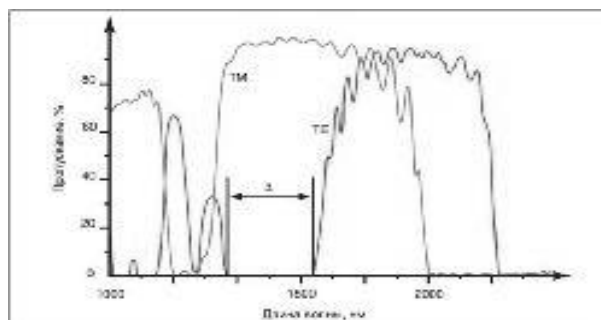
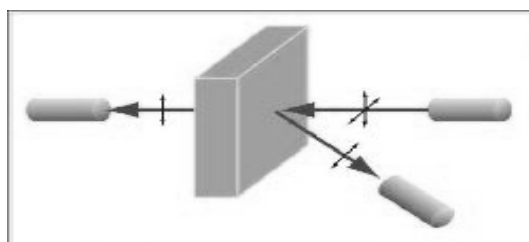


Рис.6.15. Типичный спектр пропускания многослойной периодической наноструктуры. Δ - рабочий спектральный диапазон поляризатора на основе такой структуры (показан двойной стрелкой). TE - волна с ориентацией электрического вектора перпендикулярно плоскости падения. TM - волна с ориентацией магнитного вектора перпендикулярно плоскости падения.[9]

Принцип работы поляризаторов на основе металлических линейных наноструктур (линейных решеток) основан на резком уменьшении коэффициента отражения от такой структуры для излучения с ориентацией вектора электрического поля, перпендикулярной штрихам решетки. Линейные решетки с металлическими «штрихами» используются в качестве поляризаторов еще со времен первых опытов Герца по изучению электромагнитных волн. Ранее такие устройства использовались только в радиодиапазоне электромагнитных волн. Если линейная решетка состоит из тонких проводящих штрихов с периодом меньше длины волны, то такая структура принципиально по-разному действует на световые волны, поляризованные вдоль штрихов и перпендикулярно им. Если световые волны поляризованы вдоль штрихов, то решетка ведет себя как сплошная металлическая поверхность, а если световые волны поляризованы перпендикулярно штрихам, то решетка ведет себя как диэлектрик.

Применение поляризаторов

Поляризаторы широко используются в пассивных и активных компонентах современных волоконно-оптических систем связи. Они пропускают линейно-поляризованное излучение с направлением электрического поля, совпадающим с направлением оси пропускания, и блокируют компоненту с ортогональной поляризацией (см. рис.6.16). Если блокируемая компонента не поглощается, а отражается, то устройство может выполнять функции поляризационного делителя или объединителя световых пучков.



. Рис.6.16. Прохождение светового пучка через поляризатор. Справа на поляризатор падает неполяризованное излучение, однако через поляризатор проходит только излучение, поляризованное вдоль оси пропускания поляризатора. Излучение ортогональной поляризации может быть направлено по другому пути. В этом случае поляризатор превращается в делитель светового пучка. Если направление всех лучей изменить на противоположное, то устройство будет работать как объединитель поляризованных пучков. [9]

Литература

- 1.Б.Салех,М.Тейх Оптика и фотоника принципы и применения. Учеб пособие. В 2 т, Т.2. –Долгопрудный: Изд. Дом «Интеллект»,2012.-784 с.
- 2.Игнатов А.Н. Оптоэлектроника и нанофотоника:Учебное пособие.-СПб.: Изд-во «Лань»,2011,-544 с
3. Никоноров Н.В. Шандаров Н.В. Волноводная фотоника. СПб, СПб ГУ ИТМО 2008 г.-142 с.
4. Кирчанов В.С. Наноматериалы и нанотехнологии. учебн. пособие, Пермь:Из-во ПНИПУ, 2016.-241с.
- 5.Павлова Е.Г. Поляризаторы на основе пленочных наноструктур и их применение в волоконно-оптических системах связи // Lightwave Russian Edition - № 3, 2006 - С. 49–52
- 6.Wang J.J. et al. Innovative high performance nanowire-grid polarizers and integrated isolators // IEEE j. of Selected Topics in QE.- vol. 11, 2005 - pp. 241–253
- 7.Tyan R., Sun P. et al. Polarizing beam splitter based on the anisotropic spectral reflectivity characteristic of form birefringent multilayer gratings // Opt. Lett. - vol. 21, 1996, - pp. 761–763
- 8.Taylor M., Bucher G. High contrast polarizers for the near infrared // Proc. SPIE, Polarization Considerations for Optical Systems II - vol. 1166, 1989 - pp. 446–453.
9. Lightwave Russian Edition, 2006, № 3, с. 49,50.

Глава 7 ТЕХНОЛОГИИ НАНОПЛАЗМОНИКИ

7.1. Плазмоника

Плазма твердых тел состоит из ионов, атомов, совершающих малые колебания относительно положений равновесия, и подвижных носителей заряда — электронов, совершающих движение в самосогласованном поле. Плазма типичных металлов — сильно вырожденная электронная ферми-жидкость. Электроны движется в условиях сильного взаимодействия с ионами кристаллической решетки, формирующего их энергетический спектр, и столкновениях с примесями и дефектами кристаллической решетки. Концентрация носителей заряда велика в металлах $10^{22} \div 10^{23} \text{ см}^{-3}$. Плазма в среднем электрически нейтральна. За счет флуктуаций в ней возникают плазменные колебания.

7.1.1. Плазмоны

Термин плазмон применяется для описания продольных коллективных колебаний электронов в плазме (смеси электронов и ионов). При возникновении флуктационного разделения зарядов, электроны сместились на величину x . Возникло однородное электрическое поле с напряженностью $E = enx$. Уравнение движения электрона под действием силы $F = eE$ принимает вид $\ddot{x} + \omega_p^2 = 0$, решение которого являются гармонические колебания с *плазменной частотой*

$$\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 n}{m}}.$$

Для описания этих колебаний заряда вводят квазичастицу — квант плазменных колебаний называемую *плазмоном* с энергией $\hbar\omega_p(q)$ и импульсом $\hbar\vec{q}$, где $\vec{q}$ — волновой вектор. Плазмоны в металлах самые высокоэнергетические возбуждения. *Плазмоны* (волны электронной плотности) возникают в твердых телах (*объемные плазмоны*) или вблизи их поверхности в результате коллективных колебаний электронов проводимости относительно ионов.

У границы проводник—вакуум возникает *поверхностный плазмон* — возбуждение, затухающее в глубь среды, частота которого в $\sqrt{2}$ раз меньше частоты объемного плазмона ω_p . Дисперсия этих плазмонов определяется зависимостью частоты от двумерного волнового вектора $\vec{q}_{\parallel}$, лежащего в плоскости поверхности. Поверхностный плазмон содержит продольную составляющую электрического поля, лежащую на поверхности и поперечную составляющую электрического поля, нормальную к поверхности. *Поверхностные плазмоны* — это кванты колебаний плотности свободных электронов металла, распространяющиеся только вдоль его границы с диэлектриком или вакуумом.

7.1.2. Плазмонный резонанс [1,2,3]

Плазмонный резонанс (англ. plasmon resonance) — возбуждение поверхностного плазмона на его резонансной частоте внешней электромагнитной волной (в случае наноразмерных металлических структур называется локализованным плазмонным резонансом). Плазмонный резонанс может происходить в отдельных частицах и кластерах, так и в протяженных поверхностях различной геометрии.

Технический прием, позволяющий использовать поверхностные плазмоны в оптике, основан на использовании полного внутреннего отражения. При полном внутреннем отражении, вдоль отражающей свет поверхности, распространяется электромагнитная волна, скорость которой зависит от угла падения. Если при определенном угле падения скорость этой волны совпадет со скоростью поверхностного плазмона на поверхности металла, то условия полного внутреннего отражения нарушатся, и отражение перестанет быть полным, возникнет *поверхностный плазмонный резонанс* (Surface Plasmon Resonance, SPR). При этом частота колебаний падающего света совпадает с собственной частотой колебаний свободных электронов вблизи поверхности металлической частицы, и наблюдается резкое увеличение амплитуды колебаний электронной плазмы. SPR сопровождается существенным поглощением света в видимой части спектра. Длина волны, на которой наблюдается максимум пика поглощения зависит от металла наночастицы (*Ag, Au, Cu*) её размера и формы.

Экспериментальное наблюдение плазмонов с помощью оптического микроскопа на поверхности образца из золота[3]. На рисунке 7.1. показан «портрет» резонансно усиленных плазменных колебаний на поверхности макроскопического образца золота. Образец освещался белым светом с помощью лампы подсветки оптического микроскопа. Различные градации зеленого и красного цветов (полосы и линии темной окраски) соответствуют излучающим резонансам различных по размерам дефектов поверхности, работающих в режиме резонансных рассеивателей.

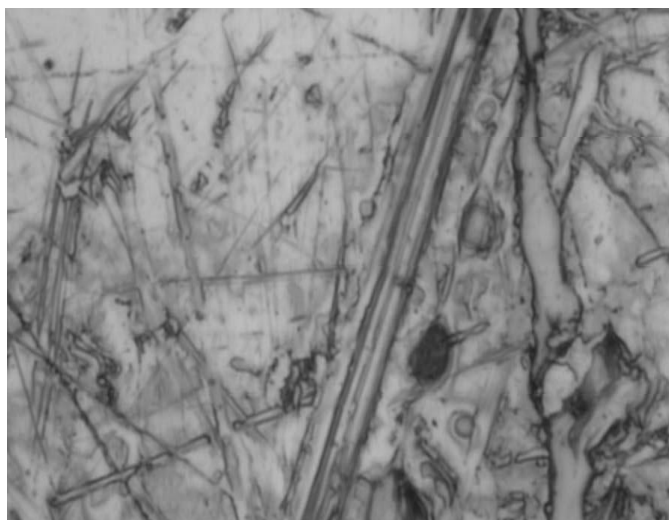


Рис.7.1. Плазмонный резонанс на статистически неровной поверхности. Пояснения к рисунку и сам рисунок заимствовано из лекции Серебrenникова А.М. [3].

7.2. Наноплазмоника [4,5,6]

Наноплазмоника — составная часть нанофотоники, занимающаяся исследованием оптических свойств и явлений, возникающих при колебаниях электронов проводимости в металлических наноструктурах и наночастицах, и взаимодействием этих колебаний со светом, атомами и молекулами. Характерной

чертой плазмоники, отличающей её от электродинамики и оптики является масштаб явлений много меньший длины волны в вакууме.

Наноплазмоника изучает явления, связанные с колебаниями электронов проводимости в металлических наноструктурах и наночастицах и взаимодействие этих колебаний со светом, атомами и молекулами, с целью создания сложных оптических наноплазмонных устройств.

Важная особенность явлений в наноплазмоне — сочетание сильной пространственной локализации электронных колебаний с высокой частотой этих колебаний (от ультрафиолетового диапазона до инфракрасного). Сильная локализация приводит к гигантскому увеличению локальных оптических и электрических полей.

Эти свойства плазмонных наночастиц позволили обнаружить ряд новых эффектов:

- Гигантские локальные поля вблизи наночастиц приводят к увеличению сечения комбинационного рассеяния на 10-14 порядков, что позволяет обнаруживать отдельные молекулы.

- Наличие локальных полей дает возможность определять структуру ДНК без прикрепления к ней маркеров.

- Используя сложную структуру спектров плазмонных частиц можно одновременно усиливать поглощение и испускание света наночастицами, и создавать эффективные флуорофоры и наноразмерные источники света.

- Плазмонные наночастицы можно использовать для стимулированного усиления плазмонных колебаний в наночастицах оптическим излучением.

- Благодаря очень малым размерам металлических наноструктур и оптическому быстродействию, происходящих в них процессов, наноплазмоника позволит создать новую элементную базу для оптических компьютеров и устройств обработки данных.

Для реализации этой идеи сначала должны появиться плазмонные устройства, аналогичные традиционным транзисторам (приборам для усиления, генерирования и преобразования электрических колебаний), из которых можно будет собирать сверхбыстрые сигнальные процессоры.

В наноразмерных металлических системах происходит модификация коллективных электронных возбуждений. Коллективное электронное возбуждение металлических наночастиц, размер которых меньше длины волны электромагнитного излучения в окружающей среде — *локализованный поверхностный плазмон*, — колеблется на частоте, меньшей частоты объемного плазмона в $\sqrt{3} = 1,732$ раз, тогда как частота поверхностного плазмона примерно в $\sqrt{2} = 1,414$ раз меньше, чем частота объемного плазмона. При совпадении частоты внешнего поля с частотой локализованного поверхностного плазмона возникает резонанс, приводящий к резкому усилению поля на поверхности частицы и увеличению сечения поглощения.

Свойства локализованных плазмонов критически зависят от формы наночастиц, что позволяет настраивать систему их резонансов на эффективное взаимодействие со светом или элементарными квантовыми системами (молекулами, квантовыми точками).

В настоящее время явление поверхностного плазмонного резонанса широко применяется при создании химических и биологических сенсоров (биосенсоров). При контакте с биообъектами (ДНК, вирусы, антитела) плазмонные эффекты позволяют более чем на порядок увеличить интенсивность сигналов флуоресценции, то есть значительно расширяют возможности обнаружения, идентификации и диагностики биологических объектов.

7.2.1. Плазмонный нанолазер [19]

Фундаментальной проблемой в интеграции фотонных устройств является проблема локализации света и создание нанолокализованных лазерных источников излучения. Новым подходом в миниатюризации лазеров является использование плазмонных полей вместо фотонных. Существует два вида поверхностных плазмонных мод пригодных для создания нанолазера: 1) локализованные плазмоны на поверхности металлических частиц и 2) плазмоны, которые распространяются по поверхности раздела металл-диэлектрик.

Поверхностные плазмоны возбуждаются при помощи направленного к поверхности металла лазерного луча. При определенных условиях (точно подобранном угле лазера, варьировании толщины, химического состава соприкасающихся поверхностей и проч.) плазмонные волны могут колебаться с той же частотой, что и внешние электромагнитные, но обладают длиной волны, намного меньше длины оптических электромагнитных волн.

Плазмонный нанолазер является (хотя бы в одном измерении) квантовым генератором нанолокализованных когерентных плазмонных полей.

Основными элементами плазмонного нанолазера являются активная среда, источник накачки активной среды и резонатор. Активная среда служит для возбуждения плазмонов в моде резонатора. См рис.7.2. Существует три типа резонаторов плазмонных колебаний: 3D-резонатор для локализованных поверхностных плазмонов на поверхности наночастиц, 2D-резонаторы для поверхностных плазмонов, распространяющихся по плоской поверхности, 1D-линейный резонатор.

Преимущество нанолазера состоит в генерации когерентного, локализованного в наноразмере, сильного электромагнитного поля. Это поле эффективно возбуждает в ближней зоне квантовые излучатели (атомы, молекулы, квантовые точки).



Рис.7.2. Схема передачи энергии возбуждения от активной среды в плазмонную моду нанолазера.[19]

Использование нанолазеров позволяет усилить взаимодействие между фотоникой и электроникой.

Идея плазмонного нанолазера впервые была выдвинута Сударкиным и Демковичем в 1989г.[19]. Теоретические обоснование такого устройства были изложены в 2003 году Стокманом Бергманом (*SPASER* — Surface Plasmon Amplification of Stimulated Emission of Radiation, т.е. усиление стимулированного излучения поверхностными плазмонами) [19]. Существуют различные способы его изготовления с использованием полупроводниковых квантовых точек и металлических частиц. Энергию излучения квантовых точек нужно будет преобразовать в плазмоны, которые будут усиливаться в плазмонном резонаторе. Поскольку плазмоны, созданные спазером, будут сфокусированы намного лучше, чем обычный луч лазера, устройство сможет потреблять минимальное количество энергии и селективно возбуждать очень маленькие объекты.

Спазер –квантово-плазмонный прибор, состоящий из инверсно возбужденных двухуровневых квантовых точек или молекул, окружающих плазмонные наночастицы. Принцип действия спазера –это усиление, обеспеченное инверсной заселенностью, вместе с обратной связью, создаваемой индуцированным излучением квантовой системы. Условие для индуцированного излучения обеспечивается помещением квантовой системы в резонатор, локализирующий генерируемую моду.

Роль фотонов играют поверхностные плазмоны, их локализация на наночастицах играет роль резонатора, создавая условия для реализации обратной связи. В спазере происходит генерация и усиление ближнего поле наночастиц. Усиление поверхностных плазмонов происходит за счет безизлучательной передачи энергии от квантовой точки. В основе процесса лежит сильное диполь-дипольное взаимодействие квантовой точки и плазмонной наночастицы.

Спазер является автоколебательной системой, как и лазер. Автоколебания - это незатухающие колебания в диссипативной динамической системе с нелинейной обратной связью. Эти колебания поддерживаются за счет энергии постоянного внешнего воздействия. Дипольный момент системы совершает автономные колебания, частота и амплитуда которых определяется балансом между накачкой и диссипацией.

Плазмонные материалы для резонаторов

Основными материалами для резонаторов являются благородные металлы, обладающие минимальными потерями. Омические потери, обусловленные электронами проводимости, возникают за счет электрон- электронного взаимодействия, электрон-фононного взаимодействия и рассеяния электронов на дефектах решетки и границах зерен. Потери, вызванные связанными электронами, возникают при поглощении фотона на межзонном переходе и переходе электрона в возбужденное состояние. Межзонные переходы являются источником значительных потерь в металлах в оптическом диапазоне.

Серебро *Ag*-основной плазмонный материал имеет минимальные потери в видимой и ближней инфракрасной области. Золото *Au* химически инертно и

создает нанопленки менее 10 нм. Оно следует за серебром по величине минимальных потерь в ближней инфракрасной зоне более 600 нм, имеет значительные потери при 470 нм. Медь *Cu* расположена после серебра по электрическому сопротивлению. Диэлектрическая проницаемость меди подобна диэлектрической проницаемости золота при длинах волн более 600 нм. Медь легко окисляется. Алюминий *Al* превосходит по оптическим свойствам серебро и золото в «голубой» и ультрафиолетовой области спектра. Алюминий имеет отрицательную действительную часть диэлектрической проницаемости при длинах волн меньше 200 нм. *Al* обладает значительными потерями на межзонных переходах 800 нм.

К другим плазмонным материалам относятся прозачные проводящие оксиды и нитриды переходных металлов. оксид индия-олова и окись цинка *ZnO*, легированная галлием *Ga* проявляют металлические свойства при длинах волн больше 1,3 мкм. Окись цинка, легированная алюминием, металлизруется при длине волны больше 1,8 мкм (потери меньше чем в серебре в 4 раза при этом диапазоне). Нитрид титана и нитрид циркония *ZrN* проявляют металлические свойства в видимом диапазоне длин волн больше 500 нм. Плазмонные свойства *TiN* сравнимы со свойствами *Ag*, *Au* в этом диапазоне.

Мнимое значение комплексной диэлектрической проницаемости материала $\varepsilon = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2$ отвечает за потери. Малое значение ε_2 можно достичь при малой концентрации носителей заряда. Это достигается легированием полупроводника или уменьшением концентрации носителей заряда в металле путем внедрения неметаллических частиц.

Идеальный плазмонный материал, с уменьшением потерь на несколько порядков, можно достичь уменьшением расстояния между атомами металла в решетке в два раза, путем допирования атомов с замкнутыми электронными оболочками для экранирования электростатического поля.

Для реального применения в оптических компьютерах будущего, потребуются найти эффективные механизмы его «электрического сопряжения» с полупроводниками без использования внешней лазерной накачки.

Устройство спазера

3D плазмонный нанолазер (спазер) – это устройство, которое генерирует локализованные поверхностные плазмоны. Локализованные плазмоны играют роль фотонов в лазере, а металлическая наночастица выполняет роль резонатора спазера. На рис.7.3 показаны две изученные конфигурации 3D-спазера а) конфигурация с усиливающей средой в центре металлической частицы (конфигурация нанооболочки и б) конфигурация наночастицы.

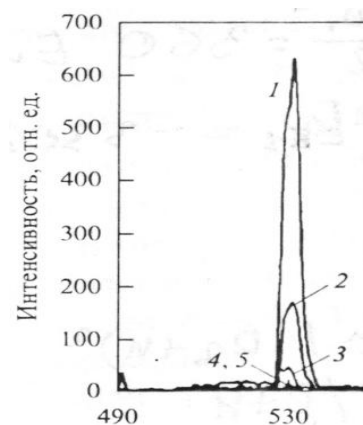
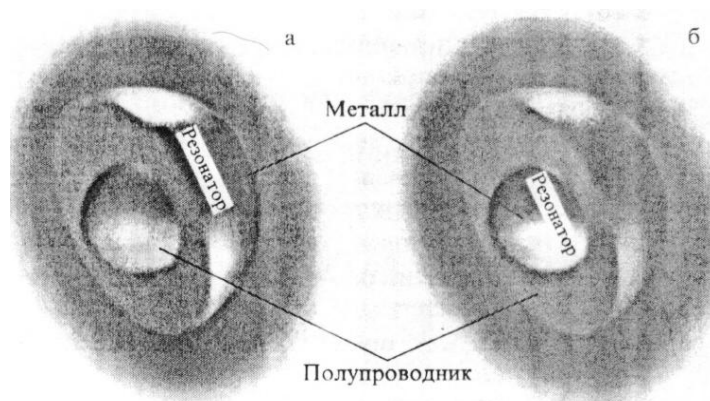


Рис.7.3 а) Конфигурация 3D-спазера с усиливающей средой(полупроводник) в центре металлической наночастицы. б) Конфигурация 3D-спазера с активной средой вне металлической наночастицы.

Рис.7.4.Спектр 3D-спазера при различных уровнях накачки активной среды: 22,5мДж,(1); 9мДж(2); 2 мДж (4).530 нм –длина волны .[19]

Простейшим 3D- резонатором для спазера является наночастица из благородного металла погруженная в среду с диэлектрической проницаемостью (См.рис.7.3.). Разработанный группой Ногинова с соавторами первый действующий прототип спазера[5] внешне представляет собой одиночную золотую наночастицу сферической формы, диаметром 14 нм заключенную в кварцевую оболочку, поверхность которой была покрыта зеленым органическим красителем Oregon Green 488. Общий диаметр рабочей поверхности, которого всего 44 нм. Мода резонатора занимала объем шарового слоя толщиной 15 нм между поверхностью металлической сердцевинки внешней оболочкой. Добротность резонатора составляла 14,8. Число молекул красителя на одну наночастицу 2700. Все экспериментальные измерения проводились с ансамблем спазеров, концентрация которых в водной суспензии составляла $3 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$.

Накачка молекул красителя осуществлялась импульсным лазерным излучением наносекундной длительности. При малых уровнях накачки рис. измеряемый спектр определяется спонтанным излучением молекул красителя. При увеличении мощности накачки появляется узкий пик в спектре излучения на длине волны 531 нм, который соответствует плазмонному резонансу наночастицы. Зависимость интенсивности излучения от мощности накачки демонстрирует пороговый характер возникновения генерации спазера.

Эти расходящиеся волны излучали свет по всем направлениям, характерные пики и фронты световых волн свидетельствовали, что плазмонные колебания происходили синхронно. Излучение наночастицы было когерентным.

Наиболее исследованной формой несферических наночастиц являются наностержни. В случае наностержня управление центральной частотой плазмонного резонанса осуществляется его длиной. Так настраивают частоту плазмонного резонанса наночастицы в резонанс с частотой излучения квантовых излучателей активной среды. Размер 3D плазмонного резонатора составляет от нескольких нм до нескольких десятков нм.рис.7.5.

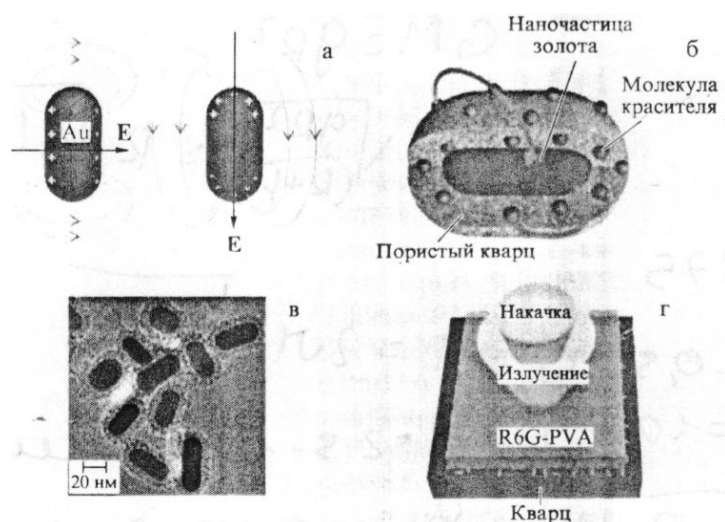


Рис.7.5. 3D-спазер на основе металлических золотых наностержней. а) Поперечные и продольные моды наностержня показаны вектором E . б) Наночастица Au, покрытая оболочкой из пористого кварца. Содержащая молекулы красителя с качестве активной среды. в) Электронная фотография монослоя частиц. г) Схема функционирования ансамбля спазеров R6G-родамин 6Ж краситель, PVA- полимер.[19]

2D- плазмонный нанолазер-это плазмонный нановолновод с активной средой в объеме плазмонной моды на гибридной наноструктуре диэлектрик-металл. См.рис.7.6. Такая наноструктура представляет собой полупроводниковый стержень, расположенный на нанометровом расстоянии от металлической поверхности. Связь между фотонной модой и диэлектрического волновода и поверхностной плазмонной волны поверхности металла формирует гибридную волну в зазоре между нановолноводом и поверхностью.

В гибридной моде основная часть энергии волны сосредоточена в неметаллическом зазоре, что при нанометровых размерах волновода и зазора обеспечивает сильную локализацию поля и одновременно большую длину распространения волны. В качестве диэлектрического волновода используют полупроводниковый усиливающий материал из-за электрохимической, фотохимической стабильности большого коэффициента усиления и возможности использовать электрическую или оптическую накачку.

Первая демонстрация 2D-плазмонного нанолазера выполнена в 2010г. [19]. Диэлектрический стержень из CdS являлся активной средой и резонатором, формирующем моды плазмонного нанолазера в продольном направлении. обратная связь в резонаторе вдоль стержня обеспечивалась отражением волны на концах наностержня из-за большой разности в коэффициентах преломления полупроводника и воздуха (резонатор Фабри-Перро). Наностержень располагался на расстоянии в несколько нанометров от металлической поверхности. Использовалась лазерная оптическая накачка на длине волны 405 нм. генерация наблюдалась на длине волны 489 нм. Поперечный размер локализации моды составлял порядка 10 нм. Плазмонный режим генерация наблюдалась при криогенной температуре образца и диаметре наностержня равном 52 нм. см. рис.7.6.

На рис.7.7. показана эволюция спектра плазмонного 2D-нанолазера со наностержнем из полупроводника InGaN, покрытого тонкой оболочкой InN, лещащего на металлической

поверхности Ag выполненной с атомарной гладкостью.при температуре 120K возникает генерация в виде небольшого пика в зеленой области .при 8K появляется узкая линия лазерной генерации длине 500 нм.

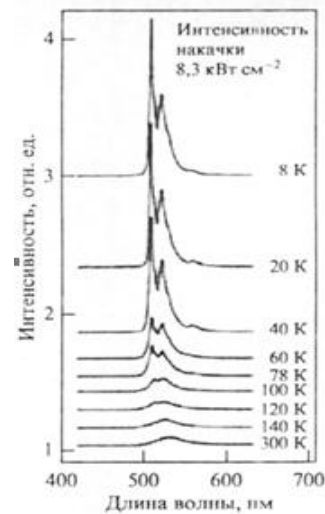
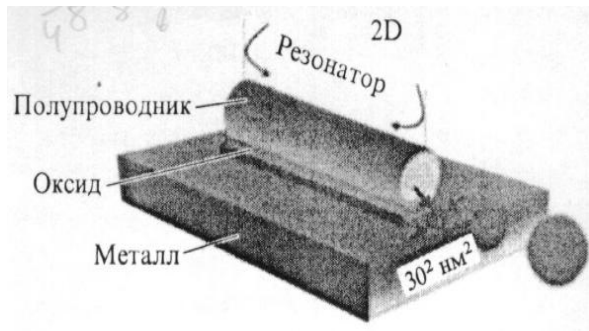


Рис.7.6. Схема 2D-плазмонного нанолазера на основе структуры диэлектрический волновод-металлическая поверхность. Наностержень является активной средой усиления волны [19].

Рис.7.7. Эволюция спектра плазмонного 2D-нанолазера на полупроводнике InGaN при изменении температуры от 8K до 300K. Пороггенерации достигался при 140K.[19]

1D-плазмонный нанолазер является одномерной планарной наноструктурой, состоящей из металлической наноструктурированной поверхности с прилегающим к ней диэлектриком. Диэлектрик действует как усиливающая среда для поверхностной плазмонной волны. Возможны планарная структура диэлектрик-металл-диэлектрик и планарная структура металл-диэлектрическая пленка-металл. Все они реализованы экспериментально.[19]. На рис.7.8. показана схема 1D-резонатора плазмонного нанолазера с обратной связью за счет полного внутреннего отражения на границах нанопленки.нанолазер образован полупроводниковым нанодиском (активная среда), расположенным на расстоянии 10 нм от металлической поверхности.

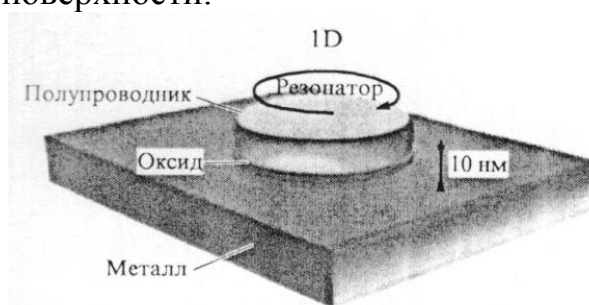


Рис.7.8. 1D- плазмонный нанолазер с дисковым резонатором.[19]

На рис.7.9 показана конфигурация нанолазера в виде металлической (Au) нанопленки-волновода, расположенной внутри усиливающей среды, с квантовыми ямами InGaAs. Длина волновода 1 мм, ширина -100 мкм. Резонатор типа Фабри-Перро образован концами металлического волновода.Импульсная оптическая накачка на длине волны $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$. Сужение линии излучения

иполроговое поведение мощности накачки говорят о возникновении режима генерации. Генерация наблюдалась при комнатной температуре и длине волны 1,46 мкм.

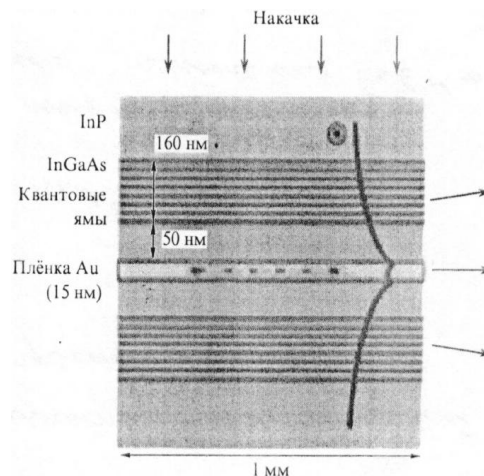


Рис. 7.9. 1D наноплазмонный лазер на основе плоского металлического волновода и активной среды, образованной квантовыми ямами *InGaAs*. [19]

На рис.7.10. показана планарная структура 1D-плазмонного нанолазера. Резонатор в виде плоского квадрата со стороной 1 мкм, толщиной 45 нм образован полупроводником *CdS* активной среды на поверхности металла *Ag*. Активная среда отделена от металла слоем изолятора *MgF₂*. здесь реализуется нановолноводная схема металл-диэлектрик-полупроводник. Формируются только плазмонные моды. На рис.7.11 в такой же схеме соответствующим выбором размера резонатора был получен одномодовый режим генерации нанолазера с шириной линии 1.1 нм.

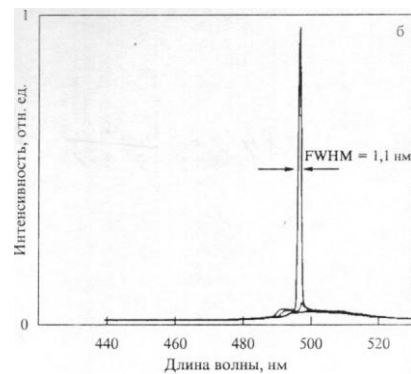
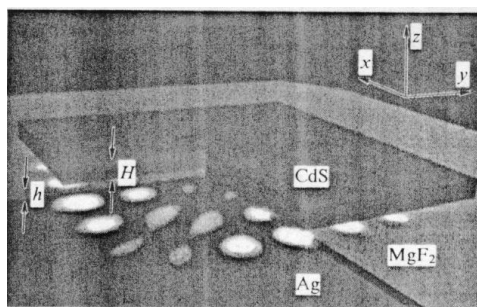


Рис.7.10. Схема 1D- плазмонного нанолазера на основе *Ag* поверхности и полупроводниковой активной среды *CdS* при комнатной температуре/ Активная среда отделена от металлической поверхности изолирующим материалом. [19]

Рис.7.11. Спектр генерации в одномодовом режиме при комнатной температуре 1D-плазмонного нанолазера на основе серебрянной поверхности и полупроводниковой активной среды. [19]

На рис.7.12.а показано схема нанолазера на основе плазмонного кристалла. Нанолазер состоит из решетки nano частиц золота на стеклянной поверхности. Покрытой слоем полимера в качестве активной среды. полимерный материал

состоит из полиуретана и молекул красителя ИК-140. Оптическая накачка фемтосекундным лазерным излучением на длине волны 800 нм. Лазерный луч накачки направлялся под углом 45° к плоскости плазмонного кристалла. Возбуждались поверхностные плазмонные поляритоны. Выходное излучение регистрировалось под нормальным углом к плоскости кристалла на длине волны $\lambda = 913$ нм со спектральной шириной $\delta\lambda = 1,3$ нм (см.рис.7.12.б). Излучение нанолазера было пространственно когерентным на площади 50×50 мкм². Нанолазер функционировал при комнатной температуре.

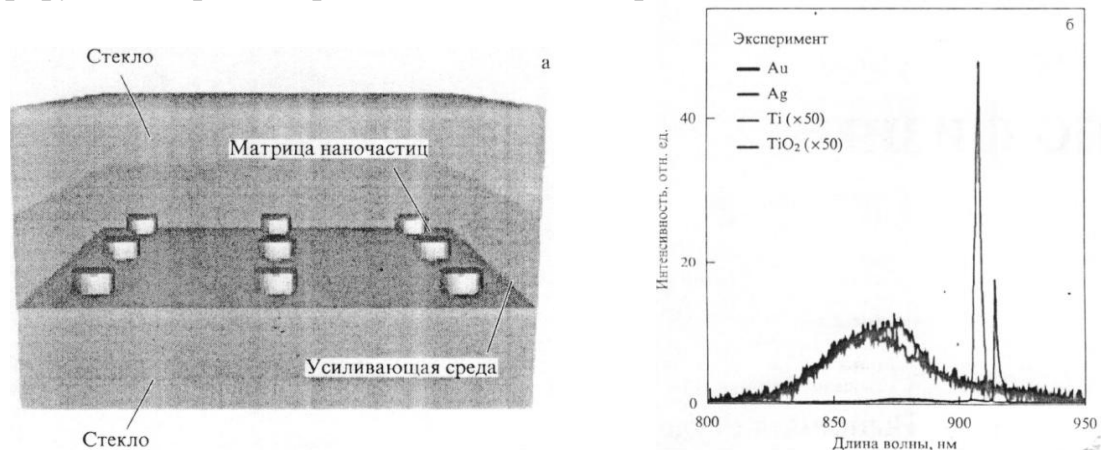


Рис.7.12. а) Схема нанолазера на основе плазмонного кристалла, состоящего из решетки наночастиц, погруженных в усиливающую среду.б) Пик линии генерации на длине 913 нм. (Au).[19]

Схема плазмонного нанолазера на основе плазмонного кристалла из решетки наноотверстий и прилегающей к ней активной среды показана на рис.7.13. На пластину из фосфида индия (InP) наносился слой арсенида индия-галлия (InGaAs) толщиной 105 нм. Он покрывался тонким слоем (15 нм) InP. Затем наносился защитный слой из нитрида кремния SiN 5 нм. Поверх защитного слоя наносилась золотая пленка 100 нм, в которой создавалась решетка наноотверстий диаметром 160 нм. Слой InGaAs являлся активной средой наноспазера. Оптическая накачка активной среды производилась на длине волны 1,06 мкм. При превышении определенного значения мощности накачки наблюдалось увеличение мощности излучения резонанса с $\lambda = 1480$ нм более чем на три порядка. Это интерпретировалось как достижение режима генерации нанолазера. генерация при криогенных температурах.

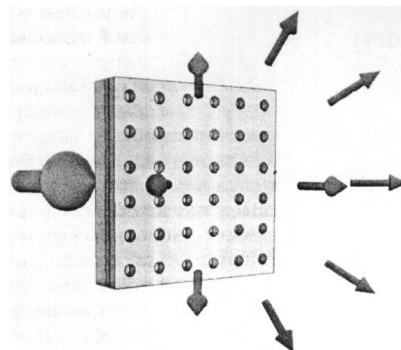


Рис.7.13. Схема плазмонного нанолазера на основе плазмонного кристалла из решетки наноотверстий .[19].

7.2.2. Применения устройств наноплазмоники [19,7]

Фотонные интегральные схемы

Наноразмерные плазмонные лазеры являются источниками, интегрируемыми с другими электронными и оптическими компонентами. Они обеспечат функционирование наноразмерных оптических схем с широкой полосой модуляции. Пассивные плазмонные элементы детекторы, волноводы и модуляторы с улучшенными характеристиками и сниженным энергопотреблением также будут входить в состав таких наноразмерных фотонных интегральных схем.

Интегрированные электронные и фотонные гибридные системы.

Замена стандартного оптического волокна полупроводниковым нановолноводом позволяет снизить размер одномодового кварцевого волновода с нескольких микрон до сотен нанометров, т.е. на порядок.

Сенсоры

В сенсорах, основанных на активной плазмонике, измеряемым параметром является интенсивность генерируемого излучения, которая чувствительна к присутствию на уровне менее 10^{-9} части детектируемого вещества с субволновым пространственным разрешением на ультракоротких временах.

Биомедицинские применения.

Интенсивность излучения 3D-спазера, биосовместимого с живыми клетками превышает на два порядка интенсивность флуоресценции от метки на основе квантовой точки. Высокая плотность энергии нанолазера в малом объеме оптической моды позволяет нанолазеру стать манипулятором и режущим инструментом биологической ткани с беспрецедентной точностью.

Оптическая связь и хранение информации

Частоты модуляции плазмонного лазера лежат в терагерцовом диапазоне. При умеренном потреблении мощности нанолазер имеет преимущество перед методами высокочастотной электроники. Острофокусированные поля плазмонных лазеров могут использоваться для увеличения плотности информации на DVD-дисках.

Построение изображений с суперразрешением

Высокая плотность энергии и малый размер оптической моды, достигаемый в нанолазерах позволяют формировать наноскопические изображения.

Ультрабыстрая спектроскопия

Плазмонный лазер обеспечивает возможность одновременной локализации энергии на нанометровой пространственной шкале и фемтосекундной (10^{-15} с) временной шкале.

Фотолитография

Нанолокализованные поля плазмонных лазеров преодолеют дифракционный предел оптических лазеров в фотолитографии.

Наноплазмоника соединяет электронные устройства размером меньше 100 нм с фотоникой оптических частот более 100 ТГц (длины волн меньше 3 мкм). Применения наноплазмоники в нанооптике: внутренние соединения микросхем, пропускание света через непрозрачные материалы, за счет плазмонных волн в наноотверстиях; создание распределенных точечных источников света, генерируемого на поверхностях наноразмерных объектов с металлическим

покрытием; наноантенн, нанорезонаторов, нановолноводов в видимом диапазоне частот. Биосенсоры, основанные на высокой чувствительности плазменных возбуждений к свойствам среды, окружающей металлическую наноструктуру, измеряют толщину коллоидных пленок, а также скрининг и подсчет событий связывания белков.[8]

На рис. 7.14. луч света, падающий на поверхность металла, создает плазмон - волны электронной плотности, с помощью которых можно передавать огромные потоки информации. Если свет фокусируется на поверхности с кольцевой канавкой, то возникают концентрические волны кольцами высокой и низкой электронной плотности

Используя свет для создания волн электронной плотности, названных плазмонами, можно передавать оптические сигналы по наноскопическим проводникам. Плазмонные цепи обладают колоссальной пропускной способностью, и поэтому их можно использовать для передачи огромных объемов информации внутри сверхбыстрых микросхем. Применение плазмонных компонентов также позволит повысить разрешение микроскопов, эффективность светоизлучающих диодов и чувствительность химических и биологических датчиков.

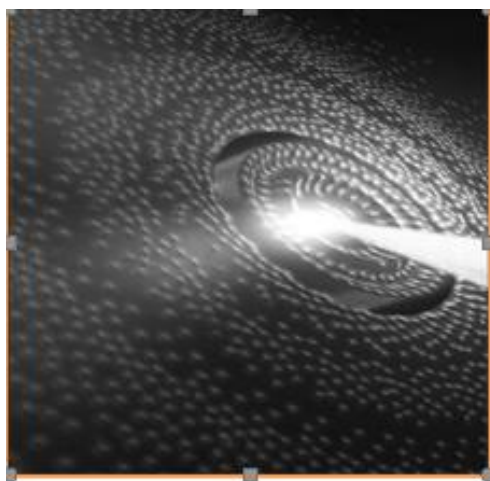


Рис.7.14. Луч света, падающий на поверхность металла, создает плазмон. [7]

Тысячелетиями алхимики и стеклодувы невольно использовали плазмонные эффекты, когда создавали витражи и красочные кубки, в стекле которых содержались мельчайшие металлические частицы. Самый известный пример — чаша Ликурга, римский кубок, датируемый IV в. н.э. и хранящийся сейчас в Британском музее. см рис.7.15.

Из-за плазмонного возбуждения электронов в металлических частицах, содержащихся в стеклянной матрице, материал кубка поглощает и рассеивает синий и зеленый свет, т.е. коротковолновую часть видимого спектра. Если рассматривать чашу в отраженном свете, рассеивание на плазмонах придает ей зеленоватый оттенок, но если внутрь поместить источник белого света, стекло кажется красным, потому что пропускает только длинные световые волны и поглощает короткие.



Рис.7.15. Римский кубок Ликурга, изготовленный в IV в. н.э., изменяет свой цвет из-за плазмонного возбуждения металлических частиц в стеклянной матрице. Если зеленоватую чашу осветить изнутри, она будет казаться красной.[7]

Исследования поверхностных плазмонов начались в 1980х гг., когда химики стали изучать это явление с помощью рамановской спектроскопии, при которой для определения структуры образца по молекулярным колебаниям наблюдают рассеяние на нем лазерного света.

В 1989 г. Томас Эббесен (Thomas Ebbesen) из научно-исследовательского института японской фирмы NEC обнаружил, что тонкая золотая пленка с миллионами микроскопических отверстий пропускает больше света, чем следовало ожидать потому, что передачу электромагнитной энергии усиливали поверхностные плазмоны.

Плоский плазмонный волновод

Наибольшая дальность распространения плазмона достигается, если волновод работает асимметрично и выталкивает большую часть электромагнитной энергии из направляющей металлической пленки в окружающий диэлектрик, тем самым снижая потери. Электромагнитные поля на верхней и нижней поверхности металла взаимодействуют друг с другом, частоты и длины волн плазмонов можно регулировать, изменяя толщину пленки. В 1990х гг. в исследовательских группах Сергея Божевольного из Ольборгского университета в Дании и Пьера Берини из Оттавского университета были разработаны плоские плазмонные компоненты, выполняющие те же функции (например, расщепление передаваемой волны), что и чисто диэлектрические устройства.

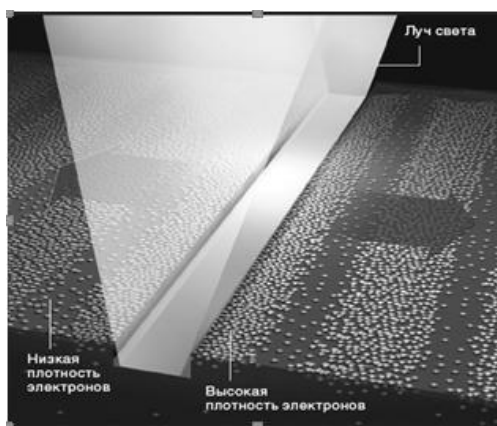


Рис.7.16. Плоский плазмонный волновод с линейной канавкой. [7]

Свет, сфокусированный на прямой канавке в металле, создает плазмоны, которые распространяются в тонком слое его поверхности (вдоль границы между металлом и воздухом) см. рис.7.16. В плоском волноводе плазмон может пройти несколько сантиметров — вполне достаточно для передачи сигналов из одной части микросхемы в другую. Большая волна может создавать помехи другим сигналам в наноскопических внутренностях чипа.

Щелевой плазмонный волновод

Для уменьшения размеров плазмонного проводника, нужно окружить диэлектрик металлом. В таком щелевом волноводе длина световой волны сокращается более чем в десять раз. См. рис.7.17. Ученые уже изготовили щелевые волноводы шириной всего 50 нм, что сопоставимо с размерами электронных элементов современных микросхем. По такой плазмонной цепи можно передавать намного больше данных, чем по электрической, но сигнал в ней затухает на расстоянии 100 мкм.

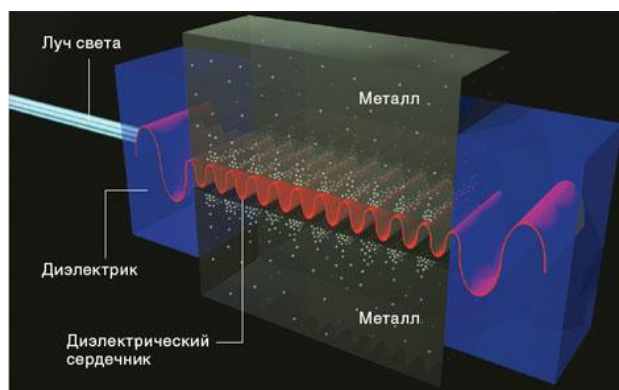


Рис.7.17. Плоский щелевой плазмонный волновод состоящий из диэлектрического сердечника между двумя металлическими пленками[7]

Плазмонстор (плазмонный переключатель)

С помощью щелевых волноводов можно значительно повысить быстродействие микросхем. На рис.7.18 слева относительно большие диэлектрические волноводы подводят оптические сигналы к плазмонным переключателям (*плазмонсторам*), соединенным с обычными электронными транзисторами.

Плазмонсторы состоят из щелевых волноводов шириной 100 нм, сужающихся до 20 нм в точках пересечения и превращают оптический сигнал в электрический.

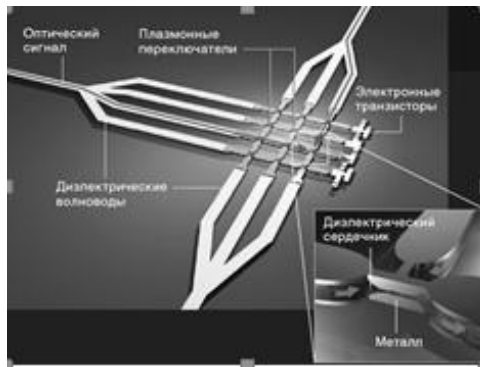


Рис.7.18. Диэлектрические волноводы подключены к сужающимся щелевым волноводам, которые соединены с электронным транзистором чипа.[7]

Потери можно снизить, вывернув плазмонный волновод наизнанку и окружив диэлектрик металлом. В получившемся плазмонном щелевом волноводе длина волны плазмонов зависит от толщины диэлектрика. Физиками из Калифорнийского технологического института и группой Марка Бронджерсма из Стэнфордского университета было показано, что плазмонные щелевые волноводы могут передавать сигналы на расстоянии в десятки микрон. Хидеки Миядзаки из японского Национального института материаловедения втиснул красный свет (с длиной волны в свободном пространстве 651 нм) в плазмонный щелевой волновод толщиной 3 нм и шириной 55 нм. Длина волны поверхностного плазмона, распространяющегося в таком устройстве, составила всего 51 нм, т.е. примерно 8% от длины волны в свободном пространстве.

Таким образом, возбуждая материалы видимым светом с длиной волны 0,5 мкм, можно получать сигналы в мягком рентгеновском диапазоне с длинами волн между 10 нм и 100 нм. Длину волны можно уменьшить более чем в 10 раз относительно ее величины в вакууме, и при этом частота сигнала остается неизменной. Произведение длины волны λ на ее частоту ν остается равным скорости света в среде $\lambda\nu = v = c_0/n$, поскольку электромагнитные волны, распространяющиеся вдоль границы металл — диэлектрик, замедляются. Способность сокращать длину волны открывает дорогу к созданию наноскопических плазмонных структур, которые могли бы заменить чисто электронные схемы из проводников и транзисторов.

Для печати микросхем на кремниевых подложках сейчас используется литография. Аналогичная технология подойдет и для серийного выпуска крошечных плазмонных устройств с множеством узких диэлектрических полос и промежутков между ними. Полосковые системы будут направлять волны положительных и отрицательных зарядов вдоль металлической поверхности. Частота оптического сигнала гораздо выше несущей частоты электрического, плазмонное межсоединение в состоянии передавать намного больше данных. В плазмонных цепях электрический заряд не перемещается (электроны периодически собираются в сгустки и разбегаются, а не текут в одном направлении). Плазмонные цепи не имеют паразитных сопротивлений и емкостей, ограничивающими пропускную способность электрических межсоединений.

Плазмонные схемы станут еще быстрее, когда исследователи изобретут *плазмонстор* — плазмонное устройство, аналогичное транзистору. Лаборатория в Калифорнийском технологическом институте и другие группы недавно разработали маломощный вариант такого прибора. Когда плазмонсторы будут усовершенствованы, из них можно будет собирать сверхбыстрые сигнальные процессоры, появление которых за 10–20 лет решительно изменит всю вычислительную технику.

Применение наносфер в медицине

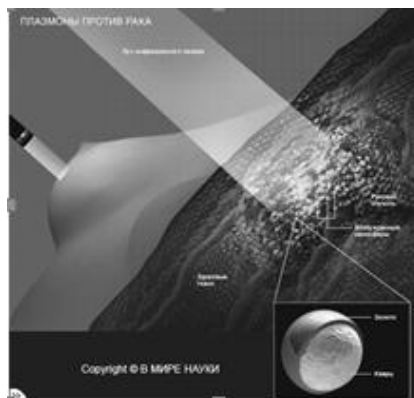


Рис. 7.19. Инфракрасный лазер разогревает наносферы доставленные лекарственным путем в опухоль.[7]

Спектр применения плазмонных устройств выходит далеко за рамки вычислительной техники. Наоми Халас и Питер Нордлендер из Университета Райса разработали наносферы, которые состоят из тонкого слоя золота толщиной 10 нм, нанесенного на поверхность кварцевых частичек диаметром 100 нм. Облучение их электромагнитными волнами вызывает колебания электронов в золотой оболочке. Поскольку поля на ее внутренней и внешней поверхности взаимодействуют, длина волны, при которой происходит резонансное поглощение энергии, зависит от размера сферы и толщины золотого слоя. Таким образом, можно проектировать наносферы, выборочно поглощающие волны с длинами от нескольких сотен нанометров (синий край видимого спектра) до 10 мкм (ближняя инфракрасная область).

Избирательность наносфер превращает их в эффективное средство лечения рака. В 2004 г. Халас и ее коллега Дженнифер Уэст ввели в кровоток мышей со злокачественными опухолями плазмонные частицы и обнаружили, что они не токсичны. Более того, наносферы сконцентрировались не в здоровых тканях тела грызунов, а в быстрорастущих злокачественных опухолях, к которым интенсивнее поступает кровь см. рис.7.19.

Ткани живых организмов прозрачны для инфракрасного излучения в определенном диапазоне длин волн. Когда исследователи направляли свет инфракрасного лазера через кожу мышей на опухоли, резонансное поглощение энергии во внедренных наносферах поднимало температуру злокачественных

образований с 37 °С до 45 °С. Светотепловое нагревание убивало раковые клетки, оставляя окружающую здоровую ткань нетронутой.

Увеличения яркости светодиодов

В 2004 г. Аксель Шерер из Калифорнийского технологического института вместе с сотрудниками японской корпорации Nichia продемонстрировал, что покрытие поверхности светодиода из нитрида галлия плотной сеткой плазмонных наночастиц (состоящих из серебра, золота или алюминия) приводит к увеличению интенсивности испускаемого света светодиодами в 14 раз.

Плазмонные наночастицы можно использовать для создания кремниевых светодиодов. Они были бы намного дешевле, чем обычные светодиоды из нитрида или арсенида галлия, но сейчас их не производят из-за низкой интенсивности излучения света. Группа из Калифорнийского технологического института в сотрудничестве с командой Альберта Полмана из Института атомной и молекулярной физики Голландского фонда фундаментальных исследований материи показала, что объединение серебряных или золотых плазмонных наноструктур с матрицами кремниевых квантовых точек существенно повышает интенсивность испускаемого ими света. Кроме того, частота, на которой происходит усиленное излучение, зависит от размера наночастиц. Согласно результатам наших вычислений, тщательной настройкой частоты плазмонного резонанса и точным подбором расстояния между частицами металла, и полупроводником можно добиться увеличения интенсивности излучения более чем в сто раз. В результате кремниевые светодиоды будут светиться так же ярко, как и традиционные.

Плазмонный графеновый чип

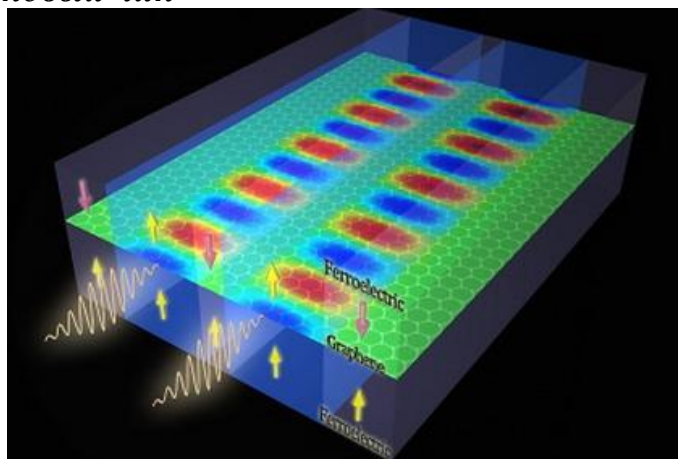


Рис.7.20. Схема нового устройства: графеновый лист между двумя слоями сегнетоэлектрика. Изображение: Qing Hu / MIT[]

Физики из Массачусетского технологического института создали электронную схему, которая позволяет управлять плазмонными волнами с помощью комбинации графена и ферроэлектрических (сегнетоэлектрических) материалов. см рис.7.20. Детали приведены в статье Applied Physics Letters.

Если типичный центральный процессор работает на частотах от сотен мегагерц до нескольких гигагерц, то плазмонные волны в опытах ученых показали принципиальную возможность достижения отметки в несколько терагерц, несколько тысяч гигагерц.

Они смогли управлять плазмонами за счет комбинации двух материалов, графена и ферроэлектриков. Разместив графеновый лист между двумя пластинками ниобата лития физики направили плазмонные волны в требуемом направлении после того, как сформировали из заряженных участков сегнетоэлектрика границы волновода.

Опыты показали, что между такими волноводами расстояние может быть не больше 20 нанометров и при этом плазмонные колебания не будут искажать друг друга. Одним из возможных приложений ученые называют компактные оптоэлектронные устройства. и быстрые систем записи и считывания информации из ферроэлектрических запоминающих устройств: теоретически скорость работы может превысить текущие показатели в тысячи раз.

Жидкое зеркало из наночастиц с электрическим управлением

Британские физики создали необычные наночастицы, которые могут одновременно быть и прозрачными для света, и превращаться в идеальное зеркало, и опубликовали "рецепт" по их изготовлению в статье Джошуа ЭдельИ др. (Joshua Edel) в журнале Nature Materials.

—Наночастицы и тонкие полоски из некоторых металлов, к примеру, золота или серебра, способны поглощать видимый свет и передавать его дальше в виде других форм электромагнитного излучения. На поверхности металла возникают плазмоны — коллективные колебания электронов и электрических полей.

взаимодействие плазмоны со зависит от двух их характеристик — размеров и расстояния между индивидуальными наночастицами. Физики достаточно давно научились управлять положением отдельных наночастиц, однако "дирижирование" множеством плазмонов оставалось нерешенной задачей.

Эдель с сотрудниками поместили наночастицы не на поверхность другого металла или кремния, как это обычно делают ученые в опытах с плазмонами, а в водный раствор, и создали особую химическую среду, позволявшую управлять положением всех частиц в растворе при помощи импульсов электричества.

Ученые заметили, что обычные наночастицы золота, покрытые полимерной пленкой, могут или отталкиваться друг от друга или сближаться друг с другом, не склеиваясь, если их зарядить и поместить в особый электролит, состоящий из двух несмешиваемых жидкостей с разными электрическими свойствами.

В состоянии покоя эта жидкость заставляет частицы золота удаляться друг от друга на достаточно большие расстояния, в результате чего она становится прозрачной для волн видимого света. Если же через нее пропустить электрический ток, то тогда положение ионов в электролите поменяется, и часть заряженных частиц увлечет за собой частицы золота и выстроит и в своеобразный плоский лист.

Частицы металла в нем будут находиться достаточно близко для того, чтобы они могли поглощать фотоны видимого света и повторно излучать их в обратном

направлении, что будет делать поверхность раствора зеркальной. При этом они не склеятся друг с другом, что позволяет сделать зеркало прозрачным, отключив ток или поменяв местами полюса у его источника.

Подобные структуры, как отмечают физики, позволяют не только создавать "электрические" зеркала, но и множество других оптических приборов с полностью управляемой оптикой.

7.3. Метаматериалы

Метаматериал (англ. metamaterial) — искусственный композитный структурированный материал, электромагнитные свойства которого существенно отличаются от свойств компонентов, входящих в его состав, и определяются особым упорядочением и структурой компонентов (кольцеподобной, рулонной, проводной и т. д.).

Метаматериалы выделены в отдельный класс материалов, так как их свойства зависят от структуры компонентов, упорядоченных особым образом, и могут кардинально отличаться от свойств составляющих их компонентов. К метаматериалам такого типа относятся, например, синтетические дихроичные материалы, состоящие из изотропных компонентов: именно асимметричная структура композитного материала, приводит к появлению анизотропии формы.

Существуют метаматериалы с многократно увеличенными электрической проницаемостью и магнитной восприимчивостью, метаматериалы, эффективность нелинейных эффектов в которых увеличивается на много порядков по сравнению с обычными веществами. Например, эффективность гигантского комбинационного рассеяния может возрасти в 10^6 раз по сравнению с вынужденным комбинационным рассеянием в компонентах, на порядки увеличивается эффективность генерации второй и третьей гармоник.

Хотя возможность управления структурой компонентов материала дает новую степень свободы в конструировании их свойств, однако настоящую революцию произвели работы, продемонстрировавшие возможность создания метаматериалов со свойствами, которые не встречаются в природных материалах. Термин «метаматериалы» особенно часто применяют по отношению именно к таким материалам.

Метаматериалы синтезируются внедрением в исходный природный материал различных периодических структур с самыми различными геометрическими формами, которые модифицируют диэлектрическую « ϵ » и магнитную « μ » восприимчивости исходного материала. В очень грубом приближении такие внедрения можно рассматривать как искусственно внесенные в исходный материал атомы чрезвычайно больших размеров. Разработчик метаматериалов при их синтезировании имеет возможность выбора (варьирования) различных свободных параметров (размеры структур, форма, постоянный и переменный период между ними и т. д.).

Один из наиболее известных классов метаматериалов — метаматериалы с отрицательным коэффициентом преломления, у которых одновременно отрицательны диэлектрическая и магнитная проницаемость. Существование веществ с одновременно отрицательными диэлектрической и магнитной

проницаемостями было теоретически обоснована в работе В. Г. Веселаго, вышедшей еще в 1967 г. [9]. Как показал автор, такие вещества характеризуются отрицательными значениями показателя преломления, а многие оптические свойства существенно отличаются от свойств традиционных материалов.

Веселаго предсказал, что определённые оптические явления будут совершенно другими в материалах с отрицательным коэффициентом преломления. Возможно, самым поразительным из них является рефракция — отклонение электромагнитной волны при прохождении границы раздела двух сред. В нормальных условиях волна появляется на противоположной стороне линии, проходящей перпендикулярно этой границе (нормаль к поверхности). Однако, если один материал имеет положительный коэффициент преломления, а другой — отрицательный, волна будет появляться на той же стороне нормали к поверхности, что и приходящая волна. Также особым свойством метаматериалов является сильная дисперсия.

Природных материалов с такими свойствами пока не обнаружено. Экспериментально вещества с отрицательным показателем преломления в радиодиапазоне электромагнитных волн были созданы в 1999 г. [10]. В настоящее время широким фронтом ведутся работы по созданию и исследованию метаматериалов с отрицательным показателем преломления в оптическом диапазоне. Все созданные искусственно материалы с одновременно отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями в оптическом диапазоне являются композитами, содержащими металлические и диэлектрические компоненты.

Весьма перспективным классом метаматериалов являются фотонные кристаллы, в частности резонансные фотонные кристаллы [11].

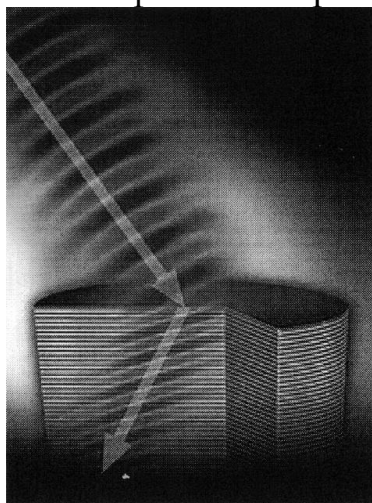


Рис.7.21. Прохождение света через метаматериал с «левосторонним» коэффициентом преломления.

Одно из возможных свойств метаматериалов — отрицательный (или левосторонний) коэффициент преломления, который проявляется при одновременной отрицательности диэлектрической и магнитной проницаемостей. Пример такого метаматериала показан на Рис.7.21.

Основы эффекта

Дисперсионное уравнение распространения электромагнитных волн в изотропной среде имеет вид:

$$k^2 - (\omega/c)^2 n^2 = 0, \quad (7.1)$$

где k — волновой вектор, ω — частота волны, c — скорость света, $n^2 = \epsilon\mu$ — квадрат показателя преломления. Из этих уравнений очевидно, что одновременная смена знаков у диэлектрической ϵ и магнитной μ восприимчивости среды никак не отразится на этих соотношениях.

7.3.1. «Правые» и «Левые» изотропные среды [8]

Уравнение (7.1) получено на основе теории Максвелла. Для сред, у которых диэлектрическая ϵ и магнитная μ восприимчивости среды одновременно положительные, три вектора электромагнитного поля — электрический $\vec{E}$ и магнитный $\vec{H}$ и волновой $\vec{k}$ образуют систему т. Н. правых векторов:

Монохроматическая плоская волна

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_0 \exp(-i\vec{k} \cdot \vec{r}) \quad \vec{H}(\vec{r}) = \vec{H}_0 \exp(-i\vec{k} \cdot \vec{r}) \quad (7.2)$$

При подстановке в уравнения Максвелла в среде, обладающей поглощением и дисперсией с комплексными диэлектрической $\epsilon(\omega)$ и магнитной проницаемостью $\mu(\omega)$ зависящими от частоты ω

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{E} &= -i\omega\mu\vec{H}, \\ \nabla \times \vec{H} &= i\omega\epsilon\vec{E}. \end{aligned} \quad (7.3)$$

Получаем

$$\begin{aligned} \vec{k} \times \vec{E}_0 &= \omega\mu\vec{H}_0, \\ \vec{k} \times \vec{H}_0 &= -\omega\epsilon\vec{E}_0. \end{aligned} \quad (7.4)$$

Умножим вектор $\vec{k}$ на уравнения (7.4)

$$\begin{aligned} \vec{k} \times \vec{k} \times \vec{E}_0 &= -\omega^2 \epsilon \mu \vec{E}_0 \\ \vec{k} (\vec{k} \cdot \vec{E}_0) - \vec{E}_0 (\vec{k} \cdot \vec{k}) &= -\omega^2 \epsilon \mu \vec{E}_0 \end{aligned} \quad (7.5)$$

Получаем дисперсионное уравнение

$$k^2 - \omega^2 \epsilon \mu = 0. \quad (7.6)$$

Такие среды, соответственно, называют «правыми».

Среды, у которых одновременно отрицательные $0 > \epsilon = -|\epsilon|$, $0 > \mu = -|\mu|$, называют «левыми». У таких сред электрический $\vec{E}$, магнитный $\vec{H}$ и волновой вектора $\vec{k}$ образуют систему *левых векторов*. (сравните их с (7.4))

$$\begin{aligned} \vec{k} \times \vec{E}_0 &= -\omega|\mu|\vec{H}_0, \\ \vec{k} \times \vec{H}_0 &= \omega|\epsilon|\vec{E}_0. \end{aligned} \quad (7.7)$$

Волновое число

$$k = \omega \sqrt{\epsilon \mu} \quad (7.8)$$

Импеданс равен

$$\eta = \frac{E_0}{H_0} = \frac{\omega \mu}{k} \quad (7.9)$$

Смена знаков в уравнениях (7.7) по сравнению с (7.4) эквивалентно замене электрического поля на магнитное. Вектора $\vec{E}_0, \vec{H}_0, \vec{k}$ в *левых средах* образуют левую тройку векторов, а вектор Пойнтинга $\vec{S} = \frac{1}{2} \vec{E}_0 \times \vec{H}_0$ образует всегда правую тройку. Поэтому в левой среде Веселаго вектор Пойнтинга антапараллелен волновому вектору $\vec{S} \uparrow \downarrow \vec{k}$, а в обычной правой среде $\vec{S} \uparrow \uparrow \vec{k}$ они параллельны см рис.7.22.

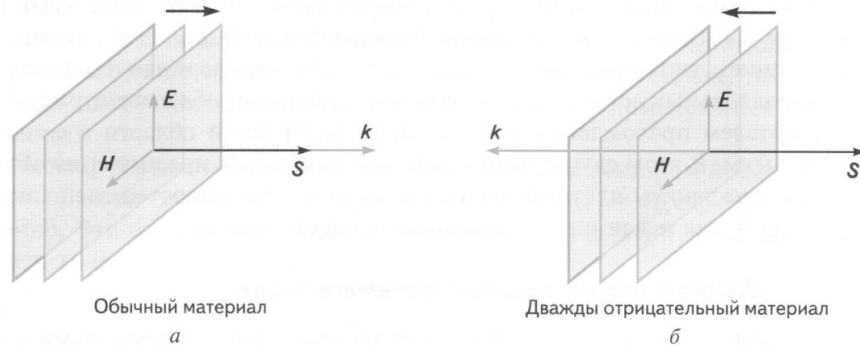


Рис.7.22 а) Плоская волна в обычном дважды положительном материале. $\vec{S} \uparrow \uparrow \vec{k}$ и волновой фронт движется в направлении потока энергии. б) Плоская волн в дважды отрицательном материале. $\vec{S} \uparrow \downarrow \vec{k}$ волновой фронт движется в направлении, противоположном потоку энергии. [8]

В англоязычной литературе описанные материалы называют right- и left-handed materials, или сокращенно RHM (правые) и LHM (левые), соответственно.

Так как направления вектора Пойнтинга $\vec{S}$ и направление групповой скорости $\vec{v}_g$

$$\vec{v}_g = \frac{d\omega(\vec{k})}{d\vec{k}} = \frac{\vec{k}}{k} \frac{d\omega(k)}{dk}, \quad (7.10)$$

совпадают друг с другом

$$\vec{S} = w\vec{v}_g, \quad (7.11)$$

где w –объемная плотность энергии волны,

то групповая скорость и фазовая скорость $v_{pf} = \frac{\omega}{k}$ направлены в противоположную сторону. Такие волны называются *обратными волнами*.см рис.7.23.б.

Так как вектор $\vec{k}$ совпадает по направлению с фазовой скоростью, то ясно, что левые вещества являются веществами с так называемой *отрицательной фазовой скоростью*. Иными словами, в левых веществах фазовая скорость противоположна потоку энергии. В таких веществах, например, наблюдается обращенный доплер-эффект.

7.3.2 Оптика материалов с отрицательным показателем преломления

На рис.7.23 показано прохождение света через границу двух сред.

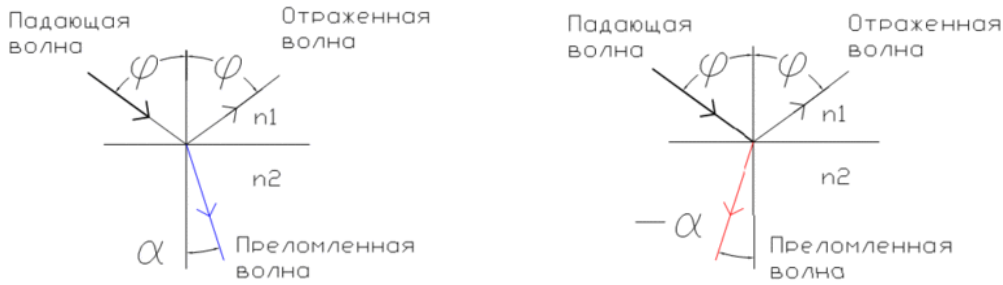


Рис.7.23. Слева прохождение света через границу сред с показателями преломления $n_1, n_2 > 0$. Справа прохождение света через границу в левую среду $n_1 > 0, n_2 < 0$.

Дисперсия левой среды

Существование отрицательного показателя среды возможно при наличии у неё частотной дисперсии. Если одновременно $\epsilon < 0$, $\mu < 0$, то энергия волны $W = \epsilon E^2 + \mu H^2$ будет отрицательной. Единственная возможность избежать этого противоречия будет наличие у среды частотной дисперсии $\partial\epsilon/\partial\omega$ и $\partial\mu/\partial\omega$.

Примеры распространения волны в левой среде

Двояковогнутая линза фокусирует свет. см рис.7.24.

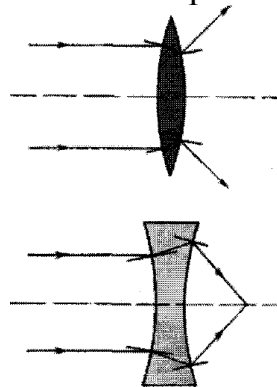


Рис.7.24. Двояковыпуклая линза, сделанная из материала с отрицательным показателем преломления, расфокусирует свет, а двояковогнутая - фокусирует.

Плоскопараллельная пластина из материала с отрицательным показателем преломления работает как фокусирующая линза. см рис.7.25.

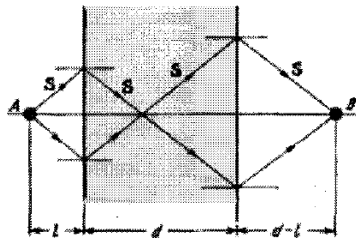


Рис.7.25 Плоскопараллельная пластина из материала с отрицательным показателем преломления работает как фокусирующая линза. Красная точка изображает источник света.

Луч света падая на тел из левой среды увеличивает свой импульс и притягивает его к себе. См рис 7.26.

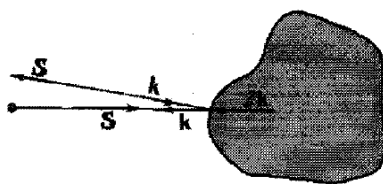


Рис.7.26 Отражение луча, распространяющегося в среде с $n < 0$, от идеально отражающей поверхности. Луч света при отражении от тела увеличивает свой импульс на величину $\vec{p} = 2N\hbar\vec{k}$, (N -число падающих фотонов). Световое давление, оказываемое светом на поглощающие правые среды, сменяется его притяжением в левой среде.

Суперлинза

Джон Пендри[10] и его коллеги в Physical Review Letters утверждают, что в материалах с отрицательным показателем преломления можно преодолеть дифракционный предел разрешения обычной оптики. В правой среде пространство изображений линзы нетождественно самому предмету, так как оно формируется без затухающих волн. В левой среде затухающие волны не затухают, даже наоборот — их амплитуда увеличивается при удалении волны от предмета, поэтому изображение формируется с участием затухающих волн, что может позволить получать изображения с лучшим, чем дифракционный предел, разрешением.

Первая экспериментально продемонстрированная суперлинза с отрицательным показателем преломления имела разрешение в три раза лучше дифракционного предела. Эксперимент проводился с микроволновыми частотами. В оптическом диапазоне суперлинза была реализована в 2005 году. Это была линза, не использующая негативную рефракцию, однако для усиления затухающих волн использовался тонкий слой серебра.

Для создания суперлинзы используются чередующиеся нанесенные на подложку слои серебра и фторида магния, на которых затем нарезалась нанорешётка. В результате создавалась трёхмерная композиционная структура с отрицательным показателем преломления в ближней инфракрасной области. Во втором случае, метаматериал создавался с помощью нанопроволок, которые электрохимически выращивались на пористой поверхности оксида алюминия.

В начале 2007 г. было заявлено о создании метаматериала с отрицательным показателем преломления в видимой области. У материала показатель преломления на длине волны 780нм был равен $-0,6$.

Благодаря тому, что метаматериалы обладают отрицательным показателем преломления, они идеальны для маскировки объектов, так как их невозможно обнаружить средствами радиоразведки. Тем не менее, существующие метаматериалы только в первом приближении имеют отрицательный показатель преломления, что приводит к значительным вторичным переизлучениям. [12]

7.3.3. Оптические плазмонные метаматериалы [12,13,14]

С помощью методов нанолитографии контролируемое изготовление оптических метаматериалов осуществляется на основе тонких пленок благородных металлов (золото и серебро). Отклик этих металлов на излучение

видимого диапазона отличается от их отклика на гигагерцовое излучение. Гигагерцовые электромагнитные волны (с длиной волны см) проникают в металлы только на глубину скин-слоя. толщиной (мкм). В видимой области у золота находится плазменная частота, на которой тонкая золотая фольга начинает пропускать свет. В видимом диапазоне существенную роль в отклике играют поверхностные плазмоны-поляритоны. Многие резонансы оптического отклика структур из тонких пленок металлов связаны с резонансным возбуждением этих поверхностных состояний.

Поляритон-составная квазичастица, возникающая при взаимодействии фотонов и элементарных возбуждений среды. Взаимодействие электромагнитных волн с возбуждениями среды, приводящие к их связи, становится особенно сильным, если их частоты ω и волновые вектора $\vec{k}$ совпадают в резонансе. В этой области образуются связанные волны, т.е. поляритоны, которые обладают дисперсией $\omega(\vec{k})$. Их энергия состоит частично из электромагнитной энергии и энергии собственных возбуждений среды.

Поверхностные плазмон-поляритоны – локализованные коллективные колебания плазмы металла и квантов электромагнитного поля. Рассмотрим распространение поверхностной волны вдоль раздела двух сред диэлектрика среда с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_1 > 0$ и металла с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_2 < 0$. Причина возникновения этой *поверхностной волны Эпштейна* состоит в локальном разделении зарядов полями, выходящими из поверхности раздела. Эти поля наводят заряды в соседних областях и вызывают на поверхности связанные волны, состоящие из колебаний плазмы и электромагнитного поля. Схема возникновения поверхностных плазмонов показана на рис.7.27.

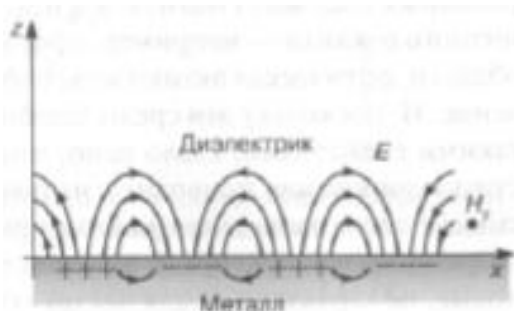


Рис.7.27. Схема возникновения поверхностных плазмонов-поляритонов. Электрическое поле имеет две компоненты $\vec{E} = (E_x, 0, E_z)$, магнитное поле $\vec{H} = (0, H_y, 0)$ направлено перпендикулярно плоскости ху.[6]

Рассмотрим дисперсию волны локализованной вблизи границы раздела этих двух сред.

Уравнения Максвелла для электромагнитного поля в СГС -системе следующие

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \nabla \cdot \vec{E} = 0, \\ \nabla \times \vec{B} &= \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \nabla \cdot \vec{B} = 0. \end{aligned} \quad (7.12)$$

Материальные уравнения

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu \vec{H}, \quad \mu = 1. \quad (7.13)$$

Уравнения Максвелла для комплексных фурье-амплитуд полей $\vec{D}_\omega = \int \vec{D}(t) e^{i\omega t} dt$, $\vec{H}_\omega = \int \vec{H}(t) e^{i\omega t} dt$ принимают вид

$$\nabla \times \vec{E}_\omega = -i \frac{\omega_0}{c} \vec{B}_\omega \quad (7.14)$$

$$\nabla \times \vec{H}_\omega = i \frac{\omega_0}{c} \vec{D}_\omega$$

Далее мы опускаем индекс ω в амплитудах.

Выберем ось z перпендикулярно поверхности раздела. Среда (диэлектрик) с положительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_1 > 0$ занимает область $z > 0$. Металл занимает область $z < 0$ с отрицательной $\varepsilon_2 < 0$. Граница сред $z = 0$. См. рис.7.28.

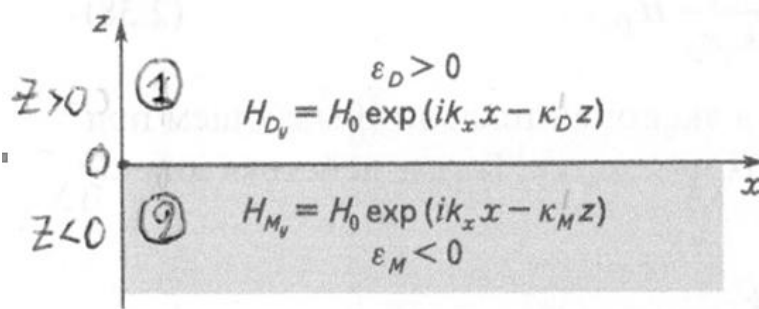


Рис.7.28. Среда 1- диэлектрик, среда 2 –металл. Показаны компоненты волны ТМ в обеих средах. $k_D = k_1$ $k_M = k_2$. [13]

Система уравнений Максвелла(7.14) распадается на две подсистемы описывающие ТЕ- и ТМ-решения, т.к. свойства системы не зависят от координат x, y . В нашем случае ТМ-моды, магнитное поле направим по оси y $\vec{H} = (0, H_y, 0)$. Электрическое поле будет иметь две ненулевые компоненты $\vec{E} = (E_x, 0, E_z)$ см. рис.7.27.

Уравнения Максвелла (7.14) в компонентах принимают вид

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -i\kappa_0 H_y \quad (7.15)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = -i\kappa_0 \varepsilon E_x \quad (7.16)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} = i\kappa_0 \varepsilon E_z \quad (7.17)$$

где

$$\varepsilon = \begin{cases} \varepsilon_1 > 0, & z > 0 \\ \varepsilon_2 < 0, & z < 0 \end{cases} \quad (7.18)$$

В области $z > 0$ (диэлектрик) решения ищем в виде:

$$E_x(x, z) = E_{x1} \exp(ik_x x - k_1 z) \equiv E_{x1} e^{\alpha_1} \quad (7.19)$$

$$E_z(x, z) = E_{z1} \exp(ik_x x - k_1 z) \quad (7.20)$$

$$H_y(x, z) = H_{y1} \exp(ik_x x - k_1 z) \quad (7.21)$$

Вычислим производные амплитуды магнитного поля и подставим их в (7.16) и (7.17)

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = -k_1 H_{y1} e^\alpha = -i\kappa_0 \varepsilon_1 E_{x1} e^\alpha \quad (7.22)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} = ik_x H_{y1} e^\alpha = i\kappa_0 \varepsilon_1 E_{z1} e^\alpha, \quad (7.23)$$

Получим для амплитуд электрического поля

$$E_{x1} = \frac{k_1}{i\kappa_0 \varepsilon_1} H_{y1} \quad (7.24)$$

$$E_{z1} = \frac{k_x}{\kappa_0 \varepsilon_1} H_{y1} \quad (7.25)$$

Вычислим производные от амплитуд электрического поля (7.19) (7.20)

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = -k_1 E_{x1} e^\alpha \quad (7.26)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial x} = ik_x E_{z1} e^\alpha \quad (7.27)$$

Подставим (7.13) в (7.15) и (7.14) в (7.16), и (7.10) в уравнение (7.4) получим

$$k_1 \frac{k_1}{i\kappa_0 \varepsilon_1} H_{y1} e^\alpha + ik_x \frac{k_x}{\kappa_0 \varepsilon_1} H_{y1} e^\alpha = i\kappa_0 \varepsilon H_{y1} e^\alpha \quad (7.28)$$

Окончательно

$$\kappa_0^2 \varepsilon_1 = -k_1^2 + k_x^2 \quad (7.29)$$

В области $z < 0$ (металл) решения ищем в виде

$$E_x(x, z) = E_{x2} \exp(ik_x x + k_2 z) \equiv E_{x2} e^\beta \quad (7.30)$$

$$E_z(x, z) = E_{z2} \exp(ik_x x + k_2 z) \quad (7.31)$$

$$H_y(x, z) = H_{y2} \exp(ik_x x + k_2 z) \quad (7.32)$$

Действуем аналогично случаю $z > 0$. Находим производные

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = k_2 H_{y2} e^\beta = -i\kappa_0 \varepsilon_2 E_{x2} e^\beta \quad (7.33)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} = ik_x H_{y2} e^\beta = i\kappa_0 \varepsilon_2 E_{z2} e^\beta, \quad (7.34)$$

Получим для амплитуд электрического поля

$$E_{x2} = -\frac{k_2}{i\kappa_0 \varepsilon_2} H_{y2} \quad (7.35)$$

$$E_{z2} = \frac{k_x}{\kappa_0 \varepsilon_2} H_{y2} \quad (7.36)$$

Вычислим производные от амплитуд электрического поля (7.19) (7.20)

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = k_2 E_{x2} e^\beta \quad (7.37)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial x} = ik_x E_{z2} e^\beta \quad (7.38)$$

Подставим (7.24) в (7.26) и (7.25) в (7.27) и (7.21) в уравнение (7.4) получим

$$-k_2 \frac{k_2}{i\kappa_0 \varepsilon_2} H_{y2} e^\beta - i k_x \frac{k_x}{\kappa_0 \varepsilon_2} H_{y2} e^\beta = -i \kappa_0 \varepsilon_2 H_{y2} e^\beta \quad (7.39)$$

Окончательно получаем

$$\kappa_0^2 \varepsilon_2 = -k_2^2 + k_x^2. \quad (7.40)$$

Рассмотрим граничные условия:

нормальные компоненты электрических полей в 1ой и 2-ой средах непрерывны

$$\varepsilon_1 E_{1z} = \varepsilon_2 E_{2z}, \quad (7.41)$$

Тангенциальные компоненты

$$H_{1y}(z=0) = H_{2y}(z=0) \quad (7.42)$$

$$E_{1x}(z=0) = E_{2x}(z=0) \quad (7.43)$$

Подставляем (7.14) и (7.25) в (7.32) и учитывая (7.31) получаем

$$\frac{k_1}{\kappa_0 \varepsilon_1} = -\frac{k_2}{\kappa_0 \varepsilon_2} \quad (7.44)$$

Если при $k_1 > 0$, $k_2 > 0$ в первой среде $\varepsilon_1 > 0$, то из (7.33) следует, что в металле диэлектрическая проницаемость отрицательна $\varepsilon_2 < 0$.

Возведем в квадрат соотношение (7.33)

$$\frac{k_1^2}{\varepsilon_1^2} = \frac{k_2^2}{\varepsilon_2^2}. \quad (7.45)$$

Подставим из (7.18) $k_1^2 = +k_x^2 - \kappa_0^2 \varepsilon_1$ и из (7.29) $k_2^2 = +k_x^2 - \kappa_0^2 \varepsilon_2$ в (7.34). получим

$$k_x^2 \left(\frac{1}{\varepsilon_1^2} - \frac{1}{\varepsilon_2^2} \right) = \kappa_0^2 \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - \frac{1}{\varepsilon_2} \right), \quad (7.46)$$

и окончательно

$$k_x^2 = \kappa_0^2 \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}. \quad (7.47)$$

Закон дисперсии плазмон-поляритона

$$k_x = \kappa_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}}. \quad (7.48)$$

Если первая среда - вакуум $\varepsilon_1 = 1$, а вторая - металл $\varepsilon_2 < 0$, то закон дисперсии поверхностной волны следующий

$$k_x = \kappa_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{1 + \varepsilon_2}}. \quad (7.49)$$

Чтобы поверхностная волна распространялась без затухания $k_x^2 > 0$ необходимо, чтобы при $\varepsilon_2 < 0$ выполнялось соотношение $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 < 0$.

Из-за выполнения соотношения (7.30) по знакам следует, что нормальная компонента меняет знак: в первой среде $\varepsilon_1 > 0$, $E_{1z} > 0$, во второй среде $\varepsilon_2 < 0$ и $E_{2z} < 0$. Так как тангенциальная составляющая магнитного поля непрерывна см. формулу (7.31), т.е. сохраняет знак, то тангенциальная составляющая вектора

плотности потока энергии (Вектор Пойнтинга) $S_x = \frac{c}{4\pi} [\vec{E} \times \vec{H}]_x = -\frac{c}{4\pi} E_z H_y$ меняет знак при переходе через поверхность раздела

$$S_{x1} \varepsilon_1 = S_{x2} \varepsilon_2 \quad (7.50)$$

Отрицательное значение диэлектрической проницаемости в металлах связано с тем, что электроны движутся на фоне положительного остова кристаллической решетки. Значительные потери в реальных металлах приводят к сильному затуханию волн Эпштейна.

При нормальном падении света с частотой ω_0 на поверхность благородного металла закон дисперсии световой волны в вакууме $\omega_0(\kappa_0) = c\kappa_0$ не пересекается с законом дисперсии этого металла $\omega_{sp}(\kappa_{sp})$ см. рис. 7.18.б. Если свет падает на поверхность металла из диэлектрической среды с показателем преломления n то возможно пересечение линий дисперсии. При выполнении условия *фазового синхронизма*. $k_{sp} = \kappa_0$ и $\omega_0(\kappa_0) = c\kappa_0/n$ см. рис. 7.17.а [13]. Экспериментально это условие реализуется в схеме Кретчмана.

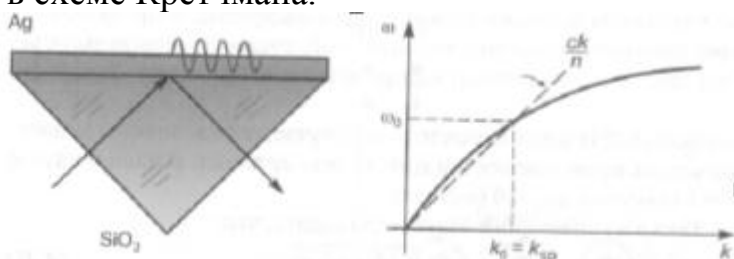


Рис. 7.29. а) Схема Кретчмана. б) Графическая иллюстрация выполнения условия фазового синхронизма.

б) графически условие фазового синхронизма выполняется при пересечении прямой линии дисперсии световой волны в вакууме с кривой дисперсии в металле. [13]

Закон дисперсии плазмон-поляритона на искусственной периодически модулированной поверхности (сверхрешетке) подобен закону дисперсии электрона в кристаллической решетке. Сверхрешеткой может выступать матрица нанотверстий в серебряной пластинке с периодом сравнимым с длиной световой волны (см. рис. 7.30).

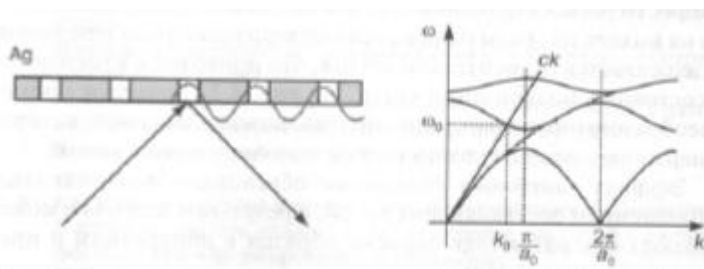


Рис. 7.30. Слева свет падает под углом на пластинку из Ag с нанотверстиями. вдоль пластинки показана поверхностная волна. Справа показан графическое условие дисперсии поверхностного плазмон-поляритона на периодически модулированной поверхности в зонах Бриллюэна [13].

Эффективное возбуждение плазмон – поляритона происходит на серебряной пленке с матрицей прямоугольных нанотверстий. При распространении плазмон-поляритонной волны условия фазового синхронизма в грубом приближении следующие

$$k_x = mb = m \frac{2\pi}{a_0}, \quad (7.51)$$

где k_x - волновой вектор плазмон-поляритонной волны, b - вектор обратной сверхрешетки, a_0 - пространственный период сверхрешетки $m=1,2,3,\dots$ при

отверстиях порядка 100 нм с периодом порядка 500 нм в видимом диапазоне излучения находится 2-3 длины поверхностной волны.

Волновод на основе поверхностных плазмонных поляритонов можно построить если диэлектрический слой покрыть с обеих сторон металлической пленкой. Толщина диэлектрического слоя должна быть малой, чтобы поверхностные волны могли перекрываться через слой и направленно распространяться. Дисперсионные соотношения для такой структуры можно получить с помощью граничных условий на поверхностях раздела «металл-диэлектрик». При субмикронных толщинах слоя можно достичь высоких постоянных распространения на частотах ниже плазменной частоты объемного металла. Моды ближнего ИК диапазона волн локализируются до нанометрового масштаба при длине распространения порядка микрона.

При использовании матриц из металлических наночастиц, расположенных так близко, чтобы их локализованные плазмонные поля перекрывались возникают направляемые моды субмикронного размера на плазмонных частотах индивидуальных частиц или на резонансной частоте зазора между частицами.

Образец метаматериала, приведенный на рис. 7.31 представляет собой серебряную пленку толщиной 150 нм, напыленную на подложку из кварца. В пленке проделаны сквозные отверстия размером 100 нм на 300 нм. На длине волны резонанса плазмон-поляритона пленка начинает пропускать на порядки больше света чем может пройти через аналогичные отверстия в экране из идеального металла, в котором плазмон-поляритонная волна отсутствует. Такой образец дополнительно обладает двойным лучепреломлением и дихроизмом

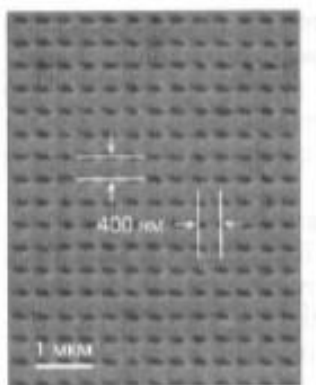


Рис.7.31. Образец метаматериала с упорядоченной наноструктурой.[12]

Показатель преломления является одной из основных характеристик распространения света в сплошной среде. Он связан с относительной диэлектрической проницаемостью и относительной магнитной проницаемостью $n = \pm\sqrt{\epsilon\mu}$. Пример структур метаматериалов с резонансным электрическим и магнитным откликом в инфракрасном и оптическом диапазонах показаны на рис.7.31 и 7.32. Структура метаматериала показанная на рис.7.32 состоит из связанных золотых полосок с переменными размерами. Это изображение получено на полевом эмиссионном растровом сканирующем микроскопе. На

рис.7.33.а показано поперечное сечение пары связанных полосок. На рис.7.33.б показаны спектры пропускания для электромагнитных волн ТМ—поляризации для шести образцов метаматериалов с двойными полосками при различных значениях ширины образцов w и значениях пространственного периода структуры p . Спектры содержат резкие резонансы, смещенные по длине волны в зависимости от ширины полоски. Резонансы охватывают всю видимую часть спектра.

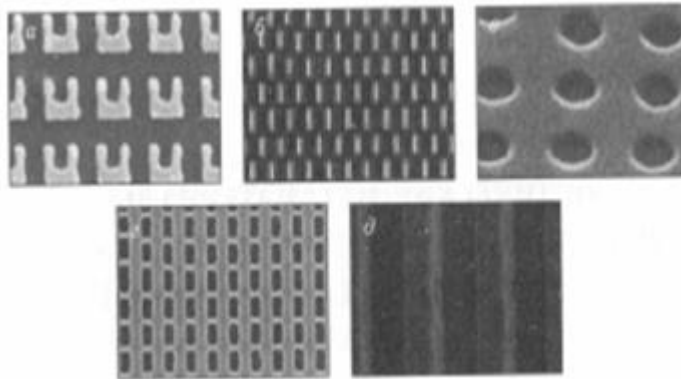


Рис.7.32. [12] Оптические наноматериалы, а) Набор золотых разомкнутых колец, обеспечивающий магнитный резонанс в видимом и телекоммуникационном диапазоне частот и отрицательную магнитную проницаемость вблизи резонанса на длине волны 1.5 мкм.

б) набор золотых парных наностержней обеспечивающий отрицательный показатель преломления вблизи длине волны 1.5 мкм.

в) набор отверстий в паре золотых пленок, разделенных слоем диэлектрика Al_2O_3 , обладающий отрицательным показателем преломления вблизи резонанса на длине волны 1.5 мкм.

г) структура «рыболовной сети» с отрицательным показателем преломления около длины волны 1.4 мкм и лучшими характеристиками в отношении минимизации потерь.

д) связанные золотые полоски, обеспечивающие магнитный отклик во всей видимой области спектра.

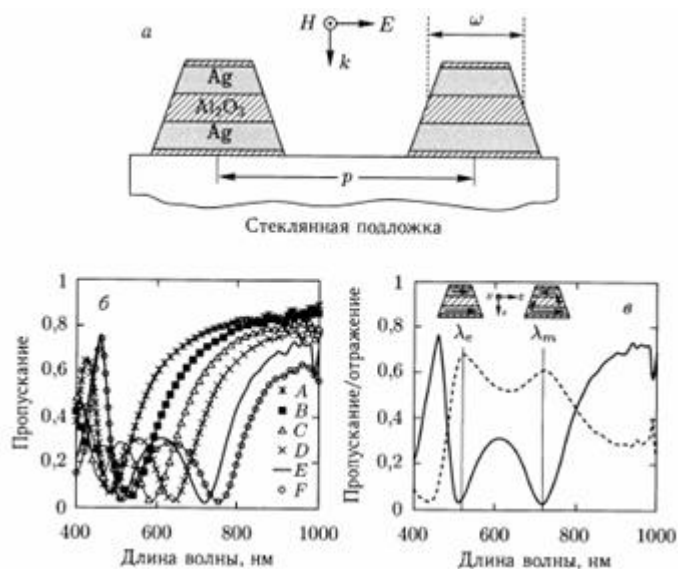


Рис.7.33. Метаматериал на основе связанных золотых нанополосок, обеспечивающих магнитный резонанс во всей видимой области спектра. [12]

а) поперечное сечение пары связанных полосок.

б) спектр пропускания для ТМ-поляризации измеренный для 6-ти образцов метаматериалов с различной средней шириной w .

в) спектр пропускания (сплошная линия) и спектр отражения (штриховая линия) для двух характерных длин волн, отвечающих отмеченным электрическому и магнитному резонансам.

Вставка сверху показывает схему моды тока при электрическом и магнитном резонансе соответственно.

Магнитный резонанс в метаматериалах на оптических частотах сильно влияет на их нелинейные оптические свойства. Метаматериал состоял из золотых разомкнутых колец. Экспериментально наблюдалось увеличение на шесть порядков генерации второй и третьей гармоник тонкой пленкой метаматериала, если возбуждались магнито-дипольные резонансы на длине волны 1.5 мкм, по сравнению с электрическими дипольными резонансами.

7.3.4. Применение оптических метаматериалов для волнового обтекания предметов [12,15]

Оптические метаматериалы доступны сейчас в виде пленок субволновой толщины. Наноструктура метаматериала влияет на его основные нелинейнооптические свойства. Управление свойствами метаматериалами позволяет превращать объекты, покрытые ими, в невидимые невооруженным глазом или радаром.

Требования к идеальному устройству невидимости:

1. Устройство независимое от объекта и макроскопическое.
2. Устройство не отражает, не рассеивает и не поглощает любое излучение, не вводит фазовые задержки и не производит тень.
3. Устройство работает в неполяризованном свете и в широком диапазоне частот.

Общие подходы основаны на гашении падающего излучения или на огибании волнами объекта.

В одной из форм невидимости на основе гашения используется плазменная или метаматериальная сферическая оболочка с низкой положительной или отрицательной диэлектрической проницаемостью. Если диэлектрическая проницаемость материала оболочки ε_1 меньше, чем у основной среды ε_2 локальный вектор электрической поляризации меняет знак, что приводит к обнулению полного дипольного момента. $P = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)E$. Ограничением является объекты субволнового размера.

Маскирующее покрытие должно искривлять фронт падающего электромагнитного излучения, заставляя лучи огибать объект, а на выходе принимать прежнее направление. См рис.7.34. Оптическая длина пути каждого луча в оболочке должна равняться оптической длине пути в свободном пространстве. Показатель преломления среды должен меняться непрерывно, чтобы луч преломлялся непрерывно и его траектория представляла гладкую кривую. Внутри оболочки создается пространство с искривленной метрикой для чего находится необходимое преобразование координат. Это преобразование координат изменяет тензоры диэлектрической и магнитной проницаемости.

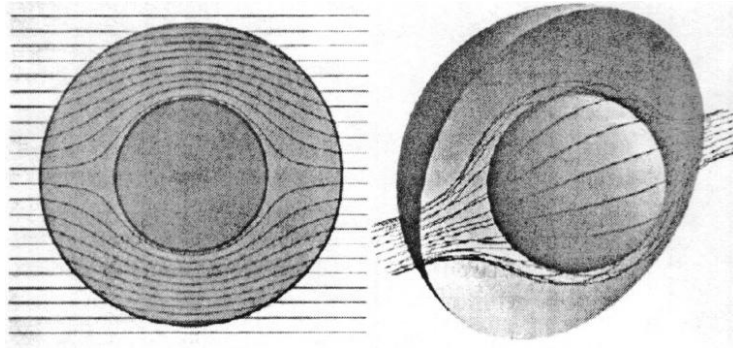


Рис. 7.34. Траектории в маскирующей сферической оболочке.[15]

Подход «волнового обтекания» оболочки невидимости вокруг объекта в рамках полной системы уравнений Максвелла основан на инвариантности вида уравнений Максвелла относительно преобразования координат. Новые ε и μ будут содержать информацию о преобразовании координат и об исходных материальных параметрах.

Трансформационный метод впервые предложен Л.С. Долиным [16,17], заново переоткрыт Пендри[10] и Леонхардом см. обзор [15] и описывается соотношениями

$$\begin{aligned}\varepsilon^{ik'} &= \left| \det(\Lambda_i^{i'}) \right|^{-1} \Lambda_i^{i'} \Lambda_k^{k'} \varepsilon \\ \mu^{ik'} &= \left| \det(\Lambda_i^{i'}) \right|^{-1} \Lambda_i^{i'} \Lambda_k^{k'} \mu, \quad i, k = 1, 2, 3\end{aligned}\quad (7.52)$$

Где $\Lambda_i^{i'} = \frac{\partial x^{i'}}{\partial x^i}$ -элементы фундаментальной матрицы преобразования (якобиана). Исходное пространство изотропно и преобразование не затрагивает время.

Здесь трансформационный подход иллюстрируется преобразованием многосвязной области в односвязную. Такое преобразование не может быть взаимно однозначным и приводит к бесконечным значениям компонент тензоров диэлектрической и/или магнитной проницаемости. Поэтому идеальная невидимость макроскопического объекта недостижима даже для монохроматического излучения, если использовать среды с физически допустимыми конечными значениями элементов тензоров проницаемости. Невидимость будет более полной, чем ближе к идеальным приближаются свойства маскирующей объект оболочки и чем шире рабочий диапазон изменения этих величин. [17]

Технология метаматериалов допускает точное управление «волновым обтеканием предмета» на основе трансформационного метода. [12,15,17]

Пример1. Необходимо создать маскирующее покрытие в виде цилиндрической оболочки $a < r < b$, внешней средой которого является воздух. Сделаем преобразование, переводящее цилиндр в цилиндрическую оболочку

$$r' = f(r) = \left(\frac{b}{b-a} \right) \cdot (r-a), \quad f(r=a)=0, \quad f(r=b)=b, \quad z' = z, \quad \phi' = \phi. \quad (7.53)$$

Уравнения Максвелла

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad \nabla \times \vec{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (7.54)$$

После таких координатных преобразований формально сохраняют свой вид

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\tilde{\mu}}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad \nabla \times \vec{H} = \frac{\tilde{\varepsilon}}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}. \quad (7.55)$$

Если вектор $\vec{E}$ параллелен оси цилиндра z , то картина становится двумерной и z -компоненты проницаемости можно считать постоянными ($D_z = \varepsilon_{zz} E_z, \varepsilon_{zz} = \text{const}$).

Уравнения Максвелла внутри оболочки примут вид

$$i\omega D_z = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial(rH_\phi)}{\partial r} - \frac{\partial H_r}{\partial \phi} \right], \quad i\omega \mu_{rr} H_r = \frac{1}{r} \frac{\partial(D_z / \varepsilon_{zz})}{\partial \phi}, \quad i\omega \mu_{\phi\phi} H_\phi = -\frac{\partial(D_z / \varepsilon_{zz})}{\partial r}. \quad (7.56)$$

В выражениях компоненты проницаемостей входят в виде произведений $\mu_{rr}\varepsilon_{zz}$ и $\mu_{\phi\phi}\varepsilon_{zz}$, поэтому можно взять простые выражения

$$\varepsilon_{rr} = \mu_{rr} = \frac{f(r)}{rf'(r)} = \frac{(r-a)^2}{r^2}; \quad \varepsilon_{zz} = \mu_{zz} = \frac{f(r)f'(r)}{r} = \left(\frac{b}{b-a} \right)^2, \quad \varepsilon_{\phi\phi} = \mu_{\phi\phi} = \frac{rf'(r)}{f(r)} = 1. \quad (7.57)$$

Где a - внутренний, b -внешний радиусы цилиндрической оболочки.

Первая экспериментальная иллюстрация маскировки методом волнового обтекания показана на рис.7.35. экспериментально была создана цилиндрическая оболочка с упрощенными материальными параметрами, дискретностью и поглощением. Покрытие содержало 10 слоев. Каждый слой состоял из множества кольцевых резонаторов. Размеры резонаторов подбирались под соотношения (7.57). На окружности слоев укладывалось целое число резонаторов. В качестве маскируемого объекта взят невысокий полый проводящий цилиндр диаметром 5,2 см. (см рис.7.36.а). Ненулевое поглощение приводит к появлению тени. Дискретность (слои) искривляет прямолинейность из-за рассеяния. Цилиндр, покрытый маскирующей оболочкой (См. рис. 7.36.б) значительно меньше рассеивал падающее излучение в СВЧ диапазоне, чем цилиндр без оболочки. (См рис.7.36а).

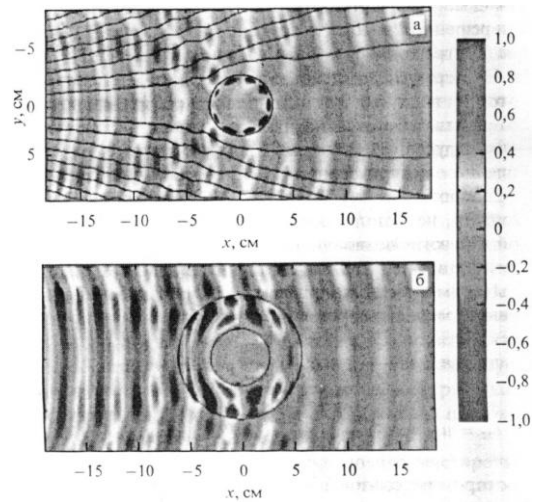
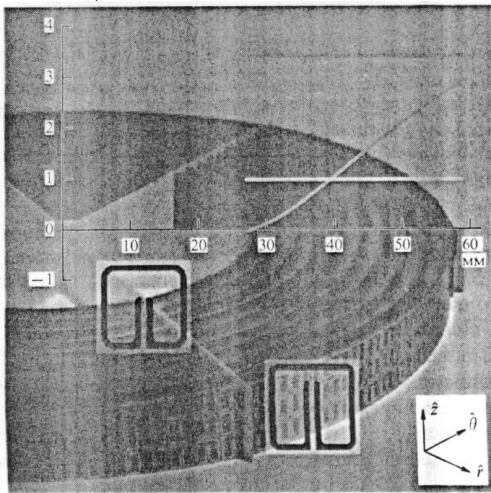


Рис.7.35. Цилиндрическая маскирующая оболочка.[15]

Рис.7.36. Распределение нормированной амплитуды электрического поля: а) экспериментальные измерения с цилиндром без покрытия (тонкие темные линии показывают направление потока энергии поля).

б) Экспериментальные измерения цилиндра с маскирующей оболочкой. [15]

7.3.5. Метаповерхности [20]

Метаповерхности – это класс двумерных оптических метаматериалов субволновой толщины состоящих из метаатомов. Метаповерхности как оптические приборы предназначены для управления светом путем изменения его фазы, амплитуды, поляризации частоты и пространственной структуры.

Обобщенный закон Снеллиуса

Луч направляется от источника А в среде с показателем преломления n_1 в точку В в среде с n_2 (см.рис.7.38) на границе раздела двух сред фаза луча испытывает резкое изменение $\Phi(x)$, где Φ является непрерывной функцией. Согласно принципу Ферма луч пройдет по такой траектории, вдоль которой оптическая длина пути будет наименьшей. Считаем траекторию 1 – основной, 2-её вариацией. На границе раздела двух сред траектория 2 отстоит от основной на малое расстояние dx . Основной луч 1 изменяет фазу на границе сред на величину $\Phi(x)$ в т.Д. Луч 2 изменяет фазу $\Phi(x-dx) = \Phi(x) - d\Phi$ в т.Е. Оптическая длина пути не должна меняться при малом изменении траектории, накопленные вдоль обеих траекторий фазы также должны совпадать.

Фазы, накопленные на отрезках АС и АЕ в объеме среды с n_1 в первом приближении одинаковые. Аналогично для отрезков FB и DB в среде с n_2 . На отрезке CD свет на траектории 1 накапливает фазу $k_0 n_1 dx \sin \theta_1$. На отрезке EF свет на траектории 2 накапливает фазу $k_0 n_2 dx \sin \theta_2$. При прохождении обеих траекторий фаза должна быть одинакова. Учитывая скачки фазы в т.Е и т.Д получаем

$$AC + k_0 n_1 dx \sin \theta_1 + \Phi + DB = AE + k_0 n_2 dx \sin \theta_2 + \Phi - D\Phi + FB$$

Окончательно, сокращая равные промежутки траекторий 1 и 2 в обеих средах при волновом числе $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$, получаем обобщенный закон Снеллиуса с градиентом скачка фазы:

$$n_2 \sin \theta_2 - n_1 \sin \theta_1 = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\Phi}{dx} \quad (7.58)$$

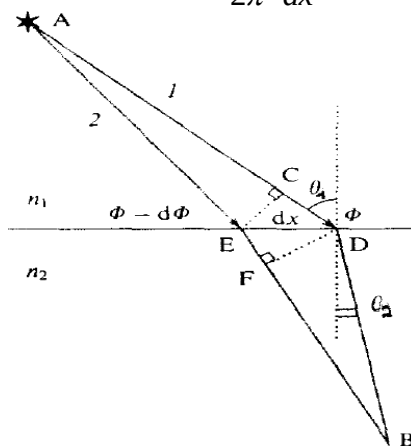


Рис.7.38. На границе раздела двух сред n_1 и n_2 свет претерпевает резкое изменение фазы Φ . Луч 1 пройдет от источника А в тВ через границу раздела так, чтобы малое изменение траектории (путь2) не приводило к изменению наопленной фазы.[20]

Из-за наличия градиента фазы в формуле (7.58) при некоторых углах падения может наблюдаться эффект отрицательного преломления. Два одинаковых угла падения в 1 среде с разных сторон нормали дадут два разных по величине угла прохождения во вторую среду.

Обобщенный закон отражения обратно в 1 среду θ_1 -угол падения, θ'_1 -угол отражения.

$$\sin \theta'_1 - \sin \theta_1 = \frac{\lambda_0}{2\pi n_1} \frac{d\Phi}{dx} \quad (7.59)$$

Наличие нового параметра градиента фазы на границе раздела приводит к существованию критического значения при котором отраженная волна становится затухающей (*эванесцентной*)

$$\theta'_1 - \sin \theta_1 = \arcsin \left(1 - \frac{\lambda_0}{2\pi n_1} \frac{d\Phi}{dx} \right) \quad (7.60)$$

В метаповерхностях резкое изменение фазы возникает из-за рассеяния на метаатомах (наночастицах). Поэтому зависимость скачка фазы Φ от координаты носит дискретный характер. Метаатомы располагаются на метаповерхностях в периодических элементарных ячейках. Метаповерхность напоминает дифракционную решетку, которая на выходе дает несколько максимумов интенсивности излучения в зависимости от угла.

Представим метаповерхность в виде фазированной антенной решетки, состоящей из N точечных источников одинаковой мощности. См. рис.7.3935. Расстояние между источниками Δx одинаково, а фазы излучения источников отличаются на $\Delta\Phi$. Напряженность результирующего поля является суммой напряженности от каждого источника. Фаза излучения каждого источника складывается из фазы, приобретенной светом при прохождении расстояния от источника до точки наблюдения и фазы каждого источника.

$$\delta_m = (\delta + \Delta\Phi)(m-1), \text{ где } \delta = \frac{2\pi\Delta x \sin \theta}{\lambda_0}.$$

Напряженность результирующего поля является суммой напряженности от каждого источника.

$$E = \sum_{m=1}^N \exp(i\delta_m) = 1 + i\delta_m + \dots$$

$$\text{Величина вектора Умова-Пойнтинга } S \propto E^2 = \frac{\sin^2[(\delta + \Delta\Phi)N/2]}{\sin^2[(\delta + \Delta\Phi)/2]}.$$

Максимум будет наблюдаться при $[(\delta + \Delta\Phi)/2] = 0$

$$\text{т.е. при } \frac{2\pi\Delta x \sin \theta}{\lambda_0} + \Delta\Phi = 2\pi m, \quad (7.61)$$

где $m = 0, \pm 1, \dots$ порядок максимума. Главный максимум при $m=0$ остается, если период ячеек меньше длины волны $\Delta x < \lambda_0$. Дополнительные максимумы возникают при $\Delta x \geq \lambda_0$.

Угол волнового фронта для главного максимума

$$\theta_{m=0} = \arcsin \left(-\frac{\lambda_0 \Delta \Phi}{2\pi \Delta x} \right). \quad (7.62)$$

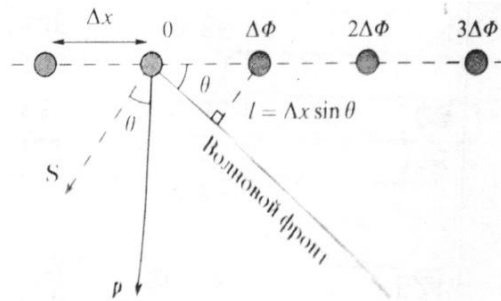


Рис.7.39. Фазированная антенная решетка, состоящая из N точечных источников, изображенных темными кружками. Фаза каждой антенны смещена на величину $\Delta \Phi$ относительно предыдущей. Вектор Умова-Пойнтинга $\vec{S}$ суммарного излучения направлен под углом θ , к нормали $\vec{p}$. [20]

Обобщенный закон Снеллиуса для максимумов прошедшего излучения в формулировке волновой оптики:

$$n_2 \sin \theta_{2,m} - n_1 \sin \theta_1 = -\frac{m\lambda_0}{\Delta x} + \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{\Delta \Phi}{\Delta x}. \quad (7.63)$$

Метаповерхности формируются планарными технологиями, основанными на технологии КМОП (Комплементарная структура Металл-Оксид-Полупроводник). Эффективность метаповерхности равна отношению интенсивности электромагнитной волны, прошедшей по обобщенному закону Снеллиуса, к интенсивности падающей волны.

Рассмотрим экспериментальное подтверждение обобщенного закона Снелиуса. Созданная метаповерхность работала на прохождение. Метаатомами были наночастицы из золота, в виде пары стержней, соединенных под различными углами (см рис.7.40а). Для полного управления излучением необходима возможность поворачивать фазу на $\Delta \Phi = 2\pi$. Изменение фазы рассеянного излучения на π регулировалось изменением длины наностержня. За счет резонанса в стержне возникает скачок фазы на π при переходе через резонансную частоту. Дополнительное смещение фазы осуществлялось поворотом на угол θ от 0 до π с использованием поляризаторов в схеме с кроссполяризацией (геометрический резонанс).

Падающее на метаповерхность излучение поляризовано. Прошедшее и отраженное излучение состоит из двух компонент рис.7.40.б: обыкновенное излучение, поляризованное в плоскости падающего и необыкновенное, поляризованное в перпендикулярной плоскости. Эффективность V-образных наночастиц выше, чем у наностержней. V-наночастицы обладают двумя резонансными модами: симметричной и антисимметричной, что позволяет поляризовать падающую волну в x- и y-направлениях. Длина стержней и угол

между ними позволяют установить нужные смещения фазы и сохранить постоянную амплитуду рассеяния.

Размер элементарной ячейки составлял 1,5 мкм, длина стержней составляла от 0,8 до 1,6 мкм, толщина стержней 50 нм. Измерения проводились в инфракрасном спектре с длинами волн от 8 до 21 мкм. Зависимость интенсивности излучения, прошедшего через метаповерхность от угла измерения показана на рис. 7.40. в, г. для разных размеров суперячейки Γ необыкновенное излучение преломляется под разными углами: чем меньше длина волны, тем больше угол отклонения. Эффективность метаповерхности не превышает 40%.

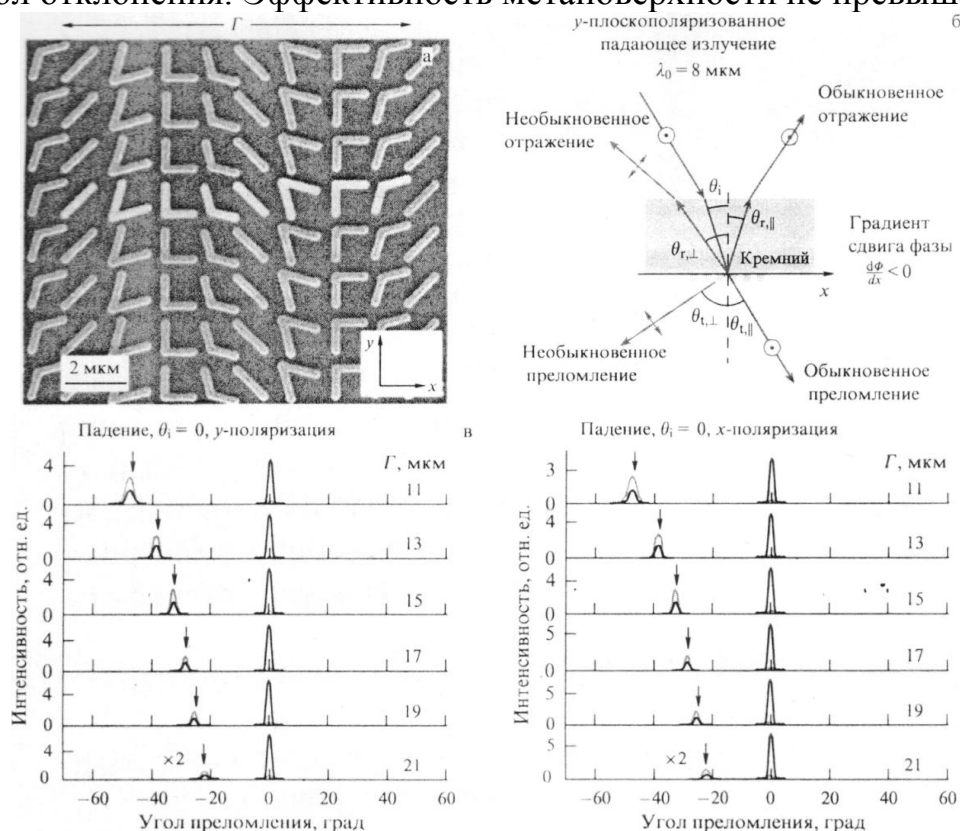


Рис. 7.40. Схема реализации обобщенного закона Снеллиуса. а) Изображение метаповерхности в электронном микроскопе. В 4-ой строке начиная со 2-го столбца находится суперячейка из 8-и метаатомов. б) Схема эксперимента. На метаповерхность падает у-поляризованное излучение. После прохождения оно разделяется на обыкновенное и необыкновенное излучения. послеотражения разделяется на обыкновенное и необыкновенное отраженные излучения. в) и г) Зависимость интенсивности прошедшего излучения от угла измерения для х- и у-поляризованной обыкновенной падающей волны. [20].

Использование фазы Панчаратнама-Берри

Для излучения с круговой поляризацией применяют другой способ управления фазой излучения метаатомов, связанный с изменением фазы Панчатратмана-Берри, который не зависит от длины волны излучения. Метаатомы на метаповерхности — это наностержни, повернутые под определенным углом к оси. На метаповерхность падает циркулярно поляризованная электромагнитная волна. В процессе взаимодействия с падающей волны с метаатомом появляется дополнительная рассеянная волна с противоположной поляризацией.

Угол поворота стержня определяет фазу рассеянной волны: $\Delta\Phi = 2\varphi$. Поворот наностержня в пределах угла π позволяет обеспечить смещение фазы в диапазоне от 0 до 2π . Падение волны с круговой поляризацией на наностержень превращает его в дипольную антенну, которая преизлучает первичную волну с той же поляризацией и излучает вторичную волну с противоположной круговой поляризацией. Эта последняя волна содержит множитель, который зависит от поляризации и угла поворота стержня φ . Этот множитель не зависит от длины волны излучения.

Поляризация излучения $\sigma = \pm 1$ влияет на знак градиента фазы метаповерхности. Согласно формуле (7.52), волна с разной поляризацией будет отклоняться в разные стороны относительно направления обычного преломления (см рис.7.41 в.г.).

Метаатомы, изменяющие фазу Панчаратнама-Берри, могут иметь П-образную форму. Управлять фазой Панчаратнама-Берри можно с помощью отверстий в виде эллипса в тонкой металлической форме.

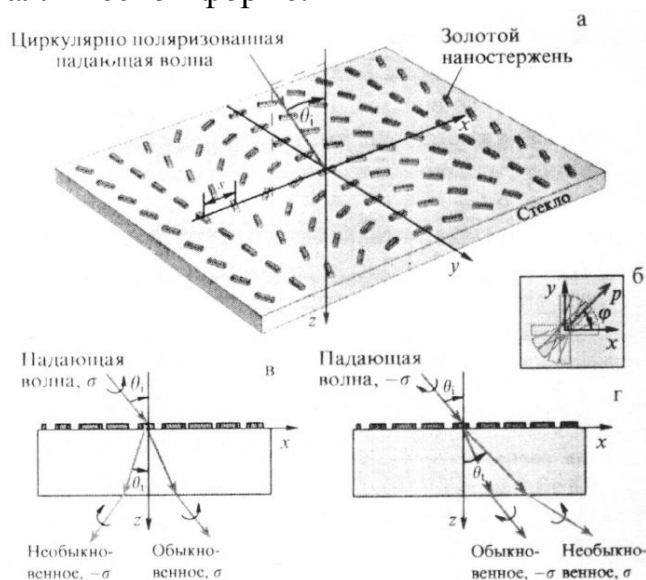


Рис.7.41. Управление циркулярно-поляризованным излучением. а) Метаповерхность из золотых стержней на стеклянной подложке. б) Вид отдельного стержня. Стержень повернут на свой угол φ , что позволяет контролировать фазу в пределах 2π . в) Падающая волна с левой поляризацией, прошедшая необыкновенная волна с правой поляризацией отклоняется влево. г) Падающая волна с правой поляризацией. Прошедшие волны с разной поляризацией отклоняются вправо на разные углы. [20]

Экспериментальная реализация метаповерхности на основе фазы Панчаратнама-Берри показана на рис.7.42. Излучение с круговой поляризацией падало на метаповерхность построенную из наностержней. На рис 7.42.а приведены две суперячейки по восемь наностержней, повернутых на угол φ , которые обеспечивают смещение фазы переизлучённой волны с обратной поляризацией $\Delta\Phi = 2\varphi$. Интенсивность прошедшего через метаповерхность излучения фиксировалась детектором под разными углами. На рис.7.42.б показаны экспериментальные данные зависимости угла прохождения от угла падения для излучения с левой поляризацией. для обычного и обобщенного законов Снеллиуса экспериментальные данные согласуются с теоретическими.

На рис.7.42.в приведена рассчитанная зависимость интенсивности прошедшего через метаповерхность излучения от угла наблюдения и длины волны. Треугольники на рисунке соответствуют экспериментальным значениям углов прохождения. Видно, что метаповерхность работает в широком спектре и наблюдается дисперсионная зависимость угла преломления от длины волны излучения.

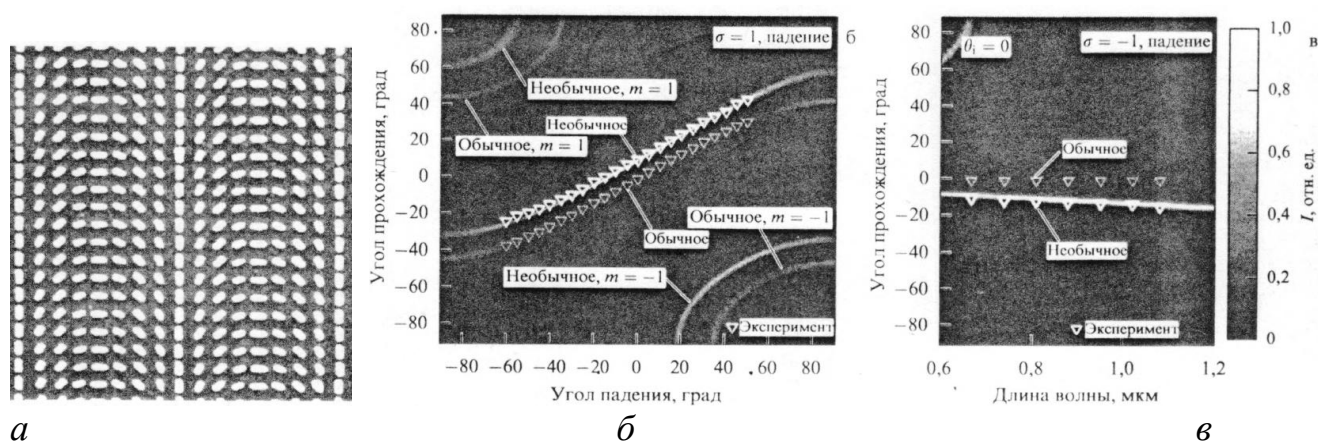


Рис.7.42. а) Изображение метаповерхности на основе фазы Панчаратнама-Берри полученное электронным микроскопом.б)Рассчитанная зависимость интенсивности прошедшего излучения от углов падения и прохождения. в) Рассчитанная зависимость интенсивности прошедшего излучения от длины волны и угла прохождения. Излучение на метаповерхность падало перпендикулярно.Треугольники –экспериментальные данные.[20]

Метаповерхности применяются для создания линз субволновой толщины называемых металинзами. Линзы, основанные на диэлектрических частицах эффективнее, чем линзы на металлических V-образных наночастицах. Например, металинза на основе наностолбиков окиси титана работает в широком диапазоне частот видимого спектра.

На основе метаповерхностей можно создавать голограммы. Метаповерхность состояла из кремниевых столбиков высотой 865 нм, радиус которых изменялся от 79 нм до 212 нм. Постоянная решетки 750 нм. Размер голограммы 0,75 мм.дифракционная эффективность голограммы 99% прозрачность метаповерхности 90% . Моноформное изображение высокого качества было получено на расстоянии 10 мм отметаповерхности.

7.3.6. Гибридные наноантенны [21]

Управлять электрической и магнитной компонентами оптической волны на нанометровом масштабе можно используя резонансные наноструктуры называемые *оптическими наноантеннами*. К ним относятся:

Плазмонные (металлические) наноантенны, работающие на основе локализованного плазмонного резонанса. Они обладают сильной локализацией электромагнитного поля около 100 нм и большим поглощением в оптическом диапазоне.

титаната бария размером 100 нм образуют димер. Для изготовления применялся метод последовательной капиллярной агрегации наночастиц золота и титаната бария в полости, сформированные в полимерном резисте электронно-лучевой литографией. BaTiO_3 служит для генерации сигнала на удвоенной частоте. Плазмонная частица из Au в составе димера усиливает генерацию второй гармоники за счет эффекта Парселла в 15 раз против одиночных частиц титаната бария.

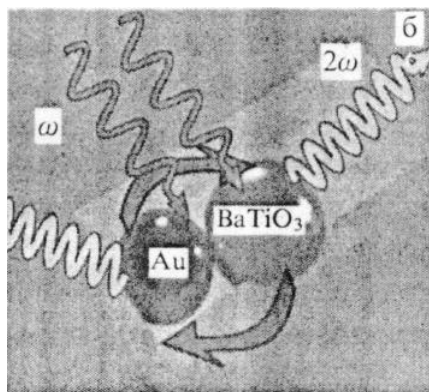


Рис. 7.45. Гибридный нанодимер из сферических наночастиц золота Au и BaTiO_3 [21]

Литература

- 1 Каплун В.А., Браммер Ю.А., Лохова С.П., Шостак И.В. Радиотехнические устройства и элементы радиосистем. Учебное пособие. М.: Высшая школа, 2002.- 294 с.
- 2 Asakawa K. et al. Photonic crystal and quantum dot technologies for all-optical switch and logic device. // New Journal of Physics, V.8, N.208 (2006), P. 1-26.
- 3 Serebrennikov A.M. "Multipolar resonant particle modes as elementary excitations in chain waveguides: Theory, dispersion relations and mathematical modeling.// Optics Communications, V. 284, N. 21 (2011), P. 5043-5054.
- 4.Климов В.В. Наноплазмоника. //УФН т178, №8, с.875-880. (2008)
- 5.Noginov M.A et.al.Demonstration of a spaser-based nanolaser// Nature. 460, 2009.- p.1110-1112.
- 6.Андрианов Е.С.Виноградов А.П.,Дорофеев А.В., Зябликовский А.А.,ЛисянскийА.А.Пухов А.А. Квантовая плазмоника учеб. пособие. Долгопрудный изд. Дом «Интеллект»,2015.- 368 с
- 7.Гарри Этуотер Плазмоника. (обзор).2013г .сайт википедия
- 8.Б.Салех,М.Тейх Оптика и фотоника принципы и применения. Учеб пособие. В 2 т, Т.2. —Долгопрудный: Изд. Дом «Интеллект»,2012.-784 с
- 9.Веселаго В. Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ // УФН. 1967. Т. 92. С. 517.
- 10.Pendry J. B., Schurig D., Smith D. R. // Science. 2006. V. 312. P. 1780.
- 11.Манцызов Б.И. Когерентная и нелинейная оптика фотонных кристаллов. — М.: Физматлит, 2009. — 206 с.
12. Нелинейности в периодических структурах и метаматериалах. Под ред проф Ю.С.Кившаря. проф Н.Н.Розанова - М.: Физматлит, 2014. -384 с.; гл 13. Н.М. Литченицер. В.М. Шалаев Оптические метаматериалы: невидимость в видимом диапазоне и нелинейность для обратных направлений,291-322с.

13. Методы получения и исследования наноматериалов и наноструктур.: учебное пособие/Е.Д. Мишина и др.; под ред А.С. Сигова.-2 изд.-М.: БИНОМ.Лаборатория знаний 2013.-184 с.
14. Агранович В Миллс Д. Поверхностные поляритоны.Электромагнитные волны на поверхностях и границах раздела сред.М.:Наука. 1985.
15. Дубинов А.Е. Мытарева Л.Ф. Маскировка материальных тел методом волнового обтекания УФН 2010, т.180, с. 475-501.
16. Долин Л.С. Изв. Вузов, Радиофизика.1961, т4. с.964.
17. Розанов Н.Н. УФН, 2011, т.181, с.787.
18. Потапов А.Л. Метаматериалы-Миф или реальность? Обратный показатель преломления часть2.// ФОТОНИКА № 2, 2017, с.62-79.
19. Балыкин В.И. Плазмонный нанолазер: современное состояние и перспективы.// УФН. т188. №9, с. 935-963.
- 20.Ремнев М.А., Климов В.В. Метаповерхности: новый взгляд на уравнения Максвелла и новые методы управления светом //УФН т.188, №2, с.169-205.
- 21.Лепешков С.И.,Краснок,А.Е.,БеловП.А., Мирошниченко А.Е. Гибридная фотоника // УФН, т.188, №11, с.1137-1154.

ЧАСТЬ II. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ ОПТОИНФОРМАТИКИ

Глава 8 ОПТИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ, ХРАНЕНИЕ И СЧИТЫВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ

8.1. Устройства памяти [1]

Устройства памяти-устройства для записи, хранения и воспроизведения информации.

Носитель информации – физический сигнал или среда. Сама информация – задается параметрами сигнала или параметрами состояния среды. Процесс записи информации – воздействие сигнала на носитель, изменяющее состояние этого носителя. Считывание информации – изменение параметров считывающего сигнала или его генерация под действием носителя.

Физические способы записи, хранения и считывания информации могут быть, электрическими, магнитными, оптическими, акустическими и др.

Элемент памяти (ЭП) – наименьший участок среды носителя информации, позволяющий хранить единицу информации.

Бистабильный элемент информации может принимать и хранить два стабильных состояния. Число бит информации n , которые может хранить q -стабильный элемент, определяются как

$$n = \ln_2 q$$

В вычислительной технике информация хранится блоками по n бит называемых *словами* или *ячейками памяти*. При $n=8$ слово содержит $8 \text{ бит} = 1 \text{ байт}$.

Характеристики устройств памяти:

- Время записи (считывания) информации определяется временем переключения элемента памяти из одного устойчивого состояния в другое.
- Характерное время хранения информации определяется физическими принципами её хранения.
- Плотность размещения информации измеряется, как отношение числа бит сохраняемых носителем к его площади или объему (для объемных носителей).
- Информационная емкость устройства памяти определяется произведением полного числа элементов памяти (ЭП) на число бит в ЭП.

8.1.1. Элементы памяти на макроскопических структурных изменениях (нарушениях формы) носителя

Запись и хранение информации осуществляется нарушением поверхности или рельефа носителя, механической перфорацией носителя. Считывание механическим, электромеханическим или оптическим методами. Пример: оптические диски. Запись – лазерным пучком прожиганием отверстий в непрозрачной подложке. Считывание информации – лазерным пучком меньшей интенсивности, из-за различия коэффициента отражения ЭП, подвергнутых действию лазерного облучения и не подвергнутых. Каждый элемент памяти имеет два стабильных состояния и позволяет хранить 1 бит информации.

На стандартном оптическом диске диаметром 30,5 см храниться $12 \div 32 \text{ Гбит}$. Время записи (считывания) информации для оптического диска

составляет от 100 до 500 мс. Плотность записи $10^8 \text{ бит} / \text{см}^2$, высокая светочувствительность $10^{-9} \text{ Дж} / \text{бит}$.

Запись осуществляется маломощными полупроводниковыми лазерами 5-10 мВт. Сравнительно простая технология, низкая стоимость носителей и процессов записи. Запись одного бита информации на оптическом диске в тысячу раз дешевле, чем магнитная запись на лентах и дисках. Низкая стоимость и надежность в эксплуатации - решающие факторы широкого практического применения оптических дисков.

8.1.2. Магнитные элементы памяти

Принцип действия основан на сохранении намагниченности носителя после выключения внешнего магнитного поля. Различают магнитные ЭП на ферритовых кольцах и магнитных лентах. Другими типом являются ЭП на *цилиндрических магнитных доменах* (ЦМД). В нем перемещение ЦМД осуществляется по направлению от головки записи к головке чтения при приложении внешнего продольного поля. Поле создается коммутацией тока системой проводников в подложке.

Минимальный размер магнитных ЭП составляет 5 мкм для дисков и 1 мкм для ЦМД. Плотность записи информации для магнитной ленты 600 бит /мм, для магнитного диска $10^4 \text{ бит} / \text{мм}^2$ для устройства на ЦМД $10^5 \text{ бит} / \text{мм}^2$.

Характерное время сохранения информации от нескольких лет до десятков лет. Время записи (считывания) для магнитной ленты $1 \div 100 \text{ Кбит} / \text{с}$, для магнитных дисков $\approx 10 \text{ Мбит} / \text{с}$, для устройств памяти на ЦМД $1 \text{ Мбит} / \text{с}$.

Достоинствами магнитных устройств памяти являются энергонезависимость (сохранение информации при отключении питания), и высокая радиационная стойкость.

Недостатки: потеря информации в сильных магнитных полях и высоких температурах.

8.1.3. Электрические элементы памяти

В основе работы лежат различные эффекты перераспределения в ЭП тока, заряда, или напряжения. Наиболее распространенными являются полупроводниковые устройства памяти. Рассмотрим постоянные запоминающие устройства (ПЗУ). В них информации записывается на этапе изготовления устройства памяти путем наличия или отсутствия перемычки в виде цепи истока полевого транзистора. Современные ПЗУ емкостью 1 Мбит состоят из ЭП площадью $\approx 30 \text{ мкм}^2$ и временем переключения $\approx 80 \div 150 \text{ нс}$.

Динамика увеличения плотности хранения информации для полупроводниковых устройств памяти приведена на рис.8.1.

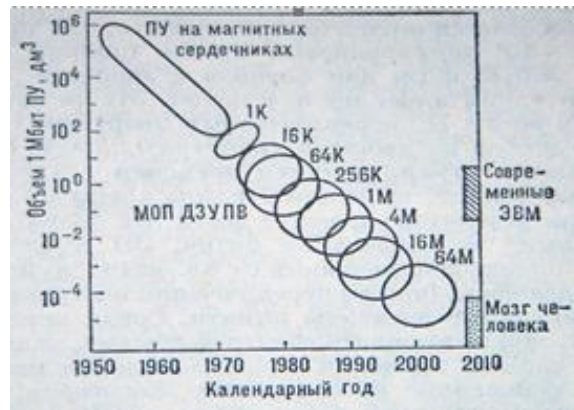


Рис.8.1. Увеличение плотности хранения информации для полупроводниковых устройств памяти в зависимости от времени.[1]

Сравнение предельных характеристик устройств памяти приведено на рис.8.2.



Рис.8.2. Предельные характеристики различных устройств памяти. Нейрон мозга имеет время переключения 10^{-1} с, мощность / бит (Вт) = 10^{-9} , энергию переключения 1 нДж.[1]

8.2. Оптические элементы памяти

В основе оптических ЭП лежит явление оптической бистабильности. Для создания бистабильного устройства требуется два свойства: нелинейность и обратная связь.

Оптическая бистабильность – самовоздействие света в нелинейных системах с обратной связью. Определенной интенсивности и поляризации падающего излучения соответствуют два возможных устойчивых стационарных состояния поля прошедшей волны, которые отличаются амплитудой или параметрами поляризации.

Именно обратная связь в нелинейных системах является причиной возникновения области значений параметров интенсивности и поляризации падающего излучения, для которой передаточные характеристики выходной интенсивности I_n , степени эллиптичности ε_n , и угла наклона главной оси эллипса поляризации φ_n неоднозначно зависят от характеристик падающего излучения $(I, \varepsilon, \varphi)$.

Если двум фиксированным значениям падающего излучения $(I, \varepsilon, \varphi)$ соответствуют два стационарных состояния поля прошедшего излучения

$(I_n, \varepsilon_n, \varphi_n)$. Тогда в этой области параметров $(I, \varepsilon, \varphi)$ в оптической системе реализуется оптическая бистабильность. Наряду со стационарными состояниями в нелинейной системе с обратной связью могут возникать режимы устойчивого, периодического, субгармонического и хаотического изменения интенсивности поляризации света.

8.2.1. Амплитудная бистабильность в пассивном кольцевом оптическом резонаторе [2]

В кольцевом оптическом резонаторе (ОР) содержащем изотропную нелинейную среду, возникает дисперсионная оптическая бистабильность, если от интенсивности света зависит показатель преломления среды.

Предположим, что поляризация света неизменна в оптическом резонаторе, когда длительность падающего импульса τ_u много больше времени обхода ОР t_p и времени релаксации нелинейности τ ($\tau_u \gg t_p$, $\tau_u \gg \tau$).

Изменение медленно меняющейся амплитуды линейно поляризованной волны $E(t, z)$ в нелинейной непоглощающей среде, помещенной в оптический резонатор, описывается уравнением

$$\frac{\partial E}{\partial z} + \frac{1}{v} \frac{\partial E}{\partial t} = -\frac{ik}{n_0} n E \quad (8.1)$$

Где v - групповая скорость, k - волновое число, n_0 - линейный показатель преломления. Зависящая от интенсивности нелинейная добавка n_2 к n_0 , удовлетворяет релаксационному уравнению

$$\tau \frac{\partial n_2}{\partial t} + n_2 = \alpha |E|^2, \quad (8.2)$$

где α - константа среды.

В кольцевом оптическом резонаторе, линейно поляризованное излучение, проходя через входное зеркало, с коэффициентом отражения r , падает в точке $z=0$ на нелинейную среду длины l . см. рис.8.3.

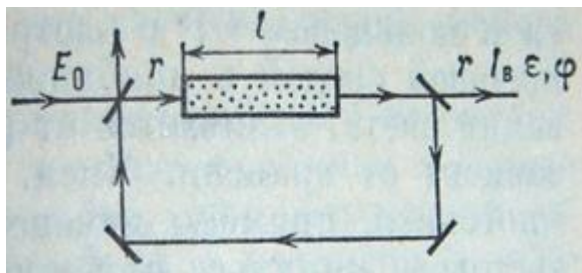


Рис.8.3 Схема кольцевого резонатора с нелинейным элементом длиной l . [2]

Пройдя через неё, оно частично отражается от выходного зеркала с коэффициентом отражения r , полностью от двух других зеркал и снова попадет в среду.

Интегрируя уравнения (8.1) и (8.2) и учитывая граничные условия в точке $z=0$ получаем систему уравнений для поля на входе в среду $E(t, 0)$ и для

нелинейного изменения фазы $\bar{\Phi}(t)$ при прохождении светового импульса через ОР.

$$E(t, 0) = (1-r)^{1/2} E_0 + rE(t-t_p) \exp\{-i(\Phi_0 + \bar{\Phi})\}$$

$$\tau \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial t} + \bar{\Phi} = \alpha k l |E(t-t_p, 0)|^2 \quad (8.3)$$

Здесь E_0 - амплитуда падающей волн, $\Phi_0 = k(n_0 l + L)$, $l + L$ - полная длина ОР.

В стационарном режиме система уравнений (8.3) сводится к трансцендентному уравнению для поля в оптическом резонаторе. ($|E_0|^2 \equiv I_{ex}$, $|E_c|^2 \equiv I_c$)

$$(1-r)I_{ex} = I_c [1 + r^2 - 2 \cos(\Phi_0 + \alpha k l I_c)]. \quad (8.4)$$

Уравнение (8.4) решается графически представлением в виде системы уравнений для коэффициента пропускания $T_c = (1-r) \frac{I_c}{I_{ex}}$ и полного изменения фазы Φ .

$$T_c = (1-r)^2 (1 + r^2 - 2r \cos \Phi)^{-1} \quad (8.5)$$

$$T_c = (1-r)(\Phi - \Phi_0) / \alpha k l I_{ex} \quad (8.6)$$

Уравнение (8.5) описывает кривую пропускания рис.8.2а. Уравнение в (8.6) дает семейство прямых выходящих из начала координат, наклон которых меняется с изменением интенсивности падающего света. Точки пересечения семейства прямых и кривой пропускания дают решение уравнения (8.4). Для простоты положено $\Phi_0 = 0$.

При малых I_{ex} - точка А и больших I_{ex} - точка D решение(8.4) единственно.

При интенсивностях падающего света $I_{\delta 1} < I_{ex} < I_{\delta 2}$ возникает три рабочие точки (С, Е, G). Граничным интенсивностям соответствуют участки прямых $BF(I_{\delta 1})$ и $DK(I_{\delta 2})$ см рис. 8.4а. Только две рабочие точки, лежащие на участках BD и FK являются устойчивыми относительно плосковолновых возмущений той же поляризации. Точка Е лежащая на участке DF неустойчива.

При адиабатическом изменении I_{ex} меняется показатель преломления нелинейной среды и следовательно оптическая длина резонатора. Возникающая из-за этого фазовая расстройка ОР от начального состояния приводит к изменению выходной интенсивности. При увеличении входной интенсивности рабочая точка движется до точки D (см. рис.8.4.б). В ней стационарное состояние становится неустойчивым и происходит переход в устойчивую точку К с большей выходной интенсивностью, и движется по устойчивому участку KL кривой пропускания.

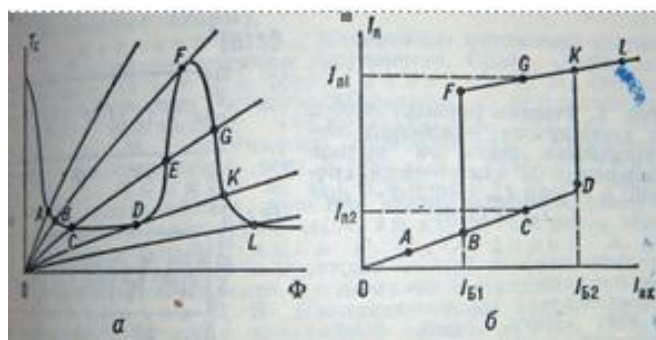


Рис.8.4 Амплитудная бистабильность. а) графическое решение уравнения (8.5) $T_c = (1-r)^2 (1+r^2 - 2r \cos \Phi)^{-1}$ -кривая пропускания.

$T_c = (1-r)(\Phi - \Phi_0) / k\alpha I_{вх}$ - прямые секущие из начала координат. Принято $\Phi_0 = 0$.

б) Гистерезисная зависимость интенсивности света на выходе оптического резонатора от интенсивности линейно поляризованной накачки. [2]

Если теперь уменьшать входную интенсивность, рабочая точка движется обратно по верхней наклонной прямой $LKGF$ (см рис.8.4.б). В точке $F(I_{вх} = I_{б1})$ рабочая точка переходит в положение B , выходная интенсивность резко падает, и далее устойчиво уменьшается на участке BA . Возникает цикл. В результате циклического изменения входной интенсивности передаточная характеристика $I_n(I_{вх}) = (1-r)I_c$, $\varepsilon_n = \varepsilon$, $\varphi_n = \varphi$ принимает вид петли *гистерезиса*. Если входную интенсивность держать в интервале $I_{б1} < I_{вх} < I_{б2}$, то выходная интенсивность I_n может быть большой или маленькой в зависимости от увеличения или уменьшения входной интенсивности. Возникает бистабильное поведение, лежащее в основе оптических двоичных переключающих устройств.

Оптическая бистабильность это оптический аналог электронных гистерезисных явлений, которые использовались при создании ЭВМ. Запись информации может происходить с помощью нелинейного оптического резонатора (ОР) работающего в бистабильном режиме. Устойчивые стационарные состояния поля, это точки G и C , им соответствуют интенсивности I_{n1} и I_{n2} . Под действием управляющих импульсов возможны переключения между ними. Переход из нижнего устойчивого состояния в верхнее, обеспечивается одним импульсом с достаточно большой интенсивностью, если он распространяется параллельно основной волне. При этом начальная выходная интенсивность I_{n2} сначала возрастает до значения, соответствующего точке L , а затем уменьшается до I_{n1} (см. Рис.8.4.б).

8.2.2. Бистабильные оптические устройства [3]

Бистабильные оптические устройства содержат оптические элементы двух типов:

1. Дипергирующие нелинейные элементы, у которых показатель преломления n является функцией оптической интенсивности. Это интерферометры Маха-Цендера и эталон Фабри –Перро, у которых среда обладает оптическим эффектом Керра

$$n = n_0 + n_1 I_0 \quad (8.6)$$

В интерферометре Маха-Цендера нелинейная среда помещается в одном плече см. рис.8.5.

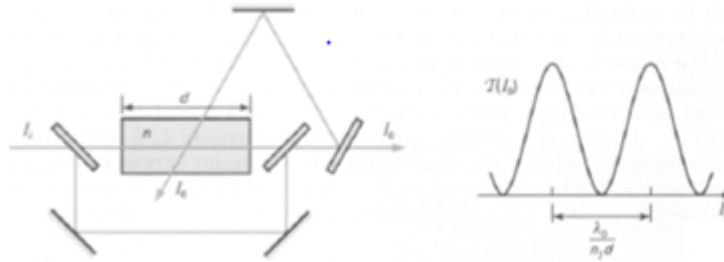


Рис.8.5. Интерферометр Маха-Цендера с нелинейной средой, показатель преломления которой управляется прошедшей интенсивностью I_0 за счет эффекта Керра.[3]

Коэффициент пропускания системы по мощности равен

$$\Upsilon = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \left(2\pi \frac{d}{\lambda_0} n + \varphi_0 \right) \quad (8.7)$$

Где d -длина активной среды, λ_0 длина волны в свободном пространстве. φ_0 - постоянная.

Подставляя n из (8.6) получаем

$$\Upsilon(I_0) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \left(2\pi \frac{d}{\lambda_0} n_2 I_0 + \varphi \right), \quad (8.8)$$

где $\varphi = \varphi_0 + 2\pi \frac{d}{\lambda} n_0$ -фаза, $\Upsilon(I_0)$ -нелинейная функция, состоящая из периодического повторения колоколообразной функции, обеспечивающей бистабильность.

2.Диссипативные нелинейные элементы, у которых функцией интенсивности является коэффициент поглощения. См. рис.8.6.

Коэффициент поглощения α насыщаемого поглотителя нелинейная функция оптической интенсивности I .

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + \frac{I}{I_s}}, \quad (8.9)$$

где α_0 -коэффициент поглощения слабого сигнала. I_s -интенсивность насыщения.

Если поглотитель помещен внутри эталона Фабри –Перро длиной d , которая настроена на максимальное пропускание, то коэффициент пропускания

$$\Upsilon = \frac{\Upsilon_1}{(1 - R \exp(-\alpha d))^2}. \quad (8.10)$$

Если среда оптически тонкая $\alpha d \ll 1$, $e^{-\alpha d} = 1 - \alpha d$ и $I = I_0 / \Upsilon_0$,

$$\Upsilon = \frac{\Upsilon_1}{[1 - R(1 - \alpha d)]^2} \quad (8.11)$$

При некоторых значениях α_0, d, R система бистабильна.



Рис.8.6. Бистабильное устройство, состоящее из насыщаемого поглотителя в резонаторе Фабри-Перро.[3]

Схема элемента памяти должна быть нелинейной и иметь обратную связь. Тогда при циклических изменениях входной интенсивности светового пучка на входе бистабильного ЭП он может функционировать обратимо. Простейшим примером бистабильного оптического ЭП является интерферометр Фабри-Перо, заполненный средой с насыщающимся поглощением, на рис.8.7а. Зависимость интенсивности прошедшего пучка от интенсивности падающего света имеет вид петли гистерезиса., где области 1 и 3 являются областями стабильности ЭП.

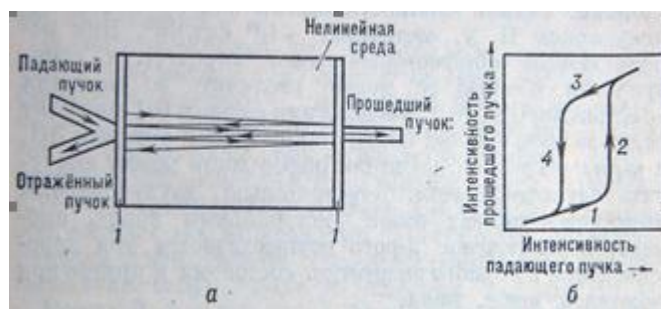


Рис.8.7.а) Интерферометр Фабри-Перо как оптически бистабильный элемент. 1- полупрозрачные зеркала. Нелинейная среда-насыщаемый поглотитель в резонаторе.

б) Петля гистерезиса зависимости интенсивности прошедшего пучка от интенсивности падающего пучка.[2]

Минимальный размер оптического ЭП определяется минимально необходимым числом атомов ансамбля, для которого устойчиво наблюдается оптическая бистабильность. Это число составляет $\sim 10^3$ двухуровневых атомов (полная энергия системы $0,25 \text{ фДж}$ для фотонов с энергией $1,5 \text{ эВ}$). ($1 \text{ фДж} = 10^{-15} \text{ Дж}$).

Полупроводники *GaAs*, *InSb*, *InAs*, *CdS* обладают высокой оптической нелинейностью, из-за экситонных эффектов на длинах волн вблизи краев запрещенной зоны. Бистабильное устройство состоит из тонкого слоя полупроводникового материала с двумя параллельными частично отражающими поверхностями, действующими как зеркала эталона Фабри-Перро.

Пример. Оптический элемент памяти на базе *GaAs* при температуре 10 К энергия переключения 15 фДж , распределенная на площади диаметром $0,25 \text{ мкм}$. Времена переключения ограничиваются временем установления поля в резонаторе, временем отклика среды и динамическими эффектами в резонаторе. Это время достигает долей *нс*. См. рис.8.2.

Массивы бистабильных элементов могут размещаться на одном чипе с отдельными пикселями, определяемыми световыми пучками. Возможно

изготовление массива 100×100 пикселей на пластине GaAs площадью 1 см^2 . Если энергия переключения $E = 1 \text{ пДж}$, а время переключения $T = 100 \text{ пс}$, то для $N = 10^4 \text{ пикселей} / \text{см}^2$, тепловая нагрузка составляет $NE/T = 100 \text{ Вт} / \text{см}^2$, что требует хороший теплоотвод. Устройство, как коммутатор, может выполнять 10^{14} битовых операций в секунду.

Достоинством оптических ЭП является их высокая помехозащищенность от электромагнитных шумов и высокая надежность (количество переключений неограниченно).

Оптические бистабильные устройства могут стать базовыми элементами систем оптической обработки информации, оптических логических и компьютерных систем.

8.3. Голографические элементы памяти

Голографические элементы памяти используют для записи, хранения и восстановления изображений явление голографии. Это аналоговые элементы памяти. Их оптическая плотность носителя информации, например, эмульсионного слоя фотопластинки, меняется непрерывно.

Запоминающие голографические устройства (ЗГУ) используют голографический способ записи, хранения, восстановления информации, представленной в двоичном коде, алфавитно-цифровом виде, или виде изображений. Информация записывается как плоская или объемная, амплитудная, фазовая или поляризационная голограмма. Достигается большая плотность информации $\sim 10^5 \text{ бит} / \text{мм}^2$, высокая помехоустойчивость и надежность.

Голограмма, как оптический элемент - это периодическая структура, с промодулированным амплитудным пропусканием, обусловленным изменением проводимости σ или/и диэлектрической проницаемости ϵ . На периодической структуре освещающая волна дифрагирует и преобразуется в другую волну. Голограммы называют фазовыми, если модуляция амплитудного пропускания обусловлена только изменением ϵ , и амплитудными голограммами, в случае изменения σ .

8.3.1. Оперативные запоминающие голографические устройства (ЗГУ)

Данные разбиваются на страницы объемом $10^3 \div 10^4 \text{ бит}$, каждая из которых записывается в виде отдельной голограммы. Весь массив данных записывается и хранится в виде матрицы голограмм на светочувствительном материале, называемом носителем информации. Любая страница может быть считана лазерным лучом.

Основные элементы ЗГУ приведены на рис.8.8: Лазер, дефлектор Д, устройство для набора страниц (УНС), Носитель информации, фотоматрица (ФМ), оптические элементы.

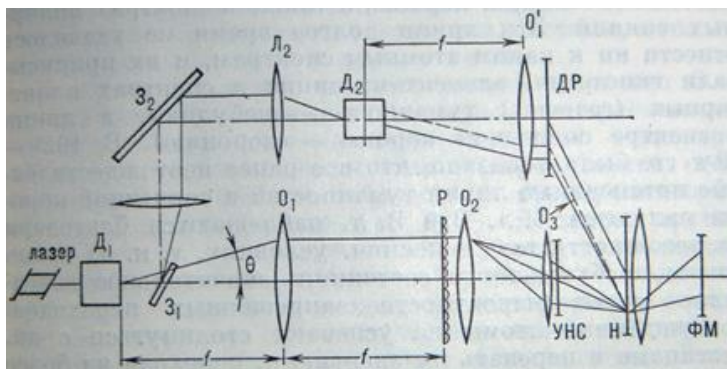


Рис.8.8. Оптическая система запоминающего голографического устройства с трехкоординатной сеткой.

Используются лазеры газоразрядные в режиме одномодовой генерации. Акусто- или электрооптический дефлектор служит для точного и быстрого отклонения луча в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. УНС формирует транспарант входной страницы и вводит её в световой поток. Это пространственный матричный модулятор света пьезокерамический или жидкокристаллический. УНС на керамике имеет число ячеек, контраст 50:1, время последовательного набора страницы 2 мс. Носитель тонкий слой регистрирующей среды, нанесенный на толстую прозрачную подложку (стеклянную). Слой допускает стирание и перезапись голограмм. Это магнитооптические пленки или электрооптические материалы.

Массив страниц записывается и хранится на носителе в виде матрицы пространственно разделенных и регулярно расположенных Фурье голограмм. См. рис.8.9. В них реализуется максимальная плотность записи информации $n_{\max} \approx 10^8 \text{ бит} / \text{мм}^2$ при избыточности, обеспечивающей надежную помехозащищенность.

При считывании информации опорный пучок адресуется дефлектором на нужную голограмму. Мнимое изображение страницы рис.8.9, восстановленное голограммой, проецируется линзой на фотоматрицу, которая детектирует оптическое изображение страницы и запоминает её.

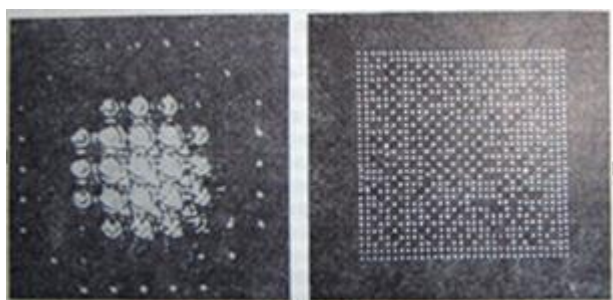


Рис.8.9. Слева- фурье-голограмма двоичной входной страницы. Справа- Изображение двоичной входной страницы.

Трехмерные голограммы имеют большую информационную емкость и ассоциативный характер памяти. *Селективный* характер записи, т.е. способность голограммы взаимодействовать только с теми компонентами восстанавливающего излучения, которые присутствовали на этапе записи. Большая емкость записи

достигается тем, что на один и тот же участок фотоматериала V можно последовательно впечатать голограммы различных объектов ($O_1, O_2, \dots$) при разных направлениях опорной волны ($R_1, R_2, \dots$) и длинах волн записывающего излучения ($\lambda_1, \lambda_2, \dots$) см. рис.8.10. Каждая из записанных голограмм может быть считана затем независимо, если её восстановить волной совпадающей с опорной волной, использованной при записи.

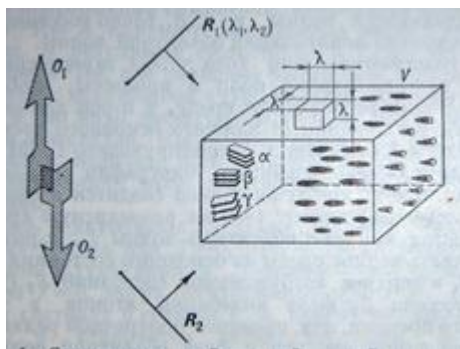


Рис.8.10. Селективные (избирательные) свойства трехмерной голограммы.

При таком способе записи информации элементами, в которых она хранится, являются трехмерные гармоники (α, β, γ) изменения показателя преломления, каждая из которых заполняет весь объем голограммы. Количество таких независимых элементов равно числу пространственно-локализованных ячеек с размерами $(\lambda \times \lambda \times \lambda)$, которое можно вместить в объеме V . Например, при записи в видимом диапазоне $\lambda = 0,5 \text{ мкм}$ в 1 см^3 помещается 10^{13} независимых гармоник.

Трехкоординатные ЗГУ используются объемные голограммы. Для различения наложенных объемных голограмм используется их угловая селективность. Она основана на изменении несущей пространственной частоты. Третьей координатой выбирается угол падения опорного пучка.

Для записи объемных голограмм используют электрооптические кристаллы LiNbO_3 , $\text{Ba}_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{Nb}_2\text{O}_6$. Записывается порядка 100 голограмм на кристалл. Плотность записи информации $10^5 \div 10^6 \text{ бит} / \text{мм}^2$. Емкость ЗГУ составляет 10^{12} бит . Они перспективны для создания архивной памяти.

Если трехмерная голограмма записывается в анизотропной среде, например, в кристалле LiNbO_3 , то структура голограммы характеризуется вариациями тензора диэлектрической проницаемости. Важное свойство анизотропных трехмерных голограмм – это их способность изменять состояние поляризации, падающей на них волны. Используя это явление считывают трехмерные голограммы излучением отличным по длине волны, которое использовалось при записи.

8.4. Запоминающие устройства на однокуантовых джозефсоновских элементах памяти [4]

Джозефсоновский контакт (ДК) – тонкая изолирующая прослойка между двумя сверхпроводниками.

Стационарный эффект Джозефсона (1962г) – протекание сверхпроводящего тока через тонкую изолирующую прослойку между двумя сверхпроводниками

$$I = I_c \sin(\varphi_2 - \varphi_1) , \quad (8.12)$$

φ_1 - фаза волновой функции в первом сверхпроводнике, φ_2 - фаза волновой функции в втором сверхпроводнике после диэлектрической прослойки.

Если увеличивать ток через контакт, то происходит переход из стационарного режима, (когда ток есть, а напряжения практически нет), в нестационарный режим (когда при достижении некоторого критического тока на контакте возникает напряжение). Критический ток складывается из тока сверхпроводящих спаренных электронов и тока нормальных электронов.

Если теперь уменьшать ток через ДК, то нестационарный эффект Джозефсона (напряжение на контакте) сохраняется до значений тока меньших критического тока, а затем напряжение и ток падают до нуля. Вольтамперная характеристика туннельного контакта Джозефсона имеет гистерезис, см. рис.8.11.

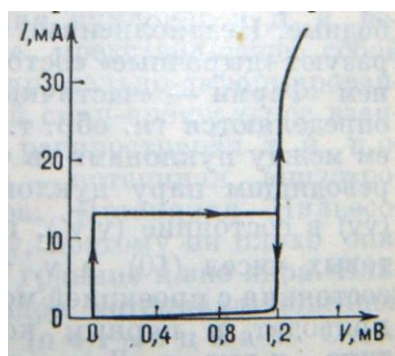


Рис.8.11. Вольтамперная характеристика туннельного контакта Джозефсона.

При нестационарном эффекте Джозефсона разность фаз на контакте зависит от времени

$$\hbar \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 2eV , \quad (8.13)$$

где V - напряжение на контакте. e - заряд электрона

Частота сверхпроводящего переменного тока, который генерируется при постоянном напряжении на ДК равна

$$\hbar \omega = 2eV \quad (8.14)$$

Формулы (8.13) и (8.14) называются соотношениями Джозефсона.

Свойство контактов Джозефсона переключаться с нулевого напряжения на конечное напряжение, при превышении током критического значения, в совокупности с малой емкостью, позволяет пользоваться их в качестве быстродействующих элементов ЭВМ.

Минимальный размер одноквантовых джозефсоновских элементов памяти ограничен снизу величиной порядка глубины проникновения $\lambda \approx 0,1 \text{ мкм}$, обеспечивающей плотность записи информации $10^4 \div 10^5 \text{ бит} / \text{мм}^2$. Времена переключения элементов памяти при температуре жидкого азота составляют $\approx 10^{-11} \text{ с}$.

Одноэлектронные элементы памяти работают на туннелировании одиночных электронов в туннельных переходах сверхмалых размеров. Их минимальный размер ограничен толщиной туннельной прослойки $\geq 3 \div 4 \text{ нм}$.

8.5. Сегнетоэлектрические энергонезависимые запоминающие устройства [5]

Это запоминающие устройства следующего поколения в силу низкого потребления энергии, высокой скорости чтения/записи и потенциально высокой плотности. Для них требуются тонкие сегнетоэлектрические пленки с большой остаточной поляризацией P_s , высокой устойчивостью к повторным включениям бистабильных состояний поляризации, синтезируемые при минимальном возможном значении температур 650 С.

Существуют два типа сегнетоэлектрических оксидов: *цирконат-титан свинца* (PZT) со структурой перовскита и второй- висмутовые сегнетоэлектрики со структурированными слоями, обладающие слоистой перовскитной структурой. Это $SrBi_2Ta_2O_9$ (SBT) $Bi_4Ti_3O_{12}$ (BiT). Обозначения материала в скобках сокращенное.

Сегнетоэлектрик PZT имеет высокую поляризацию $P_s = 20 \div 40 \text{ мКл/см}^2$. Пленки PZT с платиновыми Pt электродами характеризуются явлением усталости при переполяризации и содержат неэкологичный свинец.

Далее будем рассматривать кристаллическую структуру висмутовых сегнетоэлектриков со структурированными слоями. В структуре таких кристаллов перовскитные блоки размещаются между слоями Bi_2O_2 . Сами перовскитные блоки $(A_{m-1}B_mO_{3m-1})$ состоят из m слоев октаэдров с катионами в позициях А. Слои Bi_2O_2 действуют как изолирующие параэлектрические слои и играют важную роль для поляризационных свойств и обеспечивают долговечность сегнетоэлектрического конденсатора. Сегнетоэлектричество возникает в перовскитных блоках. Диэлектрическая и сегнетоэлектрическая анизотропия сильно зависят от количества слоев m .

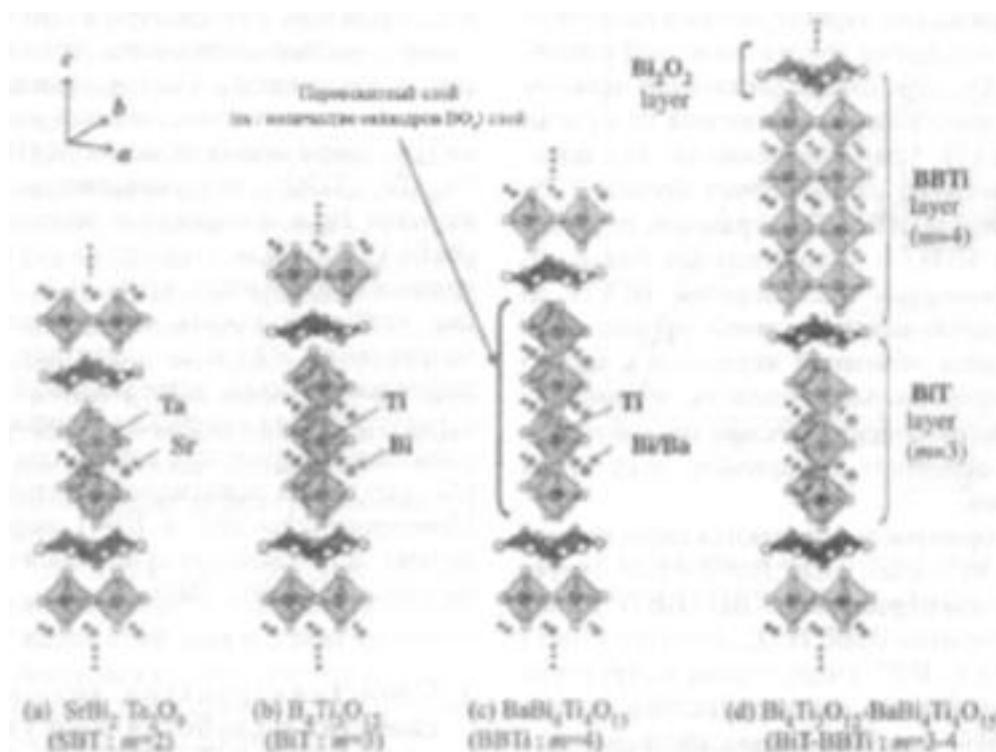


Рис.8.12. Структура висмутовых сегнетоэлектриков со структурированными слоями.

а) $SrBi_2Ta_2O_9$ (SBT), б) $Bi_4Ti_3O_{12}$ (BiT), в) $BaBi_4Ti_4O_{15}$ (BBTi), д) $Bi_4Ti_3O_{12} \square BaBi_4Ti_4O_{15}$ (BiT $\square$ BBTi).

Количество октаэдров BO_6 в одном слое обозначается как m . [5]

Монокристаллы $Bi_4Ti_3O_{12} \square Bi_4Ti_3O_{12}$ (BiT $\square$ BBTi) со структурированной сверхрешеткой имеют чередующиеся по оси c слои $m=3$ (BiT) и $m=4$ (BBTi). Эти монокристаллы достигли значения поляризации $P_s = 52 \mu\text{Кл}/\text{см}^2$, больше чем у $Bi_4Ti_3O_{12}$ (BiT) $P_s = 46 \mu\text{Кл}/\text{см}^2$ и $BaBi_4Ti_4O_{15}$ (BBTi) $P_s = 16 \mu\text{Кл}/\text{см}^2$.

Монокристаллы BiT $\square$ BBTi со структурированной сверхрешеткой, обладающие 90° –доменной структурой, были получены методом выращивания из расплава смеси порошков $BaCO_3$, Bi_2O_3 , TiO_2 . Структура была подтверждена данными рентгеновской дифракции и просвечивающей электронной спектроскопией. Диэлектрические измерения показали, что точка Кюри монокристаллов составляет 540 С. Поляризация $P_s = 52 \mu\text{Кл}/\text{см}^2$ предполагается, что большое значение поляризации для BiT $\square$ BBTi обусловлено замещением Ba на Bi и нарушением локальной симметрии слоев Bi_2O_2 .

На рис. 8.13.b показана электронная ПЭМ-микрофотография монокристаллов BiT-BBTi. На рис 8.13.c показана микрофотография области, окруженная на рис. 8.13.b белым прямоугольником. Толщина составляющих слоев примерно 1,5 и 2,0 нм.

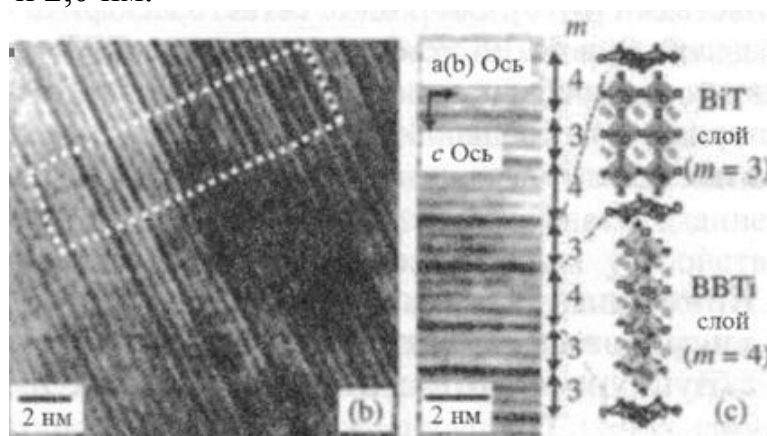


Рис.8.13. Результаты структурного анализа монокристаллов BiT-BBTi б) электронная ПЭМ-микрофотография в плоскости а(бс); в) Схематическое изображение кристаллической структуры. [5]

Температурная зависимость диэлектрической проницаемости на частоте 1 МГц показана на рис.8.14. максимум 7000 при температуре 560 С.

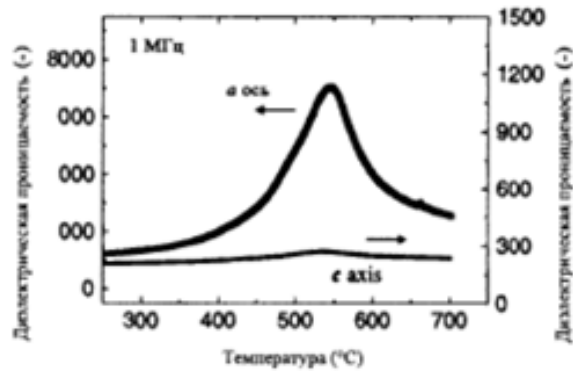


Рис.8.14. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости на частоте 1 МГц. максимум 7000 при температуре 560 С.[5]

На рис.8.15. показаны петли гистерезиса поляризации монокристаллов по оси а при температуре 25 С и частоте электрического поля 1Гц. Ось а соответствовала кристаллографической оси, определенной 90° доменной структурой.

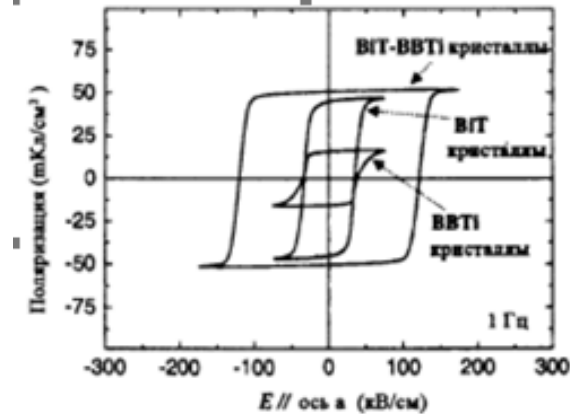


Рис.8.15. Петли гистерезиса поляризации по оси а при температуре 25 С.[5]

8.6. Новые научные разработки около 2010 года

В области запоминающих устройств[6] прогрессирует большое количество новых технологий. Виды памяти, изготовленные с использованием нанотехнологий включают: запоминающие устройства (ЗУ) с изменением фазы, резистивное ОЗУ, ЗУ с использованием магнитного туннельного перехода, магниторезистивное ОЗУ, ЗУ с переносом спинового момента, ЗУ с использованием магнитного квантового эффекта и традиционная флэш-память.

Все указанные виды энергонезависимой памяти работают на способности хранения, с выполнением операций записи и считывания с малой потребляемой мощностью с использованием схемы коррекции ошибок. Эти характеристики стимулируют дальнейшие исследования новой памяти. С использованием новых технологий будет сделана попытка обойти по плотности и потребляемой мощности характеристики NAND-флэш памяти, который составляет 64 Гбит.

Новая оптическая память с наноотверстиями в пластинках[7]

Устройство, основано на оптических резонаторах, которые можно переключать между пропускающим и блокирующим свет состояниями для того, чтобы создать цифровой сигнал.

Ячейки новых чипов памяти, потребляют в сумме около 30 нановатт энергии, их размеры (4мкм на 0,3 мкм) в 300 раз меньше размеров чипов предыдущего поколения. Ячейки оптической памяти способны хранить данные в течение 10 секунд.

Новое устройство, работает на основе оптических "отверстий", которые под воздействием внешнего фактора могут переключиться из прозрачного состояния в непрозрачное, что соответствует уровня логической 1 и 0.

Для того чтобы создать оптическое запоминающее устройство, исследователи используют тонкие пластинки из фосфида индия *InP*. Чип новой оптической памяти состоит из тончайшей основы, подложки, из фосфида индия. В центре этой подложки расположена полоса другого материала фосфида арсенида-галлия (*InGaAsP*), материала, обладающего оптическими свойствами, отличными от свойств материала подложки. Эта полоса имеет ширину около 300 нанометров и длину приблизительно четыре микрометра, именно она и является одной ячейкой памяти. В подложке из фосфида индия сделаны наноразмерные отверстия определенного диаметра, которые создают структуру, пропускающую свет только определенной длины волны. Середина клетки остается цельной, для того, чтобы направить свет внутрь и наружу.

В середине полосы оставлен свободный промежуток, который играет роль основного световода.

Информация считывается и записывается на оптическое устройство с помощью луча лазера. Когда на материал ячейки попадает свет определенной длины волны, показатель преломления материала изменяется. Он либо будет, либо не будет передавать импульс света, создавая при этом «1» или «0» бит. В первом случае ячейка пропускает свет с другой длиной волны, во втором случае - становится непрозрачной. Другой импульс света может все изменить. Свет от дополнительного лазера используется для постоянной фоновой подсветки всех ячеек памяти на чипе и выполняет роль энергетической подкачки, позволяющей ячейкам памяти оставаться в одном состоянии и хранить информацию длительное время.

Пока исследователям из NTT удалось собрать первый чип памяти, содержащий всего четыре ячейки, т.е. способный хранить четыре бита данных. Но, как утверждает Масая Нотоми, совершенно ничего не мешает объединять на одном чипе многие миллионы ячеек, при этом расход энергии увеличится незначительно до уровня не более 30 милливатт. Флеш-память потребляет 150 милливатт.

Новая память на основе кремниевых наноточек [8]

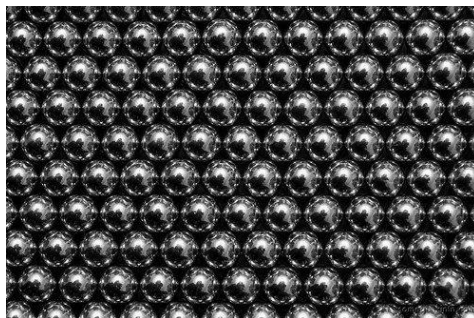


Рис.8.18. Быстрая память состоит из слоя диэлектрического материала с включенными в него дискретными кремниевым наноточками, диаметром всего 3 нм. Калифорнийский университет в Беркли. Национальная лаборатория наноустройств Тайвань.

Международная группа, Джия-Мин Ших, и др. в состав которой вошли исследователи из Калифорнийского университета в Беркли и Национальной лаборатории наноустройств в Тайване, создала новый вид электронной памяти, способной осуществлять процессы записи и стирания информации в 10-100 раз быстрее, чем самые быстрые образцы существующей компьютерной памяти, использующей для хранения информации электрический заряд. Новая память состоит из слоя диэлектрического материала с включенными в него дискретными кремниевым наноточками, диаметром всего 3 нм. И каждая такая наноточка может хранить один бит информации. см рис.8.18.

Чтобы управлять операциями с памятью, вся структура покрыта тонким слоем металла, который выступает в роли металлического управляющего электрода, затвора. А кремниевая наноточка, в совокупности с диэлектрическим материалом и металлическим управляющим электродом, представляет собой полевой транзистор, способный находиться в активном и неактивном состоянии.

"Созданная нами структура ячейки памяти может быть изготовлена с помощью самой обычной технологии производства полупроводников CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor)" - рассказывает Джия-Мин Ших, исследователь с Тайваня. - "Используя массивы из многочисленных кремниевых наноточек, можно получить память практически любой емкости, информация в которой записывается и считывается быстрым и простым способом".

Быстродействие нового типа памяти заключается в использовании сверхкоротких вспышек света зеленого лазера. Воздействие лазерного света на металлический слой в районе кремниевой точки позволяет активировать выбранную ячейку памяти, считать или записать в нее информацию.

Такой метод хранения информации является весьма надежным и долговременным. Даже в том случае, если какая-либо ячейка памяти полностью выходит из строя, то это не затрагивает ни соседние ячейки памяти, ни информацию, в них содержащуюся. Такие характеристики памяти на кремниевых наноточках позволят создавать на ее основе новые надежные и высокоскоростные устройства долговременного хранения данных.

Квантовая память на фотонных ячейках [9]

Массачуссетский технологический институт

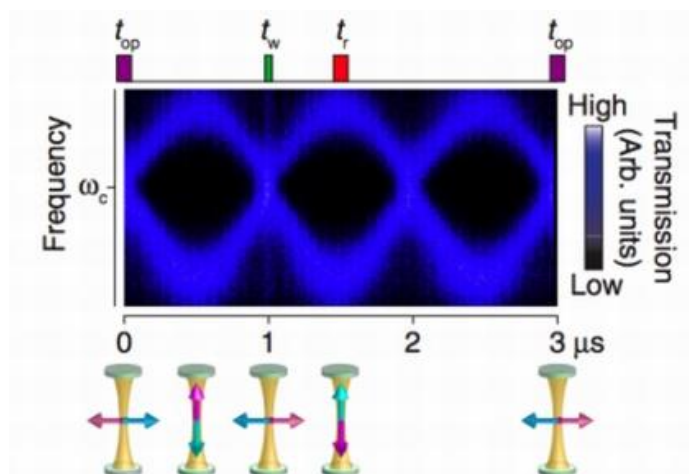


Рис.8.19.Фотонная квантовая ячейка памяти. Массачусетский технологический институт (МИТ).

Ученые из Массачусетский технологический института (МИТ) впервые разработаны ячейки квантовой памяти, построенные на принципах фотоники. Эти ячейки памяти способны к детектированию поляризации фотона света («поляризационный квантовый бит»), запоминанию полученного значения поляризации, и излучению фотона света с такой же поляризаций, в случае создания необходимых условий (операция «чтения»).см. Рис.8.19.

Ранее были созданы ячейки, способные запоминать квантовую информацию, но при попытке считывания запомненной информации, в большинстве случаев, происходило стирание информации.

Технология квантовой памяти, разработанная учеными из МИТ, еще далека от совершенства и практического применения. Информация хранится в группах атомов цезия по 8000 атомов при температуре практически абсолютного нуля -273.15°C . Цезий представляет собой опасный материал, да и очень низкая температура делают эту технологию невозможной для практической реализации. Надежность хранения информации составляет на данный момент 90%, чего явно недостаточно для систем хранения информации.

Создана голограмма, которая считывается один раз [10]

Мэтью Селларса (Matthew Sellars), Морган Хеджес (Morgan Hedges). и др. (Австралийский национальный университет) разработали эффективную квантовую оптическую память. Создан новый вид голограмм, которые можно считать только один раз. В качестве хранилища данных ученые использовали специальные оптические кристаллы, охлажденные до температуры минус -270 градусов по шкале Цельсия. Информация, передаваемая светом лазера, попадая внутрь такого кристалла, буквально "замораживалась", сохраняясь в виде замороженного состояния электронов атомов вещества кристалла.

"Свет, попадающий в кристалл, замедлялся до полной остановки, где он оставался до того момента, пока с помощью некоторых воздействий ему не "позволяли" двигаться снова. Таким образом, свет, который мы "вынимаем" из кристалла, по сути представляет собой сохраненную трехмерную голограмму, повторяющую в точности до фотона информацию, ранее записанную в кристалл"

- рассказывает ведущий исследователь Морган Хеджес (Morgan Hedges). "Из-за особенностей области квантовой механики вся информация, записанная в виде голограммы, будет полностью утеряна после того, как она будет прочитана. Это гарантирует, что информация может быть прочитана только один раз, делая такую технологию идеальной для использования в области безопасных коммуникаций".

Время устойчивого хранения информации приблизительно равно одной секунде, что в тысячи раз превышает результаты, достигнутые ранее другими учеными.

Связь магнитных и электрических материалов [11]

Джулия Манди, Ramamoorthy Рамеш и др., с кафедры Калифорнийский университет Беркли национальной лаборатории энергетики Лоуренса Беркли (Lab) и Cornell University 90, Nature) спроектировали новый магнитный сегнетоэлектрик на атомном масштабе. Дополнительную плоскость атомов железа встраивали через каждые десять слоев атомов лютеция.

Получены тонкие, атомарно тонкие пленки гексагонального лютеция оксида железа (LuFeO_3). Это материал, сегнетоэлектрик, но не с сильно магнитными свойствами. Оксид лютеция железа состоит из чередующихся простых монослоев оксида лютеция Lu_2O_3 и одиночных монослоев оксида железа Fe_2O_3 . Он отличается от сильного ферримагнитного оксида, который состоит из чередующихся монослоев оксида лютеция с двойными монослоями оксида железа (LuFe_2O_4).

Исследователи обнаружили, что, добавляя один дополнительный монослой оксида железа Fe_2O_3 на каждые 10 атомных повторов одного-единого шаблона монослоя, можно резко изменить свойства материала и создать сильно ферримагнитный слой вблизи комнатной температуры. Затем они проверили новый материал, чтобы показать, что ферримагнитные атомы с последующим выравниванием их сегнетоэлектрических соседей при переключении с помощью электрического поля.

Они сделали это при температурах в пределах от 200-300 градусов Кельвина, по сравнению с другими такими мультиферроиках, которые обычно работают при более низких температурах.

"Разработка материалов, которые могут работать при комнатной температуре делает их жизнеспособных кандидатов для современной электроники", сказал исследования совместно ведущий автор Джулия Манди, докторант университета Калифорнии и филиал в Лаборатории Беркли.

"Около 5 процентов от нашего общего мирового потребления энергии тратится на электронику," говорит старший автор Ramamoorthy Рамеш". Это наиболее быстро растущим потребителем энергии во всем мире. Интернет вещей ведет к установке электронных устройств во всем мире. В мире энергия, потребляемая микроэлектроникой, согласно прогнозам, составит 40-50 процентов к 2030 году, если мы продолжим в том же темпе".

Основной путь к сокращению потребления энергии включает ferroic материалов. Основные преимущества сегнетоэлектриков: обратимая поляризация

при маломощных электрических полях, и способность удерживать поляризованное состояние без необходимости непрерывной мощности. Типичные примеры сегнетоэлектрических материалов включают транзитные карты и чипы памяти.

Исследователи используют электрические поля, чтобы создать концентрические области "вверх" и "вниз" сегнетоэлектрической поляризации в ферритовой пленке с лютетием.

Сопряжение сегнетоэлектрических и ферромагнетиков в один мультиферроик захватывает преимущества обеих систем, что позволяет расширить диапазон применения памяти с минимальными требованиями к мощности. Ультраточная техника молекулярно-лучевой эпитаксии - позволила исследователям разработать и собрать два различных материала в один мультиферроик с помощью атомных слоев слой за слоем.

Таким образом, созданы парные сегнетоэлектрические и ферромагнетики, что их выравниванием можно управлять с помощью небольшого электрического поля при комнатных температурах. Это достижение, которое можно использовать для ультрамикропроцессоров с низким энергопотреблением и в устройствах хранения данных.

Кремний в квантовых компьютерах заменят новым материалом $\text{Hf}_2\text{Te}_2\text{P}$ **НОВОСТИ РИА 2018**

Группа физиков из UCF создала материал, состоящий из микроскопически сжатого вещества, который позволяет использовать и хранить энергию на субатомном уровне. Ученые выявили, что вещество, химически состоящее из гафния, теллура и фосфора ($\text{Hf}_2\text{Te}_2\text{P}$), представляет собой первый обнаруженный материал сразу с несколькими квантовыми свойствами. Это значит, что в его структуре может существовать более одной электронной модели, что и делает его уникальным. Физики считают, что открытие этого материала даст огромный импульс в области развития оборудования для компьютеров будущего. Они называют его кремнием новой эры. Команда работает над дальнейшим расширением спектроскопических характеристик квантовых материалов. Ожидается, что подобные вещества оптимально подходят для оборудования и даже устройств долгосрочного хранения информации.

Литература

- 1.Задков В.Н.ФиллипычевС.А. Памяти устройства. с.523-526. // Физическая энциклопедия.т3-М.: Больш.Росс. энциклопедия 1992.-672 с.
- 2.Макаров В.А.Оптическая бистабильность с428.-429.// Физическая энциклопедия.т3-М.: Больш.Росс. энциклопедия 1992.-672 с.
- 3.Б.Салех,М.Тейх Оптика и фотоника принципы и применения. Учеб пособие. В 2 т, Т.2. –Долгопрудный: Изд. Дом «Интеллект»,2012.-784 с.
- 4.Новые принципы оптической обработки информации под ред. С.А.Ахманова, М.В. Воронцова М.1990 г.

- 5.Справочник по технологии наночастиц. Приложение 10. Создание новых сегнетоэлектрических материалов. Редакторы Масуо Осчокава и др., Редактор рус. Изд.А.Б.Ярославцев, С.Н.Максимовский. Научный мир, 2013-730 с.
- 6.Микро- и наноэлектроника в системах радиолокации. Ю.И.Гуляев, А.С.Бугаев, Р.П.Быстров,С.А.Никитов, В.А.Черепенин.Монография.-М.:Радиотехника,2013.- 480 с.
7. Масая Нотоми (Masaya Notomi), Nature Photonics, //Photonic Nanostructure Research Group, «NTT», Япония.
- 8.Джия-Мин Ших, и др Калифорнийский университет в Беркли , Национальная лаборатория наноустройств Тайвань.
- 9.Массачуссетский технологический институт.
- 10.Мэтью Селларса (Matthew Sellars) Австралийский национальный университет
11. Джулия Манди, Ramamoorthy Рамеш и др., Калифорнийский университет// Natura.

Глава 9 ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

Идея использования квантов света (фотонов) в принципиальных узлах вычислительных машин появилась одновременно с изобретением лазеров - оптических квантовых генераторов - и уже несколько десятилетий исследователи и конструкторы успешно создают отдельные узлы электронно-вычислительных систем с использованием оптических технологий. Фотоны, являющиеся основными носителями информации в оптическом компьютере, по своим физическим характеристикам принципиально отличаются от электронов.

Оптические компьютеры (ОК)[1] - интенсивно разрабатываемые в 1980 - 90-е гг. поколение вычислительных машин на основе использования оптич. излучения в качестве носителя информации. Составными частями ОК служат устройства, которые формируют, передают, преобразуют и осуществляют другие операции над информационными и управляющими световыми потоками.

Полевая природа света обуславливает многочисленные преимущества оптических технологий для задач передачи, записи, обработки и хранения информации:

Преимущества оптической технологии:

- Частота оптического излучения составляет $10^{12} \dots 10^{16}$ Гц, что позволяет создать до 10^5 информационных каналов со спектральной шириной 100 ГГц;
- Передача информации фотонами происходит действительно со скоростью света в веществе c_0/n , где $c_0 = 3 \cdot 10^{10}$ см/с, n -показатель преломления, в то время как скорость распространения электрического импульса по чипу определяется временем перезарядки цепи и реально составляет величину в 20-30 раз меньше c_0 ;

- Большое число световых пучков могут свободно проходить по одной и той же области пространства, пересекаться и из-за отсутствия у фотонов электрического заряда не влиять друг на друга;
- Использование двумерного (изображения) и трехмерного (голограммы) характера световых полей позволяет значительно увеличить плотность и скорость передачи информации;
- Возможна когерентная обработка информации с использованием фазовых соотношений;
- Два состояния поляризации (горизонтальная и вертикальная или круговая, по левому или правому кругу) увеличивают вдвое объем переносимой информации;
- Возможность использования совершенно разных сред передачи, хранения и обработки информации.
- Информация, которая закодирована оптическим лучом, может передаваться без дополнительных затрат энергии.
- Обработка информации возможна во время ее передачи через оптическую систему, которая реализует вычислительную среду.
- Можно параллельно передавать целые изображения за один световой пучок.
- Оптическая система практически не излучает во внешнюю среду, обеспечивая защиту от перехвата информации и нечувствительна к электромагнитным помехам.

Все эти преимущества достигаются благодаря тому, что в качестве носителей информации используются фотоны, а не электроны.

Проникновение оптических методов в вычислительную технику ведётся по трём основным направлениям. Первое основано на использовании аналоговых оптических вычислений для решения большого класса специальных задач, связанных с необходимостью быстрого выполнения интегральных преобразований. Однако применение аналоговых оптических вычислений в универсальных вычислительных системах затруднено из-за недостаточной точности аналоговых методов, накопления шумов в процессе обработки информационного светового потока и из-за малого динамического диапазона.

Второе направление связано с использованием оптических соединений трактов для передачи сигналов на различных ступенях иерархии элементов и устройств вычислительной техники. Места электрических соединений в современных ЭВМ - наименее надёжные элементы в их конструкции. Переход к гибридным (оптоэлектронным) системам - одно из возможных решений проблемы. При этом в конструкции компьютера неизбежно появляются новые элементы - оптоэлектронные преобразователи электрических сигналов в оптические и обратно с потерями до 30 %.

Третье направление в разработке ОК связано с созданием оптических элементов на основе явления оптической бистабильности. Экспериментально реализованы полностью оптические логические устройства и усилители, комбинации которых позволяют создавать сложные информац. системы. К таким устройствам относятся элементы булевой логики, *трансфазоры* - оптические

транзисторы, триггеры - они же ячейки запоминающих устройств, и др. Построение ОК, в котором носителем информации на всех этапах её обработки и передачи является только оптическое излучение, исключает необходимость многократного преобразования электрической энергии в световую и обратно.

В современном электронном компьютере можно отметить следующие оптические узлы и элементы: устройства ввода информации – оптический сканер, оптическая мышь; устройства обмена информацией – инфракрасный порт, оптоволоконно; устройства вывода информации – лазерный принтер, дисплей, голографический (объемный) дисплей; устройства памяти – долговременная память на перезаписываемых оптических дисках, магнитооптические диски, голографические диски.

Компания Intel в 2004 г. анонсировала программу Silicon Photonics ориентированную на создание оптических узлов, встраиваемых в процессор, – лазеров, модуляторов, мультиплексоров и демультимплексоров с использованием интегральной кремниевой технологии.

В 2003 году компания Lenslet (www.lenslet.com) создала первый в мире коммерческий оптический процессор, предназначенный для увеличения вычислительной мощности электронных процессоров. Процессор назывался EnLight256, его производительность составляет 8 тераоп ($8 \cdot 10^{12}$ арифметических операций в секунду). Операции выполняются за счет манипуляции потоков света, а не электронов, поэтому достигается такая производительность. Оптические технологии в первую очередь ориентированы (по крайней мере, сейчас) на промышленное производство, военную технику – там, где нужно в реальном времени обрабатывать большие потоки информации.

Оптический процессор – устройство в виде совокупности оптических и оптико-электронных элементов выполняющее в соответствии с заданным алгоритмом оптическую обработку информации. Оптические процессоры подразделяются на аналоговые и цифровые. Аналоговые оптические процессоры состоят из линз, зеркал, призм, нескольких пространственно временных модуляторов света. Они применяются для выполнения преобразований Фурье и Френеля, умножения над двумерными функциями, выделения сигналов из шумов. Цифровые оптические процессоры состоят из одного или нескольких пространственно временных модуляторов света и волоконно-оптических элементов. Алгоритм обработки информации подобен алгоритму в универсальных компьютерных программах, предназначенных для использования в высокопроизводительных комплексах.

9.1. Оптические технологии

9.1.1. Оптические логические устройства на основе оптической бистабильности

[1]

Полный набор полностью оптических логич. устройств для синтеза более сложных блоков ОК реализуется, например, на основе пассивных нелинейных резонаторов-интерферометров, в которых в результате светоиндуцированного изменения оптической длины происходит сдвиг пика пропускания (резонанса) относительно длины волны падающего излучения. В зависимости от начального положения пика пропускания и начальной интенсивности в пассивном

нелинейном резонаторе нелинейный процесс завершается установлением одного из двух устойчивых состояний пропускания (отражения) падающего излучения.

На рис.9.1(а) и рис.9.2(а) приведены передаточные характеристики *бистабильного интерферометра* (БИ). Это зависимости интенсивности выходного сигнала (отражённого $I_{отр}$ и прошедшего $I_{пр}$) от интенсивности сигнала на входе $I_{вх}$, складывающегося из сигнала подсветки I_0 и информационного сигнала I_1 , или I_1 и I_2 . Если $I_0 + I_1 = I_{вкл}$ (порогу переключения), то происходит переход системы из состояния ("1") с высокой интенсивностью на выходе в состояние ("0"), с низкой интенсивностью на выходе (рис.9.1.а), или наоборот (рис. 9.2, а). Гистерезис, характерный для оптической бистабильности, в данном случае не обязателен. Важно лишь обеспечить достаточно большой перепад между высокой и низкой выходными интенсивностями по отношению к изменению входной интенсивности, вызвавшей этот перепад.

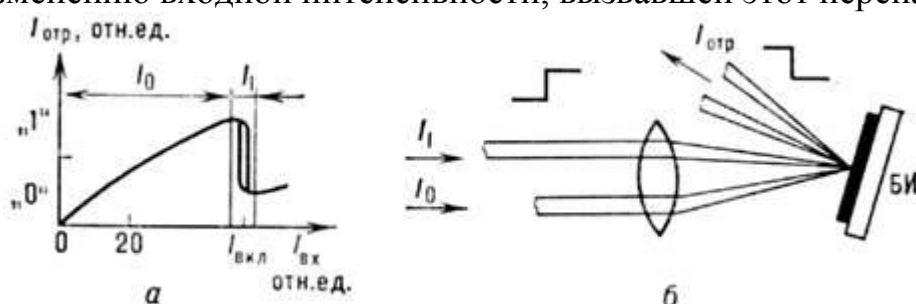


Рис.9.1. (а) Передаточная характеристика БИ в отраженном пучке. (б) Схема с логической функцией "НЕ".

Элемент "НЕ" реализуется с использованием отражённого от БИ потока (рис. 9.1, б). Интенсивность $I_{вх}$ устанавливается несколько ниже порога переключения $I_{вкл}$, что соответствует высокой интенсивности отражённого сигнала. Незначительная добавка I_1 приводит к резкому уменьшению интенсивности $I_{отр}$, а снятие I_1 - к восстановлению высокого уровня $I_{отр}$.

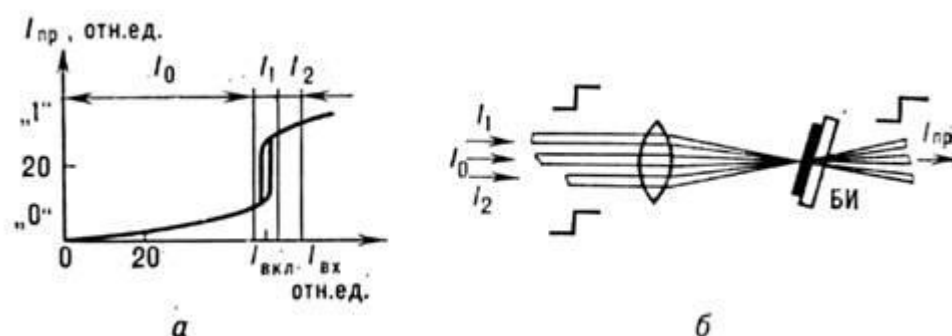


Рис.9.2. (а) Передаточная характеристика БИ в проходящем пучке. (б) схема устройства с логическими функциями "И", "НЕТ", "ДА".

На рис.9.2.(б) дана схема устройства, представляющего оптически программируемый элемент процессора, в котором вид логической операции задаётся значением интенсивности подсветки I_0 . На БИ кроме подсветки подаются ещё два информационных пучка I_1 и I_2 и на выходе рассматривается интенсивность проходящего пучка. Если интенсивность подсветки выбрана такой,

что $I_0 = I_{\text{вкл}} - 0,5I_1$ (рис.9.2.а), то наличие сигнала хотя бы в одном из информац. пучков переходит элемент в единичное состояние для проходящего луча (логич. функция "ИЛИ"). При установке $I_0 \square I_{\text{вкл}} - 1 > 5I_1$ элемент включается лишь при одновременной подаче сигнала ("1") в обоих информационных каналах (функция "И"). Если выполняется условие $I_0 < I_{\text{вкл}} - I_1 - I_2$ то при любой комбинации состояний I_1 и I_2 на выходе имеет место низкий уровень интенсивности (ф-ция "НЕТ"). Наконец, при $I_0 > I_{\text{вкл}}$ БИ всегда остаётся при включённом состоянии (ф-ция "ДА"). Для отражённого потока в этой же схеме обеспечиваются также ф-ции "ИЛИ - НЕТ" и "И - НЕТ".

Такой набор элементов является достаточным для синтеза более сложных блоков. На рис.9.3 даны некоторые примеры организации взаимодействия между отдельными элементами. БИ с гистерезисной зависимостью (рис.9.3.а) действует как оптический триггер с отдельными инверсными входами и выходами (рис.9.3.б).

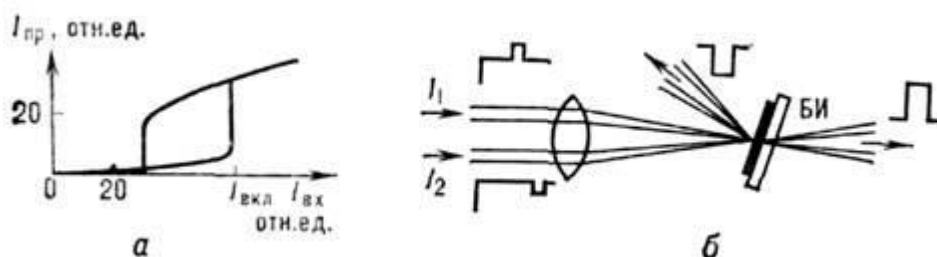


Рис.9.3.а) Передаточная характеристика бистабильного интерферометра с гистерезисной зависимостью.

б) Схема триггера с отдельными инверсными входами и выходами.

Чтобы получить RS-триггер, один из входных сигналов в схеме рис. 9.3.б необходимо инвертировать. (RS-триггер имеет два входа и два устойчивых состояния, которые меняются под действием входных сигналов, при этом обязательно попеременно то с одного, то с другого входа.) Инвертирование можно сделать с помощью дополнительного элемента "НЕ" (рис.9.4.а). В исходном состоянии интенсивность I_2 выбрана чуть ниже порога переключения элемента "НЕ", и уровень сигнала, отражённого в направлении $БИ_1$, высокий. Его сумма с начальной интенсивностью I_1 за счёт регулировки последней соответствует примерно центру области гистерезисной петли. $БИ_1$ находится в состоянии с низким пропусканием (выключен). Манипуляции интенсивностью пучка I_2 (R-вход) не могут изменить это состояние. Кратковременное же увеличение интенсивности I_1 (S-вход) приводит к включению $БИ_1$. После этого ближайшим, по времени всплеском сигнала I_2 триггер опрокидывается в исходное состояние.

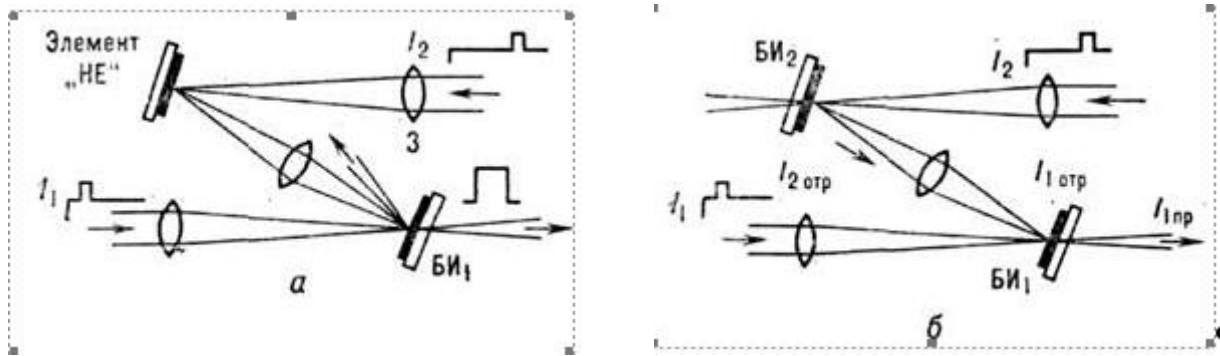


Рис.9.4. Схемы оптических RS-триггеров. а) Инвертирование дополнительным элементом «НЕ». б) Симметричная схема с двумя функциями «НЕ».

RS-триггер реализуется также и на основе двух "скрещенных" устройств с функциями "НЕ" (рис.9.4. б). Введённая в систему жёсткая положит. обратная связь приводит к тому, что первый из элементов устойчиво находится во включённом состоянии, если второй в выключенном, и наоборот. По сравнению с предыдущей эта схема полностью симметрична, но требует более тщательной юстировки.

Типы бистабильных устройств. Основными критериями, определяющими практическое использование оптических логических устройств в вычислительной технике, являются их высокое быстродействие и малая световая энергия (мощность), необходимая для перевода устройства из одного устойчивого состояния в другое. Для нелинейных пассивных резонаторов эти характеристики определяются в первую очередь величиной светоиндуцированного изменения показателя преломления нелинейной среды, помещённой между зеркалами резонатора, и добротностью последнего. С учётом необходимости интегрально-оптического исполнения оптических логических элементов указанным критериям наилучшим образом отвечают полупроводниковые материалы и структуры на их основе.

Одной из таких структур являются вакуумно-напылённые *тонкоплёночные полупроводниковые интерферометры* (ТПИ). Например, ТПИ с промежуточными слоями из ZnS , $ZnSe$ обладают сильной оптической нелинейностью тепловой природы ($\Delta n \sim 10^{-2}$) при потоках излучения $\sim 10 \text{ мВт}$, способностью работать в непрерывном режиме при комнатной температуре, малыми размерами отдельного бистабильного элемента (толщина 0,5 - 2 $\mu\text{м}$, диаметр 4 - 50 $\mu\text{м}$), возможностью формировать двумерные интегрально-оптической схемы на площади $\sim 10^2 \text{ см}^2$, свободой выбора длин волн излучения в видимой области спектра. Основным недостатком ТПИ с тепловым механизмом нелинейности является ограниченное быстродействие (времена переключения $\sim 10^{-7} \div 10^{-8} \text{ с}$). Использование оптич. нелинейности электронной природы в ТПИ на основе $GaAs$, InP , $ZnSe$ и др. полупроводниковых слоев позволяет достигать пикосекундного быстродействия в таких устройствах при удельных энергиях переключения устойчивых состояний $\sim 10^{-13} \div 10^{-15} \text{ Дж / мкм}^2$.

Увеличение нелинейного отклика в полупроводниковых резонаторах и их быстродействие достигается также при использовании в качестве нелинейной среды специальной структуры, сформированной тонкими чередующимися слоями

двух полупроводниковых материалов (например, $GaAs$ и $GaAs / Ga_xAl_{1-x}As$). Границы раздела между слоями являются гетеропереходами, представляющими собой потенциальные барьеры для движения носителей заряда в соседних слоях. При полной оптич. толщине такой структуры, равной нескольким $\lambda/2$ (λ - длина волны излучения), толщины отдельных слоев в ней имеют величину $\sim 5 - 20$ нм и, следовательно, число чередующихся пар слоев может быть ~ 100 и более.

Сформированная полупроводниковая сверхрешётка имеет период, сравнимый с характерными размерными параметрами квантовомеханического движения носителей заряда в полупроводниках, что приводит к ограничению этого движения в соответствующих направлениях. В результате в энергетическом спектре сверхрешётки возникают особенности, обуславливающие отличие оптических характеристик такой полупроводниковой структуры от характеристик исходных полупроводниковых материалов. В сверхрешетке формируется сильная оптическая нелинейность при комнатных температурах.

Бистабильные интерферометры, использующие, нелинейное изменение показателя преломления в экситонной области спектра в промежуточном слое на основе $GaAs / Ga_xAl_{1-x}As$ - это сверхрешётки, обладают временами переключения $\sim 10^{-8} \div 10^{-9}$ с и удельными энергиями переключения $\sim 10^{-12} \div 10^{-14}$ Дж / мкм². Однако технология изготовления широкоапертурных БИ на основе сверхрешёток достаточно сложна.

Для создания оптических логических элементов наряду с резонаторными используются также безрезонаторные системы, в к-рых бистабильный отклик обусловлен нелинейным изменением коэф. поглощения среды на длине волны падающего излучения (безрезонаторная бистабильность). Среди таких устройств лучшими характеристиками обладают бистабильные элементы, созданные на основе сверхрешёток и на основе стеклянных матриц, допированных полупроводниковыми микрокристаллами с размерами $\sim 10-100$ нм.

Таким образом, принципиально возможна реализация компьютеров полностью оптических, в которых используются как параллельная обработка информационных потоков широкоапертурными процессорами на основе бистабильных оптических элементов, так и оптические средства организации связей между отдельными элементами и процессорами, в том числе с использованием статистических и динамических голограмм. Концепция полностью ОК, по-видимому, наиболее адекватно соответствует естественной ситуации, поскольку человек, являясь конечным потребителем информации, наибольший её объём получает в форме оптических образов.

9.1.2. Первые цифровые оптические компьютеры

В 1984 году Б. Дженкинс из Университета Южной Калифорнии продемонстрировал первый цифровой оптический компьютер, выполнявший достаточно сложную последовательность команд. Основным элементом компьютера являлся жидкокристаллический пространственный модулятор, на заднюю поверхность которого был нанесен фотопроводник. При падении света на фотопроводник локально изменяется потенциал, воздействующий на жидкий кристалл и приводящий к изменению пропускания элемента. Используя

управляющий луч с одной стороны устройства и считывающий луч с другой стороны, возможно создание бистабильного логического элемента и реализация булевой логики. Следует отметить, что быстродействие данного устройства определялось инерционностью жидкого кристалла, и граничная частота следования импульсов составляла ~ 1 МГц.

В 80-е годы прошлого века интенсивно работали над созданием полностью оптических компьютеров нового поколения. В 1990 году компания “Bell” (Bell Labs) создала макет первого оптического компьютера. См рис.9.5.

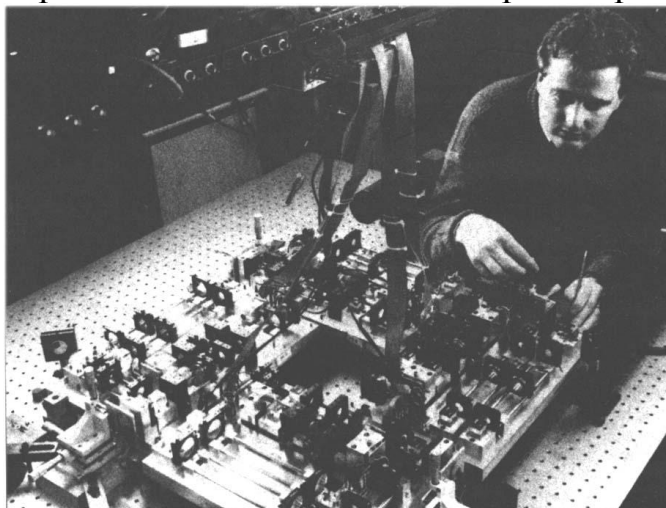


Рис.9.5. Макет цифрового оптического устройства фирмы Bell [8].

Основу процессора разработанного оптического компьютера составляли двумерные матрицы бистабильных элементов (размерностью 4×8) на основе квантоворазмерных полупроводниковых структур, обладающих нелинейными электрооптическими свойствами (self-electro-optic-effect devices - SEED).

SEED был разработан в 1986 г. и представляет собой $p-i-n$ -фотодиод, состоящий из $GaAlAs$ p -области и n -области, слаболегированная i -область состоит из 100 чередующихся слоев $GaAs$ и $GaAlAs$ толщиной по 95 нм, образуя структуру множественных квантовых ям. В элементе SEED обратная связь осуществляется за счет приложения электрического поля к квантоворазмерной структуре, причем само поле возникает при прохождении через структуру светового излучения. Нелинейное пропускание элемента SEED связано с уменьшением экситонного поглощения вследствие смещения пика экситонного поглощения из-за квантового эффекта Штарка. SEED обладает двумя стабильными состояниями при заданном уровне мощности падающего излучения, включение которых определяется предысторией ранее проводившейся засветки и является оптическим бистабильным устройством.

В симметричном SEED'e (S-SEED рис.9.6), состоящем из двух $p-i-n$ -фотодиодов, которые включены последовательно в питающую цепь, при освещении одного из диодов в цепи возникал ток, который вызывал падение напряжения на структуре сверхрешетки и приводил к увеличению пропускания света через вторую структуру. Таким образом, возникала положительная обратная связь, и совокупность этих элементов могла образовывать логические ячейки «ИЛИ– НЕ», «ИЛИ– И» и т.д.

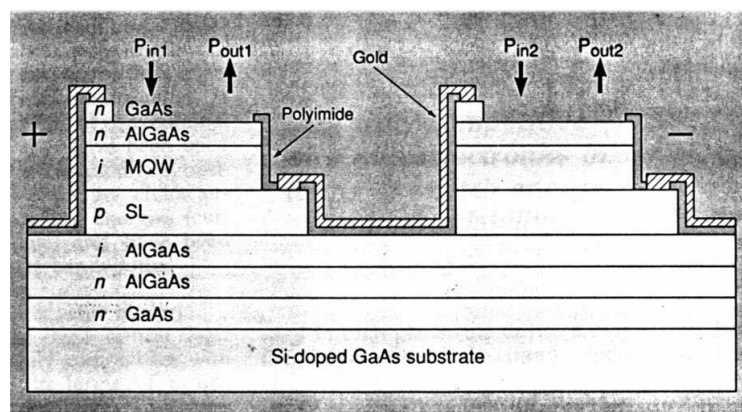


Рис.9.6. Оптический логический элемент S-SEED [8].

Первый оптический компьютер состоял из 4 каскадов и располагался на оптической плите размером $1 \times 1 \text{ м}^2$ (см. рис.9.5). Пространственное распределение излучения на выходе каждого из каскадов компьютера определялось состоянием входящей в его состав жидкокристаллической маски, управляемой обычным компьютером и распределением света на его входе. Освещение элементов производилось полупроводниковым лазером через голографическую решетку Даммена. Мощность излучения лазера составила 10 мВт , длина волны 850 нм .

Важным достоинством первого оптического компьютера явилась возможность последовательного объединения его отдельных каскадов благодаря искусственному аналогу эффекта внутреннего усиления.

Параметры системы были следующие: разрядность – 32 бита (массив 4×8); логика – бинарная; тактовая частота – $1,1 \text{ МГц}$ (определялась быстродействием ЖК маски); число переключений в секунду – 40 Мб/с . Одним из достижений данного процессора была величина энергии на одно переключение, которое составляла 20 фДж и была на 6 порядков меньше величины энергии переключения в электронных компьютерах того времени.

Второе поколение оптических цифровых компьютеров представлено компьютером DOC-II (digital optical computer), разработанного в научно-исследовательской фирме США Opticomp Corporation. В DOC-II (см. рис.9.7.) использован принцип векторно-матричного умножения, однако вектор и матрица являются булевскими логическими. В данном устройстве входной поток данных образовывался излучением линейки 64 независимо модулируемых полупроводниковых лазеров с длиной волны 837 нм . Свет от каждого лазера линейки отображался на одну строчку матричного пространственного модулятора света с размером 64×128 элементов. Отдельный элемент матрицы представлял собой акустооптическую брэгговскую ячейку на основе полупроводника GaP . Свет, выходящий из рядов пространственного модулятора, попадал на линейку из 128 лавинных фотодиодов.

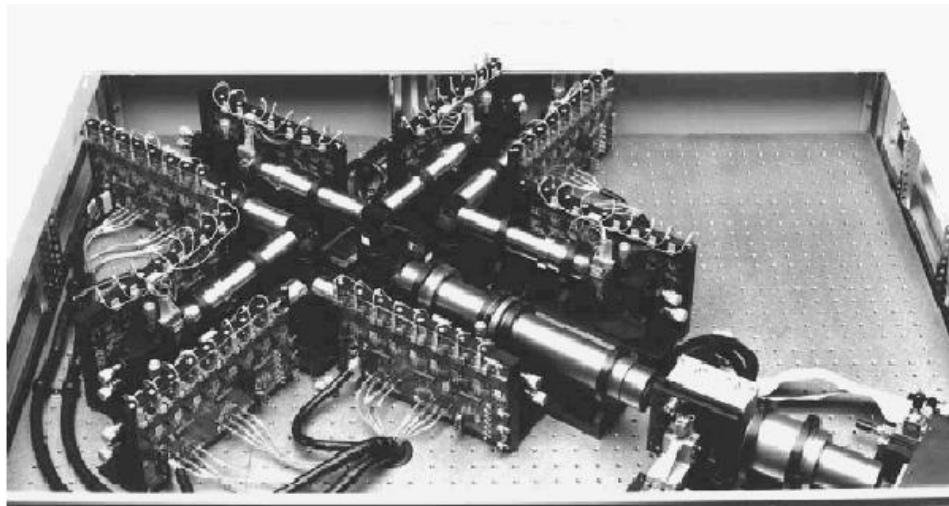


Рис.9.7 Оптический компьютер DOC-II

DOC-II имел $64 \times 128 = 8192$ межсоединений и работал на частоте передачи данных $100 \text{ Мб} \cdot \text{с}^{-1}$, что соответствовало $0,8192 \times 10^{12}$ переключений в секунду. Энергия на одно переключение составляла 7.15 фДж (~ 30000 фотонов). Для иллюстрации быстродействия представим, что нужно найти какое-то слово в тексте. Типичный современный персональный компьютер Duron 1,6/256 MB/Win XP SP1 на поиск слова в документе Win Word, состоящем из 953 страниц текста, тратит чуть больше трех секунд (а именно 3,175). В то время, как оптический компьютер DOC-II просматривает за 1 секунду 80 000 страниц обычного ASCII-текста.

Принципиальным недостатком макетов первых оптических компьютеров являлась неинтегрируемость их отдельных компонентов.

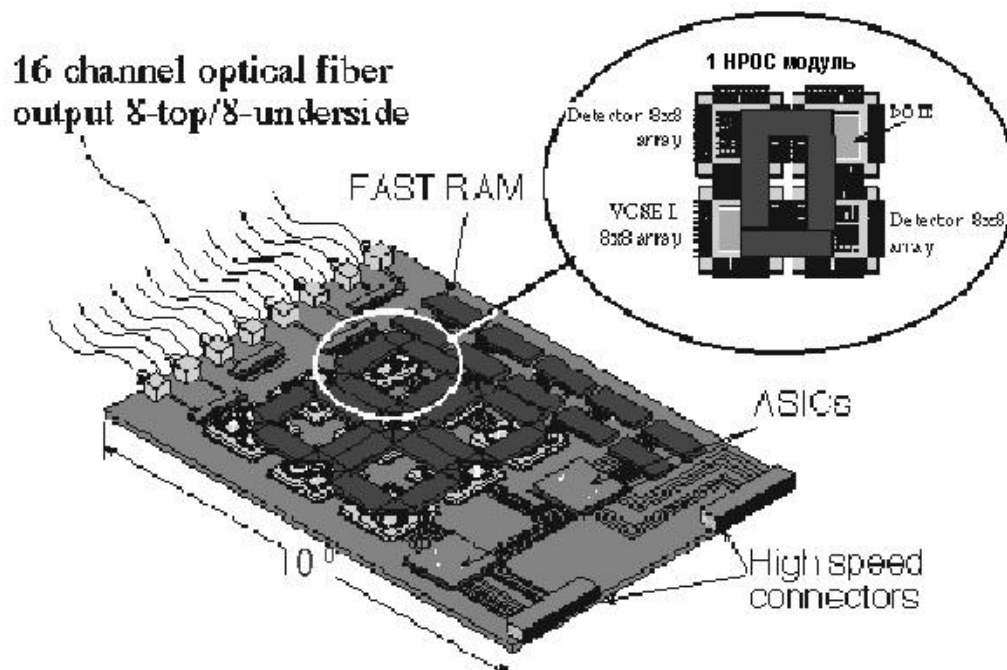


Рис.9.8. Интегральный процессор на основе HROC .

В конце 90-х годов прошлого века велись работы по созданию интегрального модуля оптического компьютера с логической матрично-тензорной основой, названного НРОС (High Performance Optoelectronic Communication) см. рис.9.8. В устройстве планировалось использовать входную матрицу VCSEL-лазеров, соединенную планарными волноводами и обычной оптикой с матрицами переключения, на основе дифракционных оптических элементов, и выходную систему, состоящую из матрицы лавинных фотодиодов, совмещенную с матрицей вертикально-излучающих диодов. В модуле используются технологии CMOS, Bi-CMOS, GaAs, оптические межсоединения организованы с использованием свободного распространения световых пучков. В итоге получается квазичетырехмерная структура. Опытные образцы показали производительность $4.096 \text{ Tb} \cdot \text{с}^{-1}$, а оценки показывают, что данная система способна развить скорость 10^{15} операций в секунду с энергией менее 1 фДж на одно переключение.

Однако, в связи с мировым кризисом фотоники и рынка волоконных линий связи работы были прекращены. В 2005г. фирма Opticomp Corporation разработала новый интегральный оптический элемент, состоящий из матрицы VCSEL-лазеров и фотодетекторов, соединенных волноводом, и планирует использовать данные устройства, как для обработки информации, так и для создания сверхбыстрых переключателей в сверхплотных волоконных линиях связи.

9.1.3. Аналоговые оптические вычисления

Когда речь идет об аналоговых оптических компьютерах, часто термин «аналоговый» употребляется в двух смыслах. Во-первых, он означает непрерывную величину, характеризующую каждую точку в окружающем пространстве (например, интенсивность света). Другими словами, какую бы точку в пространстве мы ни взяли, интенсивность света в этой точке изменяется непрерывно. Во-вторых, термин «аналоговый» означает, что объектом являются все точки непрерывных координат, а не дискретное (точечное) представление всей информации в окружающем пространстве, как это делается при обработке изображений в современных компьютерах.

Рассмотрим основные методы аналоговых вычислений, производимых в аналоговых оптических компьютерах, с использованием законов оптики. На рис. 9.9, показано, как с помощью светового луча выполняются операции сложения и умножения [1].

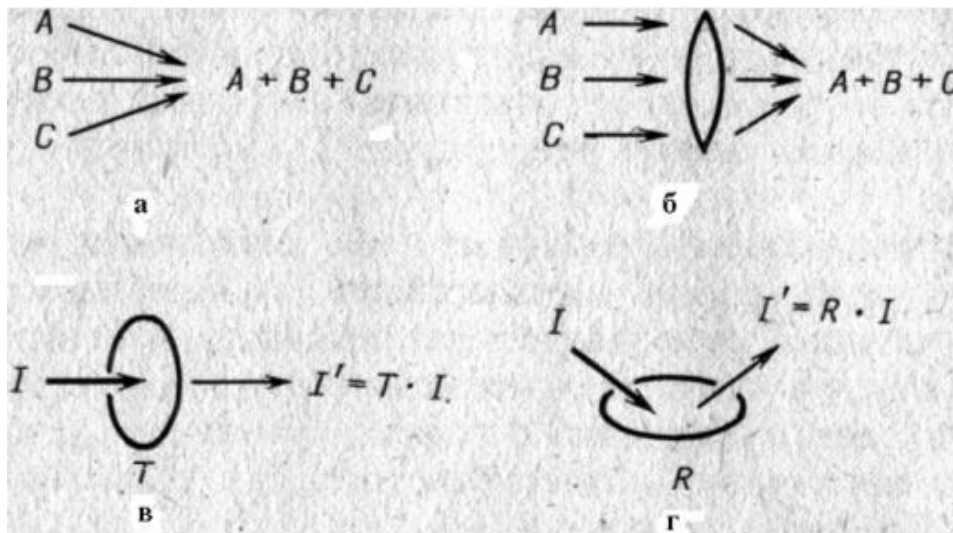


Рис.9.9. Основные аналоговые оптические операции: а — сложение; б — сложение с помощью линзы; в — умножение на основе эффекта пропускания света; г — умножение на основе эффекта отражения света.[1]

Следует отметить, что указанные на рисунке операции сложения возможны только при использовании частично-когерентных световых пучков, сложение когерентных происходит с учетом фазовых характеристик — поскольку складываются не интенсивности, а амплитуды падающих волн.

Основными операциями аналогового оптического компьютера являются только две операции - сложение и умножение, однако одни лишь эти операции не позволяют выполнять сложные вычисления. Необходимо воспользоваться другими свойствами света, такими как преломление (рефракция) и дифракция, лежащими в основе работы линз и дифракционных элементов (решеток, голограмм).

Как показано на рис.8.9, если перед линзой, например, с левой стороны (входная плоскость), поместить некоторый предмет, то с противоположной стороны мы получим перевернутое и уменьшенное изображение того же предмета. Аналоговая операция инвертирования и масштабирования произведена со скоростью света. Такая операция с данным оптическим изображением (имеющим размер 6х12 см, обладающим 60000х120000 элементами разрешения, требует минимально 7,2 Гб, используя программу, например, Adobe Photoshop).

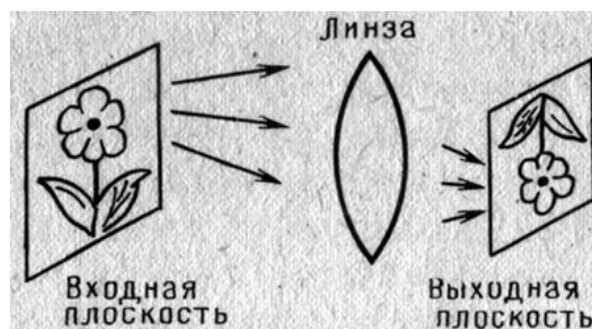


Рис.9.10. Операция инвертирования и масштабирования, выполняемая линзой при построении изображения.

Если входная и выходная плоскости оптической системы совпадают с передней и задней фокальной плоскостями сферической линзы и на вход такой системы поступает оптический сигнал $U_1(x_1, y_1)$, то на выходе появляется сигнал, связанный со входным сигналом следующим соотношением:

$$U_H(x_H, y_H) = \frac{1}{i\lambda f} \int \int_{-\infty}^{\infty} U_1(x_1, y_1) \cdot \exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda f} (x_H \cdot x_1 + y_H \cdot y_1) \right] dx_1 dy_1, \quad (9.1)$$

где f – фокусное расстояние оптической системы, λ – длина волны оптического сигнала, x_H, y_H – координаты в выходной плоскости системы.

Таким образом, выходной сигнал рассматриваемой простейшей оптической системы с точностью до постоянного множителя совпадает с фурье-образом входного сигнала. Следует отметить, что фурье-образ входного оптического сигнала существует в виде физически реального пространственного распределения комплексных амплитуд света. Благодаря этому когерентные оптические системы могут быть эффективно использованы для решения широкого круга задач, связанных с получением, преобразованием и обработкой фурье-спектров, корреляционных функций и свертков [1-3].

Поскольку фурье-образы двумерных оптических сигналов реализуются в виде реальных физических сигналов с помощью простейшей оптической системы, над ними можно производить различные математические операции методами пространственной фильтрации. Оптическая система обработки информации методами пространственной фильтрации (рис.9.11) состоит из следующих компонентов:

- источника света S ,
- двух последовательно расположенных простейших систем преобразования Фурье,
- устройства ввода информации,
- пространственного операционного фильтра
- детектора выходных сигналов.

Устройство ввода информации, операционный фильтр и детектор выходных сигналов располагаются соответственно во входной (x_1, y_1) , спектральной Фурье-плоскости (x_H, y_H) и выходной (x_D, y_D) плоскостях системы.

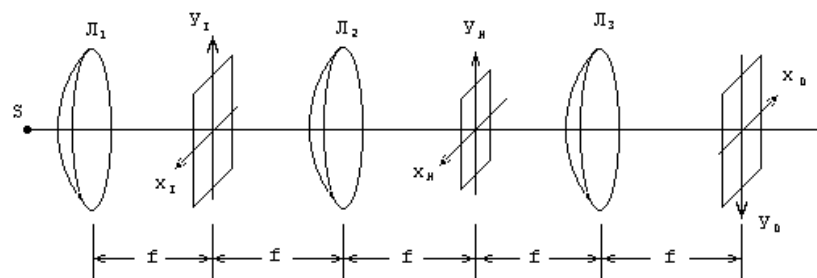


Рис.9.11. Схема оптической системы обработки информации методами пространственной фильтрации. S – источник оптического излучения. L_2 -линза осуществляет преобразование

Фурье, L_3 - линза осуществляет повторное преобразование Фурье. (x_I, y_I) - транспарант. (x_H, y_H) - операционный фильтр. (x_D, y_D) -выходная плоскость системы.

Линза L_2 осуществляет преобразование Фурье сигнала $U_1(x_I, y_I)$, созданного транспарантом, поэтому в спектральной плоскости системы непосредственно перед операционным фильтром распределение комплексных амплитуд света пропорционально фурье-образу входного сигнала. Амплитудно-фазовый коэффициент пропускания операционного фильтра определяется выражением:

$$t_H = C \cdot H(\xi, \eta) \quad (9.2)$$

где C – комплексная константа, а функция $H(\xi, \eta)$ соответствует математической операции, которую необходимо выполнить над входным сигналом, ее называют передаточной функцией фильтра. После пространственной фильтрации оптический двумерный сигнал подвергается повторному преобразованию Фурье с помощью линзы L_3 . В результате в выходной плоскости системы оптическое поле будет иметь распределение:

$$U_D(x_D, y_D) = -\frac{C_1}{(\lambda f)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_1(\xi, \eta) \cdot H(\xi, \eta) \exp[2\pi i(x_D \cdot \xi + y_D \cdot \eta)] d\xi d\eta \quad (9.3)$$

где C_1 - комплексная константа. Направления координатных осей в выходной плоскости системы выбраны противоположно направлениям осей координат во входной плоскости для того, чтобы учесть инверсию, которая получается в результате двух последовательных преобразований Фурье и выражается соотношением

$$F\{F[U(x, y)]\} = U(-x, -y) \quad (9.4).$$

Таким образом, оптическая система, представленная на рис.9.11, способна выполнять линейные интегральные преобразования типа свертки, описываемые уравнением (9.3). В частном случае, когда $H = 1$, искомая система превращается в систему, создающую изображение входного сигнала. Так как входной сигнал оптической системы является финитным, ее фурье-образ имеет неограниченную протяженность. Поэтому ошибка в выходном сигнале оптической системы, обусловленная потерей части фурье-образа, соответствующей высоким пространственным частотам, неизбежна.

9.1.4. Аналоговые процессоры

В качестве практического использования аналоговых вычислений с использованием оптического Фурье-преобразования отметим следующие модели компьютерных систем:

Оптоэлектронный процессор фирмы Global Holonetics, первым вышедший на рынок, предназначен, в частности, для распознавания упаковок в супермаркетах, в нем используется формирователь изображения, содержащий приблизительно 65000 жидкокристаллических элементов с электронным управлением, и он

распознает до 30 изображений в секунду и стоит вчетверо меньше обычных компьютеров технического зрения;

Оптический коррелятор компании Litton Data Systems на базе магнитооптики выполняет более 1000 корреляций в секунду по изображениям формата 128×128 пикселей, при объеме 10 дм^3 он высоконадежно распознает бронетехнику на многокилометровой дистанции.

В качестве другого примера практического использования аналоговых оптических компьютеров рассмотрим операционные устройства, выполняющие операции с множеством аналоговых числовых данных [1, 4].

Объектом операций, или данными, будем считать вектор, состоящий из n чисел, и двумерную матрицу размерностью $n \times n$. На рис.9.12 показан пример структуры базового оптического арифметического устройства, выполняющего умножение вектора и матрицы при $n = 3$.

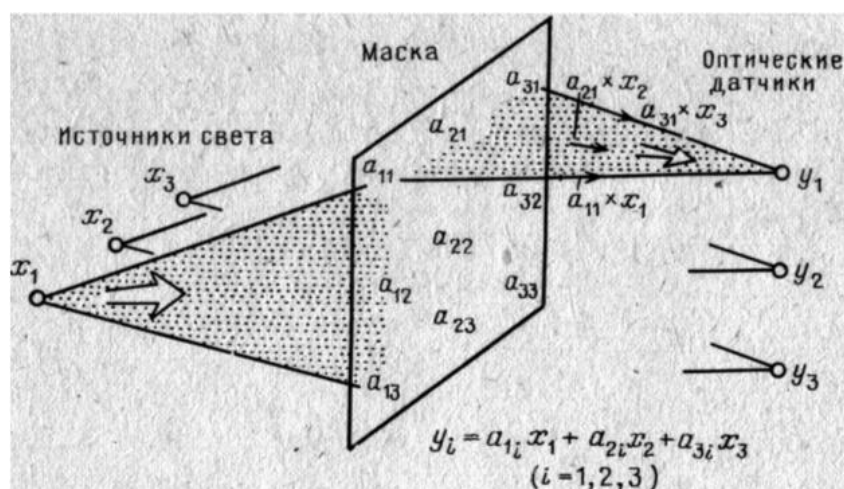


Рис.9.12. Принцип действия оптического операционного устройства, выполняющего умножение вектора на матрицу.

(x_1, x_2, x_3) -три источника света в виде строки. $[a_{ik}]$ -матричный оптический транспарант (маска). столбец оптических датчиков.

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11}x_1 + a_{21}x_2 + a_{31}x_3 \\ a_{12}x_1 + a_{22}x_2 + a_{32}x_3 \\ a_{13}x_1 + a_{23}x_2 + a_{33}x_3 \end{pmatrix}. \quad (9.5)$$

Слева показаны три источника света, расположенные горизонтально. В центре расположен оптический транспарант размером 3×3 , а справа — вертикально три фотодетектора. Кроме того, создадим оптическую систему таким образом, чтобы свет, излучаемый одним из источников, например, x_1 распространялся веерообразно по вертикали, как показано на рисунке, и падал только на часть маски a_{11}, a_{12}, a_{13} (в данной схеме оптическая система не показана). Свет от соседнего с x_1 источника x_2 распространяется также вертикально веерообразно и падает на соседние участки маски a_{21}, a_{22}, a_{23} и до других участков не доходит. Интенсивность света, прошедшего через транспарант, определяется

произведением интенсивности входного луча x_i на коэффициент пропускания a_{ij} данного участка транспаранта.

Далее, свет, прошедший через транспарант, фокусируется с помощью другой оптической системы (также не показанной на рисунке), но только по горизонтали. Световые лучи, прошедшие через элементы a_{11}, a_{21}, a_{31} в верхней части транспаранта, достигают только самого верхнего оптического датчика y_1 . Аналогично световые лучи, прошедшие через второй ряд ячеек транспаранта a_{12}, a_{22}, a_{32} достигают только датчика y_2 . В конечном итоге интенсивность света в i -м оптическом датчике будет определяться суммой трех произведений $a_{ik} \cdot x_k$ (см. формулу, приведенную на рис.9.12), которая по определению представляет собой произведение вектора x на матрицу $[a]$.

Разумеется, число элементов n вектора и матрицы не обязательно может равняться трем, оно может быть любым. Возможность параллельной (одновременной) обработки множества данных можно назвать классической отличительной чертой аналогового оптического компьютера. Этот принцип впервые был предложен в 1975 г. в Станфордском университете (США) и лег в основу многих оптических информационных устройств, разработанных впоследствии, в частности, в основу первого коммерческого цифрового оптического компьютера Enlight256, представленного компанией "Lenslet" в октябре 2003 г [6].

9.2. Коммерческий оптический компьютер EnLight 256 [6,7]

Оптический процессор Enlight256 (см.рис. 9.13) является по принципу действия аналоговым оптическим вычислительным устройством, и аппаратно представляет собой развитую гибридную цифроаналоговую систему, содержащую как оптические узлы, так и необходимые в инженерной практике компьютерные узлы (например, популярную в цифровой технике для встраиваемых применений реализацию внутрисистемной отладки).

Внутри "вычислительного ядра" Enlight, находится параллельная счетная машина со специализированной архитектурой, оптимальной для выполнения задачи умножения матрицы на вектор, - каноническая операция в вычислительной математике, основной типовой "кирпичик", из множества которых можно организовать сколь угодно сложные вычисления.

За один такт, длительностью 8 нс, процессор Enlight256 способен перемножить вектор из 256 элементов на матрицу размерностью 256×256 . Разработчики Lenslet ограничили диапазон значений элементов вектора и матрицы числом 256, соответствующим традиционным 8-битным целым числам. И именно поэтому им пришлось реализовать уникальную систему динамической калибровки, для того чтобы устранить возможную потерю точности в ходе работы.

Таким образом, производительность процессора Enlight256 составляет $8 \cdot 10^{12}$ операций в секунду: за один такт (8 нс) процессор умножает 256-байтный вектор на 256×256 - байтную матрицу.



Рис.9.13. Процессор EnLight 256.

Технология Lenslet

(lenslet -- это технический термин, обозначающий одну элементарную линзу в составе оптической многолучевой системы.)

Ядро процессора Enlight256 - оптическое, а входная и выходная информация представляется в электронном виде. Ядро состоит из 256-ти VCSEL-лазеров¹, пространственного модулятора света, набора линз и приемников излучения, образующие оптическую матрицу VMM (Vector-Matrix Multiplication), (см. рис.9.14) которая конвертирует электрическую информацию в свет, затем производит необходимые преобразования этой информации, направляя свет через программируемую внутреннюю оптику. Выходное излучение регистрируется приемниками и преобразуется снова в электрический сигнал.

VMM состоит из трех основных элементов:

1. Линейки из 256 полупроводниковых VCSEL лазеров, которые представляются как вектор, состоящий из 256 элементов, и являются одним из "регистров" оптического арифметического логического устройства, каждый элемент которого - это число разрядностью 8 бит.

2. Управляющее световым потоком интегрально-оптическое устройство на основе GaAs/GaAlAs полупроводниковых структур с квантовыми ямами (Multiple Quantum Well), состоящего из матрицы 256x256 пространственных модуляторов, работающих на отражение. Пространственный модулятор Multiple Quantum Well (MQW), состоит из NxN пиксельных модуляторов, размещенных на одном чипе см. рис.9.14.

3. Линейки из 256 фотоприемников излучения, которые интегрированы в массив аналогово-светового преобразования Analog to Digital Converters (ADS). Детекторы установлены так, чтобы получать лучи от матрицы модулятора. Вывод столбца детектора – это вектор-результат. Каждый элемент входного вектора проектируется на столбец матрицы. Каждый ряд матрицы проектируется на один детектор в векторе результата (вывода).

¹ VCSEL - Vertical Cavity Surface-Emitting Laser – лазер поверхностного излучения с вертикальным объемным резонатором.

Example:

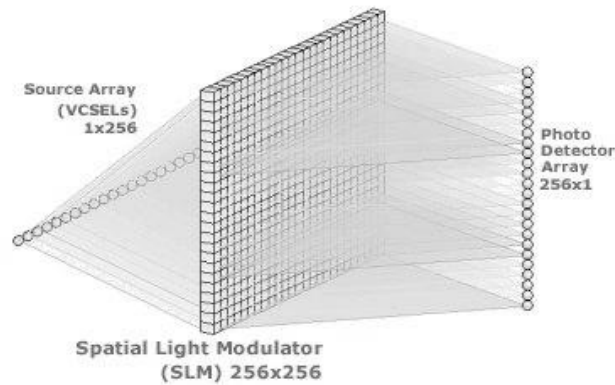


Рис.9.14. Принцип работы ядра VMM.

Программирование оптического цифрового сигнального процессора (Optical Digital Signal Processing Engine, ODSPE) заключается в изменении значений, которые сохранены в пространственном модуляторе (Spatial Light Modulator, SLM). Загрузка приложения (или данные внутри приложения) аналогична замене матрицы в пространственном модуляторе.

Пространственный модулятор, может поставляться как отдельный продукт – можно создать свой оптический процессор. Модулятор называется Ablaze.см.рис. 9.15.

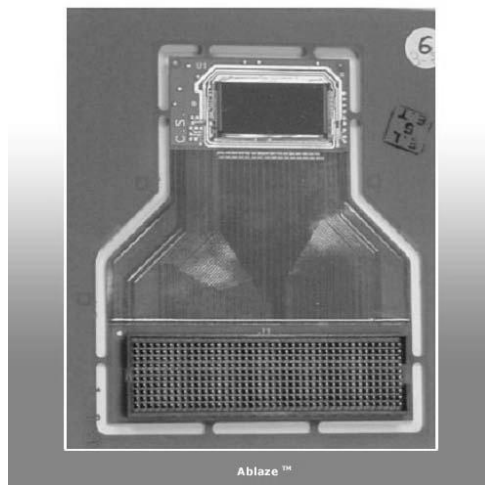


Рис.9.15. Пространственный модулятор Multiple Quantum Well.

Заявленное быстродействие в 8 триллионов целочисленных трехоперандных команд типа "умножение с накоплением" (MAC -- фактически умножение двух чисел и сложение результата с третьим числом) в секунду, способность выполнять за секунду или 125 млн. 128-точечных дискретных комплексных преобразований Фурье, или 500 тыс. таких же преобразований, но уже на 16 тыс. точек, или 125 млн. вычислений 128-точечных комплексных корреляционных функций.

Энергопотребление суммарное составляет 40 Вт, а "приведенное к производительности" -- 5 мВт на 1 млрд. операций в секунду. Эти цифры в среднем на два порядка выше (на некоторых задачах -- на три и даже на шесть!),

чем показатели классических современных DSP (цифровых процессоров обработки сигналов).

Первый оптический процессор Enlight256 (см. рис.9. 13) является по принципу действия именно аналоговым оптическим вычислителем. Аппаратно Enlight представляет собой развитую гибридную цифроаналоговую систему, содержащую как квантовомеханические элементы, так и необходимые в инженерной практике узлы (например, популярную в цифровой технике для встраиваемых применений реализацию внутрисистемной отладки, соответствующую стандарту JTAG).

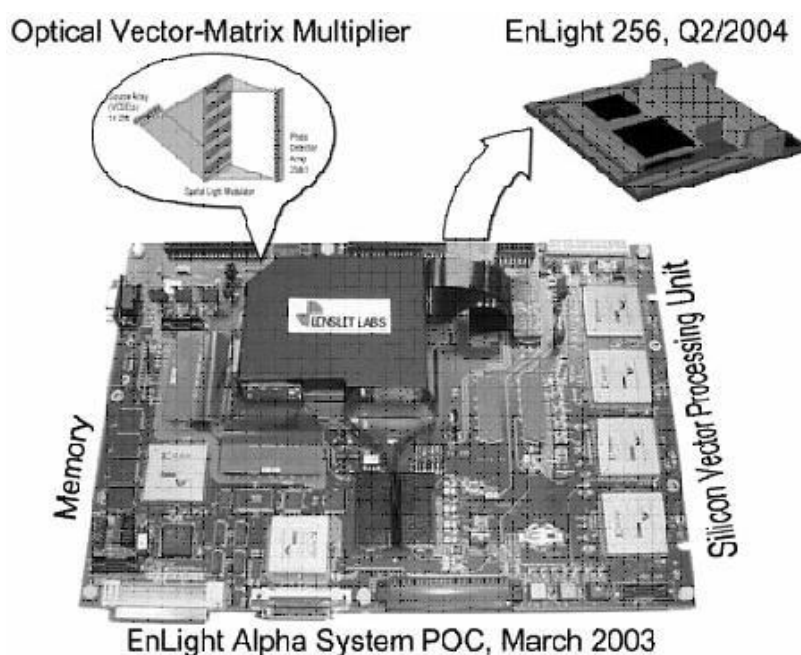


Рис.9.16. Внешний вид оптического компьютера Enlight256 с пояснениями [7].

Оптический процессор компании Lenslet конструктивно реализован традиционно: -- "материнская" плата со смонтированными оптоэлектронными компонентами. См. рис.9.16. Но в ближайшее время компания обещает компактный конструктив-микросборку. Внутри "вычислительного ядра" Enlight, по сути, находится параллельная счетная машина со специализированной архитектурой, оптимальной для выполнения фактически одной задачи: Умножение матрицы на вектор -- каноническая операция в вычислительной математике, основной типовой "кирпичик", из множества которых можно соорудить чуть ли не все что угодно. При этом элементарность такого более чем ресурсоемкого действия в Enlight подчеркивается машинным временем его исполнения -- ровно за один "такт" (на самом деле никаких особых "тактов" у оптического ядра Enlight нет, но, оно не существует "само по себе").

Цифра 256 - это "разрядность" элементарной операции, означающая, что за один "такт" процессор Enlight256 способен перемножить вектор из 256 элементов на матрицу размерностью 256 x 256.

Уточним значение использованного термина "элемент" (вектора и матрицы). Ядро Enlight по своей сути является аналоговым устройством. "Аналоговый" и "неточный" в вычислительной технике -- синонимы. Разработчики Lenslet ограничили диапазон значений элементов вектора и матрицы числом 256, соответствующим традиционным 8-битным целым числам. Им пришлось реализовать уникальную систему динамической калибровки, для того чтобы устранить возможную потерю точности в ходе работы. Так что равенство между "аналоговым" и "неточным" справедливо не только в вычислительной технике -- ядро Enlight оказалось «дискретным аналоговым».

9.2.1. Элементная база Enlight256

Гибридный характер вычислителя требует двух процедур преобразования -- "цифры в значение" и "значения в цифру". Оконечный элемент цепей трансформации 8-битного числа в интенсивность светового потока в Enlight -- лазерный диод специального исполнения, так называемый VCSEL (Vertical Cavity Surface-Emitting Laser -- лазер поверхностного излучения с вертикальным объемным резонатором). Этот полупроводниковый прибор оригинален сам по себе: в отличие от "обычных" лазерных диодов, излучающих "с торца" кристалла, VCSEL обладает рядом достоинств -- он одновременно технологичнее и дешевле стандартных лазерных диодов.

Распределенные рефлекторы Брэгга" -- состоящие из десятков слоев полупроводниковые структуры, формирующие "зеркало" с отражательной способностью свыше 99,99% и излучает более "качественный" луч (в сечении -- практически идеальный круг). Множество VCSEL можно разместить на одном кристалле. Именно такая линейка из 256 лазерных излучателей и является одним из "регистров" оптического АЛУ (арифметико-логического устройства) процессора Enlight. Второй "регистр" фактически играет роль одновременно и регистра, и АЛУ.

Название функционального вычислителя -- пространственный оптический модулятор на основе многоквантовой ямы (MQWSLM -- Multi-Quantum Well Spatial Light Modulator). В реальном исполнении это также однокристалльная микросхема, содержащая матрицу однопиксельных модуляторов. В Enlight256 MQWSLM представляет собой пиксельную матрицу 256 x 256, работающую "на отражение". Она позволяет электрически управлять интенсивностью проходящего через каждый пиксель света (в более общем случае пространственные модуляторы могут изменять разные параметры проходящей волны, а не только интенсивность).

Главная отличительная черта матрицы-модулятора Enlight -- низкая инерционность, допускающая изменение "элементов матрицы" управляющими напряжениями с частотой порядка нескольких мегагерц.

Последний элемент -- естественно, светочувствительный, обеспечивающий возврат световых потоков к электрическим напряжениям и токам. Он так же, как

и "входной преобразователь", выполнен в виде линейки, содержащей 256 фотодиодов.

9.2.2. Принцип действия вычислительного ядра Enlight 256

Излучение каждого из 256 лазерных диодов линейки "входного преобразователя" проецируется на соответствующий "столбец" пикселей матрицы MQWSLM. Прошедшее через матрицу излучение попадает на линейку фотодиодов -- каждый фотодиод принимает излучение от соответствующей строки матрицы. Результирующая энергия, полученная фотодиодами, как раз и является результатом "выполнения процедуры" умножения вектора на матрицу.

В остальном Enlight не сильно отличается от обычных цифровых процессоров:

- высокоскоростные формирователи внешних шин,
- встроенный "кэш" для быстрой загрузки векторов,
- и прочие "цифровые артефакты".

Очевидное узкое место в такой архитектуре -- естественно, внешние шины.

Существует множество задач, специфика решения которых предъявляет исключительно высокие требования именно к производительности процессора, при этом потоки обрабатываемой информации могут быть "скромными" (в кавычках, потому что все-таки полоса пропускания у внешних шин Enlight -- 32 Gbps).

Оптический процессор имеет всё необходимое, чтобы его использование стало тривиальной технической задачей -- начиная от стандартных шин и аппаратной поддержки отладки и заканчивая полным комплектом ПО, включающим практически весь необходимый набор -- от программного симулятора и компиляторов до средств высокоуровневого проектирования и оценки эффективности алгоритмов.

Применение

Основные сферы применения EnLight256 -- это военная промышленность и обработка видео в реальном времени -- обе сферы требуют высокой производительности. Один процессор EnLight 256 способен заменить несколько схем с большим количеством стандартных DSP-процессоров. Один процессор такого типа способен в реальном времени обрабатывать до 15 видеоканалов стандарта HDTV, может использоваться для распознавания голоса, человеческих лиц, обработки изображений и т.д.

Процессор в силу своих характеристик прекрасно подходит для распознавания образов в радио- и гидролокации, быстрое управление военными радарными высокого разрешения и массивами антенн с синтезируемой апертурой, так и для решения "мирных" задач -- от повышения эффективности работы сетей GSM за счет применения тех же "умных" антенных систем до многопоточного кодирования мультимедийной информации. Кроме того, размеры EnLight256 (15x15x7 см³) позволяют размещать его на транспортных средствах.

Оптический модуль, выполняющий все вычисления, получил название Ablaze. По информации компании Lenslet, Ablaze может использоваться и как отдельное устройство для обработки информации. Среди возможных применений компания выделяет устройства большой емкости для хранения информации и

широкополосные каналы ввода/вывода. Lenslet занимается внедрением модуля Ablaze как средства для кодирования видеосигнала для HDTV каналов.

Коммерческая информация

Компания "Lenslet" [6], которая разработала оптический процессор, создана в 1999 году и насчитывала около 30 сотрудников, среди которых более 20 высококвалифицированных физиков и специалистов по оптике и электрооптике. Компания специализируется на управлении, миниатюризации и интеграции электронно-оптического оборудования, а также на высокоскоростных аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразованиях.

Оценка товарного качества продукции Lenslet: - корпорация PALTEK, крупный поставщик электронных компонентов для японского рынка, еще за три месяца до начала серийных поставок Enlight подписала договор с Lenslet о стратегическом партнерстве. Рецепт успеха маленькой hi-tech-компании:

талант + работоспособность + деньги + время.

Пропорции первого ингредиента на примере Lenslet очевидны -- чем больше, тем лучше. Научное подразделение фирмы возглавлял обладатель Приза Гумбольдта за достижения в науке профессор Шимон Левит, а в консультационный совет из девяти человек входят не "просто профессора", а такие ученые с большой буквы, как -- Узи Эфрон, пионер в исследованиях жидких кристаллов и MQWSLM, Алан Оппенгейм -- отец цифровой обработки сигналов.

Второй ингредиент также лучше не экономить -- ведь "всего-то" необходимы мощный венчурный капитал и отличные финансисты. В случае с Lenslet можно назвать даже конкретные цифры -- 26 млн. долл. от JK&B Capital и The Goldman Sachs и других венчурных компаний, по частям, три раза, и непременно -- задолго до готовности. И наконец, последний компонент. А вот его требуется поменьше -- в разумном количестве и ровно столько, сколько нужно. Стартовавшая в 1999 г. и в 2000 г. получившая основной объем инвестиций, Lenslet уже во втором квартале 2004 г. начинает "отгружать" серийные Enlight256. Итого, до полной "готовности" успеха -- четыре с лишним года.

9.3. Оптические процессоры нечеткой логики [8]

В настоящее время при разработке интеллектуальных систем, в том числе, для задач контроля и управления, большое внимание уделяется реализации операций *нечеткой логики* (НЛ), которая рассматривается как наиболее адекватное на сегодня математическое описание присущих человеку особенностей мышления. В силу того, что НЛ предъявляет повышенные требования к вычислительной мощности и объему памяти процессора, разработчики процессоров НЛ проявляют повышенный интерес к оптическим информационным технологиям. Работы в этом направлении ведутся как в ряде университетов, так и инновационными фирмами.

Традиционно, процессоры делят на две группы:

1. описанные выше логические процессоры, реализующие строго определенный набор логических операций,

2. системы логического вывода, известные также под термином «нечеткая ассоциативная память», реализующие более сложные операции, относящиеся к классу нечетких ассоциаций.

Можно выделить также два подхода к созданию оптических процессоров нечеткой логики.

Первый основан на использовании таких имманентных свойств оптики, как параллелизм представления и обработки информации – в рамках этого подхода часто реализуются ранее разработанные математические модели, не учитывающие специфики оптической реализации. В данном случае оптика выступает как технология, обеспечивающая выигрыш универсального вычислителя в мощности за счет параллелизма обработки двумерных массивов информации.

В рамках первого класса систем предложены различные архитектуры, использующие матричные источники и приемники излучения - как линейки, так и двумерные матрицы, более сложные схемы на их основе, в том числе, комбинированные с системой памяти, системы распознавания и морфологической обработки изображений. В России работы по созданию оптико-электронных процессоров ведутся, например, в ФИАН им. Лебедева (А.Ю. Быковский) совместно в ВЦ РАН и МЭИ (А.Н. Аверкин), разработка запатентована. Эти системы, как правило, реализуют уже существующие математические модели.

Второй подход основан на учете в модели реальных свойств, используемых фундаментальных физических явлений, определяющих как специфические особенности, так и ограничения, накладываемые на модель.

Большой интерес представляют системы из второго класса, реализующие правило логического вывода «Обобщенный Modus Ponens». В этих системах используется, в том числе, и свойство Фурье-преобразования порождать нечеткость как свойство математической конструкции и, соответственно, методы Фурье-оптики. Например, в некоторых работах используется пространственно-неинвариантный коррелятор совместного преобразования для независимого вычисления функции принадлежности ассоциаций входа с каждым из эталонных значений. Фурье-оптика используется для генерации набора значений функции принадлежности, соответствующих результату применения каждого логического правила к входному значению.

Отметим, что подход к разработке процессора исходя из примата физической обоснованности математической модели привел к формированию алгебры логики, основанной на Фурье-дуальности определяющих операций.

Работы в этом направлении ведутся в ряде университетов США - City University of New York, The University of Tennessee, the University of Miami, Northwestern University (Evanston, IL), Massachusetts Institute of Technology (Cambridge, MA), University of Colorado (Boulder, CO) и других, а также в Китае, Японии.

С 2005г. в научной периодике существенно уменьшилось количество информации о работах по оптическим процессорам нечеткой логики – пик публикаций по этой тематике пришелся на вторую половину 80-х годов XX века. Вероятно, это связано с переходом работ в стадию инновационных разработок и,

соответственно, закрытием коммерческой информации. В пользу этой версии говорит то, что в собственно научном плане вопрос был разработан достаточно глубоко и уровень научной проработки достаточен для перехода к разработке технологий. Разработки коммерческих продуктов в смежных областях (оптические логические процессоры и вентили, системы оптической памяти) ведут такие известные своими инновационными разработками фирмы как Highland Technology, Inc., Physical Optics Corp., InPhase Technologies, Digital Optical Technologies (Somerville, MA), INTEL.

Появился интерес к использованию голографических технологий к логическим процессорам, совмещенным с голографическими запоминающими устройствами. Перспективное направление – разработка нейро-нечетких устройств, объединяющих гибкость и адекватность нечетких логик с вычислительной мощностью и способностью к самообучению искусственных нейронных сетей. Прогресс в развитии систем искусственного интеллекта актуализировал задачу интеграции в одном устройстве двух форм мышления, соответствующих функциональному разделению полушарий мозга – логического и образного. Оптические (голографические) технологии представляются перспективными потому, что обработка изображений - это обработка образов. Логико-алгебраическое описание оптических схем и реализация логических операций оптическими методами, достигли достаточного уровня развития.

Управляющая система является конечным автоматом. Внешние воздействия рассматриваются как буквы входного алфавита и выходного алфавита. Состояние описывается алфавитом состояний. Возникают - функция переходов, отображающая пару «состояние-входная буква», и функция выходов, отображающая «состояние-выходная буква».

Нечёткие автоматы получаются путем замены функций переходов и выходов конечных автоматов нечеткими отношениями. Нечёткое подмножество множества M задается функцией, отображающей M в отрезок $[0,1]$. Роль функций переходов и выходов в нечетком алгоритме играют функции отображающие множества $S \times A \times S \rightarrow [0,1]$ в отрезок, и множества $S \times B \times S \rightarrow [0,1]$ в отрезок. Здесь S – множество состояний, A -входной алфавит, B -выходной алфавит. Для нечетких автоматов обобщаются характерные для конечных автоматов задачи представления нечетких событий и реализации нечетких отношений. Нечеткие автоматы являются математическими моделями некоторых распознающих устройств и используются в задачах распознавания образов.

Представляет интерес такое направление как квантовая голография, позволяющая реализовать идею квантовых вычислений. В последнем случае важно наличие глубоких аналогий между математическими основаниями квантовых вычислений, Фурье-голографии и нечетких логик, открывающими перспективы для реализации методом Фурье-голографии как нечетких логик, так, возможно, и идеи квантовых вычислений.

9.4. Оптические нейронно-сетевые компьютеры [1]

ОК может значительно быстрее (на неск. порядков) решать вычислительные задачи по заданному алгоритму (структурированные задачи) прежде всего вследствие высокого параллелизма. Однако при решении нерегулярных

(случайных) задач, для которых практически невозможно, задать алгоритм, возникают большие затруднения. Решение случайных задач по сути сводится к выбору одного из множества готовых решений, которое является наилучшим при имеющихся входных данных. Для этого в памяти должна храниться совокупность таких решений. Обычный компьютер не обладает способностью запоминать и извлекать из памяти информацию в виде готовых решений. Это свойственно человеческому мозгу и проявляется при решении задач, связанных с распознаванием образов (такие задачи относятся к случайным).

Для моделирования процессов работы мозга человека путём имитации его анатомических нейронных структур разрабатывались в 80 - 90-е гг. нейронные (нейронно-сетевые) компьютеры. Подобно мозгу, такие компьютеры состояли из большого числа несложных процессорных элементов, между которыми имеются многочисленные перекрёстные связи. Такие системы, как и мозг, обладали ассоциативной памятью, способной при наличии на входе части всех признаков некоторого объекта воспроизвести на выходе всю информацию о данном объекте. Вычисления в нейронных сетях выполняются "коллективно": в результате простых операций, выполняемых одновременно отдельными нейронами, вся сеть в целом реализует более сложную функцию. При такой организации процесса вычислений информация может кодироваться и запоминаться не в отдельных ячейках, а установлением определённой структуры связей между ними. Нейронно-сетевые компьютеры способны к самопроизвольному обучению.

Нейронно-сетевой ОК состоит из двух основных компонентов. Это двумерная матрица оптических переключающих (бистабильных) элементов (искусственных аналогов нейронов); состояния одних элементов изменяются в зависимости от состояния элементов, с которыми они соединены. С помощью световых пучков каждый элемент этой матрицы может быть соединён со всеми другими. Второй компонент - голограмма, с помощью которой задаются различные связи между элементами. С помощью голограммы, объём которой равен 1 см^3 , можно задать более 10^9 связей. Нейронно-сетевые ОК способны дать наилучшие результаты в задачах, связанных с принятием решений с целесообразно ограниченной точностью, т. е. в области информационной деятельности, в наибольшей степени свойственной человеческому мозгу.

Оптические нейросетевые компьютеры - это одно из будущих поколений вычислительной техники, конкретный вид которой будет определяться как новыми архитектурными построениями, так и новой элементной базой. Они будут обладать возможностями недоступными электронным вычислительным машинам.

9.5. Программа Нейронет

Data science, наука о данных — новая область знаний и разработки инструментов анализа больших массивов данных, big data. Чтобы анализировать огромный массив данных, поступающих от промышленных сетей или из расшифрованного генома человека, данные, нужны когнитивные компьютеры.

Когнитивный компьютер — устройство, способное учиться и анализировать данные. Чтобы создать такую машину, пытаются разработать принципиально новую компьютерную архитектуру, имитирующую мозг. Поэтому когнитивные компьютеры еще называют *нейроморфными компьютерами*.

Мемристоры — элементы микроэлектроники, способные менять свое сопротивление под действием проходящего через них тока. Чем больше было импульсов от одного мемристора к другому, тем лучше «ассоциативная» связь между ними. Из таких элементов, моделирующих нейроны и синапсы, должны состоять нейроморфные компьютеры. Есть и другие названия для базовых элементов нейрокомпьютеров, например, когнитивные чипы, или когнайзеры.

Коннектом — карта нервной системы живого организма, на которую нанесены нейроны и их соединения. Функциональный коннектом — модель нервной системы, на которой видно, как нейроны обмениваются импульсами в реальном времени.

Нейронет — гипотетическая сеть будущего, которая сможет связать между собой ваши мозги и с помощью нейроинтерфейсов дать возможность мысленно управлять внешними объектами. Недавно было осуществлено первое такое соединение между мозгами двух крыс.

9.5.1. Мемристор[11]

Мемристор ([англ.](#) memristor = **memory** + **resistor** [память+электрическое сопротивление]) — пассивный элемент в микроэлектронике, способный изменять своё сопротивление в зависимости от протекавшего через него заряда (интеграла тока за время работы). Может быть описан как *двухполюсник* с нелинейной *вольт-амперной характеристикой*, обладающий *гистерезисом*.



Рис.9.17. Знак мемристора []

Теория мемристора была создана в **1971 году** китайцем Леоном Чуа (на англ.), на русском (Цай Шаотаном). Соотношения которые связывают попарно напряжение U , ток I , Заряд Q , магнитный поток Φ следующие: определение тока $I = \frac{dQ}{dt}$; эдс электромагнитной индукции Фарадея $U = \frac{d\Phi}{dt}$; определение емкости $C = \frac{Q}{U}$; определение индуктивности $L = \frac{\Phi}{I}$; определение сопротивления $R = \frac{U}{I}$. Следуя симметрии парных отношений магнитный поток и электрический заряд могут быть связаны соотношением

$$M(Q) = \frac{d\Phi}{dQ}. \quad (9.6)$$

При подстановке дифференциалов заряда и магнитного потока получается новый нелинейный параметр

$$M[Q(t)] = \frac{U(t)}{I(t)}. \quad (9.7)$$

называемый *мемристивностью*, имеющий размерность сопротивления, которое зависит от электрического заряда, протекающего через него. .

Это четвертый параметр $M[Q(t)]$ дополняет стандартный набор R , L , C пассивных параметров электрической цепи.

Принцип действия

Лабораторный образец запоминающего элемента, демонстрирующего некоторые свойства мемристора, был создан в 2008 году коллективом учёных во главе с Р. С. Уильямсом в исследовательской лаборатории фирмы **Hewlett-Packard** на основе диоксида титана--материала с ионной проводимостью. Такой мемристор состоит из двух последовательно включенных слоев с различными свойствами. Работа устройства (изменение его свойств) обеспечивается за счет химических превращений в тонкой (5 нм) двухслойной плёнке **диоксида титана**. Один слой стехиометрического окисла TiO_2 с большим удельным сопротивлением. Другой слой кислородно-дефицитного диоксида титана TiO_{2-x} , в котором дефицит кислорода составляет порядка 2,5% ($x=0,025$). Кислородные вакансии в этом слое являются донорами электронов и положительно заряжены.

Эти два слоя расположены между парой плоских металлических электродов. Под действием приложенного к устройству **электрического напряжения** происходит дрейф заряженных кислородных вакансий из слоя TiO_{2-x} (легированная область) в слой бездефектного (нелегированного) TiO_2 слоя. При этом динамическая толщина легированного слоя увеличивается, а нелегированного слоя уменьшается. Приложение обратного напряжения приводит к обратному эффекту. Данную реализацию мемристора следует отнести к классу наноионных устройств.

Математическая модель

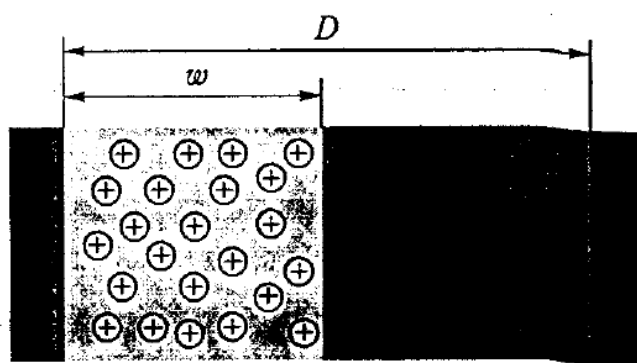


Рис.9.18. Модель мемристора с схему с двумя последовательно соединенными слоями оксида титана TiO_{2-x} ($\oplus$ -кислородные вакансии) и TiO_2 (черный цвет). две узкие черные полосы сбоков -- электроды.[11]

Рассмотрим схему с двумя последовательно соединенными резисторами, значения сопротивлений которых соответствуют двум указанным слоям окисла титана. См рис.8.17.

Пусть $w(t)$ – зависящая от времени толщина легированного слоя, D – суммарная толщина двух слоев. R_{on} – сопротивление полностью заполненной легированной пленки между электродами $D=w$, R_{off} – сопротивление полной нелегированной пленки. $w=0$. Полное нелинейное сопротивление M (мемристивность) имеет вид

$$M(t) = \frac{w(t)}{D} R_{on} + \left[1 - \frac{w(t)}{D} \right] R_{off}, \quad (9.8)$$

где скорость движения границы между слоями определяется скоростью дрейфа $\mu_v E$ вакансий с подвижностью μ_v в электрическом поле с напряженностью E . Учитывая, что $E = \frac{U}{D} = \frac{IR}{D}$ получаем

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\mu_v R_{on}}{D} I(t). \quad (9.9)$$

Рассмотренный процесс резистивного переключения, который характерен для оксидов переходных металлов, называется механизмом изменения валентности, или механизм окисления–восстановления. Сопротивление такой структуры обратно пропорционально её площади.

Существуют структуры (окись никеля NiO) сопротивление которых не зависит от площади. Переключение в них происходит путем образования нитеобразных каналов. Это *филаментарный* механизм резистивного переключения. Состояния с низким сопротивлением объясняются наличием проводящих филаментов(нитей) с высокой плотностью кислородных вакансий, а мемристорный эффект связан с изменением приграничной структуры этих филаментов. Происходит процесс обратного анодного окисления части филамента, которая находится вблизи металлического платинового электрода. Положительный нарастающий потенциал приложенный к этому электроду активирует дрейф вакансий кислорода от анода вглубь материала.

Характеристики мемристора

Важной характеристикой мемристора является вольт-амперная характеристика, т.е. зависимость тока от напряжения в виде гистерезиса, при биполярном сигнале возбуждения. Эта приближенная модель предполагает, что вакансии могут полностью вытесняться из легированного слоя. Легированная область не может распространяться на всю толщину устройства.

Вводится вырезающая функция («окно»), которая запрещает параметру w принимать не физические значения вне интервала $0 < w < D$. Тогда уравнение (8.9) принимает вид

$$\frac{dw}{dt} = f(w) \frac{\mu_v R_{on}}{D} I(t). \quad (9.10)$$

Где $f(w)$ является функций в виде перевёрнутой и смещенной параболы

$$f(w) = 4 \frac{w}{D} \left(1 - \frac{w}{D} \right). \quad (9.11)$$

Она максимальна, когда граница лежит в центре устройства $w=D/2$ и спадает до нуля на электродах $w=0$ и $w=D$, где скорость границы падает до нуля.

Из формулы(9.7) выражения для тока через мемристор с текущим сопротивлением $M(t) \equiv R_m(t)$

$$I(t) = \frac{U(t)}{R_m(t)} . \quad (9.12)$$

Из формулы (9.8) получаем

$$R_m(t) = R_{off} + \frac{w(t)}{D} (R_{on} - R_{off}) . \quad (9.13)$$

Продифференцируем (9.13) по времени и получим производную, в которую подставим (9.10) и затем (9.12)

$$\frac{dR_m}{dt} = \frac{R_d}{D} \frac{dw}{dt} = f(w) \frac{\mu_v R_{on}}{D} I(t) = -\eta f(w) \frac{\mu_v R_{on}}{D} \frac{U(t)}{R_m(t)} . \quad (9.14)$$

Введем коэффициент полярности $\eta = \pm 1$, приложенного к мемристоры напряжения, в (9.14).

Запишем уравнение для квадрата текущего сопротивления мемристора

$$\frac{dR_m^2}{dt} = -2\eta k R_d U(t) . \quad (9.15)$$

Окончательно решение уравнения (9.15) следующее

$$R_m^2(t) = R_m^2(0) - 2\eta k R_d \varphi(t) . \quad (9.16)$$

где $\varphi(t) = \int_0^t U(t) dt$ -эффективный магнитный поток.

Пример. Типичный набор параметров для мемристора. $R_{on} = 100 \text{ Ом}$, $R_{off} = 16 \text{ кОм}$, подвижность $\mu_v = 10^{-14} \text{ м}^2 / \text{В} \cdot \text{с}$, $D = 10 \text{ нм}$.

1.Для линейно нарастающего напряжения $U(t) = vt$, $\eta = +1$

$$R_m^2(t) = R_m^2(0) - 2\eta k R_d vt^2 . \quad (9.17)$$

См рис.9.19.

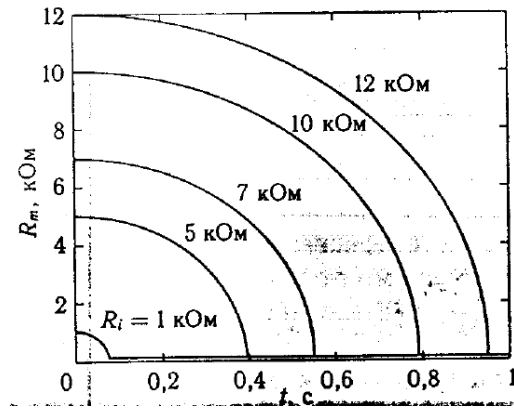


Рис.9.19. Отклик мемристора на линейное напряжение при различных начальных сопротивлениях.[11]

2. Для переменного напряжения $U(t) = U_0 \sin(\omega t + \theta)$ получаем

$$\omega R_m^2(t) = [R_m^2(0) - 2\eta k R_d U_0] \cdot [\cos \theta - \cos(\omega t + \theta)]. \quad (9.18)$$

Возникающие в этом режиме петли гистерезиса показаны на рис.9.20. С ростом частоты площадь внутри петель падает и при высокой частоте гистерезис исчезает. Граница между слоями не успевает сдвигаться вслед за переменным внешним напряжением.

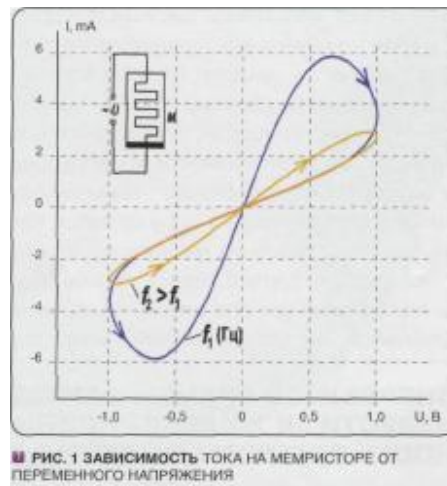


Рис.9.20. Вольт-амперная характеристика мемристора с начальным сопротивлением около 500 Ом при переменном напряжении различной частоты.[11]

С ростом частоты площадь внутри петель падает и при высокой частоте гистерезис исчезает. Граница между слоями не успевает сдвигаться вслед за переменным внешним напряжением.

В различных реализациях мемристоров используются также полимеры с ионной проводимостью, ферроэлектрики, туннельные диоды, окислы графена и кремния. Наблюдающееся в мемристоре явление гистерезиса позволяет использовать его в качестве энергонезависимых ячеек и нейроморфных систем.

Теоретически мемристорные запоминающие элементы могут быть более плотными и быстрыми, чем современная флеш-память. Также блоки из них могут заменить ОЗУ. Умение мемристоров «запоминать» заряд позволит впоследствии отказаться от загрузки системы компьютера: в памяти компьютера, отключённого

от питания, будет храниться его последнее состояние. При поддержке со стороны программного обеспечения компьютер можно будет включить и начать работу с того места, на котором она была остановлена при выключении.

Рассматривается возможность применения мемристоров в качестве искусственных синапсов (весовых модулей) нейропроцессоров и искусственных нейросетей. Поведение мемристора напоминает работу биологического синапса - чем интенсивнее входной сигнал, тем выше пропускная способность синапса ("вес" сигнала). Данное решение позволит сильно упростить конструкцию нейропроцессора и его стоимость, так как хорошо воспроизводится на уже имеющихся технологических линиях по производству микрочипов.

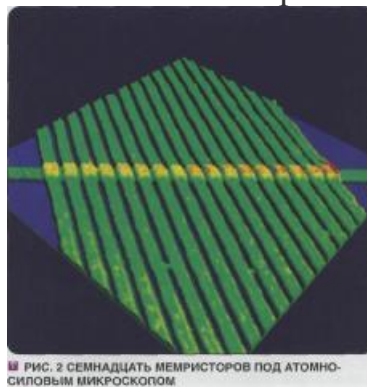


Рис. 9.21. Семнадцать мемристоров под атомным микроскопом.[11]

Мемристор с шестью состояниями показан на рис.9.22.

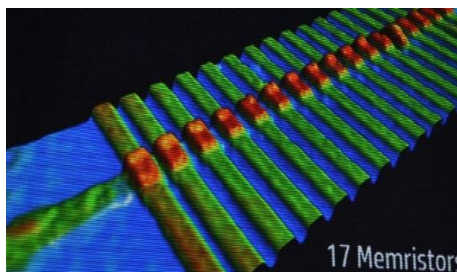


Рис.9.22 Мемристор с шестью состояниями. Изображение от Тринити-колледжа.[]

Мемристор, может быть использован для более компактной энергонезависимой памяти, новых универсальных логических вентилях и нейроподобных компьютеров, и для памяти с десятичной системой счисления.

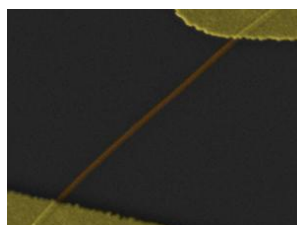


Рис. 9.23. Однонаправленная память: нановолокно из оксида титана работает и как диод, и как мемристор. Изображение от Тринити-колледжа. []

Флеш-память и динамическая RAM хранить бит в виде электрического заряда. как, мемристоре (или RRAM — резистивная RAM) хранят данные как

сопротивление. Мемристор «запоминает» уровень протекшего через него тока, изменяя свое внутреннее сопротивление. Если ток протекает в другом направлении, сопротивление уменьшается.

Мемристор от Тринити-колледжа работает как диод: уровни сопротивления можно контролировать только при протекании тока в одном направлении. Эффект диода реализуется на этапе постпроизводства с помощью так называемого электроформинга. Мемристор состоит из полупроводящего нановолокна из диоксида титана, которое расположено между двумя металлическими электродами. После создания мемристора его подвергают длительному воздействию напряжения 10 В, которое увеличивает популяцию носителей заряда возле интерфейса с катодом, создавая диодный переход. см рис.9.23.

Новый мемристор не только проводит ток лишь в одном направлении, но и хранит биты иначе. В обычном мемристоре для хранения двух разных уровней сопротивления нужны два разных уровня напряжения. В этом устройстве вы применяете напряжение 7,5 В и переходите на один уровень сопротивления выше, применяете 7,5 В еще раз, и переходите на следующий уровень». Можно остановиться на любом из уровней, который сохраняется, а позднее применить еще один импульс, чтобы перейти на следующий уровень, или сбросить устройство с помощью единственного отрицательного импульса в -7,5 В. Этот мемристор является диодом, поэтому можете сбросить ячейку памяти без протекания тока, что с «обычным» мемристором невозможно.

Эффект памяти можно объяснить физическим изменением, которое имеет место в нановолокне у интерфейса с электродом. Если применить положительное напряжение к одному из контактов, то создаются кислородные вакансии. удаление кислорода из кристаллической решетки волокна облегчает перемещение электронов в металл. Отрицательный импульс в -7,5 В инжектирует электроны из золотого электрода в нановолокно, уничтожая кислородные вакансии у интерфейса и уменьшая проводимость нановолокна.

9.5.2. Российские ученые создали проект инновационного биоморфного нейропроцессора [9]

Исследовательская группа Тюменского государственного университета предложила концепцию биоморфного нейропроцессора, который может имитировать информационные процессы вплоть до работы колонки кортекса в коре головного мозга человека.

Нейропроцессор — класс микропроцессоров для аппаратного ускорения работы алгоритмов искусственных нейронных сетей, компьютерного зрения, машинного обучения и других методов искусственного интеллекта.

Под биоморфным нейропроцессором ученые ТюмГУ подразумевают автономное аппаратное средство, которое сможет решать нейросетевые задачи. Его построят на основе биоморфной электрической модели нейрона Ходжкина-Хаксли. Схема такого нейропроцессора предполагает входное и выходное устройства для обработки сигналов, запоминающую матрицу, блок нейронов

и маршрутизатор на основе логической матрицы. См. рис.9.24. Представлены электрические схемы, топологию, нанотехнологию изготовления и принципы работы основных узлов нейропроцессора – сверхбольших 3D запоминающей и логической матриц.

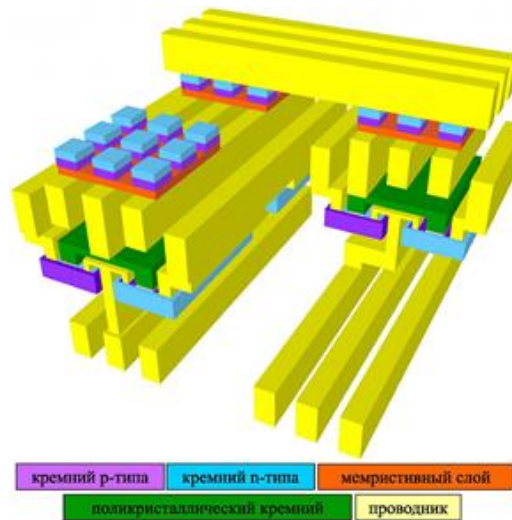


Рис.9.24. Элементная база биоморфного нейропроцессора ТюмГУ.[9]

Запоминающая матрица — это 3D структура из одинаковых (и зеркально ориентированных по отношению друг к другу) комбинированных мемристорно-диодных кроссбаров. Помимо запоминания информации, она выполняет часть процессинга для нейросети, суммируя входные сигналы.

Логическая матрица выполняет собственно логические функции, маршрутизацию сигналов, а также обработку видео и звуковых сигналов во входном устройстве нейропроцессора. Ее 3D структура — одинаковые перпендикулярные пласты, коммутируемые через мемристорные кроссбары с селективными диодами. Ученые ТюмГУ продемонстрируют концепцию биоморфного нейропроцессора в октябре 2018г. на международном семинаре MEM-Q в Греции.

В России будут создавать свой нейропроцессор

9.01.2019

В отраслевом союзе «Нейронет» объединили усилия четырех компаний, входящих в систему Национальной технологической инициативы (НТИ). Созданный консорциум займется разработкой национального нейропроцессора, способного не только конкурировать с западными образцами, но и стать стопроцентно отечественным, «доверенным», то есть гарантированно свободным от недокументированных возможностей и аппаратных «закладок». Последнее особенно важно для заказчиков из российского ВПК, где нейронные сети тоже получают широкое распространение — в системах управления боевыми беспилотниками, в планировании военных операций, в аппаратуре высокоточного наведения стрелкового оружия.

Работа сейчас идет по двум направлениям: во-первых, разработка серверного чипа для мощных серверов в дата-центрах, во-вторых, создание экономичного

встраиваемого нейропроцессора для установки на всевозможных «умных устройствах»: смартфонах, роботах, дронах, беспилотных автомобилях.

Разработка отечественной аппаратуры, ускоряющей обсчет нейросетей, — важнейший, необходимый проект при существующей конъюнктуре мирового рынка, — Соединение универсальных процессорных ядер со специализированными блоками, выполняющими вычисления по нейросетевым алгоритмам с высокой эффективностью, — актуальная современная тенденция. Чтобы такую систему можно было считать доверенной, и ядро, и нейросетевой акселератор должны быть разработаны в России. Кроме микросхемы нейропроцессора, необходимо создать еще и обслуживающую ее программную среду: операционную систему, средства разработки, библиотеки нейросетевых алгоритмов, среду обучения нейросетей. Только тогда можно будет говорить о существовании полноценной отечественной аппаратно-программной нейросетевой платформы.

9.5.3. Нейронный процессор TrueNorth Neurosynaptic System [американская «истинный север» нейросинаптическая система]

15.07.2017

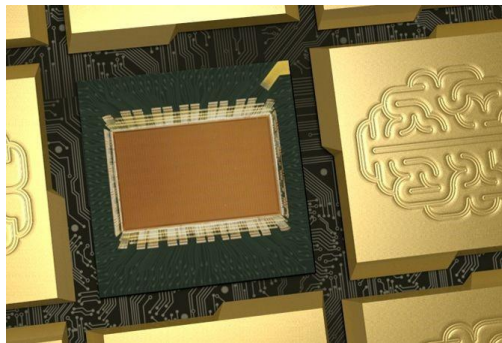


Рис.9.25. Чип TrueNorth.

Еще в 2014 году компания IBM представила чип нового типа, который предназначен для реализации нейронных сетей. чип содержал 1 миллион нейронов и 256 миллионов синапсов, что, похоже на архитектуру неокортекса мозга. Такой процессор можно использовать для решения задач, где требуется высокая и сверхвысокая производительность. Например, с его помощью можно классифицировать объекты в видеопотоке в режиме реального времени. Позднее Ливерморская национальная лаборатория (LLNL) объявила о создании производительного компьютера, принцип работы которого схож с принципом работы мозга человека. Система включает 16 миллионов нейронов и 4 млрд синапсов. В компьютере, который был разработан лабораторией, всего 16 TrueNorth чипов, а сама система получила название IBM Neuromorphic System.

Сейчас IBM участвует в совместном проекте с BBC США. Партнеры собираются создать новый суперкомпьютер, который будет включать 64 миллиона нейронов и 16 миллиардов синапсов. При этом потреблять он будет всего 10 Вт энергии, то есть его можно будет подключить к обычной энергосети.

По мнению разработчиков, новый компьютер (его название TrueNorth Neurosynaptic System) позволит работать с несколькими источниками данных одновременно (видео, изображения, аудио и текст). Сейчас один нейроморфный процессор состоит из 5,4 млн транзисторов, составляющих ядра, всего их 4096. Ядра, в свою очередь создают массив из 1 млн цифровых нейронов, которые взаимодействуют друг с другом посредством 256 миллионов электрических синапсов.

BBC США, а именно Air Force Research Lab (AFRL), использует возможности процессора для идентификации военных и гражданских транспортных средств при радиолокации с воздуха. Военные утверждают, что чип работает не хуже, чем мощный военный компьютер. Но энергии при этом потребляется в двадцать раз меньше.

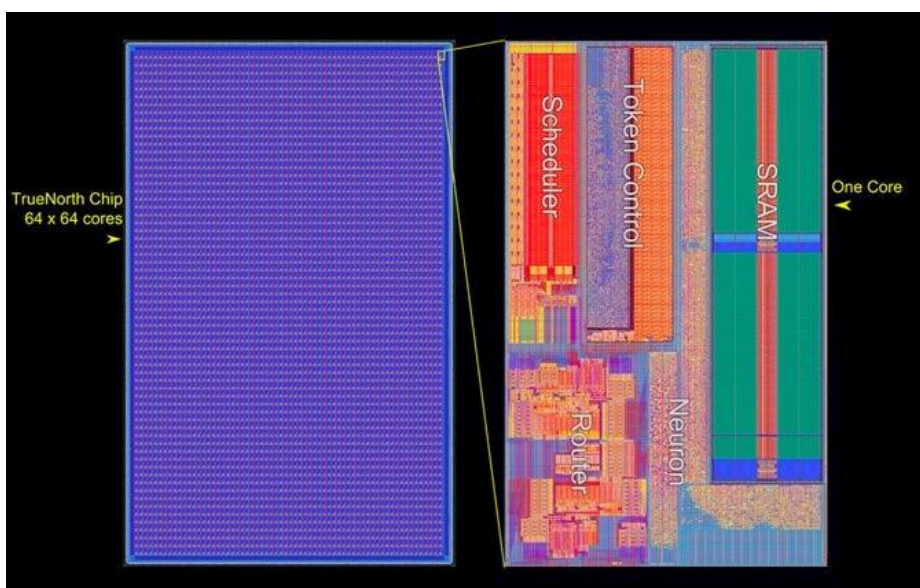


Рис.9.26. Структура нейрочипа TrueNorth

Чип TrueNorth изготовлен по 28 нм техпроцессу. Он содержит 5,4 миллиарда транзисторов и представляет собой нейроморфную систему со следующими характеристиками:

- один миллион эмулируемых «нейронов»,
- 256 миллионов эмулируемых связей между нейронами — «синапсов»,
- около 400 мегабит SRAM памяти (приблизительно 50 мегабайт).

Корпорация Samsung ранее создала на основе TrueNorth систему машинного зрения. Ее принцип работы отличается от принципа работы обычных камер. И эта система обеспечивает обработку видеопотока со скоростью в 2 тысячи кадров в секунду и выше. У самых современных камер этот показатель не превышает 120 fps.

9.5.4.Европейский нейроморфный суперкомпьютер [SpiNNaker][12]

В 2018г, по просьбе Манчестерского университета, появился европейский нейроморфический суперкомпьютерный проект, целью которого является имитация искусственного мозга с использованием так называемой Spiking Neural Network Architecture (SpiNNaker) (Ветвящаяся архитектура нейронной сети) см. Рис.9.27.



Рис.9.27 Фрагмент аппаратуры нейрокомпьютера SpiNNaker[12]

SpiNNaker является новой массивно-параллельной компьютерной архитектурой, вдохновленной фундаментальной структурой и функциями человеческого мозга, который сам состоит из миллиардов простых вычислительных элементов, взаимодействующих с использованием ненадежных пиков.

Цели проекта двоякие:

Предоставить платформу для высокопроизводительной массивно-параллельной обработки, подходящей для моделирования крупномасштабных нейронных сетей в режиме реального времени, в качестве исследовательского инструмента для нейробиологов, программистов и робототехников.

Как помощь в исследовании новых компьютерных архитектур, которые нарушают правила обычных суперкомпьютеров, но которые, мы надеемся, приведут к принципиально новым и выгодным принципам для энергоэффективных массивно-параллельных вычислений

48-чиповая плата была разработана, чтобы стать строительным блоком для машин SpiNNaker в диапазоне различных размеров. Цель состоит в том, чтобы иметь возможность моделировать единую сеть, состоящую из одного миллиарда простых нейронов, для чего требуется машина с более чем 50 000 чипов.

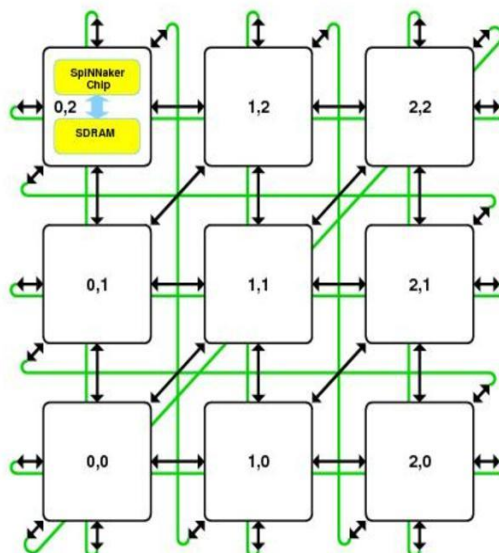


Рис. 9.28. Архитектура нейрокомпьютера SpiNNaker[12]

SpiNNaker - это вычислительная машина на миллион ядер, флагманская цель которой состоит в том, чтобы иметь возможность моделировать поведение агрегатов до миллиарда нейронов в режиме реального времени. Он состоит из массива ядер ARM9, обменивающихся данными через пакеты, переносимые с помощью пользовательской структуры межсоединений. Пакеты имеют небольшой размер (40 или 72 бита), и их передача полностью осуществляется аппаратными средствами, что обеспечивает для всего механизма чрезвычайно высокую полосу пропускания, составляющую более 5 миллиардов пакетов / с. Три из основных аксиом параллельного проектирования машин - когерентность памяти, синхронность и детерминизм - были отброшены в дизайне, что, к удивлению, не поставило под угрозу способность выполнять значимые вычисления. Еще одним атрибутом системы является подтверждение, начиная с начальных этапов проектирования,

Механизм SpiNNaker представляет собой массивно-параллельную многоядерную вычислительную систему. Он будет содержать до 1 036 800 ядер ARM9 и 7 ТБ ОЗУ, распределенных по всей системе в узлах 57 КБ, причем каждый узел представляет собой систему в пакете (SiP), содержащую 18 ядер, плюс встроенную SDRAM объемом 128 МБ (синхронная динамическая память с произвольным доступом). Каждому ядру соответствует 64 КБ памяти с плотной связью данных (DTCM) и 32 КБ памяти с тесной связью команд (ITCM). Ядра имеют различные способы связи друг с другом и с памятью, доминирующим из которых являются пакеты. Это 5- или 9-байтовые (40- или 72-битные) кванты информации, которые передаются по системе под эгидой специальной параллельной системы аппаратной маршрутизации.

Физическая иерархия системы имеет каждый узел, содержащий два кремниевых кристалла - сам чип SpiNNaker, а также SDRAM Mobile DDR (двойная скорость передачи данных), который физически установлен поверх матрицы SpiNNaker и соединен с ней стежком. Узлы упакованы и смонтированы в шестигранный массив из 48 узлов на печатной плате (полная система, требующая 1200 таких плат). При работе двигатель потребляет не более 90 кВт электроэнергии.

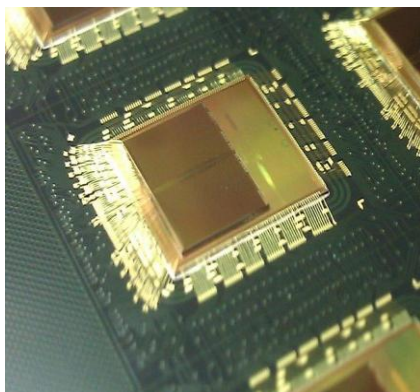


Рис.9.29.Чип SpiNNaker. [12]

Основным строительным блоком станка SpiNNaker является многоядерная система SpiNNaker на кристалле. Чип представляет собой глобально асинхронную локально-синхронную (GALS) систему с 18 процессорными узлами ARM968, расположенными на синхронных островах, в окружении легкой асинхронной коммуникационной инфраструктуры с коммутацией пакетов.

На рисунке 9.29 показано, что каждая микросхема SpiNNaker содержит два кремниевых кристалла: сам кристалл SpiNNaker и кристалл SDRAM объемом 128 МБ (синхронная динамическая память с произвольным доступом), который физически установлен поверх матрицы SpiNNaker и прикреплен к ней стежком.

Микроархитектура предполагает, что процессоры «бесплатны»: реальная стоимость вычислений - это энергия. Вот почему мы используем энергосберегающие встроенные процессоры ARM9 и SDRAM Mobile DDR (Double Data Rate), в обоих случаях мы жертвуем некоторой производительностью для значительного повышения энергоэффективности.

На рисунке 9.30 показан график матрицы SpiNNaker с 18 идентичными подсистемами обработки, расположенными на периферии, а также компонентом Network-on-Chip и общими компонентами в центре. При запуске, после самопроверки, одно из ядер избирается на специальную роль в качестве Monitor Core, а затем выполняет задачи управления системой. Обычно для поддержки приложения используются 16 ядер, а одно зарезервировано в качестве запасного для обеспечения отказоустойчивости и повышения производительности.

Межпроцессорное взаимодействие основано на эффективной многоадресной инфраструктуре, основанной на нейробиологии. Он использует сеть с коммутацией пакетов для эмуляции очень высокой связности биологических систем. Пакеты маршрутизируются по источнику, т. Е. Они несут только информацию об эмитенте, а сетевая инфраструктура отвечает за доставку их по назначению.

Сердцем коммуникационной инфраструктуры является индивидуальный многоадресный маршрутизатор, который может реплицировать пакеты, где это необходимо, для реализации многоадресной функции, связанной с отправкой одного и того же пакета нескольким различным адресатам.

Чипы SpiNNaker имеют шесть двунаправленных межчиповых каналов, которые позволяют использовать сети различной топологии. Межкристальная связь использует каналы с самосинхронизацией, которые, хотя и дорогостоящие в проводных соединениях, значительно более энергоэффективны, чем синхронные каналы с аналогичной пропускной способностью.

Площадь матрицы SpiNNaker составляет 102 мм² (10,386 мм × 9,786 мм).

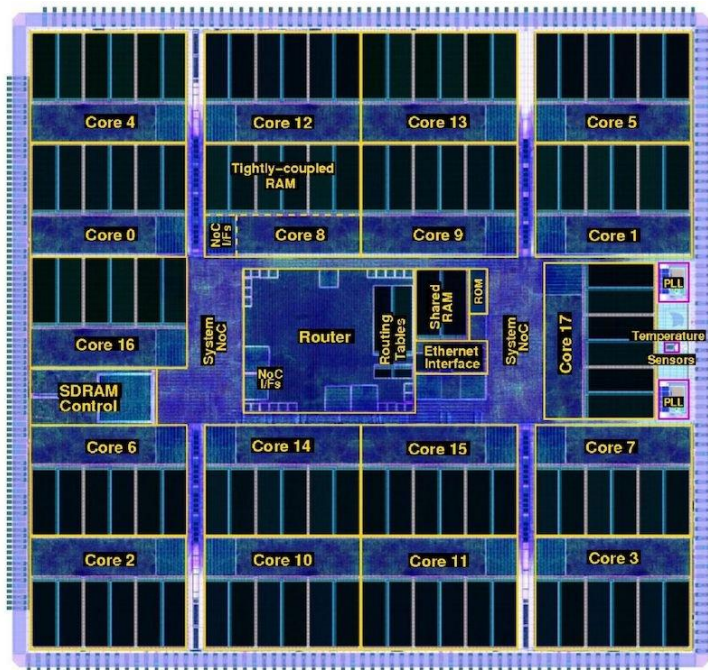


Рис.9.30 Микросхема нейροкомпьютера SpiNNaker[12]

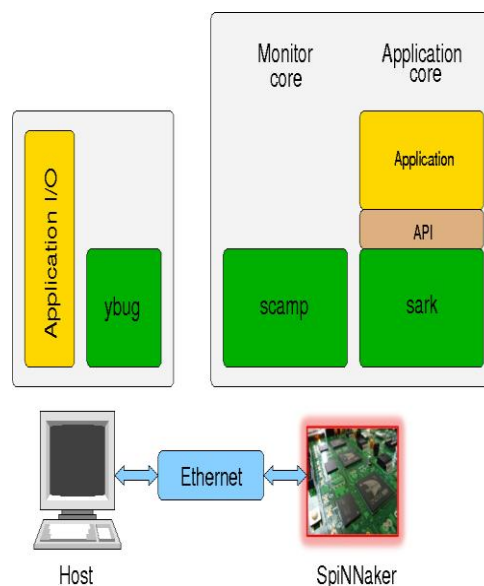


Рис.9.31. Компоненты системного программного обеспечения нейροкомпьютера SpiNNaker. [12]

Системное программное обеспечение.

Во время выполнения SpiNNaker используется три разных устройства:

Хост-машина - для ввода-вывода приложений и мониторинга.

Ядра мониторинга SpiNNaker - для поддержки приложений и мониторинга системы. Кроме того, один из них связывается с хостом через Ethernet.

Ядра приложений SpiNNaker - для запуска приложений.

На рис. 9.31 показаны программные компоненты среды выполнения SpiNNaker, используемые для поддержки приложений:

ubug - [программное обеспечение хоста] взаимодействует с scamp на ядрах монитора и предоставляет простой интерфейс команды / отладки для запуска приложений и проверки ресурсов памяти и встроенных в кристалл ресурсов.

scamp - [монитор ядра программного обеспечения] взаимодействует с ubug на хосте и sark на ядрах приложений. Поддерживает общесистемную межпроцессорную связь и связь с хостом.

sark - [прикладное программное обеспечение] взаимодействует с мошенниками на ядре монитора и предоставляет возможность абстрактно использовать аппаратное и периферийное оборудование ядра. Например, запуск таймера 1 мс, установка записи в таблице многоадресной маршрутизации или установка обработчика для обработки поступления пакетов.

Модель программирования SpiNNaker - это простая модель, управляемая событиями. Приложения не управляют потоком выполнения, они могут только указывать функции, называемые обратными вызовами, которые должны быть выполнены, когда происходят определенные события, такие как прибытие пакета, завершение передачи с прямым доступом к памяти (DMA) или истечение срока периодический интервал времени. Ядро времени выполнения приложения SpiNNaker (sark) контролирует ход выполнения и планирует / отправляет функции обратного вызова приложения.

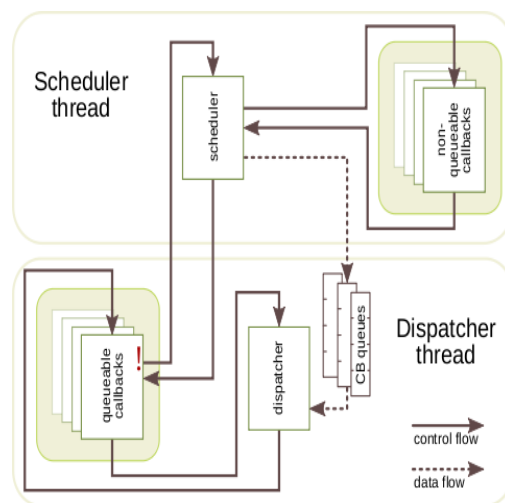


Рис.9.32 Базовая архитектура платформы SpiNNaker управляемой событиями. [12]

На рис. 9.32. показана базовая архитектура платформы, управляемой событиями. Разработчики приложений пишут процедуры обратного вызова, которые связаны с интересующими событиями, и регистрируют их с определенным приоритетом в ядре. Когда происходит соответствующее событие, планировщик либо выполняет обратный вызов немедленно и атомарно (в случае не входящего в очередь обратного вызова), либо помещает его в очередь планирования в позиции в соответствии с его приоритетом (в случае стоящего в очереди обратного вызова). Когда управление возвращается диспетчеру (после

завершения обратного вызова), выполняется обратный обратный вызов с наивысшим приоритетом. Очередные обратные вызовы не обязательно выполняются атомарно: им могут предшествовать обратные вызовы без очереди, если во время их выполнения происходит соответствующее событие.

SpiNNaker API поддерживает модель программирования, предоставляя функции для регистрации обратных вызовов, входа и выхода из критических секций, взаимодействия с другими ядрами и хостом, запуска операций DMA и других полезных задач.

Называется этот компьютер Spiking Neural Network Architecture (SpiNNaker) и он может выполнять более, чем 200 миллионов операций в секунду, а каждая из микросхем имеет 100 миллионов деталей. Машина собрана на базе Школы компьютерных наук Манчестерского университета и на реализацию этого проекта было потрачено 15 миллионов фунтов стерлингов. Но эта сумма не так впечатляет, как время, ушедшее на разработку: 20 лет прорабатывалась концепция суперкомпьютера и еще 10 лет потребовалось на сборку.

Машина SpiNNaker имеет 1 000 000 (ядер) т.е. нейроморфных процессоров, которые подобны человеческими мозговыми нейронами. Для моделирования мозгового моделирования в реальном времени потребовалось 1 млн ядер. Каждый из этих процессоров (микросхем) способен выполнять более 200 млн операций в секунду и имеет 100 млн.транзисторов.

Предполагается, что нейроморфный суперкомпьютер будет моделировать биологический мозг больше, чем любой другой компьютер на планете. Согласно данным анонса, биологический нейрон является основной клеткой мозга, которая общается посредством излучения «пику» чистой электрохимической энергии. Нейроморфный компьютер использует крупномасштабные системы, содержащие электронные схемы, имитирующие эти же всплески в машине.

В отличие от обычного компьютера, который посылает огромное количество информации через стандартную сеть, SpiNNaker имитирует параллельную архитектуру мозга и отправляет миллиарды небольших объемов информации одновременно тысячам разных пунктов назначения.



Рис.9.33 Фрагмент структуры связи ядер SpiNNaker. [12]

SpiNNaker имеет 1 000 000 ядер, однако это намного меньше, чем требуется для правильной имитации всего человеческого мозга. Для сравнения, мозг мыши имеет 100 млн. нейронов, а человеческий мозг имеет 100 млрд. нейронов. Поэтому суперкомпьютеру может понадобиться в 100 тысяч раз больше ядер, чем

в настоящее время, для достижения паритета с биологическим человеческим мозгом. Нам не нужен паритет 1:1 с мозгом человека, чтобы имитировать его точно, возможно использовать меньше физических ядер с более «виртуальными ядрами» (или потоками), которые могут действовать как нейроны. Суперкомпьютер на 1 000 000 ядер будет полезным для моделирования определенных частей мозга в режиме реального времени, а также для других задач.

[<http://apt.cs.manchester.ac.uk/projects/SpiNNaker/project/>]

Новый метод для обучения ограниченной машины Больцмана (вид нейросети нейросети) [10]

В Институте интеллектуальных кибернетических систем Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ" предложили новый метод для обучения ограниченной машины Больцмана (вид нейросети), позволяющий оптимизировать процессы семантического кодирования, визуализации и распознавания данных. Результаты исследования опубликованы в журнале "Optical Memory and Neural Networks". 2018.

В настоящее время большую популярность приобретает изучение глубоких нейронных сетей различной архитектуры: сверточных, рекуррентных, автоэнкодерных. Ряд высокотехнологичных компаний, среди которых – Microsoft и Google, используют глубокие нейронные сети для проектирования различных интеллектуальных систем. Вместе с глубокими нейронными сетями приобрел популярность термин "глубокое" обучение.

В системах глубокого обучения автоматизируется сам процесс выбора и настройки признаков. То есть, сеть самостоятельно определяет и использует наиболее эффективные алгоритмы для иерархического извлечения признаков. Для метода глубокого обучения характерно обучение на больших выборках при помощи единого оптимизационного алгоритма. Типичные алгоритмы оптимизации настраивают параметры всех операций одновременно и эффективно оценивают влияние каждого параметра нейросети на ошибку с помощью так называемого метода обратного распространения.

"Способность искусственных нейронных сетей обучаться является наиболее интригующим их свойством. Подобно биологическим системам, нейронные сети сами моделируют себя, стремясь достичь лучшей модели поведения", — отметил профессор Института кибернетических систем НИЯУ МИФИ Владимир Головкин.

Прорыв в обучении нейросетей произошел в 2006 году, после научной публикации Джеффри Хинтона с описанием техники предварительной тренировки нейросети. В статье говорилось, что можно эффективно учить многослойную нейронную сеть, если обучать каждый слой отдельно при помощи ограниченной машины Больцмана, а затем дообучать методом обратного распространения ошибки. Эти сети получили название нейронных сетей глубокого доверия (Deep Belief Networks, DBN).

Владимир Головкин проанализировал проблематику и основные парадигмы глубокого машинного обучения, предложив новый метод для обучения

ограниченной машины Больцмана. Ученый показал, что классическое правило обучения этой нейросети является частным случаем предложенного им метода.

"Американские ученые Минский и Пейперт в свое время выявили, что однослойный персептрон с пороговой функцией активации формирует линейную разделяющую поверхность с точки зрения классификации образов и поэтому не может решить задачу "исключающее или". Это провоцировало пессимистические выводы насчет дальнейшего развития нейронных сетей. Однако последнее утверждение справедливо только для однослойного персептрона с пороговой или монотонной непрерывной функцией активации – например, сигмоидной. При использовании сигнальной функции активации однослойный персептрон может решить задачу "исключающее или", так как он разбивает входное пространство образов на классы при помощи двух прямых", – рассказал Владимир Головки.

В работе также были проанализированы перспективы применения глубоких нейронных сетей для сжатия, визуализации и распознавания данных. Кроме того, Головки предложил подход к реализации семантического кодирования (хеширования) с помощью глубоких автоассоциативных нейронных сетей. Этот метод глубокого обучения может быть очень полезен в поисковиках для нейросетей, которые, по утверждению автора, будут показывать высокую скорость поиска релевантных изображений.

Практическую ценность данных научных разработок сложно переоценить: они уже нашли применение в таких областях, как компьютерное зрение, распознавание речи и биоинформатика.

Литература

1. Корпушенко Ф.В. Оптические компьютеры. // Физическая энциклопедия т.3 с.445-447. М.: Больш. Российская энциклопедия.1992 г.-672 с.
2. Эйбрэхом А., Ситон К. Т., Смит С. Д., Оптический компьютер, "В мире науки", 1983, № 4, с. 15; "ТИИЭР", 1984, т. 72, № 7;
3. Сеницын Г. В., Полностью оптические элементы дискретной логики на основе бистабильных тонкопленочных интерферометров, "Квантовая электроника", 1987, т. 14, № 3, с. 529;
4. Абу - Мостафа Я. С., Псалтис Д., Оптические нейронно-сетевые компьютеры, "В мире науки", 1987, № 5, с. 42;
5. Гиббс Х. М., Оптическая бистабильность. Управление светом с помощью света, пер. с англ., М., 1988; Optical computing, "Appl. Opt.", 1988, v. 27, № 9, p. 1641.
6. www.lenslet.com,
7. <http://dms.karelia.ru/~avip/op/in.htm>.
8. П.А. Белов, В.Г. Беспалов, В.Н. Васильев, С.А. Козлов, А.В. Павлов, К.Р. Симовский, Ю.А. Шполянский, (Обзор) Оптические процессоры: достижения и новые идеи : <https://ysu.info/ru/data/publications/Bookoob/Paper/-001.doc>.
9. <https://ria.ru/science/20180919/1528827563.html>
10. <https://ria.ru/science/20180621/1522975977.html>
11. Мейлихов Е.З. Общая физика конденсированного состояния. Долгопрудный, ИНТЕЛЛЕКТ, 2018, с.415.
12. <http://apt.cs.manchester.ac.uk/projects/SpiNNaker/project/>.

Новая форма материи - «Кристаллы Времени»

Впервые их предсказал нобелевский лауреат теоретик физики Фрэнк Вильчек в 2012-м году. Кристаллы времени — это структуры, которые, кажется, находятся в движении даже в основном состоянии или состоянии покоя.

В 2010 году нобелевский лауреат по физике Франк Вилчек готовил лекцию по классификации кристаллов для студентов Массачусетского Технологического института. Периодическая структура кристаллов повторяется в пространстве трех измерений. Время является участником пространственно-временного континуума, который имеет четыре измерения: длина, ширина, высота и время. Следовательно, существуют объекты, повторяющиеся не только в пространстве, но и во времени. Они называются «кристаллами времени».

Обычные кристаллы образуются, когда хаотично размещенные атомы начинают спонтанно собираться в организованную структуру. Образование кристаллической решетки требует энергии, поэтому сами кристаллы находятся на более низком энергетическом уровне, нежели первоначальная хаотичная среда. Места в решетке, которые могут занимать атомы строго ограничены в своем количестве. Закон симметрии природы утверждает, что все места эквивалентны одно другому. Однако, поскольку атомы могут занимать только места в узлах кристаллической решетки, то места между этими узлами теряют свою эквивалентность иным точкам пространства. Налицо изменение природных свойств пространства.

Изложенное выше касалось пространственных кристаллов. Вилчек задумался, а как будут себя вести кристаллы времени. К анализу уравнений был привлечен Альфред Шапер, физик-теоретик университета Кентукки. - решения уравнений имеют место быть только в случае если кристаллы времени возвращаются в исходное состояние исключительно через дискретный промежуток времени.

Поскольку промежуток времени дискретен, то имеется явное нарушение природы симметрии времени. Точно так обычные кристаллы нарушают природу симметрии пространства, кристаллы времени совершают свои хронарные (временные) колебания без затрат энергии. Анализ полученных уравнений показывает, что необходимым условием существования кристаллов времени является их нахождение на стабильном (минимальном энергетическом) уровне. Само движение кристаллов времени представляет собой хронарные колебания возле стабильного положения. По словам Вилчека — кристаллы времени трясутся словно желе.

За экспериментальную проверку взялся (со своими коллегами) профессор Чжан Сян из университета Калифорнии. Идея экспериментаторов заключалась в следующем — облако атомов бериллия загоняется в электромагнитную ловушку, представляющую собой круговое поле. Поскольку атомам бериллия деваться некуда, они обязаны равномерно распределиться по окружности. Силы электростатического отталкивания другого распределения попросту не позволят.

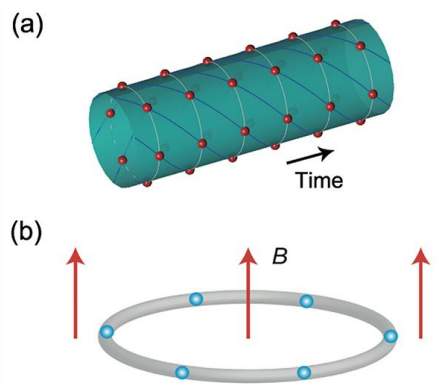


Рис.9.34 (а) Кристалл времени имеет периодические структуры как в пространстве, так и во времени. Частицы, расположенные в пространстве по периодической схеме, вращаются в одном направлении даже при самом низком энергетическом состоянии, определяя периодичность во времени. (б) Экспериментальная реализация кристалла времени, использует ультрахолодные ионы. Ионы образуют периодическую структуру в пространстве и в слабом магнитном поле движутся вдоль кольца, создавая кристалл времени. Источник изображения: physics.aps.org

В электромагнитной ловушке атомы равномерно расположились по окружности, фактически они начали представлять некий газовый кристалл. Сохраняя расстояние между атомами, кольцо бериллия медленно вращалось по кругу. Экспериментаторы смогли охладить кольцо бериллия практически до абсолютного нуля, но круговое движение не прекратилось. Атомы бериллия продолжали взаимодействовать между собой — то симметрично, то асимметрично. Подобное взаимодействие и было предсказано для "кристаллов времени" — поскольку периодичность и асимметрия наблюдались как в пространстве, так и во времени. Никакой полезной работы кольцо атомов бериллия, да еще охлажденное практически до абсолютного нуля, выполнить не может. Например, появится возможность создать сверхточный прибор измерения времени — переход атомов от симметрии воздействия к асимметрии и наоборот строго периодичен. Ученые подтвердили существование нового вида материи: кристаллов времени: постоянно в движении без затрат энергии.

Исследователям удалось создать кристаллы времени — странные кристаллы, атомная структура которых повторяется не только в пространстве, но и во времени, что означает, что они постоянно двигаются без затрат энергии. Открытие может показаться абсолютно абстрактным, но оно является предвестником начала новой эры в физике, ведь многие десятилетия мы изучали лишь материю, которая по определению была 'в равновесии': металлы и изоляторы. Звучали предположения о существовании во Вселенной самых разных странных видов материи, которая не находится в равновесии, в том числе и кристаллы времени. Сам факт того, что у нас теперь есть первый пример 'неравновесной' материи, может привести к прорыву в нашем понимании окружающего мира. "Это новый вид материи, ...один из первых экземпляров 'неравновесной' материи. Всю вторую половину прошлого века мы изучали материю в равновесии, такую как металлы и изоляторы. И только сейчас мы

ступили на территорию ‘неравновесной’ материи.” .говорит ведущий исследователь Норман Яо из Калифорнийского университета в Беркли.

У обычных кристаллов атомная решетка повторяется в пространстве, совсем как углеродная решетка алмаза. Но, как рубин или изумруд, они не движутся, потому что находятся в равновесии в своем основном состоянии. А у кристаллов времени структура повторяется еще и во времени, не только в пространстве. И поэтому они в основном состоянии находятся в движении. Представьте себе желе. Если его ткнуть пальцем, оно начнет колебаться. То же самое происходит и в кристаллах времени, но большое отличие в том, что им на движение не требуется энергия. Кристалл времени — это как постоянно колеблющееся желе в своем привычном, основном состоянии, и именно это делает его новым видом материи — ‘неравновесной’ материи.

.Яо и его команда создали детализированную схему, в которой подробно описали, как создать и измерить характеристики кристалла времени, и даже предсказать какими должны быть различные фазы, окружающие кристалл времени, другими словами, они описали эквиваленты твердого, жидкого и газообразного состояний нового типа материи. Опубликованную в *Physical Review Letters* статью Яо назвал “мостиком между теоретической идеей и экспериментальным воплощением”. Следуя инструкции Яо, две независимые группы — одна из Университета Мериленда, другая из Гарварда — сумели создать свои собственные кристаллы времени. Результаты обоих исследований были объявлены в конце прошлого года на сайте [arXiv.org](https://arxiv.org) и были отправлены на публикацию в рецензируемые журналы. Яо стал со-автором обеих статей. факт, что двум независимым группам удалось по одной схеме создать кристаллы времени в абсолютно разных условиях, звучит многообещающе

.В Университете Мериленда кристаллы времени были созданы из цепочки из 10-ти ионов иттербия, все с запутанными спинами электронов.

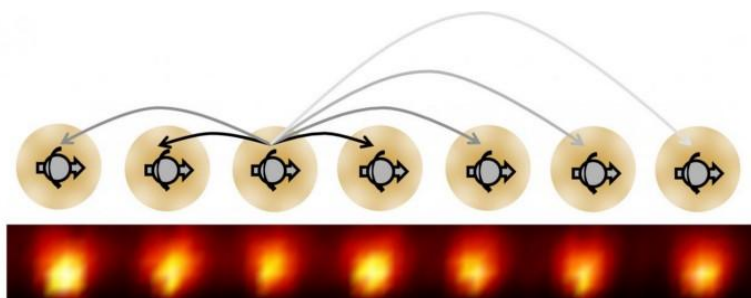


Рис.9.35.Цепочки ионов иттербия с запутанными спинами электронов для кристалла времени.[Chris Monroe, University of Maryland].

(Chris Monroe, University of Maryland) Ключом к превращению этой основы в кристалл времени было сохранение ионов в неравновесии, и для этого по ним по очереди ударяли из двух лазеров. Один лазер создавал магнитное поле, второй лазер частично разворачивал спины атомов.Так как спины атомов были изначально запутаны, они вскоре вошли в стабильную, повторяющуюся схему поворота спина, которая и определяет кристалл. Это было нормальным, но чтобы стать кристаллом времени, система должна была сломить симметрию во времени.

При наблюдении за цепочкой атомов иттербия, исследователи заметили нечто необычное. Два лазера, периодически ударяющих по атомам иттербия, вызывали повторение в системе с периодом в два раза больше периода ‘толчков’, а это было как раз тем, что не могло возникнуть в нормальной системе. “Не правда ли, было бы очень странно, если бы вы ткнули желе и обнаружили, что оно реагирует на это с разными временными периодами?” — объясняет Яо. “Но в этом и есть природа кристалла времени. У вас есть какой-то возбудитель с периодом T , но система каким-то образом синхронизируется, и вы наблюдаете ее движение с периодом, превышающим T .” В зависимости от магнитного поля и пульсации лазера, кристалл времени потом мог изменить свою фазу, как тающий кубик.

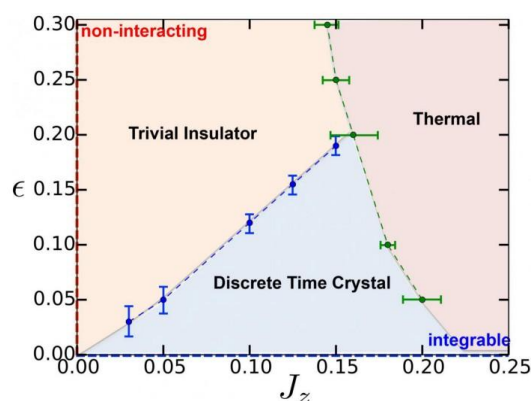


Рис.9.36. Диаграмма для кристалла времени. Norman Yao, UC Berkeley).

Кристалл из Гарварда был другим. Исследователи создали его, используя плотные азотно-вакансионные центры в алмазе, но пришли к тому же результату. “Таких схожие результаты, полученные в двух очень разных системах, подтверждают, что кристаллы времени — широко распространенная форма материи, а не какая-то любопытная особенность, наблюдаемая лишь в небольшой, особенной системе,” — объясняет Фил Риферми из Университета Индианы в сопуствующей к работе заметке, он не участвовал в исследовании, но рецензировал статью. “Наблюдение этого отдельного кристалла времени... подтверждает, что слом симметрии может происходить в всех областях природы, а это открывает новые сферы для исследований.” Схема Яо была опубликована в *Physical Review Letters*.

Глава 10 ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ НАНОТЕХНОЛОГИИ

10.1. Квантовая нанотехнология

Квантовая нанотехнология — область исследований нанотехнологий, основанных на квантовой теории. В квантовых нанотехнологиях основное внимание уделяется использованию квантовых феноменов в наноматериалах и наносистемах. При этом квантовая механика и квантовая электродинамика применяется для создания новых наноматериалов и наноустройств, функционирование и структура которых объясняется через (англ. *entanglement*) квантовую сцепленность (запутанность) состояний, квантовую

суперпозицию чистых состояний, и дискретность (квантованность) энергии квантовых состояний.

Квантовая нанотехнология также рассматривается как технология манипуляций с отдельными квантовыми состояниями атомов и молекул. Квантовая нанотехнология существенно отличается от неквантовых нанотехнологий, в которых производятся преобразования с квантовыми состояниями множеств атомов.

К основным концепциям квантовых нанотехнологий относятся квантовые аналоги *наноассемблеров*, *репликаторов* и самовоспроизводящихся (самокопирующих) машин. Самовоспроизводящиеся (самоклонировующиеся) квантовые машины — это квантовые системы, которые делают копию самих себя. Отметим, что квантовые наномашин не могут самоклонироваться, если они являются гамильтоновыми (закрытыми) системами.

Можно построить только квантовые негамильтоновы самоклонировующиеся машины, то есть квантовые открытые системы. Квантовые наномашин не являются только машинами наноразмеров. Эти наномашин используют новые (квантовые) принципы работы. Квантовые наномашин отличается от неквантовых так же, как квантовые компьютеры отличаются от классических молекулярных компьютеров.

Предполагается, что квантовые наномашин могут применяться для создания сложных структур из квантовых состояний. Например, они могут использоваться для того, чтобы самоклонировать квантовые состояния. Квантовые наномашин смогут создать состояния сверхпроводимости в молекулярных нанопроводниках, сверхтекучесть состояний движения наномашин, или состояние сверхизлучения в наномашин, являющихся молекулярными наноантеннами. Квантовые точки, квантовые диполи, квантовые проволоки станут главными элементами квантовых интегральных схем наноразмерных квантовых компьютеров.

Основные применения квантовых технологий ограничены тремя сферами: сенсоры, безопасная связь и квантовые вычисления.

Сенсоры — самая коммерциализованная сфера сейчас: уже доступны детекторы, способные обнаруживать отдельные молекулы. Их высокая чувствительность позволяет, например, обнаружить следы взрывчатого вещества в багаже.

Линии связи, защищенные квантовым шифрованием, нельзя незаметно прослушать. Пока в мире продаются единичные устройства для квантовой связи, но отметим, что часть защищенных таким образом линий созданы и работают в России.

Третьим направлением являются квантовые вычисления. Пока они находятся на стадии исследований.

10.2. Теоретические элементы для построения квантового компьютера

Теоретической основой квантовой технологий и квантовых устройств является квантовая механика. Напомним основные положения квантовой механики в дираковских обозначениях.

10.2.1. Постулаты квантовой механики [1,2]

П 1. *Постулат о пространстве состояний*

Состояние квантовой замкнутой системы задается единичным вектором $|\psi\rangle$ в комплексном гильбертовом пространстве, образующем пространство состояний. Кубитам соответствует комплексное пространство состояний $\mathbb{C}^2$

$$|\psi\rangle = \cos\frac{\theta}{2}|0\rangle + e^{i\varphi}\sin\frac{\theta}{2}|1\rangle \quad (10.1)$$

или для двухуровневой системы

$$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \quad \text{где } |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1.$$

П 2. Постулат об эволюции

Временная эволюция замкнутой квантовой системы из начального состояния $|\psi_0\rangle$ в конечное состояние $|\psi_t\rangle$ описывается унитарным преобразованием (унитарным оператором U)

$$|\psi(t)\rangle = U|\psi(0)\rangle = e^{-iHt}|\psi(0)\rangle. \quad (10.2)$$

Унитарный оператор U действующий на одиночный кубит называется однокубитовым(унитарным) элементом.

Пример квантовый элемент $NOT \equiv X = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \equiv \sigma_1 \equiv \sigma_x$ -- элемент Паули.

П 3. Постулат об измерении

Измерение фон Неймана состояния

$$|\psi\rangle = \sum_{i=1}^n \alpha_i |e_i\rangle \quad (10.3)$$

в ортонормированном базисе $|e_1\rangle, \dots, |e_n\rangle$ дает результат j с вероятностью $P(j) = |\alpha_j|^2$. Измерение переводит систему из состояния $|\psi\rangle$ в состояние $|e_j\rangle$ соответствующее результату j. После измерения система находится в измеренном состоянии $|e_j\rangle$ с вероятностью

$$|\alpha_j|^2 = \alpha_j^* \alpha_j = |\langle e_j | \psi \rangle|^2 = \langle \psi | e_j \rangle \langle e_j | \psi \rangle = \text{Sp}(\langle \psi | e_j \rangle \langle e_j | \psi \rangle) = \text{Sp}(|\psi\rangle \langle \psi | e_j \rangle \langle e_j |).$$

Если состояния $|\psi_1\rangle$ и $|\psi_2\rangle$ неортогональны, т.е. $\langle \psi_1 | \psi_2 \rangle \neq 0$, то невозможно различить их в результате измерения.

П 4. Постулат об объединении систем (о тензорном произведении состояний подсистем)

Пространство состояний составной системы является тензорным произведением пространства состояний её компонент. Пространства состояний отдельных подсистем тензорно перемножаются $\mathbb{C}^n \otimes \mathbb{C}^n = \mathbb{C}^{n^2}$

Пространство состояний составной системы, состоящей из двух подсистем является тензорным произведением состояний первой подсистемы $|\psi_1\rangle$ на состояние второй подсистемы $|\psi_2\rangle$

$$|\psi\rangle = |\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle \equiv |\psi_1\rangle |\psi_2\rangle \equiv |\psi_1\psi_2\rangle \quad (10.4)$$

Пример1: Двухкубитовое пространство состояний $C^2 \otimes C^2 = C^4$ имеет состояния

$$|0\rangle \otimes |0\rangle = |00\rangle, \quad |0\rangle \otimes |1\rangle = |01\rangle,$$

$$|1\rangle \otimes |0\rangle = |10\rangle, \quad |1\rangle \otimes |1\rangle = |11\rangle.$$

двухкубитовая система находится в произвольном состоянии

$$|\psi\phi\rangle = \alpha_{00}|00\rangle + \alpha_{01}|01\rangle + \alpha_{10}|10\rangle + \alpha_{11}|11\rangle. \quad (10.5)$$

Общее состояние *трехкубитовой* системы следующее

$$|\psi\phi\phi\rangle = \alpha_{000}|000\rangle + \alpha_{001}|001\rangle + \alpha_{010}|010\rangle + \alpha_{100}|100\rangle + \alpha_{101}|101\rangle + \alpha_{011}|011\rangle + \alpha_{110}|110\rangle + \alpha_{111}|111\rangle. \quad (10.6)$$

Пример 2. Тензорное произведение двух однокубитовых состояний

$$[\alpha_0|0\rangle + \alpha_1|1\rangle] \otimes [\beta_0|0\rangle + \beta_1|1\rangle] = \alpha_0\beta_0|00\rangle + \alpha_0\beta_1|01\rangle + \alpha_1\beta_0|10\rangle + \alpha_1\beta_1|11\rangle$$

в матричном виде следующее

$$\begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_0\beta_0 \\ \alpha_0\beta_1 \\ \alpha_1\beta_0 \\ \alpha_1\beta_1 \end{bmatrix}.$$

Часто применяют эквивалентные формы записи $|\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle = |\psi_1\rangle |\psi_2\rangle = |\psi_1\psi_2\rangle$.

Напомним, что тензорное произведение Кронекера матриц $A = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$

$B = \begin{bmatrix} x & y \\ v & w \end{bmatrix}$ следующее

$$A \otimes B = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} x & y \\ v & w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \cdot B & b \cdot B \\ c \cdot B & d \cdot B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ax & ay & bx & by \\ av & aw & bv & bw \\ cx & cy & dx & dy \\ cv & cw & dv & dw \end{bmatrix}.$$

10.2.2. Квантовая суперпозиция состояний

Квантовая суперпозиция (когерентная суперпозиция) — это суперпозиция состояний, которые не могут быть реализованы одновременно с классической

точки зрения, это суперпозиция альтернативных (взаимоисключающих) состояний. Принцип существования суперпозиций состояний обычно называется в контексте квантовой механики просто принципом суперпозиции.

Если функции Ψ_1 и Ψ_2 являются допустимыми волновыми функциями, описывающими состояние квантовой системы, то их линейная суперпозиция $\Psi_3 = c_1\Psi_1 + c_2\Psi_2$, также описывает какое-то состояние данной системы. Если измерение какой-либо физической величины $\hat{f}$ в состоянии $|\Psi_1\rangle$ приводит к определённому результату f_1 , а в состоянии $|\Psi_2\rangle$ — к результату f_2 , то измерение в состоянии $|\Psi_3\rangle$ приведёт к результату f_1 или f_2 с вероятностями $|c_1|^2$ и $|c_2|^2$ соответственно.

Из принципа суперпозиции также следует, что все уравнения на волновые функции (например, уравнение Шрёдингера) в квантовой механике должны быть линейными.

Любая наблюдаемая величина (например, положение, импульс или энергия частицы) является собственным значением эрмитова линейного оператора, соответствующим конкретному собственному состоянию этого оператора, то есть определённой волновой функции, действие оператора на которую сводится к умножению на число — собственное значение.

Линейная комбинация двух волновых функций — собственных состояний оператора также будет описывать реально существующее физическое состояние системы. Однако для такой системы наблюдаемая величина уже не будет иметь конкретного значения, и в результате измерения будет получено одно из двух значений с вероятностями, определяемыми квадратами коэффициентов (амплитуд), с которыми базисные функции входят в линейную комбинацию. (Разумеется, волновая функция системы может быть линейной комбинацией и более чем двух базисных состояний, вплоть до бесконечного их количества).

Важными следствиями квантовой суперпозиции являются различные интерференционные эффекты, а для составных систем — запутанные состояния, (*запутанные состояния*).

Пример. Двухкубитовое состояние

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle|1\rangle \quad (10.7)$$

является запутанным (*ЭПР-парой*), т.к. нет значений $\alpha_0, \alpha_1, \beta_0, \beta_1$ удовлетворяющих условию

$$|\psi\rangle = (\alpha_0|0\rangle + \alpha_1|1\rangle)(\beta_0|0\rangle + \beta_1|1\rangle). \quad (10.8)$$

Доказательство

Перемножим скобки получим

$$|\psi\rangle = \alpha_0\beta_0|0\rangle|0\rangle + \alpha_0\beta_1|0\rangle|1\rangle + \alpha_1\beta_0|1\rangle|0\rangle + \alpha_1\beta_1|1\rangle|1\rangle \quad (10.9)$$

Сравним (10.7) и (10.9) получим условие на коэффициенты

$$\alpha_0\beta_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad \alpha_1\beta_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad \alpha_0\beta_1 = 0, \quad \alpha_1\beta_0 = 0 \quad (10.10)$$

Система (10.10) не имеет решения. ■

Квантовая запутанность — квантовомеханическое явление, при котором квантовые состояния двух или большего числа объектов оказываются взаимозависимыми. Такая взаимозависимость сохраняется, даже если эти объекты разнесены в пространстве за пределы любых известных взаимодействий, что находится в логическом противоречии с принципом локальности. Например, можно получить пару фотонов, находящихся в запутанном состоянии, и тогда если при измерении спина первой частицы спиральность оказывается положительной, то спиральность второй всегда оказывается отрицательной, и наоборот.

Запутанным называется состояние, не являющееся *сепарабельным* (разделяемым), где высокоэффективные квантовые измерения выполняются над одной составляющей без воздействия на другие составляющие, и где составляющие пространственноподобно разделены во время измерения.

При устойчивом английском термине *Quantum entanglement*, достаточно последовательно используемым в англоязычных публикациях, русскоязычные работы демонстрируют разнообразие терминов. Часто встречаются: *Запутанные квантовые состояния и зацепленные состояния*.

10.3. Получение запутанных квантовых состояний [5.6]

10.3.1. Спонтанное параметрическое рассеяние света [3]

Параметрическое рассеяние света-неупругое рассеяние света в однородной нелинейной среде, параметры которой (диэлектрическая проницаемость) модулируются световой волной. Особенности:

- а) Широкий непрерывный спектр рассеянного излучения независимый от собственных частот атомов и молекул.
- б) Зависимость частоты рассеянного света от угла рассеяния (направления наблюдения)
- в) Рассеянный свет состоит из коррелированных попарно фотонов («*бифотонов*») и является *сжатым*, т.е. имеет неодинаковые дисперсии квадратурных амплитуд.

Параметрическое рассеяние объясняется спонтанным распадом фотона, падающего свет на пару фотонов с меньшей энергией в результате взаимодействия электромагнитного мполя с веществом.

Спонтанное параметрическое рассеяние — неупругое рассеяние света в однородной нелинейной среде, диэлектрическая проницаемость которой модулируется световой волной. Частота рассеянного света зависит от угла рассеяния (направления наблюдения). Спонтанный распад фотонов падающего света на пары фотонов с меньшими энергиями подчиняется закону сохранения энергии

$$\hbar\omega_n = \hbar\omega_1 + \hbar\omega_2 \quad (10.11)$$

Для эффективного условия параметрического рассеяния требуется условие фазового синхронизма

$$\vec{k}_n = \vec{k}_1 + \vec{k}_2 \quad (10.12)$$

где $|\vec{k}_n| = k_n = \frac{n\omega}{c}$ - волновой вектор волны накачки.

При небольшой плотности мощности накачки $I_n \ll 100 \text{ Вт/см}^2$, коэффициент параметрического преобразования F_k холостой волны ω_2 в сигнальную волну ω_1 , линейно зависит от I_n

$$F_k = \Gamma l^2 = \frac{(2\pi)^5 \chi^{(2)2} l^2}{c \lambda_1 \lambda_2} I_n. \quad (10.13)$$

При $I_n = 1 \text{ Вт/см}^2$, $\lambda_1 = \lambda_2 = 0,5 \text{ мкм}$, $\chi^{(2)} = 10^{-8} \text{ см}^3/\text{эрг}^{-1/2}$, протяженность образца $l = 1 \text{ см}$, коэффициент параметрического преобразования $F_k = 10^{-7}$. Это соответствует яркостной температуре излучения $T_k \approx 1800 \text{ К}$.

Такое излучение легко наблюдать невооруженным глазом с торца нелинейного кристалла. Спектральная мощность спонтанного параметрического рассеяния $P_\lambda \approx 10^{-8} \text{ Вт/нм}$ при мощности накачки $P_n = 1 \text{ Вт}$. Это излучение распределено по образующим двух пересекающихся конусов с раствором порядка 10° см. рис.10.1.

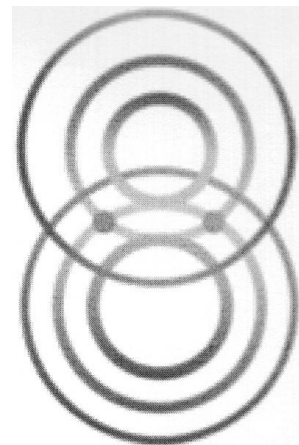
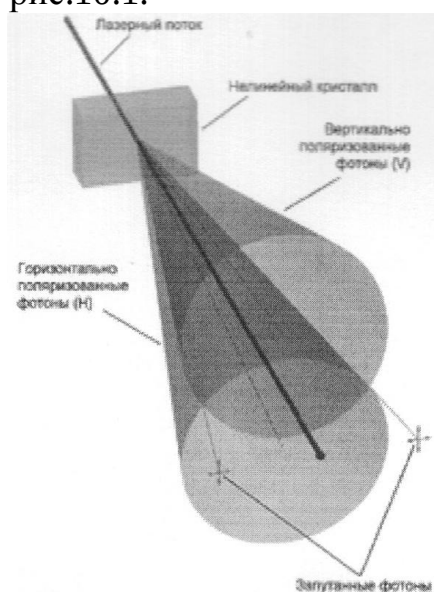


Рис.10.1 а) Получение запутанных состояний. Лазерный луч падает на нелинейный кристалл. В результате спонтанного параметрического рассеяния (СПР) на выходе получают два конуса поляризации Н и V, несущие пары фотонов в запутанном квантовом состоянии (бифотон) показанные крестиками.

б) Символ бифотона в статье на сайте Американского физического общества.

Общая эффективность спонтанного параметрического рассеяния составляет примерно $\int P_\lambda d\lambda / \hbar \omega_n \approx 10^{11}$ пар фотонов/сек. Спонтанное параметрическое рассеяние является эффективным источником излучения с парной корреляцией фотонов.

Параметрическое рассеяние является эффективным источником «двухфотонного света», т.е. источником излучения *запутанных фотонов*

(фотонов с парной корреляцией). Спонтанное параметрическое рассеяние свет дающее бифотоны позволяет реализовать экспериментальную проверку парадокса Эйнштейна-Подольского-Розена и неравенств Белла и подтвердить справедливость квантовой механики.

Копенгагенская интерпретация квантовой механики рассматривает волновую функцию до её измерения как находящуюся в суперпозиции состояний. В соответствии с Копенгагенской интерпретацией при измерении происходит необратимый коллапс волновой функции, и та принимает определённое значение, при этом предсказуем только набор возможных значений, но не результат конкретного измерения.

В простейшем случае источником S потоков запутанных фотонов служит определённый нелинейный материал, на который направляется лазерный поток определённой частоты и интенсивности (схема с одним эмиттером). В результате спонтанного параметрического рассеяния (СПР) на выходе получаются два конуса поляризации H и V , несущие пары фотонов в запутанном квантовом состоянии. См рис.10.1.

Выбор конкретного материала зависит от задач эксперимента, используемой частоты и мощности В таблице 10.1. приводятся некоторые часто используемые неорганические нелинейные кристаллы с регулярной доменной структурой

Таблица 10.1.

Вещество	формула	Аббревиатура
бета-борат бария	$\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$	BBO
триборат лития	LiB_3O_5	LBO
титанил фосфат калия	KTiOPO_4	KTP
ниобат калия	KNbO_3	--

10.4. Мысленный эксперимент (ЭПР) Эйнштейна-Подольского-Розена в интерпретации Боме

Мы следуем статье Аспе «Теорема Белла: Наивный взгляд Экспериментатора.»[4]

Схема эксперимента

Рассмотрим оптический вариант мысленного ЭПР-опыта, предложенный Бомом 4 (рис.10.2) 1). Источник S испускает пару фотонов с различными частотами ν_1 и ν_2 , распространяющихся в противоположных направлениях вдоль оси Oz . Предположим, что поляризационная часть вектора состояния пары равна:

$$|\Psi(\nu_1, \nu_2)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}[|xx\rangle + |yy\rangle] \quad (10.14)$$

где $|x\rangle$ и $|y\rangle$ - линейно поляризованные состояния. Это состояние не преобразуется в произведение двух состояний, ассоциированных с состоянием каждого из фотонов. Невозможно приписать каждому из них хорошо определенное состояние, например, определенную поляризацию. Такое состояние, описывающее систему некоторых объектов, мыслимую только глобально, представляет собой *запутанное состояние (entangled state)*.

Измерение осуществляется линейной поляризацией двух фотонов с помощью анализаторов I и II . За анализатором I с ориентацией a расположены два

детектора, выдающие результат + или – в соответствии тем, какая линейная поляризация обнаружена: параллельная или перпендикулярная a . Анализатор II с поляризацией b действует подобным же образом. см рис.10.2

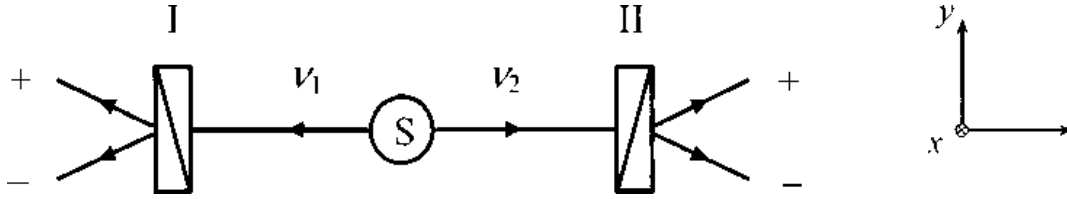


Рис. 10.2. Мысленный эксперимент Эйнштейна-Подольского-Розена-Боба с фотонами. Два фотона ν_1 и ν_2 , испущенные в состоянии $|\Psi(1,2)\rangle$ уравнения (1), анализируются линейными поляризаторами с ориентациями a и b . [4]

Можно измерять вероятности одиночной или совместной регистрации на выходе каналов поляризаторов. Легко вывести предсказания квантовой механики для этих измерений поляризации, как одиночных, так и совместных.

Рассмотрим сначала одиночные вероятности $P_{\pm}(a)$ получения результатов $\pm$ для фотона ν_1 , и, аналогично, одиночные вероятности $P_{\pm}(b)$ получения результатов $\pm$ для фотона ν_2 . Квантовая механика (Q.M.) предсказывает, что:

$$P_{+}(a) = P_{-}(a) = \frac{1}{2},$$

$$P_{+}(b) = P_{-}(b) = \frac{1}{2}. \quad (10.15)$$

Эти результаты согласуются с замечанием о том, что мы невозможно сопоставить некоторую поляризацию каждому из фотонов, так что каждое отдельное измерение поляризации дает случайный результат.

Рассмотрим теперь вероятности $P_{\pm\pm}(a,b)$ совместного обнаружения фотонов с частотой ν_1 и ν_2 , в каналах (+) параллельной, или (–) перпендикулярной поляризаторов I или II с направлениями a и b . Квантовая механика предсказывает:

$$P_{++}(a,b) = P_{--}(a,b) = \frac{1}{2} \cos^2(a,b)$$

$$P_{+-}(a,b) = P_{-+}(a,b) = \frac{1}{2} \sin^2(a,b). \quad (10.16)$$

Корреляции

Рассмотрим сначала частную ситуацию когда угол между направлениями равен нулю $(a,b)=0$, когда поляризаторы параллельны. Квантовая механика предсказывает такую вероятность для совместных вероятностей см. (10.16):

$$P_{++}(a,a) = P_{--}(a,a) = \frac{1}{2},$$

$$P_{+-}(a,a) = P_{-+}(a,a) = 0. \quad (10.17)$$

Согласно этому результату и с учетом (10.15) видно, что если фотон ν_1 , обнаружен в канале + поляризатора I, то фотон ν_2 , наверняка будет обнаружен в

канале + поляризатора II (и аналогично для каналов -). Для параллельных каналов имеется полная корреляция между индивидуальными случайными результатами измерения поляризации двух фотонов ν_1 и ν_2 . Удобной мерой корреляции между случайными числами является *коэффициент корреляции*. Для рассмотренной выше ситуации он будет равен

$$E(a,b) = P_{++}(a,b) + P_{--}(a,b) - P_{+-}(a,b) - P_{-+}(a,b) . \quad (10.18)$$

Используя предсказание (9.16) квантовой механики, находим для коэффициента EQM корреляции

$$E_{QM}(a,b) = \cos^2(a,b) - \sin^2(a,b) = \cos 2(a,b) . \quad (10.19)$$

В частном случае для параллельных анализаторов ($(a,b) = 0$) находим $E_{QM}(0) = 1$, что подтверждает полноту корреляции.

Квантово-механические расчеты исходят из предположения, что хотя каждое отдельное измерение дает случайные результаты, но эти случайные результаты коррелированы, как показывает уравнение (10.19). Для параллельных (или перпендикулярных) ориентаций поляризаторов корреляция является полной ($|EQM| = 1$).

ЭПР исходили из Предположение о локальности: Событие происходящее в т.А не может мгновенно изменить состояние системы, находящейся в другой точке В. Оно следует из утверждения, что никакое взаимодействие не может распространяться с бесконечной скоростью.

10.5. Неравенства Белла [4,5]

10.5.1. Формализм

Через три десятилетия после выхода статьи ЭПР, Белл выразил в математической форме следствия, вытекающие из предшествующего обсуждения и явно ввел дополнительные параметры, обозначенные им через λ . Их распределение по ансамблю эмиттированных пар он определил функцией $\rho(\lambda)$, так что

$$\rho(\lambda) \geq 0, \int \rho(\lambda) d\lambda = 1 \quad (10.20)$$

Для данной пары, характеризуемой данным дополнительным параметром λ , результаты измерения задаются функциями, принимающими только два возможных значения (+ 1 и - 1):

$$\begin{aligned} A(\lambda, a) &= \pm 1 \text{ в анализаторе I (с ориентацией } a) \\ B(\lambda, b) &= \pm 1 \text{ в анализаторе II (с ориентацией } b) \end{aligned} \quad (10.21)$$

Конкретная теория дополнительного параметра полностью определяется явным видом функций $\rho(\lambda)$, $A(\lambda, a)$ и $B(\lambda, b)$. Результат измерения А не зависит от измерения В. Математически постулат о локальности можно выразить как

$$\begin{aligned} A(a, \lambda) &\neq A(a, b, \lambda) , \\ B(b, \lambda) &\neq B(a, b, \lambda) \end{aligned} \quad (10.22)$$

Корреляционная функция ожидаемой средней величины произведения АВ следующая

$$E(a,b) = \int \rho(\lambda) A(\lambda a) B(\lambda a) d\lambda \quad (10.23)$$

10.5.2. Неравенства Белла

Существует много разных форм и представлений неравенств Белла. Здесь приведем простую форму, непосредственно приводящую к возможности ее экспериментальной проверки.

Согласно (9.23), можно переписать эти неравенства. Рассмотрим величину

$$s = A(\lambda, a)B(\lambda, b) - A(\lambda, a)B(\lambda, b') + A(\lambda, a')B(\lambda, b) + A(\lambda, a')B(\lambda, b') = \\ A(\lambda, a)[B(\lambda, b) - B(\lambda, b')] + A(\lambda, a')[B(\lambda, b) + B(\lambda, b')] \quad (10.24)$$

Учитывая, что четыре числа A и B принимают только значения ± 1 , простой анализ второй строки выражения (9.24) показывает, что $s(\lambda a a', b b') = \pm 2$.

Усредняя s по λ :

$$S = \int s(\lambda a a', b b') \rho(\lambda) d\lambda \quad (10.25)$$

находим, что значение этой величины заключено между $+2$ и -2 :

$$-2 \leq S(a a', b b') \leq 2, \quad (10.26)$$

где

$$S(a a', b b') = E(a, b) - E(a, b') + E(a', b) + E(a', b'). \quad (10.27)$$

Это – так называемые **В.С.Н.С.Н.** неравенства, т.е. неравенства Белла, обобщенные Clauser, Horne, Shimony, Holt. Они содержат комбинацию S четырех коэффициентов корреляции для поляризации, связанных с двумя направлениями анализа для каждого поляризатора (a и a' для поляризатора I, b и b' для поляризатора II). Заметим, что они применимы для теорий с дополнительным параметром весьма общего вида, определяемого в разделе 10.5.1.

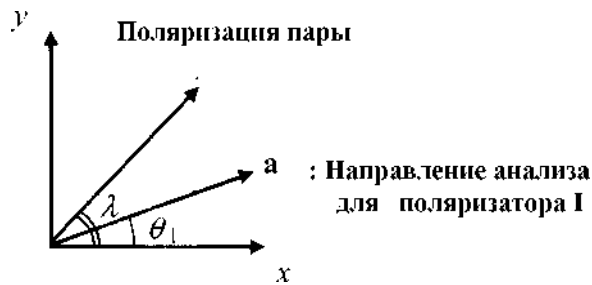


Рис.10.3. По оси y отложено поляризация пары. По направлению a [4]

Конфликт с квантовой механикой

Можно воспользоваться предсказаниями (10.19) квантовой механики для ЭПР-пар, чтобы оценить величину $S(a, a', b, b')$, определяемую соотношением (10.27). Для частного набора ориентаций, показанных на рис. 9.4а, результат равен

$$E_{QM}(a, b) = 2\sqrt{2} = 2,828$$

Это квантово-механическое предсказание определенно конфликтует с неравенствами Белла (9.20) $-2 \leq S(aa', bb') \leq 2$, которые верны для произвольной теории с дополнительным параметром общего вида, описанной в п.10.5.1.

Ситуация, для которой предсказания квантовой механики не могут быть воспроизведены (имитированы) теориями с дополнительными параметрами определяется **теоремой Белла**:

Невозможно найти теорию с дополнительным параметром, удовлетворяющую общему описанию из п.10.5.1, которая воспроизводит все предсказания квантовой механики.

Важность теоремы Белла состоит в том, что она относится не к конкретным моделям с дополнительными параметрами, а имеет общий характер.

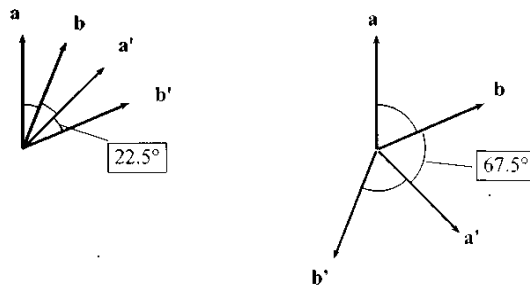


Рис.10.4. Угловые ориентации, где в наибольшей степени проявляется конфликт между неравенствами Белла и квантовой механикой. а) угол $22,5^\circ$, б) угол $67,5^\circ$ [4].

Максимальный конфликт

Интересно установить наибольшее расхождение между неравенством Белла и предсказаниями квантовой механики. Обозначим коэффициент корреляции, предсказываемый квантовой механикой, через S_{QM} :

$$S_{QM}(a, b, a', b') = \cos(a, b) - \cos(a, b') + \cos(a', b) + \cos(a', b') \quad (10.28)$$

Она является функцией трех независимых переменных (a, b) , (b, a') и (a', b') . Заметим, что угол между направлениями a и b :

$$(a, b') = (a, b) + (b, a') + (a', b') \quad (10.29)$$

Чтобы найти экстремум S_{QM} , приравняем три частных производные к нулю и получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_{QM}}{\partial (a, b)} &= -\sin(a, b) = 0 = -\sin(a', b) = -\sin(a', b') \\ (a, b) &= (b, a') = (a', b') = \theta \end{aligned} \quad (10.30)$$

а также

$$\sin(a, b') = \sin 3\theta.$$

На рис.10.5 построен график функции $S_{QM}(\theta)$ для случая, определенного условием (9.24).

Отсюда видно, что абсолютные максимум и минимум величины S_{QM} равны:

$$S_{QM}(\theta) = 2\sqrt{2} = 2,828 \quad \text{при} \quad \theta = \pm \frac{\pi}{8} = 22,5^\circ \quad (10.31)$$

$$S_{QM}(\theta) = -2\sqrt{2} = -2,828 \quad \text{при} \quad \theta = \pm \frac{3\pi}{8} = 67,5^\circ \quad (10.32)$$

Эти значения и являются решениями (9.25). Соответствующие наборы ориентаций показаны на рис.10.4. Они дают наибольшие нарушения неравенств Белла. $-2 \leq S(aa', bb') \leq 2$.

Более общим образом рис.10.5 показывает, что имеется большой диапазон ориентаций, влекущих конфликт с неравенствами Белла. Ясно также, однако, что имеется много наборов ориентаций, для которых такой конфликт отсутствует.

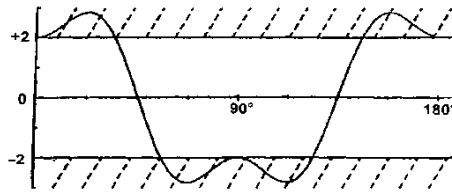


Рис.10.5 $S(\theta)$, предсказываемая квантовой механикой для ЭПР-пар. Конфликт с неравенствами Белла возникает при $|S| > 2$, и он достигает максимума для набора ориентаций, показанных на рис.10.4.[4]

Обсуждение условия локальности.

Любая теория дополнительных параметров подчиняется неравенствам Белла.

При выводе неравенств Белла необходимы две гипотезы:

1-я: Корреляции на расстоянии понимаются на основе введения дополнительных параметров для разделенных частиц (различным частицам отвечают различные физические сущности). **Квантовая механика нарушает неравенства Белла.**

2-я: Результат измерения поляризации $A(\lambda, a)$ поляризатором I не зависит от ориентации удаленного поляризатора II и наоборот. Распределение вероятностей $\rho(\lambda)$ (характер измерения пар) не зависит от ориентации направлений поляризации a и b. $A(\lambda)$, $B(\lambda)$, $\rho(\lambda)$ отвечают условию локальности (т.е. не зависят от ориентации удаленных поляризаторов).

Эксперимент подтверждает нарушения неравенства Белла и подтверждает квантовую механику и опровергает любую теорию дополнительных параметров.

10.5.3. Экспериментальная проверка неравенств Белла

Теорема Белла решающим образом повлияла на дискуссии о возможности (или необходимости) полноты квантовой механики. Речь больше не шла о философской позиции (реализм или позитивизм...) или об индивидуальном предпочтении. Стало возможным разрешение вопроса с помощью эксперимента. Если можно приготовить пары фотонов (или частиц со спином 1/2) в ЭПР-состоянии и измерить четыре числа совпадений $N_{\pm\pm}(a, b)$ для детекторов на выходе измерительных каналов поляризаторов (или фильтров Штерна-Герлаха),

то можно получить и поляризационный коэффициент корреляции для поляризаторов с ориентациями a и b :

$$E(a,b) = \frac{N_{++}(a,b) - N_{+-}(a,b) - N_{-+}(a,b) + N_{--}(a,b)}{N_{++}(a,b) + N_{+-}(a,b) + N_{-+}(a,b) + N_{--}(a,b)} \quad (10.33)$$

Выполнив четыре измерения этого типа с ориентациями $E(a,b)$, $E(a,b')$, $E(a',b)$ и $E(a',b')$, мы получим измеренное значение $S(a,a',b,b')$ для величины S , определяемой уравнением (9.27). Выбрав ситуацию, при которой квантовая механика предсказывает, что эта величина не удовлетворяет неравенствам Белла, (10.26), получаем экспериментальный критерий, позволяющий выбрать между квантовой механикой и некоторой локальной теорией с дополнительными параметрами. Если при этом используется схема с регулирующими поляризаторами, тогда тестируется даже более общий класс «сепарабельных» (или причинных в релятивистском смысле) теорий с дополнительными параметрами.

Источник запутанных фотонов

В качестве источника запутанных фотонов (рис.10.6) использовался двухфотонный каскад селективного возбуждения для кальция $4p^2\ ^1S_0 \rightarrow 4s4p\ ^1P_1 \rightarrow 4s^2\ ^1S_0$. Этот каскад очень подходит для экспериментов с подсчетом совпадений, поскольку время жизни τ для промежуточного уровня очень короткое (5 нс). Удалось достигнуть этого оптимального соотношения при использовании лазера с ионами криптона ($\lambda_K = 406\text{ нм}$) и перестраиваемого лазера на органических соединениях ($\lambda_D = 581\text{ нм}$), настроенного на резонанс с двухфотонным процессом. Оба лазера работали в одномодовом режиме. Они фокусировались на пучке атомов кальция (лазерные лучи имели толщину около 50 мкм). Два каскада составила интенсивность для двух каскадов составила около $N = 4 \times 10^7\text{ с}^{-1}$.

При мощности в несколько десятков мВт на каждом лазере интенсивность истинных совпадений – пропорционально N . При данной интенсивности каскада интенсивность совпадений с параллельными поляризаторами составляла около 10^2 с^{-1} , т.е. на несколько порядков амплитуды больше, чем в первых экспериментах. Статистическая точность в 1% могла достигаться при этом в каждом отдельном сеансе продолжительностью 100 с.

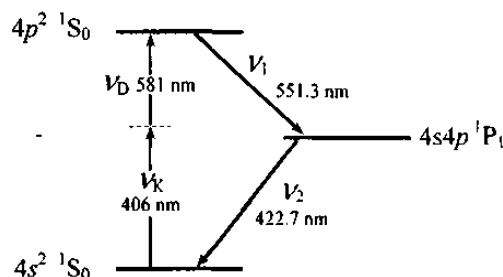


Рис.10.6 – Двухфотонное селективное возбуждение лазера с $4p^2\ ^1S_0 \rightarrow 4s4p\ ^1P_1 \rightarrow 4s^2\ ^1S_0$ состоянием кальция с ионами криптона и перестраиваемого лазера на органических соединениях. Из этого состояния радиоактивный распад атома может приводить только к генерации пары запутанных фотонов (ν_1, ν_2).[4].

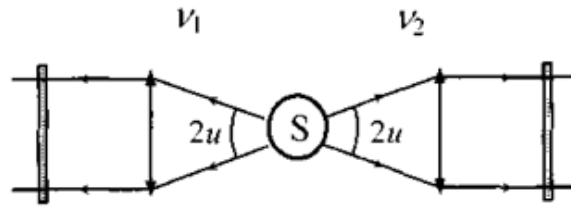


Рис 10.7 - Реалистическая конфигурация с фиксированным углом. каскада $J = 0 \wedge J = 1 \wedge J = 0$. [4]

Флуоресцентное излучение собиралось двумя широкоапертурными асферическими линзами ($u = 32^\circ$, как указано на рис.10.7), за которыми в каждом плече были установлены интерференционный фильтр (соответственно на 551.3 нм и 422.7 нм), направляющая оптическая система, поляризатор и трубка фотоумножителя. Фотоумножители подключались к электронным счетчикам совпадений, которые содержали преобразователь длительности в амплитуду и многоканальный анализатор, подсчитывающий спектр временной задержки при двухфотонном детектировании (рис. 10.9). Этот спектр в начале содержит плоский участок, обусловленный случайными совпадениями (между фотонами, излученными разными атомами). Истинные совпадения (между фотонами, излученными одним и тем же атомом) отображаются в виде пика при нулевой задержке, спадающего по экспоненте с постоянного времени $\tau = 5$ нс (время жизни промежуточного состояния каскада). Таким образом, измеренный сигнал совпадения соответствует длительности пика.

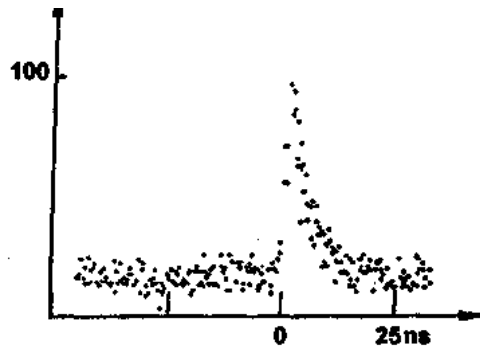


Рис.10.8 – Спектр временной задержки. Число зарегистрированных пар как функция задержки между моментами регистрации двух фотонов. Плоский участок отвечает случайным совпадениям между некоррелированными фотонами, излученными разными атомами, и пропорционален квадрату (N_2) интенсивности каскада. Пик, пропорциональный N , отвечает коррелированным фотонам и дает измеренную интенсивность совпадений. [4]

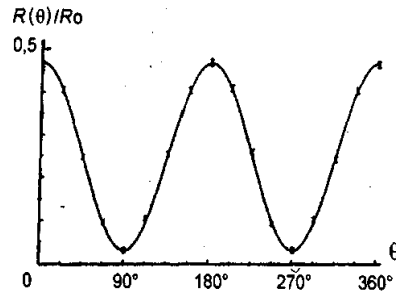


Рис. 10.9 Эксперимент с одноканальными поляризаторами. По горизонтали отложен угол между осями анализаторов, по вертикали отложено число совпадений, кривая проведенная через точки соответствует предсказанию квантовой теории. [4].

Нормализованная интенсивность совпадений как функция относительной ориентации поляризаторов. Указана погрешность величиной ± 1 стандартное отклонение. Сплошная кривая - не результат сглаживания экспериментальных данных, а предсказание квантовой механики для данного эксперимента, нарушение Неравенства Белла на 9 стандартных отклонений.

Эксперименты с двухканальными анализаторами

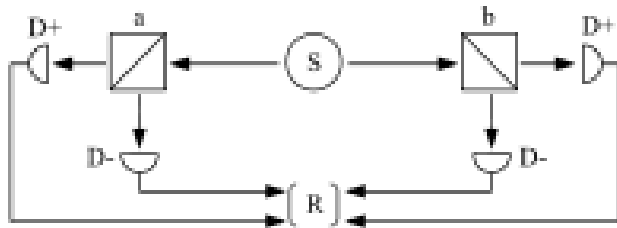


Рис. 10.10. Схема эксперимента с двух канальными анализаторами [4].

В классическом эксперименте Аспэ (см. рис. 10.10) два потока фотонов с нулевым суммарным спином, вылетающие из источника S, направлялись на призмы Николя a и b. В них за счёт двойного лучепреломления происходило разделение поляризаций каждого из фотонов на элементарные, после чего пучки направлялись на детекторы D+ и D-. Сигналы от детекторов через фотоумножители поступали в регистрирующее устройство R, где вычислялось неравенство Белла.

При использовании двухканальных поляризаторов эксперимент, гораздо лучше соответствует идеальной схеме рис. 10.2. Поляризаторы представляли собой поляризующие кубы с диэлектрическими слоями, пропускающими одну поляризацию и отражающие ортогональную к ней (подобный эксперимент с двухканальными поляризаторами из кальцита рассматривался в университете Catania). Такой поляризующий расщепитель и два соответствующих фотоумножителя были укреплены на вращающейся монтажной подставке. Данное устройство (поляриметр) дает + и - результаты при измерении линейной поляризации. Это - оптический аналог фильтра Штерна - Герлаха для частиц со спином 1/2.

Для поляриметров I и II с ориентациями a и b и счетверенной системой подсчета совпадений можно измерять в одном сеансе четыре интенсивности совпадений $N_{\pm\pm}(a,b)$ и непосредственно определять коэффициент

поляризационной корреляции $E(a,b)$, подставляя эти числа в уравнение (10.33). Далее было достаточно повторить то же самое измерение при подходящей (sensitive) настройке в четырех направлениях, чтобы непосредственно проверить идеальные неравенства Белла (10.26). Однако эффективность детектирования в каждом канале заметно ниже единицы, во-первых, из-за ограниченной величины угла собирания и, во-вторых, из-за собственной эффективности фотоумножителей.

Чтобы иметь возможность логически сравнивать наши измерения по проверке неравенств Белла предполагалось, что ансамбль фактически регистрируемых пар не зависит от ориентаций поляриметров.

Экспериментально было проверено, что сумма четырех интенсивностей совпадений $N_{\pm\pm}(a,b)$ остается постоянной при изменении ориентаций, хотя каждая из интенсивностей варьируется на 100%. Это показывает, что объем выборки пар не изменяется. Эксперимент был выполнен при подходящей (sensitive) настройке в четырех направлениях в соответствии с рис. 9.4а, т.е. для максимально конфликтного предсказания.

Было получено значение

$$S_{\text{exp}} = 2,697 \pm 0,015 \quad (10.34)$$

нарушающее неравенство (10.26) ($|S| \leq 2$) более чем на 40 стандартных отклонений. Заметим, что этот результат находится в точном соответствии с предсказаниями квантовой механики для эффективности наших поляризаторов и апертуры линз:

$$S_{QM} = 2,7 \pm 0,05 \quad (10.35)$$

Погрешность, указанная для S_{QM} , учитывает незначительную асимметрию между двумя каналами поляризатора ($\pm 1\%$). Влияние этой асимметрии было найдено расчетным путем и не может привести к изменению S_{QM} более чем на 2 %. Было выполнено измерения поляризационного коэффициента корреляции $E(a,b)$ в разных направлениях, чтобы непосредственно сравнить его с предсказаниями квантовой механики (рис. 10.14). Как видим, согласие полное.

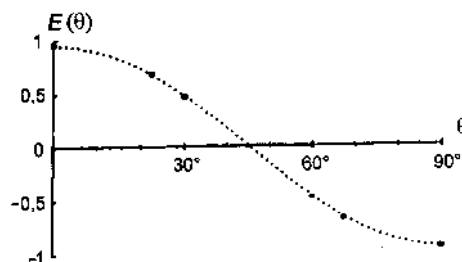


Рис.10.11. – Эксперимент с двухканальными поляризаторами. Зависимость коэффициента корреляции поляризаций от угла поворота между осями поляризаторов. Пунктирная кривая предсказания квантовой теории.[4]

На рис.10.11. представлена поляризационная корреляция как функция относительного угла поляриметров. Указана величина погрешности $+2$ стандартных отклонения. Пунктирная кривая – не результат сглаживания экспериментальных данных, а предсказание квантовой механики для данного

эксперимента. В идеальном эксперименте кривая должна точно проходить через значения ± 1 . Эти измерения могут быть представлены в разной форме, подчеркивая релевантность проверки неравенств Белла.

На рис.10.12 показано поведение измеренной величины $S(\theta)$ в соответствии с ее определением в разделе 4.2. Нарушение неравенств Белла очевидно вблизи 22.5° (что соответствует результату (37)) и 67.5° , но можно также видеть, как уже подчеркивалось, что имеется широкий диапазон ситуаций, где нет конфликта с неравенствами Белла.

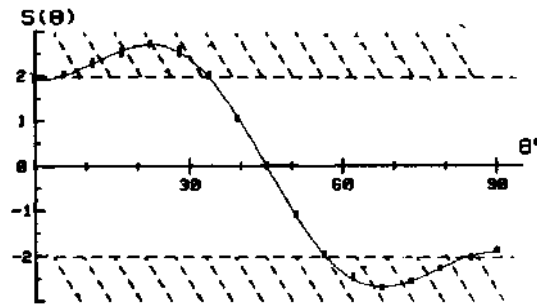


Рис. 10.12 – Эксперимент с двухканальными поляризаторами. Величина $S(\theta)$, предназначенная для проверки неравенств Белла ($-2 < S < +2$), как функция относительного угла поляриметров. Указана величина погрешности $+2$ стандартных отклонения. Пунктирная кривая – не результат сглаживания экспериментальных данных, а предсказание квантовой механики для данного эксперимента. В идеальном эксперименте кривая должна точно проходить через значения ± 2.828 . [4].

Заключение

Можно заключить, что квантовая механика содержит в себе некоторую нелокальность, и что этот нелокальный характер подтвержден экспериментами. Отметим, что эта нелокальность имеет очень тонкую природу и, в частности, не может быть использована для сверхсветовой телеграфии. В схеме, где делается попытка использовать ЭПР-корреляции для передачи сообщения, необходимо послать дополнительную информацию (относительно ориентации поляризатора) по обычному каналу, в котором причинность, разумеется, не нарушается. Это – аналог схем телепортации, где квантовое состояние может быть телепортировано посредством нелокального процесса, но при этом также необходима передача классической информации по классическому каналу. квантовая нелокальность не позволяет послать обычную информацию,

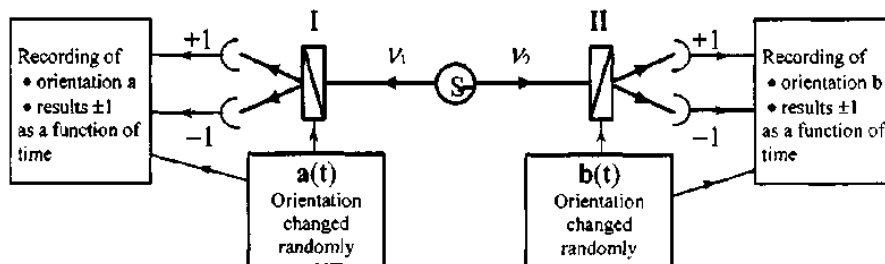


Рис.10.13. Идеальный динамический эксперимент. Каждый поляризатор случайным образом меняет ориентацию во время пролета фотонов между источником и поляризаторами. С каждой стороны производится как регистрация направления поляризации, так и результаты измерения поляризации как функции времени. После завершения сеанса измерений оба набора данных с обеих сторон объединяются, чтобы можно было определить величину корреляции как функции относительной ориентации в момент измерения. [4]

Рассмотрим идеальный третий эксперимент Аспе, выполненный по схеме рис. 10.13. Здесь с каждой стороны как в эксперименте по схеме рис. 10.2 с регулируемые поляризаторами, имеется система мониторинга, которая регистрирует детектируемые события каналах + или – вместе с точной сопутствующей информацией. Предполагается, что ориентация каждого поляризатора изменяется в случайные моменты времени, и это также отслеживается системой мониторинга с соответствующей стороны. Эксперимент будет полностью завершен только тогда, когда два набора данных, собранных по отдельности на каждой стороне, окажутся объединены, чтобы можно было определить корреляцию. Тогда, рассматривая ранее собранные данные, отвечающие парным событиям, разделенным в момент их реализации пространственно-подобным интервалом, можно на самом деле выявить, изменялась ли корреляция в тот истинный момент времени, когда менялась относительная ориентация поляризаторов.

Итак, в ЭПР-корреляциях проявляется нелокальное поведение. *Запутывание (entanglement)* безусловно является свойством, выходящим за рамки любого пространственно-временного описания по Эйнштейну: пара запутанных фотонов должна рассматриваться как единый глобальный объект, который нельзя рассматривать в виде составленного из разделенных в пространстве и времени отдельных объектов с хорошо определенными свойствами.

Вывод: 1. Локальные теории с дополнительными параметрами приводят к неравенствам Белла. Условие локальности в более сложных версиях мысленного ЭПР-эксперимента («динамического эксперимента») может рассматриваться как *следствие причинности по Эйнштейну*, предусматривающей сверхсветовые взаимодействия.

2. Некоторые предсказания квантовой механики нарушают неравенства Белла и, следовательно, что квантовая механика несовместима с локальными теориями с дополнительными параметрами. Здесь мы заканчиваем изложение статьи Аспе[4].

Результаты, полученные как в опытах Фридмана–Клаузера, так и в опытах Аспэ, четко говорили в пользу отсутствия эйнштейновского локального реализма. «Жуткое дальное действие» из мысленного эксперимента окончательно стало физической реальностью. Последний удар по локальности был нанесён в 1989 году многосвязными состояниями Гринбергера — Хорна — Цайлингера заложившими базис квантовой телепортации.

В эксперименте Цайлингера и др. изучались запутанные состояния трех частиц. установлено что эти три частицы образуют единый объект, находящийся в сразу в нескольких местах. Его параметры относятся к разным частям системы, которые могут находиться на сколь угодно больших расстояниях друг от друга.

Между ними нет реального физического взаимодействия, но есть мгновенная корреляция результатов измерений. В множестве перепутанных состояний простые понятия причинности и локальности больше не применимы.

Другие работы

Явление квантовой запутанности существует и для других частиц и их состояний. В 2010 году международный коллектив учёных из Франции, Германии и Испании получил и исследовал запутанные квантовые состояния электронов, то есть частиц с массой, в твёрдом сверхпроводнике из углеродных нанотрубок. В 2011 году исследователям из Института квантовой оптики общества Макса Планка удалось создать состояние квантовой запутанности между отдельным атомом рубидия и конденсатом Бозе-Эйнштейна, разнесёнными на расстояние 30 метров.

Литература

- 1.Ф.Кайе, Р.Лафлам, М.Моска Введение в квантовые вычисления.М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и Хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2009.-360 с.
- 2.Р.Перри Элементарное введение в квантовые вычисления. Учебное пособие .- Долгопрудный, Интеллект, -2015-208 с
- 3.Ghosh R. and Mendel L. Observation of nonclassical effect in the interference of twophons/ Phys/ Rev/Lett.vol,59.p1903-1905,1987.
- 4.A. Aspect Bells theorem: The Naive views of an Experimentalist // "Quantum [Un]speakables - From Bell to Quantum information", изд. R. A. Bertlmann и A. Zeilinger, Springer (2002). alain.aspect@iota.u-psud.fr
- 5.Гринштейн Дж.Зайонц Квантовый вызов.Современные исследования оснований квантовой механики.2- изд.Долгопрудный; Интеллект 2912.-432 с.
- 6.Баргатин И. В., Гришанин Б. А., Задков В. Н. Запутанные квантовые состояния атомных систем // Успехи физических наук : журнал. — М., 2001. — Т. 171. — № 6.
- 7.Квантовая криптография. Идеи и практика / Под ред. С. Я. Килина, Д. Б. Хорошко, А. П. Низовцева. — Минск: Белорусская наука, 2007.

Глава 11 КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ И ОПЕРАЦИИ

Идея о квантовых вычислениях была высказана Ю.И.Маниным в 1980 г.[1] Одна из первых моделей квантового компьютера была предложена Ричардом Фейнманом в 1981 году [2]. Вскоре П. Бениоф описал теоретические основы построения такого компьютера.

Необходимость в квантовом компьютере возникает тогда, когда мы пытаемся исследовать методами физики сложные многочастичные системы, подобные химическим и биологическим. Пространство квантовых состояний таких систем

растет как экспонента от числа n составляющих их реальных частиц, что делает невозможным моделирование их поведения на классических компьютерах уже для $n=10$. Поэтому Манин и Фейнман высказали идею построения квантового компьютера.

Квантовый компьютер — вычислительное устройство, работающее на основе квантовой механики. Квантовый компьютер принципиально отличается от классических компьютеров, работающих на основе классической механики. Полноценный квантовый компьютер является пока гипотетическим устройством, сама возможность построения которого связана с серьёзным развитием квантовой теории в области многих частиц и сложных экспериментов; эта работа лежит на переднем крае современной физики.

Элементы квантовых компьютеров могут применяться для повышения эффективности вычислений на уже существующей приборной базе. Первый разработанный высокоуровневый язык для такого вида компьютеров: Quipper.

Квантовый компьютер использует для вычисления не обычные (классические) алгоритмы, а процессы квантовой природы, так называемые квантовые алгоритмы, использующие квантовомеханические эффекты, такие как квантовый параллелизм и квантовая запутанность.

Если классический процессор в каждый момент может находиться ровно в одном из состояний обозначаемых кет-векторами: $|0\rangle, |1\rangle, \dots, |N-1\rangle$, то квантовый процессор в каждый момент находится одновременно во всех этих базисных состояниях, при этом в каждом состоянии $|j\rangle$ — со своей комплексной амплитудой λ_j . Это квантовое состояние называется квантовой суперпозицией данных классических состояний и обозначается как

$$|\Psi\rangle = \sum_{j=0}^{N-1} \lambda_j |j\rangle \quad (11.1)$$

Условие нормировки

$$\lambda_0^2 + \lambda_1^2 + \dots + \lambda_{N-1}^2 = 1 \quad (11.2)$$

Базисные состояния могут иметь и более сложный вид.

Квантовое состояние $|\Psi\rangle$ может изменяться во времени двумя принципиально различными путями:

1. Процессом измерения.

2. Унитарная квантовая операция (квантовый вентиль, quantum gate), в дальнейшем просто операция.

11.1. Измерение (наблюдение)

Если классические состояния $|j\rangle$ есть пространственные положения группы электронов в квантовых точках, управляемых внешним полем V , то унитарная операция есть решение уравнения Шредингера для этого потенциала.

Измерение есть случайная величина, принимающая значения $|j\rangle$ $j = 0, 1, \dots, N-1$ с вероятностями $|\lambda_j|^2$ соответственно. В этом состоит квантовомеханическое правило Борна. Измерение есть единственная возможность получения информации о квантовом состоянии, так как значения λ_j нам непосредственно не

доступны. Измерение квантового состояния принципиально не может быть сведено к унитарной шрёдингеровской эволюции, так как, в отличие от последней, оно необратимо. При измерении происходит так называемый коллапс волновой функции $|\Psi\rangle$, физическая природа которого до конца не ясна. Спонтанные измерения состояния в ходе вычисления ведут к декогерентности, то есть отклонению от унитарной эволюции, что является главным препятствием при построении квантового компьютера.

Квантовое вычисление есть контролируемая классическим управляющим компьютером последовательность унитарных операций простого вида (над одним, двумя или тремя кубитами). В конце вычисления состояние квантового процессора измеряется, что и дает искомым результат вычисления.

Квантовый параллелизм — принцип, лежащий в основе работы квантовых компьютеров и позволяющий им потенциально превзойти в производительности классические компьютеры. В основе квантового параллелизма лежит использование при вычислениях суперпозиций базовых состояний, что позволяет одновременно производить большое количество вычислений с различными исходными данными. Например, 64-разрядный квантовый регистр может хранить до 2^{64} значений одновременно, а квантовый компьютер может все эти значения одновременно обрабатывать. Тем не менее, извлечение результатов таких вычислений затруднено, что ограничивает область применения квантовых компьютеров.

Содержание понятия «квантовый параллелизм» в вычислении может быть раскрыто так: «Данные в процессе вычислений представляют собой квантовую информацию, которая по окончании процесса преобразуется в классическую информацию путём измерения конечного состояния квантового регистра. Выигрыш в квантовых алгоритмах достигается за счёт того, что при применении одной квантовой операции большое число коэффициентов суперпозиции квантовых состояний, которые в виртуальной форме содержат классическую информацию, преобразуется одновременно».

11.1.1. Кубиты [3,4]

Кубит (q-бит, quantum bit, квантовый бит;) — квантовый разряд или наименьший элемент для хранения информации в квантовом компьютере.

Система обладающая двумя различающимися состояниями называется двоичной цифрой или *битом*. Бит всегда имеет только одно из двух возможных значений: 0 или 1.

Один классический бит может находиться в одном и только в одном из состояний $|0\rangle$ или, $|1\rangle$. Квантовый бит, называемый кубитом, находится в состоянии

$$|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle = a \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + b \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}, \quad (11.3)$$

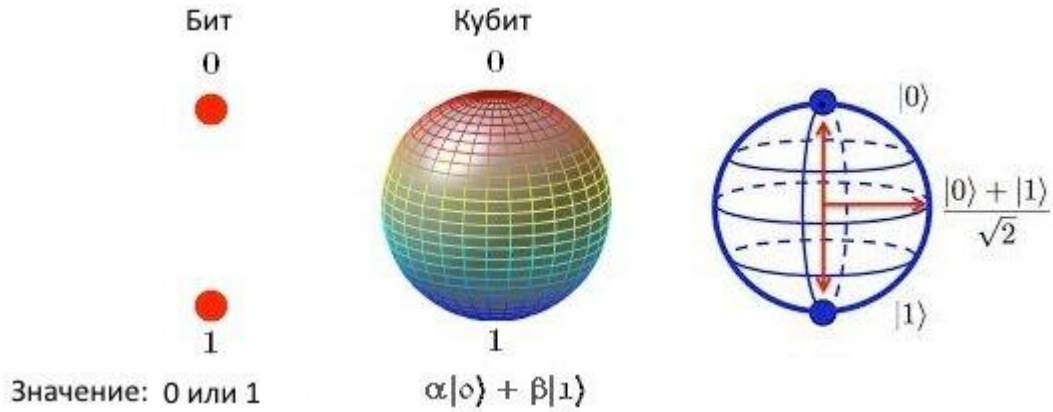


Рис.11.1 слева.графическое изображение бита, в центре --кубит ввиде сферы Блоха,справа -- Множество векторов состояний кубита образует двумерное (2×2) комплексное векторное пространство Гильберта $\mathbb{C}^2$.

Проекции кет-вектора $|\psi\rangle$ на базисные орты равны амплитудам (коэффициентам) a и b

$$\langle 0|\psi\rangle = \langle 0|0\rangle a + \langle 0|1\rangle b = a, \quad \langle 1|\psi\rangle = \langle 1|0\rangle a + \langle 1|1\rangle b = b, \quad (11.4)$$

где компоненты базисных двумерных **кет**-векторов:

$$|0\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad |1\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (11.5)$$

компоненты **бра**-векторов:

$$\langle 0| = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}^\dagger, \quad \langle 1| = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}^\dagger, \quad (11.6)$$

$$\langle 0|0\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}^\dagger \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = 1, \quad \langle 1|1\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}^\dagger \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = 1, \quad \langle 0|1\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}^\dagger \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = 0, \quad \langle 1|0\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}^\dagger \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = 0. \quad (11.7)$$

Знак эрмитового сопряжения матрицы означает комплексное сопряжение и транспонирование матричных элементов $[\psi_{mn}]^\dagger = [\psi_{nm}]^*$.

Амплитуды $a = |a|e^{+i\varphi_a}$, $b = |b|e^{+i\varphi_b}$ комплексные числа $a, b \in \mathbb{C}$, поэтому

$$\langle \psi|\psi\rangle = (a^* \langle 0| + b^* \langle 1|) (a|0\rangle + b|1\rangle) = a^* a \langle 0|0\rangle + b^* b \langle 1|1\rangle + a^* b \langle 0|1\rangle + b^* a \langle 1|0\rangle = |a|^2 + |b|^2 \quad (11.8)$$

Условие нормировки:

$$\langle \psi|\psi\rangle = |a|^2 + |b|^2 = 1. \quad (11.9)$$

так что $|a|^2$ и $|b|^2$ — вероятности получить 0 или 1 соответственно при измерении этого состояния.

Все состояния однокубитовых систем описываемые вектором состояния $|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$ называются *чистыми состояниями*. Состояния, которые не описываются векторами $|\psi\rangle$, а описываются *статистическими операторами* $\hat{\rho}$ (*матрицами плотности*) называются смешанными состояниями.

Сразу после измерения кубит переходит в базовое квантовое состояние, соответствующее классическому результату.

Кубиты могут быть связаны друг с другом, то есть на них может быть наложена ненаблюдаемая связь, выражающаяся в том, что при всяком изменении над одним из нескольких кубитов остальные меняются согласованно с ним. Иными словами, совокупность запутанных между собой кубитов может интерпретироваться как заполненный *квантовый регистр*. Как и отдельный кубит, квантовый регистр гораздо информативнее классического регистра битов. Он может не только находиться во всевозможных комбинациях составляющих его битов, но и реализовывать всевозможные тонкие зависимости между ними.

Кубиты в квантовом регистре могут обмениваться своим состоянием и могут его преобразовывать. Тогда есть возможность создать компьютер, способный к параллельным вычислениям на уровне своего физического устройства, и проблемой остаётся лишь прочитать конечный результат вычислений.

Обобщением понятия кубит является *кунит* (*Q-энк, qudit*), способный хранить в одном разряде более двух значений (например, *кутрит* — 3, *куквадрт* — 4, ..., *куэнк* — n)[2].

Идея квантовых вычислений состоит в том, что квантовая система из L двухуровневых квантовых элементов (кубитов) имеет $2L$ линейно независимых состояний, а значит, вследствие принципа квантовой суперпозиции, пространство состояний такого квантового регистра является $2L$ -мерным гильбертовым пространством. Операция в квантовых вычислениях соответствует повороту вектора состояния регистра в этом пространстве. Таким образом, квантовое вычислительное устройство размером L кубит фактически задействует одновременно $2L$ классических состояний.

Квантовый регистр из двух кубитов хранит 4 числа в суперпозиции: 00, 01, 10, 11.

$$\begin{bmatrix} 00 & 01 \\ 10 & 11 \end{bmatrix} \quad (11.10)$$

Квантовый регистр из 3 кубитов может одновременно хранить 8 чисел в суперпозиции, 000, 100, 010, 001, 110, 101, 011, 111.

$$\begin{bmatrix} 000 & 011 & 010 \\ 100 & & 001 \\ 101 & 110 & 111 \end{bmatrix} \quad (11.11)$$

Упражнение: постройте квантовый регистр из 4-х кубитов *куквадрт*.

Физическими системами, реализующими кубиты, могут быть любые объекты, имеющие два квантовых состояния:

- 1) поляризационные состояния фотонов,
- 2) электронные состояния изолированных атомов или ионов,
- 3) спиновые состояния ядер атомов, и т. д.

Приведем примеры из квантовой механики:

Пример1. Система из одного кубита.

Фотон находится в состоянии $|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$ суперпозиции двух поляризаций. Это состояние есть вектор в двумерной плоскости, систему координат в которой можно представлять как две перпендикулярные оси, так что a и b есть проекции кет-вектора $|\psi\rangle$ на эти оси; Измерение раз и навсегда коллапсирует состояние фотона в одно из состояний $|0\rangle$ или $|1\rangle$, причем вероятность коллапса равна квадрату соответствующей проекции $|a|^2$ или $|b|^2$. Полная вероятность получается по теореме Пифагора. $a^2 + b^2 = 1$.

Пример 2: Имеется кубит в квантовом состоянии $|\psi\rangle = \frac{4}{5}|0\rangle - \frac{3}{5}|1\rangle$.

Вероятность получить при измерении **0** составляет $\left|\frac{4}{5}\right|^2 = 64\%$; при измерении **1** составляет $\left|-\frac{3}{5}\right|^2 = 36\%$. В результате измерения кубит переходит в новое квантовое состояние $|\phi\rangle = |0\rangle$, то есть, при следующем измерении этого кубита мы получим **0** со стопроцентной вероятностью (предполагается, что по умолчанию унитарная операция тождественна; в реальных системах это не всегда так).

Пример 2. Система из двух кубитов.

Измерение каждого из них может дать 0 или 1. Поэтому у системы есть 4 классических состояния: 00, 01, 10 и 11. Аналогичные им базовые квантовые состояния: $|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle$. И наконец, общее квантовое состояние системы имеет вид

$$|\Psi\rangle = a|00\rangle + b|01\rangle + c|10\rangle + d|11\rangle \quad (11.12)$$

Теперь $|a|^2$ — вероятность измерить $|00\rangle$ и $|b|^2$ — вероятность измерить $|01\rangle$ и $|c|^2$ — вероятность измерить состояние $|10\rangle$, $|d|^2$ — вероятность измерить $|11\rangle$. Отметим, что полная вероятность $a^2 + b^2 + c^2 + d^2 = 1$.

1. Если мы измерим только первый кубит квантовой системы, находящейся в состоянии $|\Psi\rangle$, у нас получится:

С вероятностью $p_0 = |a|^2 + |b|^2$ первый кубит перейдет в состояние $|0\rangle$,

а второй кубит в состояние: $\frac{1}{\sqrt{|a|^2 + |b|^2}}(a|0\rangle + b|1\rangle)$.

В первом случае измерение даст состояние: $|\Psi_0\rangle = |0\rangle \otimes \frac{1}{\sqrt{|a|^2 + |b|^2}}(a|0\rangle + b|1\rangle)$.

2. Если теперь снова измерить первый кубит, с вероятностью $p_1 = |c|^2 + |d|^2$ первый кубит перейдет в состояние $|1\rangle$,

а второй кубит в состояние: $\frac{1}{\sqrt{|c|^2 + |d|^2}}(c|0\rangle + d|1\rangle)$.

Второе измерение даст состояние: $|\Psi_1\rangle = |1\rangle \otimes \frac{1}{\sqrt{|c|^2 + |d|^2}}(c|0\rangle + d|1\rangle)$.

Результат такого измерения невозможно записать как вектор в гильбертовом пространстве состояний. Такое состояние, в котором участвует наше незнание о том, какой же результат получится на первом кубите, называют *смешанным состоянием*. В этом случае такое смешанное состояние называют проекцией исходного состояния $|\Psi\rangle$ на второй кубит, и записывают в виде *матрицы плотности* вида $\rho_2 = p_0\rho_{\Psi_0} + p_1\rho_{\Psi_1}$

где матрица плотности состояния $|\psi\rangle$ определяется как $\rho = |\psi\rangle\langle\psi|$.

В общем случае системы из L кубитов, у неё $2L$ классических состояний (00000...(L-нулей), ...00001(L-цифр), ... , 11111...(L-единиц)), каждое из которых может быть измерено с вероятностями 0—100 %.

Таким образом, одна операция над группой кубитов затрагивает все значения, которые она может принимать, в отличие от классического бита. Это и обеспечивает беспрецедентный параллелизм квантовых вычислений.

Томография квантового состояния

Томография квантового состояния- процедура определения матрицы плотности ρ неизвестного состояния системы. Томография квантового состояния состоит в определении всех элементов матрицы ρ_{ik} , или если система находится в чистом состоянии $|\psi\rangle = \sum_x c_x |x\rangle$ в базисе $|x\rangle$ все амплитуды $c_x = |c_x| \exp(i\varphi)$ включая их фазы.

Томография квантового состояния является развитием идеи измерения состояния системы в некотором базисе.

Пример. Матрицу плотности ρ одного кубита можно разложить по стандартному набору матриц преобразования кубита (I, X, Y, Z):

$$\rho \equiv Sp(I\rho)I + Sp(X\rho)X + Sp(Y\rho)Y + Sp(Z\rho)Z \quad (11.13)$$

где средние значения наблюдаемых X, Y, Z определяются по формулам

$$\langle X \rangle = Sp(X\rho) \equiv \lim_{m \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_i \right), \dots \quad (11.14)$$

Найденные из измерений приближенные значения элементов матрицы кубита следующие

$$\rho_{ik} = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} \\ \rho_{21} & \rho_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \langle Z \rangle & \langle X \rangle - i \langle Y \rangle \\ \langle X \rangle + i \langle Y \rangle & 1 - \langle Z \rangle \end{bmatrix}. \quad (11.15)$$

Тензорные произведения

Разложение системы из многих кубитов по отдельным кубитам можно представить в виде тензорного произведения

$$\frac{1}{2}(|00\rangle + |01\rangle + |10\rangle + |11\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \otimes (|1\rangle + |0\rangle)$$

Томография квантового состояния n кубитов квантового компьютера

$$\rho = \frac{1}{2^n} \sum Sp(A_1 \otimes A_2 \otimes \dots \otimes A_n \otimes \rho) (A_1 \otimes A_2 \otimes \dots \otimes A_n) \quad (11.16)$$

где $A = (I, X, Y, Z)$

11.2. Вычисление на квантовом компьютере

Упрощённая схема вычисления на квантовом компьютере выглядит так:

1. Берется система кубитов, на которой записывается начальное состояние.
2. Затем состояние системы или её подсистем изменяется посредством унитарных преобразований, выполняющих те или иные логические операции.
3. В конце измеряется значение, и это результат работы компьютера.

Квантовая схема состоит из входного квантового состояния нескольких кубитов, и квантовой цепи.

Квантовые цепи обратимые, не имеют циклов, читаются слева направо и состоят из следующих компонент:

квантовые логические элементы, вентили, (унитарные операторы) выполняют логические операции над входными сигналами. Действие логического элемента описывается его таблицей истинности.

Квантовый регистр – набор ячеек, содержащих значения 0 или 1 те набор кубитов. *Абстрактные провода* – передают сигналы между логическими элементами и регистрами.

Роль проводов квантового компьютера играют кубиты, а роль логических блоков квантового компьютера играют унитарные преобразования. Такая концепция квантового процессора и квантовых логических вентилях была предложена в 1989 году Дэвидом Дойчем. Он в 1995 году нашёл универсальный логический блок, с помощью которого можно выполнять любые квантовые вычисления.

Квантовый венти́ль (квантовый логический элемент, *гейт*) — это базовый элемент квантового компьютера, преобразующий входные состояния кубитов на выходные по определённому закону. Отличается от обычных логических вентилях тем, что работает с кубитами, а, следовательно, подчиняется квантовой логике. Квантовые вентили, в отличие от многих классических, всегда являются обратимыми.

Так как кубит можно представить вектором в двумерном пространстве, то действие вентиля можно описать унитарной матрицей, на которую умножается соответствующий вектор состояния входного кубита. Однокубитные вентили описываются матрицами размера 2×2 , двухкубитные — 4×4 , а n -кубитные — $2^n \times 2^n$.

Примеры квантовых вентилях [3,4]

Здесь мы рассмотрим одно- двух- и трехкубитные вентили.

11.2.1. Однокубитные вентили

В пространстве Гильберта преобразования вектора состояния кубита $|\psi\rangle = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$ в вектор состояния $|\psi'\rangle = \begin{bmatrix} a' \\ b' \end{bmatrix}$ осуществляется унитарным оператором вращения

$$U(2 \times 2) = \begin{bmatrix} pe^{+i\theta_1} & -qe^{+i\theta_2} \\ qe^{-i\theta_2} & pe^{-i\theta_1} \end{bmatrix}, \quad (11.17)$$

где $p^2 + q^2 = 1$.

Кубит одновременно определен в комплексном абстрактном двумерном векторном гильбертовом пространстве $\mathbb{C}^2$ и в трехмерном пространстве Эвклида.

Вычислительные операции совершаются в гильбертовом пространстве как

$$|\psi'\rangle = U(2 \times 2)|\psi\rangle \begin{bmatrix} a' \\ b' \end{bmatrix}$$

преобразования вектора состояния кубита. Одновременно физические процессы в квантовой системе описываются в трехмерном эвклидовом пространстве.

Теорема. Матрица U произвольного унитарного преобразования в гильбертовом пространстве может быть представлена как произведение трех

матриц описывающих вращение вектора состояния $U = e^{i\alpha} R_x(\theta) R_y(\theta) R_z(\theta)$.

Унитарный оператор действующий на двумерную квантовую систему (кубит) называется однокубитовым квантовым элементом.

Простейшие однокубитовые вентили:

Вентиль Паули I Тождественное преобразование:

$$\sigma_0 = I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11.18)$$

$$I|0\rangle = |0\rangle, \quad I|1\rangle = |1\rangle, \quad I(a|0\rangle + b|1\rangle) = a|0\rangle + b|1\rangle.$$

Вентиль Паули X (квантовый аналог логического элемента X):

$$\sigma_1 = \sigma_x = X = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (11.19)$$

$$X|0\rangle = |1\rangle, \quad X|1\rangle = |0\rangle, \quad X(a|0\rangle + b|1\rangle) = b|0\rangle + a|1\rangle.$$

Вентиль Паули Y:

$$\sigma_2 = \sigma_y = Y = \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}, \quad (11.20)$$

$$Y|0\rangle = i|1\rangle, \quad Y|1\rangle = -i|0\rangle, \quad Y(a|0\rangle + b|1\rangle) = -ib|0\rangle + ia|1\rangle.$$

Вентиль Паули Z (знак состояния кубита):

$$\sigma_3 = \sigma_z = Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad (11.21)$$

$$Z|0\rangle = |0\rangle, \quad Z|1\rangle = -|1\rangle, \quad Z(a|0\rangle + b|1\rangle) = a|0\rangle - b|1\rangle.$$

Фазовый вентиль (матрица преобразования вектора состояния кубита):

$$U(\varphi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(i\varphi) \end{bmatrix}.$$

При
$$U\left(\frac{\pi}{2}\right) \equiv S = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix}, \quad (11.22)$$

$$S|0\rangle = |0\rangle, \quad S|1\rangle = i|1\rangle, \quad S(a|0\rangle + b|1\rangle) = a|0\rangle + ib|1\rangle.$$

Преобразование Адамара H: (корень квадратный из вентиля NOT)

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} (X + Z). \quad (11.23)$$

Он превращает $|0\rangle$ или $|1\rangle$ в суперпозицию

$$H|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle), \quad H|1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle), \quad (11.24)$$

$$H(a|0\rangle + b|1\rangle) = \frac{a+b}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{a-b}{\sqrt{2}}|1\rangle. \quad (11.25)$$

Элемент Адамара равен своему обратному элементу $H = H^{-1}$ откуда следует

$$H\left[\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)\right] = |0\rangle, \quad H\left[\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)\right] = |1\rangle. \quad (11.26)$$

11.2.2. Трехмерная визуализация кубита -- сферы Блоха

Каждое однокубитовое чистое состояние можно представить в виде точки на поверхности сферы Блоха, или единичного вектора с фиксированным началом в центре блоховской сферы. Однокубитовый элемент описывает поворот вектора состояния кубита от оси z к полярной оси, заданной полярным и азимутальным углами θ, φ

$$U(\theta, \varphi) = \begin{bmatrix} \cos \frac{\theta}{2} & -ie^{-i\varphi} \sin \frac{\theta}{2} \\ -ie^{i\varphi} \sin \frac{\theta}{2} & \cos \frac{\theta}{2} \end{bmatrix}. \quad (11.27)$$

Действие однокубитового квантового элемента рассматривается как поворот блоховского вектора из состояния $|\psi\rangle$ до состояния $U|\psi\rangle$., Логические элементы поворотные относительно осей x,y,z сферы Блоха, выражаются через вентили Паули

$$R_x(\theta) \equiv \exp\left(-i\frac{\theta}{2}X\right) = I \cos \frac{\theta}{2} - iX \sin \frac{\theta}{2} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\theta}{2} & -i \sin \frac{\theta}{2} \\ \sin \frac{\theta}{2} & \cos \frac{\theta}{2} \end{bmatrix}, \quad (11.28)$$

$$R_y(\theta) \equiv \exp\left(-i\frac{\theta}{2}Y\right) = I \cos \frac{\theta}{2} - iY \sin \frac{\theta}{2} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\theta}{2} & -\sin \frac{\theta}{2} \\ \sin \frac{\theta}{2} & \cos \frac{\theta}{2} \end{bmatrix}, \quad (11.29)$$

$$R_z(\theta) \equiv \exp\left(-i\frac{\theta}{2}Z\right) = I \cos\frac{\theta}{2} - iZ \sin\frac{\theta}{2} = \begin{bmatrix} \cos\frac{\theta}{2} - i\sin\frac{\theta}{2} & 0 \\ 0 & \cos\frac{\theta}{2} + i\sin\frac{\theta}{2} \end{bmatrix}. \quad (11.30)$$

В общем виде эти операторы вращения можно записать

$$R_\sigma(\theta) = I \cos\frac{\theta}{2} - iP_\sigma \sin\frac{\theta}{2}, \quad (11.31)$$

где означает оператор Паули P_σ с индексом $\sigma = X, Y, Z$.

Однокубитовая операция отрицания NOT $iR_x(\pi) \equiv X$ выполняет поворот вектора состояния кубита вокруг оси X на угол $\pi = 180^\circ$: $X \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b \\ a \end{bmatrix}$.

Оператор $-iR_z(\pi) \equiv Z$ осуществляет изменение знака у второй проекции вектора состояния кубита: $Z \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ -b \end{bmatrix}$.

Оператор $iR_y(\pi) \equiv Y$, осуществляет поворот вектора состояния и изменение фазы у его проекций: $Y \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -ib \\ ia \end{bmatrix}$.

Оператор фазовый вентиль $U\left(\frac{\pi}{2}\right)$ осуществляет изменение фазы нижней проекции вектора состояния кубита: $U\left(\frac{\pi}{2}\right) \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ ib \end{bmatrix}$.

11.2.3. Логические элементы, действующие на два кубита

Истинные квантовые логические элементы (вентили) должны быть обратимыми. Также возможны вентили, имеющие два входа (и два выхода, так как количество входов и выходов у квантовых вентилях должно совпадать в силу требования унитарности):

Контролируемое U ($C-U$). Суть контролируемого U заключается в том, что на первый вход подаётся управляющий кубит, а на второй — управляемый. Если управляющий кубит равен единице, над управляемым проводится операция U , а если нулю — тождественное преобразование (кубит подается на выход без изменений). Если матрица U имеет вид

$$U = \begin{bmatrix} x_{00} & x_{01} \\ x_{10} & x_{11} \end{bmatrix} \quad (11.32)$$

тогда матрица *контролируемого преобразования $C-U$* выглядит так:

$$C(U) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_{00} & x_{01} \\ 0 & 0 & x_{10} & x_{11} \end{bmatrix} \quad (11.33)$$

Контролируемое отрицание (C-NOT). В этом случае $U = \sigma_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ и матрица преобразования имеет вид:

$$CNOT = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (11.34)$$

$$CNOT|00\rangle = |00\rangle, CNOT|01\rangle = |01\rangle, CNOT|10\rangle = |11\rangle, CNOT|11\rangle = |10\rangle, \quad (11.35)$$

$$\begin{aligned} CNOT(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle)|1\rangle &= \alpha|01\rangle + \beta|10\rangle, \\ CNOT|0\rangle(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) &= \alpha|00\rangle + \beta|01\rangle, \\ CNOT|1\rangle(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) &= \alpha|11\rangle + \beta|10\rangle. \end{aligned} \quad (11.36)$$

Контролируемое отрицание (C-NOT, CNOT) — это квантовый вентиль, реализующий операцию сходную с классическим XOR, частный случай класса вентилях C-U (контролируемые операции U). Имеет 2 входа и 2 выхода. Классический логический вентиль имеет 1 выход, но для квантового C-NOT требуется 2 выхода для сохранения обратимости. На дополнительный выход подается не измененный управляющий кубит. Данный вентиль инвертирует второй кубит только, если на первый (управляющий) вход подана 1. см рис.11.2. Также CNOT можно представить в виде *таблицы истинности*:

$$a - \bullet - a'$$

$$b - \oplus - b'$$

a	b	a'	b'
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	1	1
1	1	1	0

Рис.11.2 Графическое представление и таблица истинности для элементарного логического вентиля, контролируемого НЕ. a – бит источника, b – бит цели. Каждая горизонтальная линия представляет собой состояние одного бита, изменяющегося слева направо. Символы на двух линиях, соединенные по середине вертикальной чертой (не показана!) означают, совместное действие двух вентелей на эти биты. Таблица истинности контролируемого НЕ (обратимого XOR), соответствует таблице сложения двух битов, если в ней не учитывать бита переноса.

Первую физическую реализацию CNOT получили в 1995 году. В этой реализации использовался один ион ${}^9\text{Be}^+$, а два кубита были реализованы согласно схеме предложенной Cirac и Zoller на различных его состояниях (сверхтонкое расщепление ${}^2S_{\frac{1}{2}}$ для целевого кубита и 2 состояния гармонического осциллятора для управляющего кубита). Надежность работы элемента составила около 90 %.

11.2.4. Логические элементы, действующие на три кубита

Универсальный трехбитовый вентиль Тоффоли (Toffoli), (CCNOT) используется для построения обратимой булевой логики. Его действие сводится к изменению состояния бита цели c , при условии, что оба неизменяемых бита источников (a, b) имеют значение 1. Может быть реализован на C-NOT и однокубитных вентилях. Похож по алгоритму работы на CNOT, но обращает значение последнего бита только, если два первых входа равны единице. В противном случае все входы подаются на выход неизменными.

Таблица истинности *вентиля Тоффоли* показана на рис.10.2

$$a \text{ --- } \bullet \text{ --- } a'$$

$$b \text{ --- } \bullet \text{ --- } b'$$

$$c \text{ --- } \oplus \text{ --- } c'$$

Таблица истинности *вентиля Тоффоли* показана на рис.11.3

a	b	c	a'	b'	c'
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	1
0	1	0	0	1	0
0	1	1	0	1	1
1	0	0	1	0	0
1	0	1	1	0	1
1	1	0	1	1	1
1	1	1	1	1	0

Рис.11.3 Графическое представление и таблица истинности для трехбитового логического вентиля Тоффоли. a –бит источника, b –бит источника, c -бит цели.

Состояние бита цели c меняется тогда и только тогда, когда оба неизменяемых бита источников (a, b) имеют значение 1. Каждая горизонтальная линия представляет собой состояние одного бита,изменяющегося слева направо. Символы на трех линиях, соединенные вертикальной чертой по центру (не показана!) означают, совместное действие трех вентелей на эти биты.

Вентиль Фредкина (Fredkin gate), (CSWAP) — также универсален. Если в первый вход установлена управляющая линия, происходит переставление значения кубитов со входов 2 и 3. Иначе все три кубита остаются без изменений. Вертикальное соединение трех элементов в центре не показано! См рис.11.4

$$a \text{ --- } \bullet \text{ --- } a'$$

$$b \text{ --- } \bullet \text{ --- } b'$$

$$c \text{ --- } \oplus \text{ --- } c'$$

Таблица истинности вентиля Фредкина:

a	b	c	a'	b'	c'
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	1
0	1	0	0	1	0
0	1	1	0	1	1

1	0	0	1	0	0
1	0	1	1	1	0
1	1	0	1	0	1
1	1	1	1	1	1

Рис.11.4 Графическое представление и таблица истинности для трехбитового логического вентиля Фредкина. a – бит источника, b – бит источника, c – бит цели. Если в первый вход a поставлена управляющая 1, тогда переставляются значения кубитов со входов 2 и 3, см. 6-ю строку и 7-ю строку.

Каждая горизонтальная линия представляет собой состояние одного бита, изменяющегося слева направо. Символы на трех линиях, соединенные вертикальной чертой по центру (не показана!) означают, совместное действие трех вентелей на эти биты.

11.2.5. Универсальные квантовые вентили

Набор квантовых вентилей называют универсальным, если любое унитарное преобразование можно аппроксимировать с любой заданной точностью конечной последовательностью вентилей из этого набора. Иными словами, универсальные квантовые вентили являются генераторами группы унитарных матриц. Можно доказать, что набор, состоящий из вентиля C-NOT и всех однокубитных вентилей, является универсальным.

Однокубитовые операции (континуум вращений вектора состояний) плюс двухкубитовая операция «контролируемое Не» (CNOT) составляют универсальный набор операций, позволяющий осуществить любое преобразование вектора состояния компьютера.

Максимальной простотой обладает универсальный набор дискретных операций, состоящий из однокубитовых операций:

$$\text{преобразования Адамара } H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}, \quad (11.37)$$

$$\text{фазового вентиля } U(\pi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \equiv Z, \quad (11.38)$$

$$\text{фазового вентиля } U\left(\frac{\pi}{4}\right) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{2}}(1+i) \end{pmatrix} \quad (11.39)$$

$$\text{и двухкубитового вентиля } CNOT = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (11.40)$$

При физическом исполнении кроме однокубитовых операций, двухкубитовая операция CNOT включает в себя процесс свободной эволюции двух кубитов под воздействием гамильтониана их взаимодействия. В процессе свободной эволюции один кубит управляет другим кубитом. При этом используется энергия взаимодействия.

Пример квантовой цепи. *Логический элемент Белла*

Логический элемент Белла предназначен для получения белловских запутанных состояний $|\beta_{xx}\rangle$. Вертикальное соединение | двух элементов точки и кружка, после вентиля Адамара не показано! См рис.11.5.

$$\begin{array}{c} |a\rangle - \boxed{H} - \square - \\ |b\rangle - \text{---} \oplus - |\beta_{xx}\rangle \end{array}$$

Рис.11.5. Вентиль Белла.

Базис Белла:

$$\begin{aligned} \beta|00\rangle &\rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) = |\beta_{00}\rangle \\ \beta|01\rangle &\rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + |10\rangle) = |\beta_{01}\rangle \\ \beta|10\rangle &\rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle - |11\rangle) = |\beta_{10}\rangle \\ \beta|11\rangle &\rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle) = |\beta_{11}\rangle \end{aligned} \quad (11.41)$$

Пример: *Реализации операции CNOT на зарядовых состояниях электрона в квантовых точках*

Один кубит можно представить в виде электрона в двухямном потенциале, так что $|0\rangle$ означает нахождение его в левой яме, а $|1\rangle$ — в правой. Это называется кубит на зарядовых состояниях.

Общий вид квантового состояния такого электрона: $|\Psi\rangle \rightarrow \lambda_0|0\rangle + \lambda_1|1\rangle$.

Зависимость его от времени есть зависимость от времени амплитуд λ_0, λ_1 . Она задается уравнением Шредингера вида

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H}\Psi, \quad (11.42)$$

где гамильтониан $\hat{H}$ имеет в силу одинакового вида ям и эрмитовости имеет вид

$$\hat{H} = \begin{pmatrix} a & -a \\ -a & a \end{pmatrix} = a \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \quad (11.43)$$

для некоторой константы a .

Собственные значения гамильтониана определяются из определителя

$$a \begin{vmatrix} \lambda - 1 & -1 \\ -1 & \lambda - 1 \end{vmatrix} = 0$$

$$(\lambda - 1)^2 = 1. \quad \lambda_1 = 2, \lambda_2 = 0; \quad E_1 = 2a, E_2 = 0.$$

Вектор основного состояния

$$|\tilde{0}\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \quad (11.44)$$

есть собственный вектор этого гамильтониана с собственным значением $E_2 = 0$.

Вектор первого возбужденного состояния

$$|\tilde{1}\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle) \quad (11.45)$$

это собственный вектор этого гамильтониана со значением $E_1 = 2a$.

Никаких других собственных состояний (с определенным значением энергии) здесь нет, так как наша задача двумерная.

Поскольку каждое состояние $|\Psi\rangle$ переходит за время t в состояние

$$|\Psi\rangle \rightarrow \lambda_0 \exp(0t)|0\rangle + \lambda_1 \exp(-2at/\hbar)|1\rangle \quad (11.46)$$

То для реализации операции NOT перехода $|0\rangle \rightarrow |1\rangle$ и наоборот $|1\rangle \rightarrow |0\rangle$

достаточно подождать время. $t = \frac{\pi\hbar}{2a}$.

То есть гейт NOT дается просто естественной квантовой эволюцией нашего кубита при условии, что внешний потенциал задает двухямную структуру; это делается с помощью технологии квантовых точек.

Для реализации CNOT надо расположить два кубита (то есть две пары ям) перпендикулярно друг другу, и в каждой из них расположить по отдельному электрону. Тогда константа a для первой (управляемой) пары ям будет зависеть от того, в каком состоянии находится электрон во второй (управляющей) паре ям: если ближе к первой, a будет больше, если дальше — меньше. Поэтому состояние электрона во второй паре определяет время совершения NOT в первой яме, что позволяет снова выбрать нужную длительность времени для производства операции CNOT.

Эта схема очень приближительная и идеализирована; реальные схемы сложнее и их реализация представляет вызов экспериментальной физике.

В квантовом случае система из n кубитов находится в состоянии, являющимся суперпозицией всех базовых состояний, поэтому изменение системы касается всех $2n$ базовых состояний одновременно. Теоретически новая схема может работать намного (в экспоненциальное число раз) быстрее классической.

Ускорение на квантовом компьютере не связано с тактовой частотой процессора. Оно основано на квантовом параллелизме. Один шаг квантового вычисления совершает большую работу, чем один шаг классического. Не следует приравнивать квантовое вычисление к распараллеленному классическому. Например, квантовый компьютер не может решить задачу перебора быстрее, чем за $\sqrt{T_{class}}$, где T_{class} — время работы детерминированного классического алгоритма перебора (см.[3]). Недетерминированный классический алгоритм решает её за время $\log T_{class}$. Недетерминированный классический алгоритм требует экспоненциального ресурса памяти, то есть не является физически осуществимым, тогда как квантовый алгоритм не противоречит известным законам природы.

Квантовое вычисление является процессом особого рода. Оно использует особый физический ресурс: квантовые запутанные состояния, что позволяет в некоторых случаях достигнуть поразительного выигрыша во времени. Такие случаи называются квантовым ускорением классических вычислений. Случаи квантового ускорения, на фоне общей массы классических алгоритмов, очень редки (см.[4]). Однако, это не умаляет принципиального значения квантовых вычислений, потому что они способны принципиально ускорить выполнение задач перебора.

11.3. Теорема о запрете клонирования

Теорема о запрете клонирования — утверждение квантовой теории о невозможности создания идеальной копии произвольного неизвестного квантового состояния. Теорема была сформулирована Вуттерсом, Зуреком и Диксом в 1982 году и имела огромное значение в области квантовых вычислений, квантовой теории информации и смежных областях.

Состояние одной квантовой системы может быть сцепленным (запутанным) с состоянием другой системы. Например, создать сцепленное состояние двух кубитов можно с помощью однокубитного преобразования Адамара и двухкубитного квантового вентиля C-NOT. Результатом такой операции не будет клонирование, поскольку результирующее состояние нельзя описать на языке состояний подсистем (состояние является нефакторизуемым). *Клонирование* — это такая операция, в результате которой создается состояние, являющееся тензорным произведением идентичных состояний подсистем.

Теорема о запрете клонирования[3,4]

Не существует супероператора F , который бы выполнял преобразование вида

$$|\psi\rangle\langle\psi| \otimes |s\rangle\langle s| \xrightarrow{F} |\psi\rangle\langle\psi| \otimes |\psi\rangle\langle\psi|$$

над произвольно выбранным $|\psi\rangle$ (где $|s\rangle$ -некоторое вспомогательное состояние регистра). То есть не существует квантовой операции, которая бы клонировала неизвестное произвольное квантовое состояние.

Теорема следует из линейности супероператоров и нелинейности оператора клонирования.

Доказательство

Пусть мы хотим создать копию системы A , которая находится в состоянии $|\psi\rangle_A$. Для этого возьмем систему B с тем же самым гильбертовым пространством, находящуюся в начальном состоянии $|e\rangle_B$. Начальное состояние, конечно, не должно зависеть от состояния $|\psi\rangle_A$, поскольку это состояние нам неизвестно. Составная система $A+B$ описывается тензорным произведением состояний подсистем:

$$|\psi\rangle_A \otimes |e\rangle_B \equiv |\psi\rangle_A |e\rangle_B . \quad (11.47)$$

С составной системой можно произвести два различных действия.

Первое: Мы можем измерить её состояние, что приведет к необратимому переходу системы в одно из собственных состояний измеряемой наблюдаемой и (частичной) потери информации об исходном состоянии системы А. Очевидно, такой сценарий нам не подходит.

Другая возможность заключается в применении унитарного преобразования $\hat{U}$, должным образом «настраивая» гамильтониан системы. Оператор $\hat{U}$ будет клонировать состояние системы, если

$$\hat{U}|\psi\rangle_A \otimes |e\rangle_B \equiv |\psi\rangle_A |\psi\rangle_B \quad (11.48)$$

$$\hat{U}|\phi\rangle_A \otimes |e\rangle_B \equiv |\phi\rangle_A |\phi\rangle_B \quad (11.49)$$

и

$$\langle\phi|_B \langle\phi|_A = \langle e|_B \langle\phi|_A \hat{U}^\dagger \quad (11.50)$$

для всех $|\phi\rangle$ и $|\psi\rangle$.

Согласно (11.48), (11.50), определению унитарного оператора $\hat{U}^\dagger \hat{U} = \hat{U} \hat{U}^\dagger = 1$, $\hat{U}$ сохраняет скалярное произведение:

$$\langle e|_B \langle\phi|_A \hat{U}^\dagger \hat{U} |\psi\rangle_A |e\rangle_B = \langle e|_B \langle\phi|_A |\psi\rangle_A |\psi\rangle_B \quad (11.51)$$

то есть

$$\langle\phi|\psi\rangle = \langle\phi|\psi\rangle^2. \quad (11.52)$$

Из этого следует, что либо $|\phi\rangle = |\psi\rangle$, либо состояния $|\phi\rangle$ и $|\psi\rangle$ ортогональны (что в общем случае, конечно, неверно). Таким образом, операция $\hat{U}$ не может клонировать произвольное квантовое состояние. Теорема о запрете клонирования доказана. ■

Неточное копирование. Хотя создание точных копий неизвестного квантового состояния невозможно, можно тиражировать его неточные копии. Для этого нужно привести исходную систему во взаимодействие с большей вспомогательной системой и провести специальное унитарное преобразование комбинированной системы, в результате которого несколько компонентов большей системы станут приблизительными копиями исходной. Такой процесс может быть использован для атаки на квантовые криптографические системы, а также для других целей в квантовых вычислениях.

11.4. Квантовая телепортация состояний [3,4]

Алгоритм телепортации реализует точный перенос состояния одного кубита (или системы) на другой. В простейшей схеме используются 3 кубита: телепортируемый кубит и запутанная пара, один кубит которой находится на другой стороне. Отметим, что в результате работы алгоритма первоначальное состояние источника разрушится — это пример действия общего принципа невозможности клонирования — невозможно создать точную копию квантового состояния, не разрушив оригинал. Не получится скопировать произвольное состояние, и телепортация — замена этой операции.

Телепортация позволяет передавать квантовое состояние системы, а не саму систему, с помощью обычных классических каналов связи. Таким образом, можно, в частности, получить связанное состояние системы, состоящей из подсистем, удаленных на большое расстояние.

По сценарию протокола квантовой телепортации персонаж Алиса пересылает персонажу Бобу состояние кубита. Боб получает только два бита классической информации.

Предположим, в распоряжении Алисы имеется только классический канал связи с Бобом. Предположим, что кубиты Алисы и Боба находятся в белловском запутанном (сцепленном) состоянии

$$\beta|00\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) = |\beta_{00}\rangle \quad (11.53)$$

1) Перед началом коммуникаций Алиса и Боб берут по половинке ЭПР-пары:

У Алисы находится выделенный кубит из $|\beta_{00}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\underline{00}\rangle + |\underline{11}\rangle)$

У Боба выделенный кубит из $|\beta_{00}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\underline{00}\rangle + |\underline{11}\rangle)$

Они расходятся на произвольное расстояние.

2) Алисе нужно телепортировать кубит в неизвестном состоянии

$$|\psi\rangle = (\alpha_0|0\rangle + \alpha_1|1\rangle). \quad (11.54)$$

Она умножает его на перепутанный кубит $|\psi\rangle|\beta_{00}\rangle = (\alpha_0|0\rangle + \alpha_1|1\rangle)(|\underline{00}\rangle + |\underline{11}\rangle)\frac{1}{\sqrt{2}}$.

Получает комбинированное состояние (кубиты Алисы выделены черточкой

снизу) $|\psi\rangle|\beta_{00}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(\alpha_0|\underline{000}\rangle + \alpha_0|\underline{010}\rangle + \alpha_1|\underline{100}\rangle + \alpha_1|\underline{110}\rangle)$

3) Алиса применяет Вентиль CNOT. Это эквивалентно применению $CNOT \otimes I$ к комбинированному состоянию трех кубитов, включающему и кубит Боба

$$|\psi\rangle|\beta_{00}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(\alpha_0|\underline{000}\rangle + \alpha_0|\underline{010}\rangle + \alpha_1|\underline{100}\rangle + \alpha_1|\underline{110}\rangle)$$

4) Алиса применяет логический элемент Адамара $H = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$ к своему первому

кубиту который хочет телепортировать. Это эквивалентно действию $H \otimes I \otimes I$ на всю систему:

$$H|\psi\rangle = \frac{1}{2}[\alpha_0(|000\rangle + |100\rangle + |011\rangle + |111\rangle) + \alpha_1(|010\rangle - |110\rangle + |001\rangle - |101\rangle)]$$

Смещаем амплитуды так, чтобы можно было считать первые два бита оставив третий в суперпозиции

$$H|\psi\rangle = \frac{1}{2}[\alpha_0(|\underline{00}\rangle|0\rangle + |\underline{10}\rangle|0\rangle + |\underline{01}\rangle|1\rangle + |\underline{11}\rangle|1\rangle) +$$

$$\alpha_1(|\underline{01}\rangle|0\rangle - |\underline{11}\rangle|0\rangle + |\underline{01}\rangle|1\rangle - |\underline{10}\rangle|1\rangle)]$$

$$H|\psi\rangle = \frac{1}{2}[|\underline{00}\rangle(\alpha_0|0\rangle + \alpha_1|1\rangle) + |\underline{01}\rangle(\alpha_0|1\rangle + \alpha_1|0\rangle) +$$

$$|\underline{10}\rangle(\alpha_0|0\rangle - \alpha_1|1\rangle) + |\underline{11}\rangle(\alpha_0|1\rangle - \alpha_1|0\rangle)]$$

5) Алиса измеряет первые два выделенные кубиты в базисе Белла $\{|\beta_{00}\rangle, |\beta_{01}\rangle, |\beta_{10}\rangle, |\beta_{11}\rangle\}$,

$$\beta|00\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) = |\beta_{00}\rangle \quad \beta|10\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle - |11\rangle) = |\beta_{10}\rangle$$

$$\beta|01\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + |10\rangle) = |\beta_{01}\rangle \quad \beta|11\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle) = |\beta_{11}\rangle$$

и используя элементы Паули:

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, XZ = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} :$$

После измерения система «Алиса+Боб» находится в одном из следующих совместных состояний

$$|\psi\rangle|\beta_{00}\rangle = \frac{1}{2} [|\beta_{00}\rangle|\psi\rangle + |\beta_{01}\rangle(X|\psi\rangle) + |\beta_{10}\rangle(Z|\psi\rangle) + |\beta_{11}\rangle(XZ|\psi\rangle)], \quad (11.55)$$

С вероятностью для каждого равной $\frac{1}{4}$.

Результат измерений (т.е. $|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle$) Алиса передает Бобу по классическому каналу.

б) Получив сообщение от Алисы, Боб узнает, что его куббит $|\beta_{00}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$ принял состояние $I|\psi\rangle, X|\psi\rangle, Z|\psi\rangle, XZ|\psi\rangle$. Боб выбирает в соответствии с сообщением от Алисы одну из четырех цепей:

Случай бит **0,0** применение элемента I: $I(\alpha_0|0\rangle + \alpha_1|1\rangle) \mapsto \alpha_0|0\rangle + \alpha_1|1\rangle = |\psi\rangle$,

Случай бит **0,1** применение элемента X: $X(\alpha_0|1\rangle + \alpha_1|0\rangle) \mapsto \alpha_0|0\rangle + \alpha_1|1\rangle = |\psi\rangle$,

Случай бит **1,0** применение элемента Z: $Z(\alpha_0|0\rangle - \alpha_1|1\rangle) \mapsto \alpha_0|0\rangle + \alpha_1|1\rangle = |\psi\rangle$,

Случай бит **1,1** применение элемента XZ: $XZ(\alpha_0|1\rangle - \alpha_1|0\rangle) \mapsto \alpha_0|0\rangle + \alpha_1|1\rangle = |\psi\rangle$.

(11.56)

Боб условно применяет к своему кубиту Z и X, что классически задается значениями $(0,1)=a$ и $(1,0)=b$. Выполняя это преобразование Боб получает состояние $|\psi\rangle = \alpha_0|0\rangle + \alpha_1|1\rangle$, сравните с (11.54).■

Таким образом Алиса смогла правильно передать Бобу квантовое состояние, не прибегая к пересылке самой квантовой информации, а пересылая только два бита классической информации, создавая запутанную ЭПР-пару и выполняя локальные измерения Белла.

Квантовая телепортация, основанная на запутанных квантовых состояниях, используется в таких интенсивно исследуемых областях, как квантовые вычисления и квантовая криптография.

11.5. Квантовая коммуникация [3,4]

Теория квантовой механики запрещает передачу информации со сверхсветовой скоростью. Это объясняется принципиально вероятностным характером измерений и теоремой о запрете клонирования. Представим разнесённых в пространстве наблюдателей A и B, у которых имеется по

экземпляру квантово-запутанных ящиков с кошками Шрёдингера, находящимися в суперпозиции «жив-мёртв». Если в момент t_1 наблюдатель A открывает ящик, то его кот равновероятно оказывается либо живым, либо мёртвым. Если живым, то в момент t_2 наблюдатель B открывает свой ящик и находит там мёртвого кота. Проблема в том, что до исходного измерения нет возможности предсказать, у кого именно что окажется, а после один кот жив, другой мёртв, и назад ситуацию не повернуть.

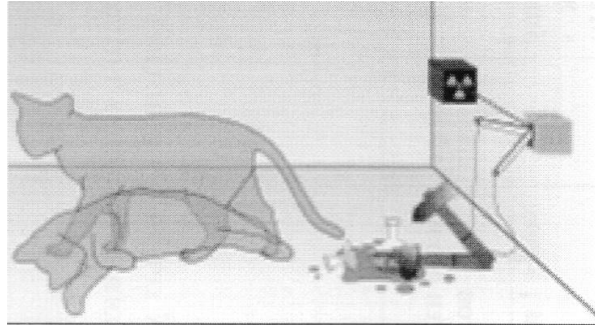


Рис.11.6 Ящик с мыслимыми кошками Шредингера.

Слабые квантовые измерения позволяют вовремя остановить «убийство» кота Шрёдингера и оставить его в исходной суперпозиции «жив-мёртв». Обход классических ограничений был найден в 2006 году Коротковым и Джорданом из Калифорнийского университета за счёт слабых квантовых измерений (англ. weak quantum *measurement). Продолжая аналогию, оказалось, что можно не распаивать ящик, а лишь чуть-чуть приподнять его крышку и подсмотреть в щёлку. Если состояние кота неудовлетворительно, то крышку можно сразу захлопнуть и попробовать ещё раз.

В 2008 году другая группа исследователей из Калифорнийского университета объявила об успешной экспериментальной проверке данной теории. «Реинкарнация» кота Шрёдингера стала возможной. Наблюдатель A теперь может приоткрывать и закрывать крышку ящика, пока не убедится, что у наблюдателя B кот окажется в нужном состоянии.

Открытие возможности «обратного коллапса» во многом перевернуло представления о базовых принципах квантовой механики:

Возникла идея не просто передачи потоков запутанных частиц в разнесённые в пространстве приёмники, но и хранения таких частиц неопределённо долгое время в приёмниках в состоянии суперпозиции для «последующего использования». Ещё из работ Раньяды 1990 года было известно о таких расслоениях Хопфа, которые могли быть топологическими решениями уравнений Максвелла. Это означало, что математически могут существовать ситуации, при которых пучок фотонов или отдельный фотон будет бесконечно циркулировать по сложной замкнутой траектории, выписывая тор в пространстве.

В 2008 году американские исследователи занялись анализом получаемых расслоений и их возможной физической реализацией. В результате были найдены стабильные решения и технические способы, позволяющие реализовать такие решения. Оказалось, что пучок света действительно можно «свернуть в бублик»

(точнее — в замкнутый тороидальный узел) и «положить на место», и такое состояние останется стабильным и самоподдерживающимся.

Помимо проблемы «складирования» запутанных частиц остаётся нерешённой проблема декогеренции, то есть утраты частицами запутанности со временем из-за взаимодействия с окружающей средой.

11.6. Квантовая криптология [3,4]

Квантовая криптология состоит из *криптографии*—это изобретение и применение секретных кодов и *криптоанализа*—это взлом секретных кодов.

Квантовая криптография используется для пересылки зашифрованных сообщений по двум каналам связи, квантовому и традиционному. Первый протокол (КРК) *квантового распределения ключа* BB84 был предложен Беннетом и Брассардом в 1984 году и реализован в 1989. КРК-способ передачи секретных ключей от одной стороны к другой обнаруживающий любые попытки их перехвата. Необычайно высокий коэффициент ошибок в перехваченном сообщении является отличным индикатором перехвата. При этом никакой полезной информации получить перехватчикам не удастся.

Устройство Беннета и Брассарда передало секретный ключ на расстояние 30 см с помощью поляризованного света, прошедшего через кристалл кальцита и ряд электрооптических устройств. С тех пор квантовая криптография являлась одним из бурно развивающихся прикладных направлений квантовой физики, и к 2011 году несколькими лабораториями и коммерческими фирмами были созданы работающие прототипы передатчиков и приёмников.

Следует отметить, что главное преимущество квантовой криптографии состоит в абсолютной безопасности передаваемой информации. Оно базируется на гарантированном уведомлении, как только кто-либо попытается перехватить сообщение (подслушивает их), его состояние меняется. Это достигается за счет следующих квантовомеханических эффектов:

Квантовая неопределенность: неизвестный фотон может быть поляризован горизонтально (180°), вертикально (90°), диагонально (45°) и (135°). Пока фотон неизмерен ничего нельзя сказать о его поляризации.

Теорема о запрете клонирования квантовых состояний не позволяет восстановить первоначальное состояние перехваченного(измерением) фотона.

Если измерение выполнено (проведено различие между двумя неортогональными состояниями) сигнал навсегда потерян.

Измерения необратимы. Любая суперпозиция случайным образом коллапсирует в результирующее базовое состояние, теряя амплитуду вероятностей, которые были до измерения.

В связи с открытием и успешным тестированием обратимых слабых квантовых измерений основы надёжности квантовой криптографии оказались под большим вопросом.

11.7. Квантовые алгоритмы [3,4,5]

Квантовый алгоритм — это алгоритм, предназначенный для выполнения на квантовом компьютере.

Квантовый алгоритм представляет собой классический алгоритм, который задает последовательность унитарных операций (гейтов, или вентилях) с

указанием, над какими именно кубитами их надо совершать. Квантовый алгоритм задается либо в виде словесного описания таких команд, либо с помощью их графической записи в виде системы *вентилей* (quantum gate array).

Результат работы квантового алгоритма носит вероятностный характер. За счёт небольшого увеличения количества операций в алгоритме можно сколь угодно приблизить вероятность получения правильного результата к единице.

Множества задач, допускающих решение на квантовом компьютере и на классическом, совпадают. Квантовый компьютер, таким образом, не увеличивает число алгоритмически разрешимых задач. Весь смысл применения квантового компьютера в том, что некоторые задачи он способен решить существенно быстрее, чем любой из классических. Для этого квантовый алгоритм должен по ходу вычисления генерировать и использовать запутанные квантовые состояния.

Любая задача, решаемая квантовым алгоритмом, может быть решена и классическим компьютером путем прямого вычисления унитарных матриц экспоненциальной размерности, получения явного вида квантовых состояний. В частности, проблемы, неразрешимые на классических компьютерах (например, проблема остановки), остаются неразрешимыми и на квантовых. Но такое прямое моделирование требует экспоненциального времени, и потому возникает возможность, используя квантовый параллелизм, ускорять на квантовом компьютере некоторые классические алгоритмы.

Существуют три класса квантовых алгоритмов:

- 1) алгоритмы с квантовыми скрытыми подгруппами преобразований абелевых групп.
- 2) алгоритмы с усилением амплитуд состояний.
- 3) алгоритмы для моделирования квантовых систем на компьютере.

Алгоритмы классов 1) и 3) предусматривают применение дискретного Фурье преобразования. На квантовом компьютере Фурье-преобразование выполняется за полиномиальное число (n^2) операций.

Алгоритм Гровера (2) класс), поиска в базе данных, позволяет найти решение уравнения $f(x) = 1$, $0 \leq x < N$ за время $O(\sqrt{N})$. Предназначен для поиска некоторого объекта в неструктурированной базе данных. Достигается квадратичное ускорение решения задачи поиска.

Алгоритм Шора класса 1) факторизации чисел позволяет разложить натуральное число n на простые множители за полиномиальное от $\log(n)$ время. Он является основой для работ по квантовой криптографии и демонстрирует экспоненциальное ускорение задачи раскодирования зашифрованных сообщений стандартом RSA. В основе криптосистемы с открытым ключом RSA лежит предположение, что решение математической задачи о разложении больших чисел на простые множители (например, произведение двух 200-значных чисел друг на друга) требует экспоненциально большого числа операций и астрономического времени на классическом компьютере. Квантовый алгоритм Шора дает возможность вычислить простые множители больших чисел за полиномиальное время n^3 и взломать шифры RSA криптосистем.

Алгоритм Залки — Визнера позволяет моделировать унитарную эволюцию квантовой системы n частиц за почти линейное время с использованием $O(n)$ кубит. Относится к третьему классу.

Алгоритм Дойча — Джоза по определению типа дискретной функции от дискретного аргумента, позволяет «за одно вычисление» определить, является ли функция двоичной переменной $f(n)$ постоянной ($f_1(n) = 0, f_2(n) = 1$ независимо от n) или «сбалансированной» ($f_3(0) = 0, f_3(1) = 1; f_4(0) = 1, f_4(1) = 0$).

Алгоритм Саймона решает проблему чёрного ящика экспоненциально быстрее, чем любой классический алгоритм, включая вероятностные алгоритмы.

11.8 Энтропия фон Неймана- характеристика запутанности двухкубитовых систем[6]

Квантовая энтропия фон Неймана в абстрактном гильбертовом пространстве $\mathbb{C}^n$ имеет вид

$$S(\rho) = -\text{Tr}(\rho \ln \rho), \quad (11.57)$$

где ρ - статистический оператор (матрица плотности).

Эволюция во времени статистического оператора определяется уравнением фон Неймана

$$\frac{\partial \hat{\rho}}{\partial t} = i\hat{L}(t)\hat{\rho} \equiv \frac{i}{\hbar} [\hat{H}(t), \hat{\rho}] = \frac{i}{\hbar} \{ \hat{H}(t)\hat{\rho} - \hat{\rho}\hat{H}(t) \}, \quad (11.58)$$

где $\hat{H}(t)$ - оператор гамильтона (гамильтониан)

Для кубитов A и B энтропия имеет вид

$$S(\rho_A) = -\text{Tr}(\rho_A \log_2 \rho_A), \quad (11.59)$$

$$S(\rho_B) = -\text{Tr}(\rho_B \log_2 \rho_B), \quad (11.60)$$

Где «трек» $\text{Tr} \equiv \text{Sp}$ «шпур» -- это сумма диагональных элементов матрицы.

Для *чистого состояния* двухкубитовой системы AB , когда приведенные матрицы плотности для обоих кубитов имеют вид

$$\rho_A = |0_A\rangle\langle 0_A| + |1_A\rangle\langle 1_A| = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_A + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_A = I_A = 1, \quad (11.61)$$

$$\rho_B = |0_B\rangle\langle 0_B| + |1_B\rangle\langle 1_B| = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_B + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_B = I_B = 1. \quad (11.62)$$

Тогда $\log_2 \rho_A = \log_2 \rho_B = \log_2 1 = 0$ и энтропия двух кубитовой системы в чистом состоянии равна нулю:

$$S(\rho_{AB}) = S(\rho_A) + S(\rho_B) = 0. \quad (11.63)$$

В *запутанном состоянии* двухкубитовая система AB характеризуется приведенными матрицами плотности ρ_A и ρ_B , которые описывают для обоих кубитов *смешанные состояния*:

$$\rho_A = \text{Tr}_B(\rho_{AB}) = |c_1|^2 |0_A\rangle\langle 0_A| + |c_2|^2 |1_A\rangle\langle 1_A|, \quad (11.64)$$

$$\rho_B = \text{Tr}_A(\rho_{AB}) = |c_1|^2 |0_B\rangle\langle 0_B| + |c_2|^2 |1_B\rangle\langle 1_B|. \quad (11.65)$$

Эти смешанные состояния (11.64-65) состоят из чистых состояний описываемых векторами с вероятностями $P(|0\rangle) = \frac{1}{2}$ и $P(|1\rangle) = \frac{1}{2}$.

Энтропии для подсистем А и В следующие:

$$S(\rho_A) = -[|c_1|^2 \log_2 |c_1|^2 + |c_2|^2 \log_2 |c_2|^2], \quad (11.66)$$

$$S(\rho_B) = -[|c_1|^2 \log_2 |c_1|^2 + |c_2|^2 \log_2 |c_2|^2]. \quad (11.67)$$

Максимум энтропии подсистемы (кубит А) $S(\rho_A)$ достигается при значениях вероятности $|c_1|^2 = |c_2|^2 = \frac{1}{2}$ и $\log_2 |c_1|^2 = \log_2 1 - \log_2 2 = -1$, (11.68)

$$S_{\max}(\rho_A) = -\left[\frac{1}{2}(-1) + \frac{1}{2}(-1)\right] = +1, S_{\max}(\rho_B) = +1. \quad (11.69)$$

Энтропия двухкубитовой системы в запутанном состоянии равна

$$S_{\max}(\rho_{AB}) = S_{\max}(\rho_A) + S_{\max}(\rho_B) = 2. \quad (11.70)$$

В запутанном состоянии максимальные значения приведенных матриц А и В следующие

$$(\rho_A)_{\max} = \frac{1}{2}|0_A\rangle\langle 0_A| + \frac{1}{2}|1_A\rangle\langle 1_A| = \frac{1}{2}I_A, \quad (11.71)$$

$$(\rho_B)_{\max} = \frac{1}{2}|0_B\rangle\langle 0_B| + \frac{1}{2}|1_B\rangle\langle 1_B| = \frac{1}{2}I_B. \quad (11.72)$$

Таким образом, квантовая энтропия фон Неймана может служить количественной мерой запутанности двухкубитовых систем. Сравните формулу (11.70) с формулой (11.63).

Литература

1. Ю. И. Манин Вычислимое и невычислимое. — М.: Сов. радио, 1980. — С. 15.
2. Feynman, R.P. Simulating physics with computers // International Journal of Theoretical Physics. — 1982. — V. 21. — Number 6. — P. 467—488 [1]
3. Кайе Ф., Лафлам Р., Моска М. Введение в квантовые вычисления. — Ижевск: РХД, 2009. — 360 с.
4. Р. Перри Элементарное введение в квантовые вычисления. Учебное пособие. - Долгопрудный, Интеллект, -2015-208 с.
5. Нильсен. М.А. Чанг И.Л. Квантовые вычисления и квантовая информация. М. : Мир-. 2006- 826 с.
6. Ю.А. Байков, В.М. Кузнецов «Квантовая механика», учебное пособие. М.- БИНОМ. Лаборатория знаний, 2019--291 с.

Глава 12 КВАНТОВЫЙ КОМПЬЮТЕР

12.1. Структура квантового компьютера [1]

Квантовый компьютер — это компьютер, с аналоговым управлением и вероятностным представлением цифрового решения. Основные проблемы, связанные с созданием и применением квантовых компьютеров:

1. необходимо обеспечить высокую точность измерений $10^{-5} - 10^{-4}$ параметров управляющих кубитами сигналов;
2. внешние воздействия могут разрушить квантовую систему или внести в неё искажения.

Чтобы использовать квантовую схему для вычисления, нужно уметь вводить входные данные, проделывать вычисления и считывать результат. Поэтому принципиальная схема любого квантового компьютера (см. рис.11.1) должна включать следующие функциональные блоки:

- квантовый регистр для ввода данных,
- квантовый процессор для преобразования данных,
- устройство для считывания данных.

Квантовый регистр представляет собой совокупность некоторого числа L кубитов. До ввода информации в компьютер все кубиты квантового регистра должны быть приведены в базисные состояния $|0\rangle$. Эта операция называется подготовкой, или *инициализацией*.

Далее определенные кубиты (не все) подвергаются селективному внешнему воздействию (например, с помощью импульсов внешнего электромагнитного поля, управляемых классическим компьютером), которое изменяет значение кубитов, то есть из состояния $|0\rangle$ они переходят в состояние $|1\rangle$. При этом состояние всего квантового регистра перейдет в суперпозицию базисных состояний $c_n|n\rangle$, то есть состояние квантового регистра в начальный момент времени $t=0$ будет определяться функцией:

$$|\psi(0)\rangle = \sum_{n=0}^{2^L-1} c_n |n\rangle \quad (12.1)$$

Понятно, что данное состояние суперпозиции можно использовать для бинарного (двоичного) представления числа n .

В квантовом процессоре введенные данные подвергаются последовательности квантовых логических операций, которые с математической точки зрения описываются унитарным преобразованием $\hat{U}_{mn}$, действующим на состояние всего регистра.

В результате через некоторое количество тактов работы квантового процессора исходное квантовое состояние системы становится новой суперпозицией вида:

$$|\psi(t)\rangle = \sum_{n,m=0}^{2^L-1} c_n \hat{U}_{mn} |n\rangle \quad (12.2)$$

Для построения любого вычисления достаточно всего двух базовых логических булевых операций. С помощью базовых квантовых операций можно имитировать работу обычных логических элементов, из которых сделаны компьютеры. Поскольку законы квантовой физики на микроскопическом уровне являются линейными и обратимыми, то и соответствующие квантовые логические устройства, производящие операции с квантовыми состояниями отдельных кубитов (квантовые вентили), оказываются логически и термодинамически обратимыми.

Квантовые вентили аналогичны соответствующим обратимым классическим вентилям, но, в отличие от них, способны совершать унитарные операции над суперпозициями состояний. Выполнение унитарных логических операций над кубитами предполагается осуществлять с помощью соответствующих внешних воздействий, которыми управляют классические компьютеры.

После реализации преобразований в квантовом компьютере новая функция суперпозиции представляет собой результат вычислений в квантовом процессоре. Остается лишь считать полученные значения, для чего производится измерение значения квантовой системы.

В итоге образуется последовательность нулей и единиц, причем, в силу вероятностного характера измерений, она может быть любой. Таким образом, квантовый компьютер может с некоторой вероятностью дать любой ответ. При этом квантовая схема вычислений считается правильной, если правильный ответ получается с вероятностью, достаточно близкой к единице. Повторив вычисления несколько раз и выбрав тот ответ, который встречается наиболее часто, можно снизить вероятность ошибки до сколь угодно малой величины.

В квантовом компьютере в памяти (регистр состояния) хранятся значения L кубитов, однако квантовая система находится в состоянии, являющемся суперпозицией всех базовых $2L$ состояний, и изменение квантового состояния системы, производимое квантовым процессором, касается всех $2L$ базовых состояний одновременно. Соответственно в квантовом компьютере вычислительная мощность достигается за счет реализации параллельных вычислений, причем теоретически квантовый компьютер может работать в экспоненциальное число раз быстрее, чем классическая схема.

Программируемый квантовый компьютер в смысле архитектуры фон Неймана построить нельзя из-за

Теорема о запрете программирования:

Разные унитарные операторы $U_0, U_1, \dots, U_n$, требуют ортогональных программ $|U_0\rangle, |U_1\rangle, \dots, |U_n\rangle$.

Комментарий: пусть программа квантового компьютера состоит из нескольких унитарных операторов. Т.к. существует бесконечное множество унитарных операторов программный регистр должен быть бесконечного размера.

12.1.1. Идеальный квантовый компьютер

Квантовый компьютер представляет собой регистр из n -кубитов, управляемых внешними классическими сигналами. Квантовый компьютер встроен в классическое окружение, состоящее из управляющего классического

компьютера и генераторов импульсов, управляющих эволюцией кубитов, и средствами измерения состояний кубитов. см рис

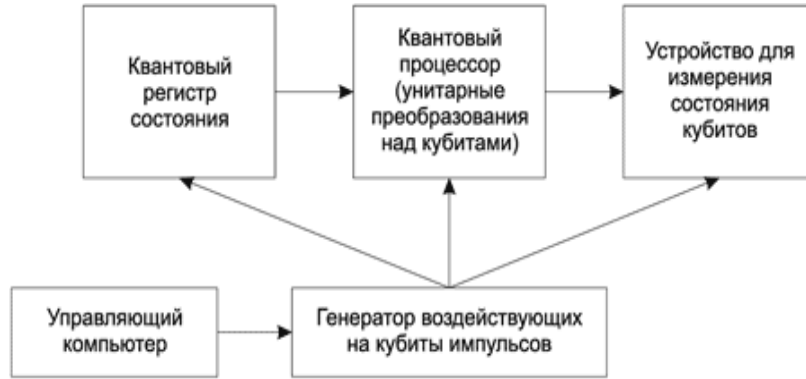


Рис.12.1. Схема квантового компьютера.[1]

Идеальный квантовый компьютер имеет состояния, которые всегда когерентны. Это означает отсутствие взаимодействия с окружением, создающим шумы и нарушающим когерентность вектора состояния компьютера и точное управление внешних сигналов.

Вектор состояния квантового регистра, состоящего из n кубитов представляет собой разложение по 2^n базисных состояний регистра $|i_1, i_2, \dots, i_n\rangle$ где $i_1, \dots, i_n = \{0, 1\}$.

$$|\psi\rangle = \sum_{i_1, \dots, i_n} a_{i_1, i_2, \dots, i_n} |i_1, i_2, \dots, i_n\rangle \quad (12.3)$$

Здесь $a_{i_1, \dots, i_n}$ - проекции вектора $|\psi\rangle$ на направления ортов $|i_1, i_2, \dots, i_n\rangle$.

Процесс вычисления на квантовом компьютере состоит в преобразовании начального вектора состояния $|\psi_{in}\rangle$ компьютера в конечный вектор состояния $|\psi_f\rangle$ путем умножения начального вектора на унитарную матрицу U размерности $2^n \times 2^n$

$$|\psi_f\rangle = U(2^n \times 2^n) |\psi_{in}\rangle \quad (12.4)$$

В начальном состоянии компьютера все кубиты квантового регистра должны находится в основном состоянии ,

$$|\psi_{in}\rangle = |0_1, 0_2, \dots, 0_n\rangle, \quad (12.5)$$

которое не содержит никакой информации о задаче и её решении.

Конечный вектор состояния

$$|\psi_f\rangle = \sum_{x=0}^{2^n-1} a_x^{(i)} |x\rangle \quad (12.6)$$

содержит всю информацию о решении задачи. Измерив в базисе состояние каждого из n кубитов в конечном состоянии получаем любое из значений $0 \leq x \leq 2^n - 1$ с вероятностями $|a_x^{(i)}|^2$. Квантовый алгоритм должен приводить к такому конечному состоянию $|\psi_f\rangle$, что вероятность правильного решения

$p_s = |a_s|^2 \ll 1$ была близка к единице, а сумма вероятностей всех ошибочных решений $\sum_{x \neq s} |a_x|^2 \rightarrow 0$ стремилась к нулю.

Квантовый компьютер является цифровым вероятностным компьютером, т.к. дает решение задачи с определенной вероятностью.

В квантовых вычислениях происходит преобразование начального вектора состояния в конечный вектор через непрерывный ряд состояний. Базисный набор состояний остается неизменным. Динамика состояния компьютера передается изменениями во времени амплитуд, которые являются аналоговыми величинами, принимающими непрерывный ряд значений в интервале $0 \leq |a_x| \leq 1$. По способу управления этими величинами квантовый компьютер является аналоговым компьютером. Параметры сигналов (импульсов), управляющих кубитами, должны контролироваться с погрешностью $10^{-4} \div 10^{-5}$.

Таким образом, **квантовый компьютер является цифровым вероятностным компьютером с аналоговым управлением, что отличает его от всех типов классических компьютеров.**

Матрицу U можно разложить в упорядоченное произведение матриц второго и четвертого порядков с точностью достаточной для вычислений

$$U(2^n \times 2^n) = \prod_{i,j} U_i(2 \times 2) \otimes U_j(2^2 \times 2^2). \quad (12.7)$$

Матрица второго порядка $U(2 \times 2) = \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{pmatrix}$ преобразует вектор $|\psi\rangle = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$ в вектор $|\psi'\rangle = \begin{pmatrix} a' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$ и описывает операцию на отдельном кубите i .

Матрицы четвертого порядка $U(2^2 \times 2^2)$ преобразуют векторы состояний пар кубитов

$$|\psi_{in}\rangle = a_{00}|00\rangle + a_{10}|10\rangle + a_{01}|01\rangle + a_{11}|11\rangle \rightarrow |\psi_f\rangle = a'_{00}|00\rangle + a'_{10}|10\rangle + a'_{01}|01\rangle + a'_{11}|11\rangle. \quad (12.8)$$

Числа сомножителей второго и четвертого порядка в разложении определяют число однокубитовых и двухкубитовых операций необходимых для реализации алгоритма. Алгоритм считается эффективным, если полное число операций является полиномиальным от числа задействованных в вычислениях кубитов компьютера. Если число операций растет экспоненциально, алгоритм считается неэффективным.

Физическая реализация квантовой операции всегда сопровождается некоторой погрешностью исполнения ε . Для достижения погрешности в выполнении однокубитовой операции необходимо затратить $O\left(\log_2^c \frac{1}{\varepsilon}\right)$

операций из дискретного набора. Справедлива

Теорема Соловей – Китаева: [2]

Если G –конечное множество однокубитовых элементов (поворотных) $G = \{R_l(\beta), R_m(\gamma)\}$ удовлетворяет условиям:

i) l и m - непараллельные оси блоховской сферы, а

ii) $\beta, \gamma \in [0, 2\pi)$ - действительные числа, так что измерение конечных состояний $\frac{\beta}{\pi}$ и $\frac{\gamma}{\pi}$ не являются рациональными числами,

(iii) для любого элемента $g \in G$ его обратный элемент g^{-1} можно точно воспроизвести конечной последовательностью элементов из G ,

тогда любой однокубитовый элемент можно аппроксимировать с погрешностью, не более ε , используя $O\left(\log^c\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)\right)$ элементов из G , где c - положительная константа.

Согласно этой теореме любой однокубитовый элемент можно аппроксимировать с погрешностью не более $\frac{\varepsilon}{m}$ используя $O\left(\log^c\left(\frac{m}{\varepsilon}\right)\right)$ элементов из конечного множества G .

12.2. Сравнение квантового компьютера с оптическим компьютером

Вектор состояния квантового компьютера при вычислениях содержит как цифровую информацию в квантовом регистре $|x\rangle$, так и аналоговую (a_x) информацию в амплитудах квантовых состояний:

$$\sum_{j=1}^m |\psi_j\rangle = \sum_{j=1}^m \sum_{x=0}^{2^n-1} a_x^{(j)} |x\rangle = \sum_{x=0}^{2^n-1} \left(\sum_{j=1}^m a_x^{(j)} \right) |x\rangle. \quad (12.9)$$

В квантовом компьютере происходит 2^n -кратная интерференция амплитуд для каждого вектора $|x\rangle$ $0 \leq x \leq 2^n - 1$.

В оптическом компьютере при вычислениях происходит однократная интерференция оптических мод:

$$\sum_{j=1}^m E_j = \sum_{j=1}^m a_j \sin(\omega t + \varphi_j) \quad (12.10)$$

Оптический компьютер содержит только аналоговую информацию и относится к классическим компьютерам.

Оптический компьютер может стать квантовым, если он будет работать на кубитах, созданных из когерентных фотонов, состояния которых при вычислениях останутся когерентными.

12.3. Физические проблемы квантовых компьютеров [1,3]

Основная проблема физической реализации идеального квантового компьютера — это быстрый распад чистых квантовых суперпозиционных состояний, описываемых вектором $|\psi\rangle = \sum_x c_x |x\rangle$ и превращение их в смешанные состояния, описываемые матрицей плотности $\rho = \sum_x |c_x|^2 |x\rangle\langle x|$. Это происходит при

взаимодействии квантового регистра с неконтролируемым окружением, из-за неточности в значениях параметров управляющих импульсов. и неконтролируемого взаимодействия кубитов между собой.

Этот процесс называется *декогеренцией* и накладывает основное требование на физические элементы квантового компьютера: время сохранения

когерентности состояния должно быть больше времени вычисления. Существует два способа избежать распада когерентности:

1. Максимально изолировать квантовую систему от окружения и увеличить время когерентности искусственно.

2. Необходимо сокращать время операции τ_{op} и увеличивать время декогеренции отдельного кубита τ_{dc} .

Регистр из L кубитов теряет когерентность быстрее чем один кубит. Отношение времени декогеренции квантового регистра τ_{dc}^L к времени выполнения вычислительной операции τ_{op} следующее $N_{op} \equiv \frac{\tau_{dc}^L}{\tau_{op}} = \frac{\tau_{dc}}{\tau_{op} L^\alpha}$ где $\alpha = 1, 2$.

Отношение $\frac{\tau_{dc}}{\tau_{op}} = 10^3 \div 10^6$.

12.3.1. Методы подавления декогеренции

Время сохранения когерентности состояний должно быть больше времени вычислений. Существует два способа избежать распада когерентности:

- 1) квантовую систему максимально изолировать от окружения (сделать её замкнутой).
- 2) увеличить время когерентности искусственно.

Квантовый метод коррекции ошибок исправляет амплитудные и фазовые ошибки. Квантовый компьютер должен работать, чередуя вычисления и протоколы коррекции ошибок. Методы коррекции ошибок определяются выбранным кодом, который позволяет корректировать только те ошибки, для которых он предназначен. Эти коды требуют увеличения числа кубитов и числа квантовых операций. При одноступенчатом кодировании число необходимых кубитов увеличивается примерно в 10 раз, во столько же раз возрастает число операций.

Квантовые вычисления называются помехоустойчивыми, если они обеспечивают надежный результат вычисления при указанных ограничениях методов коррекции ошибок. Помехоустойчивость вычислений означает стабилизацию квантово-когерентного состояния компьютера в течение времени необходимого для выполнения полиномиального алгоритма. Квантовый компьютер может работать сколь угодно долго, если вероятность ошибки в одной элементарной операции меньше порогового значения $10^{-5} \div 10^{-6}$. Это означает, что операции квантовой коррекции ошибок удаляют из компьютера больше ошибок, чем туда вносят. Это утверждение эквивалентно теореме о существовании полномасштабного квантового компьютера.

Квантовая коррекция ошибок возможна также методом слабых непрерывных измерений и обратной связи. Принцип коррекции ошибок с помощью квантовой обратной связи является универсальным. Достаточно контролировать времена передачи квантов от объекта к окружению, и унитарным преобразованием возвращать состояние системы к прежнему состоянию после каждого акта редукции. Такая коррекция используется, если возможен непрерывный контроль за потерями в локальных узлах квантовых вычислений.

12.3.2. Фазовая декогеренция кубита

Рассмотрим простейшую систему, состоящую из двух кубитов. Кубит q – квантовая система, кубит e – квантовое окружение системы. В начальный момент $t=0$ кубит q находится в суперпозиционном состоянии $|\psi\rangle = \alpha|0_q\rangle + \beta|1_q\rangle$ и с окружением e не запутаны.

$$|\psi_{qe}(0)\rangle = (\alpha|0_q\rangle + \beta|1_q\rangle)|e(0)\rangle \quad (12.11)$$

При включении взаимодействия кубит с окружением e в состоянии $|0_e\rangle$ и запутывается с ним

$$|\psi_{qe}(t)\rangle = \alpha|0_q\rangle|e_0(t)\rangle + \beta|1_q\rangle|e_1(t)\rangle \quad (12.12)$$

В течении времени меньшего времени декогерентности состояния $|e_0(t)\rangle$, $|e_1(t)\rangle$ нормированы, но неортогональны

$$\begin{aligned} \langle e_0(t)|e_0(t)\rangle &= \langle e_1(t)|e_1(t)\rangle = 1, \\ \langle e_0(t)|e_1(t)\rangle &= \cos\theta. \end{aligned} \quad (12.13)$$

Угол θ между векторами характеризует процесс декогерентизации:

При $t=0$ $|e_0(t=0)\rangle = |e_1(t=0)\rangle = |e(0)\rangle$, $\langle e_0(0)|e_1(0)\rangle = 1$.

При $t \rightarrow t_{dc}$ $\theta \rightarrow \frac{\pi}{2}$.

Введем вектор $|e_0^\perp(t)\rangle$ ортогональный к $|e_0(t)\rangle$. и возьмем их в качестве базиса.

Представим матрицу плотности системы и окружения в виде

$$\rho_{qe}(t) = |\psi_{qe}(t)\rangle\langle\psi_{qe}(t)| \quad (12.14)$$

Вычислим приведенную матрицу плотности кубита

$$\rho_q(t) = \langle e_0(t)|\rho_{qe}|e_0(t)\rangle + \langle e_0^\perp(t)|\rho_{qe}|e_0^\perp(t)\rangle \quad (12.15)$$

$$\rho_q(t) = |\alpha|^2|0_q\rangle\langle 0_q| + \alpha\beta^*|1_q\rangle\langle 0_q|\cos\theta + \alpha^*\beta|0_q\rangle\langle 1_q|\cos\theta + \beta^2|1_q\rangle\langle 1_q|. \quad (12.16)$$

Представим приведенную матрицу плотности кубита в базисе $(|0_q\rangle, |1_q\rangle)$ в матричной форме

$$\begin{aligned} \rho_q(t) &= \begin{bmatrix} |\alpha|^2 & \alpha\beta^*\cos\theta(t) \\ \alpha^*\beta\cos\theta(t) & |\beta|^2 \end{bmatrix} \xrightarrow{t>t_{dc}} \\ &\xrightarrow{t>t_{dc}} \begin{bmatrix} |\alpha|^2 & 0 \\ 0 & |\beta|^2 \end{bmatrix} = |\alpha|^2|0_q\rangle\langle 0_q| + |\beta|^2|1_q\rangle\langle 1_q| = \rho_q(t). \end{aligned} \quad (12.17)$$

Недиагональные матричные элементы приведенной матрицы плотности кубита называются *когерентностями*. Они исчезают после времени декогеренции. Матрица описывает *фазовую декогеренцию кубита*.

Существует множество каналов, по которым происходит декогеренция состояний кубитов и квантовых компьютеров.

Амплитудная декогеренция состояния кубита состоит в уменьшении начальной амплитуды состояния кубита. Декогеренция может происходить за счет межкубитовых взаимодействий и возникновения квантового хаоса (взаимодействие должно быть меньше порогового значения).

Декогеренция возникает за счет ошибок управления кубитами (величина ошибок управления обратна пропорциональна числу вычислительных операций) поэтому необходимо контролировать частоты генераторов и амплитуды управляющих полей.

Декогеренция кубитов в многоуровневых системах происходит дополнительно за счет переходов с незадействованных в вычислениях уровней энергии. Процесс вычислений влияет на процесс декогерентности, т.к. флуктуации управляющих сигналов также могут изменять состояния кубитов.

12.4. Общие требования для реализации квантового компьютера

Для реализации полномасштабного квантового компьютера, превосходящего по производительности любой классический компьютер, на каких бы физических принципах он ни работал, следует обеспечить выполнение следующих основных требований:

1. *Реализация кубитов.* Физическая система, представляющая собой полномасштабный квантовый компьютер, должна содержать достаточно большое число $L > 10^3$ хорошо различимых кубитов для выполнения соответствующих квантовых операций. Стационарные кубиты подходят для построения аппаратной части квантового компьютера. Бегущие кубиты (flying qubits) используются для передачи квантовой информации (для квантовых коммуникаций).
2. *Управление унитарными преобразованиями* - способ управления преобразованиями в квантовых логических цепях.
3. *Получение начальных состояний (кубитов)* - это присвоение исходных значений кубитам путем инициализации регистров состояния $|000\dots\rangle$. Начальные состояния требуются также для квантовой коррекции ошибок.
4. *Большое время декогерентности.* Разрушения суперпозиции квантовых состояний (время декогерентизации) должно, по крайней мере, в 10^4 раз превышать время выполнения основных квантовых операций (время такта). Для этого система кубитов должна быть довольно слабо связана с окружением;
5. *Измерение конечных состояний.* Необходимо обеспечить измерение с достаточно высокой надежностью состояния квантовой системы на выходе. Измерение конечного квантового состояния является одной из основных проблем квантовых вычислений.

Измерение должно носить неразрушающий характер, позволяя оставлять кубиты в состояниях пригодных для дальнейшего использования. Необходимо также обеспечить считывание информации с кубитов.

6.Реализация полного набора универсальных квантовых логических элементов.

Главные технологии для квантового компьютера:

-*Твердотельные квантовые точки* на полупроводниках: в качестве логических кубитов используются либо зарядовые состояния (нахождение или отсутствие электрона в определенной точке) либо направление электронного и/или ядерного спина в данной квантовой точке. Управление: через внешние потенциалы или лазерным импульсом.

-*Сверхпроводящие элементы* (джозефсоновские переходы, сквиды и др.). В качестве логических кубитов используются присутствие/отсутствие куперовской пары в определенной пространственной области. Управление: внешний потенциал/магнитный поток.

-*Ионы в вакуумных ловушках Пауля* (или атомы в оптических ловушках). В качестве логических кубитов используются основное / возбужденное состояния внешнего электрона в ионе. Управление: классические лазерные импульсы вдоль оси ловушки или направленные на индивидуальные ионы + колебательные моды ионного ансамбля.

-Смешанные технологии: использование заранее приготовленных запутанных состояний фотонов для управления атомными ансамблями или как элементы управления классическими вычислительными сетями.

Практическое применение квантовых компьютеров

Для практического применения пока не создано ни одного квантового компьютера, который бы удовлетворял всем вышеперечисленным условиям (см. выше общие требования).

На момент 2000г наибольший квантовый компьютер составлен всего из семи кубитов. Этого достаточно, чтобы реализовать алгоритм Шора и разложить число 15 на простые множители 3 и 5.К настоящему времени (2019 г.) неизвестно на основе какой технологии будет построен квантовый компьютер на 1000 кубитов. По прогнозам к 2020 г будут реализованы квантовые компьютеры на 100 кубитов.

12.5. Квантовый компьютер на основе спектрометра ядерного магнитного резонанса (ЯМР) [1]

В ЯМР-спектрометре высокого разрешения спины ядер исследуемой молекулы образуют кубиты. Каждое ядро имеет свою частоту резонанса в данном магнитном поле. При воздействии импульсом на ядро на его резонансной частоте оно начинает эволюционировать, остальные же ядра не испытывают никакого воздействия. Для того чтобы заставить эволюционировать другое ядро, нужно взять иную резонансную частоту и дать импульс на ней. Таким образом, импульсное воздействие на ядра на резонансной частоте представляет собой селективное воздействие на кубиты. При этом в молекуле есть прямая связь между спинами, поэтому она является идеальной заготовкой для квантового компьютера, а сам спектрометр представляет собой квантовый процессор.

При физической реализации логических вентилей необходимо воздействовать на квантовую частицу (кубит) радиочастотным импульсом.

Вентиль NOT соответствует перевороту спина $I_z \rightarrow -I_z$ под действием импульса $Y(\theta = \pi)$ (вращение намагниченности вокруг оси Y на угол π).

Вентиль CNOT выполняется на двух спинах $1/2$ с гамильтонианом $\hat{H} = \omega_k \hat{I}_{zk} + A \hat{I}_{zk} \hat{I}_{zl} + \hat{H}'_{imp}(t)$ (спин $\hat{I}_l$ контролирует $\hat{I}_k$). CNOT выполняется в три шага:

Импульс $Y\left(\frac{\pi}{2}\right)$ + свободная прецессия в течение времени $\tau = \frac{\pi}{A_{kl}}$ + импульс $X_k\left(\frac{\pi}{2}\right)$.

Если $I_{zl} = 1/2$ (контролирующий кубит в состоянии $|0\rangle$), то при указанных воздействиях контролируемый кубит совершает переходы $I_{zk} \rightarrow I_{xk} \rightarrow I_{yk} \rightarrow I_{zk}$.

Если $I_{zl} = -1/2$ (контролирующий кубит в состоянии $|1\rangle$), то результат эволюции контролируемого кубита другой: $I_{zk} \rightarrow I_{xk} \rightarrow -I_{yk} \rightarrow -I_{zk}$.

Таким образом, спин I_k эволюционирует по разному при разных положениях $I_{zl} = \pm 1/2$:

$CNOT|00\rangle = |00\rangle$, $CNOT|01\rangle = |01\rangle$, $CNOT|10\rangle = |11\rangle$, $CNOT|11\rangle = |10\rangle$. Здесь в $|i_1 i_2\rangle$ i_1 -состояние контролирующего кубита.

Однокубитовое преобразование Адамара в технике магнитного резонанса осуществляются 90° -импульсами: $Y\left(\frac{\pi}{2}\right)I_z \rightarrow I_x$, $Y\left(\frac{\pi}{2}\right)(-I_z) \rightarrow -I_x$.

Первые эксперименты на ядерных спинах двух атомов водорода в молекулах 2,3-дибромотиофена SCH:(CBr)₂:CH и на трех ядерных спинах — одном в атоме водорода H и двух в изотопах углерода ¹³C в молекулах трихлорэтилена CCl₂:CHCl — были поставлены в 1997 году в Оксфорде (Великобритания).

В случае использования ЯМР-спектрометра важно, что для селективного воздействия на ядерные спины молекулы необходимо, чтобы они заметно различались по резонансным частотам. Позднее были осуществлены квантовые операции в ЯМР-спектрометре с числом кубитов 3, 5, 6 и 7.

Главным преимуществом ЯМР-спектрометра является то, что в нем можно использовать огромное количество одинаковых молекул. При этом каждая молекула (точнее, ядра атомов, из которых она состоит) представляет собой квантовую систему. Постоянное магнитное поле выравнивает спины.

Последовательности радиочастотных импульсов, выполняющие роль определенных квантовых логических вентилей, осуществляют унитарные преобразования состояний соответствующих ядерных спинов одновременно для всех молекул. То есть селективное воздействие на отдельный кубит заменяется одновременным обращением к соответствующим кубитам во всех молекулах большого ансамбля. Компьютер такого рода получил название *ансамблевого (bulk-ensemble quantum computer) ЯМР квантового компьютера*. Такие компьютеры могут работать при комнатной температуре, а время декогерентизации квантовых состояний ядерных спинов составляет несколько секунд.

В области ЯМР квантовых компьютеров на органических жидкостях к настоящему времени достигнуты наибольшие успехи. Они обусловлены в основном хорошо развитой импульсной техникой ЯМР-спектроскопии, обеспечивающей выполнение различных операций над когерентными суперпозициями состояний ядерных спинов, и возможностью использования для этого стандартных ЯМР-спектрометров, работающих при комнатной температуре.

Основным ограничением ЯМР квантовых компьютеров является сложность инициализации начального состояния в квантовом регистре. Дело в том, что в большом ансамбле молекул исходное состояние кубитов различно, что осложняет приведение системы к начальному состоянию.

Другое ограничение ЯМР квантовых компьютеров связано с тем, что измеряемый на выходе системы сигнал экспоненциально убывает с ростом числа кубитов L . Кроме того, число ядерных кубитов в отдельной молекуле с сильно различающимися резонансными частотами ограничено. Это приводит к тому, что ЯМР квантовые компьютеры не могут иметь больше десяти кубитов. Их следует рассматривать лишь как прототипы будущих квантовых компьютеров, полезные для отработки принципов квантовых вычислений и проверки квантовых алгоритмов.

Преимущества твердотельных ЯМР-квантовых компьютеров:

1. Ядерные спины сами по себе являются кубитами.
2. Число кубитов в квантовом регистре может быть произвольно велико.
3. При низких температурах состояния ядерных спинов-кубитов характеризуются очень большими временами релаксации (и, соответственно, временами декогерентизации) по сравнению с кубитами на электронных состояниях.
4. Твердотельные структуры нанометрового масштаба, которые предполагается использовать в полупроводниковых ЯМР квантовых компьютерах, предназначены не для создания самих кубитов, как в случае сверхпроводниковых квантовых устройств, а лишь для задач управления кубитами и измерения их состояний.

Определенные дополнительные преимущества имеют, кроме того, твердотельные ЯМР квантовые компьютеры, работающие на принципе клеточного автомата. Для организации квантовых операций в двух и трехмерном ЯМР ансамблевом клеточном автомате наиболее предпочтительными представляются коллинеарные антиферромагнитные структуры шахматного типа, описываемые двумя магнитными подрешетками.

Недостатки ЯМР-компьютеров:

1. Невозможно масштабировать ЯМР-компьютер более чем до 20 кубитов.
2. Большие габариты устройства за счет электромагнитов.

Компьютеры на основе ядерного квадрупольного резонанса (ЯКР-компьютеры) в этом отношении предпочтительнее, т.к. не содержат больших электромагнитов, необходимых для создания постоянного магнитного поля. Квадрупольные ядра со спинами 1, 5/2 имеют три уровня энергии и являются кутритами.

12.6. Квантовые компьютеры на различной физической основе

Состояние современной высокоточной технологии и технологии высокочистых материалов уже сейчас позволяют приступить к экспериментальным работам по созданию элементов полупроводниковых ЯМР кубитовых компьютеров. Уже созданы простейшие фрагменты такого компьютера. Однако создание многокубитовых твердотельных структур – более далекая перспектива. Потребуется привлечение многих технологических и схемотехнических достижений современной микро- и нанoeлектроники, а также исследование и моделирование физических процессов, в частности процессов декогерентизации, в многокубитовых кубитовых системах.

Число предложенных вариантов многокубитовых кубитовых компьютеров постоянно растет. Широкую известность получил полупроводниковый вариант, основанный на схеме Б.Кейна, с индивидуальным обращением к отдельным кубитам. Предпринимаемые первые успешные экспериментальные шаги в направлении создания элементов такого кремниевого многокубитового ЯМР кубитового компьютера в Австралийском Центре технологии кубитовых компьютеров.

Кубитовый компьютер на ионных ловушках

Другой вариант кубитового компьютера основан на использовании ионных ловушек, когда в роли кубитов выступает уровень энергии ионов, захваченных ионными ловушками, которые создаются в вакууме определенной конфигурацией электрического поля в условиях лазерного охлаждения их до сверхнизких температур. В ионных ловушках содержатся ионы, выстроенные в ряд с помощью магнитного поля. Первый прототип кубитового компьютера, основанного на этом принципе, был предложен в 1995 году.

Ионы Ca^+, Ba^+, Sr^+, Hg^+ в ловушке образуют однородный кристалл и взаимодействуют друг с другом обмениваясь фононами (квантами колебательных возбуждений, которые являются вспомогательными кубитами). Состояние каждого иона находится под управлением поляризованного и сфокусированного лазерного пучка.

Допускаются состояния $|000...0\rangle$ и состояния $|111...1\rangle$. Сильное взаимодействие кубитов. Слабая связь с оборудованием.

Высокоточное измерение состояний требует сильной связи с оборудованием.

Кубитовое измерение отдельного атома состояние $|0\rangle$. облучение лазером, атом излучает 10^8 фотонов в секунду. Атомный приемник настроен на лазерную волну.

Кубитовое измерение отдельного атома состояние $|1\rangle$. облучение лазером, атом не излучает, атомный приемник не настроен на атомную волну.

Полупроводниковые кристаллы бесспинового моноизотопного кристалла кремния ^{28}Si , в котором атомы фосфора ^{31}P (кубиты) расположены в линейной цепочке (модель Кейна). Кубитом служит ядерный спин $1/2$, или электронный спин атома фосфора ^{31}P . Число кубитов в такой архитектуре не ограничено.

Кубитовые компьютеры на кубитовых точках

Квантовые точки - это искусственные атомноподобные наноструктурные элементы с конечным числом дискретных энергетических уровней. На электрон захваченный группой атомов воздействует лазерный пучок определенной частоты и переводит его в возбужденное состояние. Возбужденное состояние рассматривается как $|1\rangle$, Основное состояние как $|0\rangle$. Облучение лазерным пучком рассматривается как контролируемый not-вентиль (CNOT-вентиль).

Преимущество такого подхода состоит в сравнительно простом индивидуальном управлении отдельными кубитами. Основными недостатками квантовых компьютеров этого типа являются необходимость создания сверхнизких температур, обеспечение устойчивости состояния ионов в цепочке и ограниченность возможного числа кубитов — не более 40.

Квантовый компьютер на основе сквидов-сверхпроводящих интерференционных устройств (superconducting quantum interference devices)

При построении квантовых компьютеров на твердом теле используются следующие технологии: Молекулярная эпитаксия, нанолитография и зондовая микроскопия.

Молекулярная эпитаксия позволяет создавать совершенные моноатомные слои кристаллов, достигая атомных размеров по толщине.

Методы зондовой микроскопии позволяют наблюдать поверхность с атомным разрешением. Зонды можно использовать как атомный манипулятор, перемещая атомы на поверхность и обратно. Зонды работают как катализаторы локальных поверхностных химических реакций окисления, травления, осаждения материала. Они доставляют энергию локального возбуждения в форме электрического тока, напряжения, фотонов, механической энергии (деформации). Зонды могут измерять состояния атомных частиц.

Методы электронно-лучевой нанолитографии с разрешением 1-10 нм можно использовать при создании атомных структур квантовых компьютеров.

Квантовый компьютер на основе вакуумной технологии удержания ионов и атомов в ловушках

Используется размещение ионов или атомов в области минимума потенциала, создаваемого системой электродов и электромагнитных полей. Для подавления теплового движения атомов используется технология лазерного охлаждения. *Оптические пинцеты*- определенная конфигурация лазерных лучей, удерживающая атомы или ионы в определенном положении.

Квантовый компьютер на оптических фотонах:

Способ представления кубитов - использование поляризации фотонов.

Роль логических элементов выполняют светоделительные элементы.

Измерения осуществляются детектированием отдельных фотонов.

Инициализация кубитов – поляризация фотонов.

Фотоны недостаточно сильно взаимодействуют с окружением.

Использование перепутывание состояний. Детектирование одиночных фотонов представляет крайне сложную задачу. Управлять отдельными фотонами трудно.

12.7. Состояние квантовых компьютеров до 2012 г.

На рубеже 21 века во многих научных лабораториях были созданы однокубитные квантовые процессоры (по существу, управляемые двухуровневые системы, о которых можно было предполагать возможность масштабирования на много кубитов). Очень скоро был реализован жидкостной ЯМР — квантовый компьютер (до 7 кубит, IBM, И. Чанг)

В России разработкой вопросов физической реализации квантового компьютера занимается ряд исследовательских групп, ядро которых составляет школа академика К. А. Валиева: Физико-технологический институт РАН (лаборатория ФКК),

МГУ (ф-т ВМК, кафедра КИ, физический ф-т, кафедра КЭ), МФТИ, МИФИ, МИЭТ, КГУ, ЯрГУ, а также ряд сотрудников институтов РАН (ИТФ, ИФТТ и др.) и вузов.

2005 году группой Ю. Пашкина (кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории сверхпроводимости г. Москвы) при помощи японских специалистов был построен двухкубитный квантовый процессор на сверхпроводящих элементах. Примерно в это время до десятка кубит было сделано на ионах в ловушках Пауля (Д. Вайнленд, П. Цоллер, Р. Блатт).

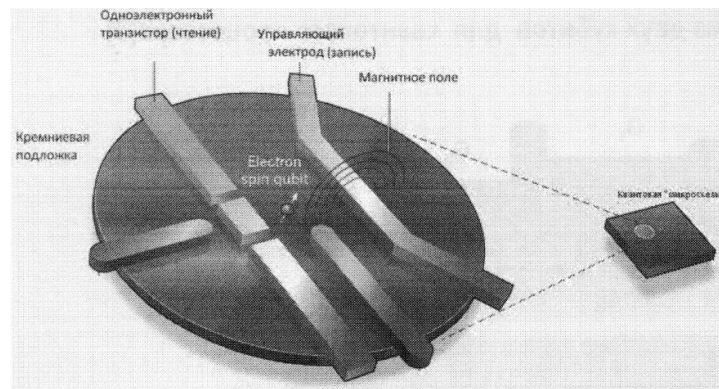
В ноябре 2009 года физикам из Национального института стандартов и технологий в США впервые удалось собрать программируемый квантовый компьютер, состоящий из двух кубит.

В феврале 2012 года компания IBM сообщила о достижении значительного прогресса в физической реализации квантовых вычислений с использованием сверхпроводящих кубитов которые, по мнению компании, позволят начать работы по созданию квантового компьютера

В апреле 2012 года группе исследователей из Южно-Калифорнийского университета, Технологического университета Дельфта, университета штата Айова, и Калифорнийского университета, Санта-Барбара, удалось построить двухкубитный квантовый компьютер на кристалле алмаза с азотными примесями (NV-центры, см. далее). Компьютер функционирует при комнатной температуре и теоретически является масштабируемым. В качестве двух логических кубитов использовались направления спина электрона и ядра азота соответственно. Для обеспечения защиты от влияния декогерентности была разработана целая система, которая формировала импульс микроволнового излучения определенной длительности и формы. При помощи этого компьютера реализован алгоритм Гровера для четырёх вариантов перебора, что позволило получить правильный ответ с первой попытки в 95 % случаев.

12.8. Разработки квантовых компьютеров после 2012 г.

**Запись и считывание данных из кремниевого кубита[4]
.09.2012**



© Nature / Lee C. Bassett, David D. Awschalom

Рис.12.2. Представлен полноценный кубит из пластинки кремния и атома фосфора и использован для записи и считывания информации.[4]

Австралийские физики Группа физиков под руководством Андреа Морелло (Andrea Morello) из университета Нового Южного Уэльса в Сиднее (Австралия) изготовили полноценный кубит из пластинки кремния и атома фосфора и впервые использовали его для записи и считывания информации, говорится в статье, опубликованной в журнале Nature. см. Рис.12.2.

Кубитом может быть спин электрона, принимающий состояния, условно называемые "верх" и "низ". Для своей работы компьютеры должны уметь менять состояние спина, то есть записывать информацию, и отслеживать это изменение, тем самым считывая обработанные данные.

Ключевым компонентом нового устройства является набор микроэлектродов, генерирующий микроскопическое магнитное поле, пульсирующее с частотой в 30 гигагерц. Это поле взаимодействует с электронами в атоме кубита и меняет их спин, тем самым записывает новую информацию до начала очередного цикла операций.

По словам ученых, такие кубиты способны функционировать без внешнего вмешательства в течение 200 микросекунд. Этого времени хватает на совершение около тысячи манипуляций, что достаточно для проведения несложных вычислений и опытов. Другим положительным качеством этих кубитов является их относительная дешевизна - их можно "печатать" при помощи современных технологий изготовления кремниевых микрочипов.

Морелло и его коллеги отмечают, что длительность работы таких кубитов можно многократно улучшить, снизив долю примесей в кремнии и усовершенствовав конструкцию электродов. В этом случае кубит сможет просуществовать в синхронизированном виде около

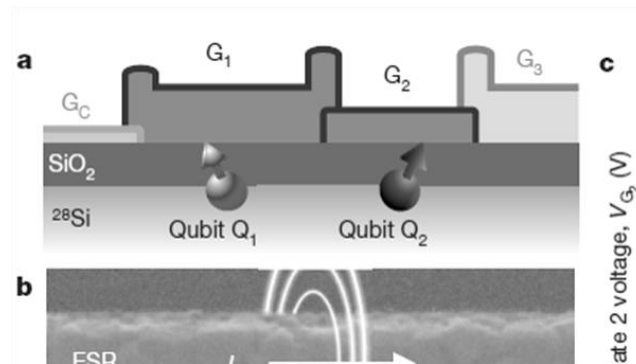
"Нам впервые удалось продемонстрировать способность представлять и манипулировать кубитом, управляя спином электронов в атоме. Это ключевой шаг на пути создания кремниевого квантового компьютера на основе единичных атомов-кубитов", - заключает один из участников исследования Эндрю Дзурак (Andrew Dzurak) из университета Нового Южного Уэльса.

Физики научились записывать и считывать данные из кремниевого кубита

По словам Дзурака, его лаборатория уже разработала и запатентовала технологию, которая позволяет производить чипы с тысячами и миллионами подобных кубитов, взаимодействующих друг с другом, при помощи тех же технологий, которые уже существуют сегодня.

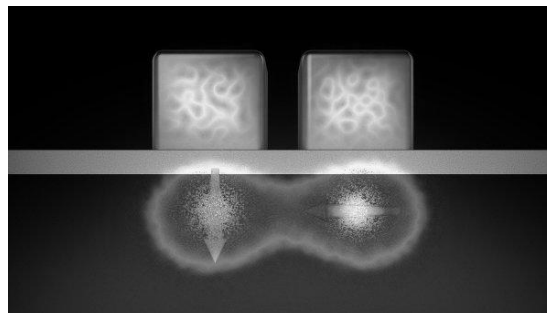
Создание кремниевого модуля из двух кубитов для квантового процессора[5]

Австралийские физики создали первый полноценный вычислительный модуль из двух кремниевых кубитов, способный выполнять квантовый аналог логической операции "ИЛИ", говорится в статье, опубликованной в журнале Nature.



© Фото: UNSW

Рис.12.3. Схема двух кубитового кремниевого модуля для операции «ИЛИ»[5]



© Фото: UNSW

Рис.12.4.Изображение двух кубитового кремниевого модуля [5]

" Удалось совершить первое вычисление внутри квантового кремниевого чипа, используя те технологии, которые применяются сегодня в полупроводниковой индустрии. Нам удалось достичь этого, используя обычные транзисторы, которые мы перестроили таким образом, что через них мог проходить только один электрон", заявил Эндрю Дзурак из университета Нового Южного Уэльса (Австралия).

Дзурак и его коллега по университету Андреа Морелло уже несколько лет разрабатывают компоненты, необходимые для сборки полноценного квантового компьютера. Так, в 2010 году они создали квантовый одноэлектронный транзистор, а в 2012 году — полноценный кремниевый кубит на основе атома фосфора (см. рис.П.9.). В 2013 году они собрали новую версию кубита, которая

позволяла почти со 100% точностью считывать данные из него и оставалась стабильной очень долго.

Замена атома фосфора на редкий изотоп кремния – кремний-29, и изменение структуры кубита, сделали его похожим на обычный полевой транзистор. Объединили два подобных кремниевых кубита, расположив их рядом и соединив их затворы друг с другом. Созданная структура представляет CNOT-вентиль – квантовый аналог устройства, исполняющего операцию "ИЛИ" в классических микросхемах. См рис.12.3-4.

Кубитом может быть спин электрона, принимающий состояния, условно называемые "верх" и "низ". Для своей работы компьютеры должны уметь менять состояние спина, то есть записывать информацию, и отслеживать это изменение, тем самым считывая обработанные данные.

Здесь представлен двойной логический элемент, который использует одиночные спины электронов в изотопически обогащенном кремнии¹⁴ и реализуется путем выполнения одно- и двухкубитовых операций в системе квантовых точек с использованием обменного взаимодействия. Реализованы ворота CNOT с помощью управляемых фазовых операций в сочетании с однокубитными операциями. Прямое управление затвором обеспечивает однозначную адресацию, а также переключаемое обменное взаимодействие, которое используется в двухцилиндровом вентиле с управляемой фазой. Независимо просматривая оба кубита, измеряются четкие антикорреляции в двухспиновых вероятностях затвора CNOT.

Создан первый в России элемент квантовых компьютеров[6]

05.2015г. Ученые из Лаборатории искусственных квантовых систем МФТИ, Российского квантового центра, МИСиС и ИФТТ РАН создали первый в России сверхпроводящий кубит — основной элемент будущих квантовых компьютеров, Основная часть работ по созданию устройства была выполнена на оборудовании Центра коллективного пользования МФТИ.

Квантовые биты или кубиты — главный составной элемент будущих квантовых компьютеров, На рис.12.5. показана фотография кубита микронного размера.

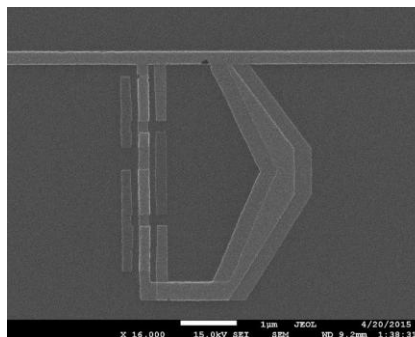


Рис.12.5. Кубит под электронным микроскопом с увеличением в 16 тысяч раз © Ivan Khrapach / RQC, MIPT, MIS&S, Institute of Solid State Physics[6]

Джозефсоновские контакты, состоят из двух сверхпроводников, разделенных тонким слоем диэлектрика. Электроны благодаря квантовым эффектам могут «просачиваться» (туннелировать) сквозь диэлектрик.

Кубиты, построенные из нескольких джозефсоновских контактов, ведут себя как атомы. Они могут находиться в основном и возбужденном состоянии, излучать и поглощать фотоны. Такие кубиты могут быть созданы с помощью существующих методов литографии, на которых основано современное производство микросхем.

Такой кубит сотрудникам Лаборатории искусственных квантовых систем (ИКС) Междисциплинарного центра фундаментальных исследований МФТИ под руководством профессора Олега Астафьева совместно с Центром коллективного пользования МФТИ. В эксперименте также участвовали сотрудники Лаборатории сверхпроводящих квантовых цепей Российского квантового центра (РКЦ) под руководством профессора Алексея Устинова и Лаборатории сверхпроводимости Института физики твердого тела (ИФТТ) РАН под руководством профессора Валерия Рязанова. Оборудование для получения кубита показано на рис.12.6.

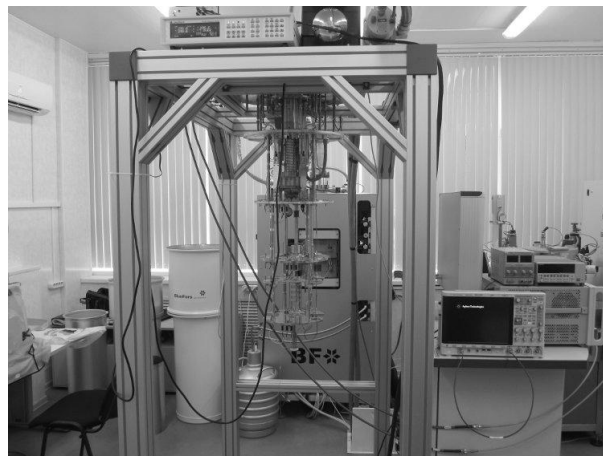


Рис.12.6. Оборудование для получения кубита © Ivan Khrapach / RQC, MIPT, MIS&S, Institute of Solid State Physics [6]

Благодаря новейшему литографическому оборудованию, установленному в МФТИ, ученым удалось создать шесть кубитов микронного размера. Каждый из них состоит из четырех джозефсоновских контактов на «петле» размером в один микрон. Сами контакты состоят из алюминиевых полосок, разделенных слоем диэлектрика (оксида алюминия) толщиной около 2 нанометров.

Созданный специалистами МФТИ кубит был затем перевезен в лабораторию РКЦ, где эта работа была завершена, после чего были проведены измерения: ученые прозондировали устройство микроволновым излучением и определили, что его свойства соответствуют заданным параметрам.

«Наша работа свидетельствует, что в России теперь есть технологии и команды ученых, которые могут включиться в мировую гонку построения квантовых компьютеров», — добавил Алексей Устинов.

Ранее группа под руководством Устинова в МИСиС при участии РКЦ измерила кубит, который был создан в Германии. Теперь ученые получили собственно российский кубит.

В МФТИ создана первая в России двухкубитная схема

30 Март, 2016. Учёные Лаборатории искусственных квантовых систем и Центра коллективного пользования МФТИ впервые в России создали квантовую схему из двух кубитов. Данная работа представляет собой следующий шаг к созданию будущих квантовых компьютеров. Годом ранее группа физиков из МФТИ, ИФТТ РАН, МИСиС и РКЦ разработала первый российский кубит и схему, обеспечивающую изменение его параметров. см рис. 12.7.

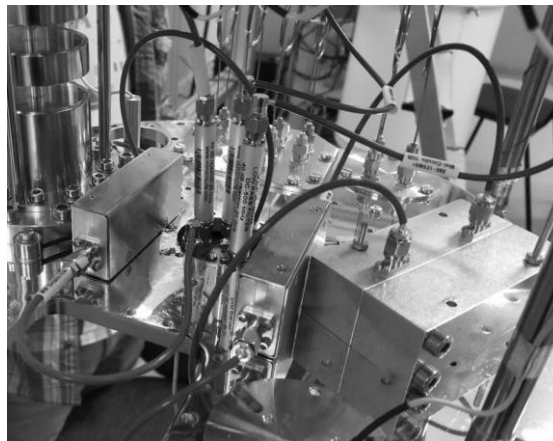


Рис.12.7. Криостат растворения с установленным устройством управления кубитами.

Создание квантового компьютера откроет принципиально новые возможности для обработки информации. Компьютер из нескольких тысяч кубитов сможет превзойти наиболее мощные современные суперкомпьютеры в решении целого ряда проблем. К таким вычислительным задачам относятся, в частности, криптография, задачи оптимизации в сложных системах, приложения искусственного интеллекта.

Физики создали и проверили в работе первый в мире 51-кубитный квантовый компьютер

Группа ученых из Гарвардского университета и Массачусетского технологического института под руководством Михаила Лукина, профессора физики из Гарварда и сооснователя Российского квантового центра, создала и успешно проверила программируемый квантовый компьютер на базе 51 кубита, став, таким образом, лидером среди участников квантовой гонки. Об этом сам Лукин сообщил, выступая с докладом на IV Международной конференции по квантовым технологиям в Москве (ICQT-2017) 14 июля.2017.

Как сообщил Лукин, выступая на конференции ICQT, он и его коллеги использовали кубиты на основе холодных атомов, которые удерживались оптическими «пинцетами» - специальным образом организованными лазерными лучами.

Лукину и его коллегам удалось решить с помощью своего квантового вычислителя задачу моделирования поведения квантовых систем из множества частиц, которая была практически нерешаема с помощью классических компьютеров. При расчете процессов термализации (охлаждения), обнаруживаются неожиданно стабильные состояния вещества. Более того, в результате им удалось предсказать несколько ранее неизвестных эффектов, которые затем были проверены с помощью обычных компьютеров. Полученные результаты были постфактум проверены на обычных компьютерах. Ученым удалось найти способ приближенных вычислений, которые помогли получить сходный результат на классическом компьютере.

В ближайшее время ученые намерены продолжить эксперименты с квантовым компьютером, возможно, они попытаются использовать эту систему для проверки алгоритмов квантовой оптимизации, которые позволяют превзойти существующие компьютеры.

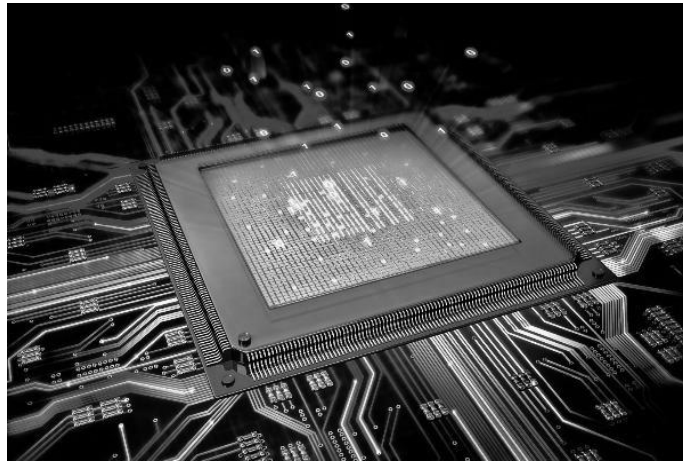


Рис.12.8. На снимке показан программируемый квантовый компьютер на базе 51 кубита группы Лукина. Кубиты на основе охлажденных атомов, которые удерживались оптическими «пинцетами» - специальным образом организованными лазерными лучами. Из доклада Лукина на IV Международной конференции по квантовым технологиям в Москве (ICQT-2017) 14 июля 2017. г.

Возможности квантовых компьютеров зависят от числа кубитов. Уже несколько десятков кубитов могут дать такой выигрыш в вычислительной мощности, который недостижим для классических компьютеров. До этого момента лидером в неформальной гонке за кубиты считалась квантовая лаборатория корпорации Google под руководством Джона Мартиниса, которая планирует эксперименты на компьютере с 49 кубитами. IBM уже проводит эксперименты с 17-кубитным устройством. Создание 51-кубитного компьютера – гигантский шаг вперед в этой области. см. рис. 12.8.

Большинство современных квантовых компьютеров основаны на использовании сверхпроводящих кубитов на основе контактов Джозефсона.

По словам представителя, IBM, которого цитирует издание Quartz, вычислительную мощность 25-кубитного компьютера можно симулировать на обычном ноутбуке. Для 45 кубитов понадобится суперкомпьютер, а при 50

кубитах «вы не сможете построить настолько крупную классическую вычислительную систему, чтобы симулировать квантовый компьютер такой мощности».

Множество научных групп сейчас пытаются создать универсальный квантовый компьютер, в эти проекты вкладывают средства многие правительства и корпорации, например, Google, IBM, Microsoft или китайский интернет-ритейлер Alibaba. Вычислительные элементы таких компьютеров – кубиты – построены на основе квантовых объектов: ионов, охлажденных атомов или фотонов, способных находиться в суперпозиции нескольких состояний. Это позволяет квантовым компьютерам одновременно, за один такт, делать сразу множество вычислений. Например, с их помощью можно моделировать поведение сложных квантовых систем, и создавать новые материалы с уникальными свойствами.

Физик из Google: мы близки к созданию "рабочего" квантового компьютера
07:3017.07.2017

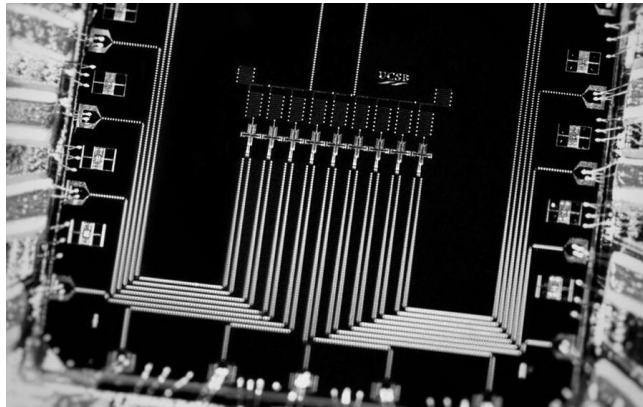
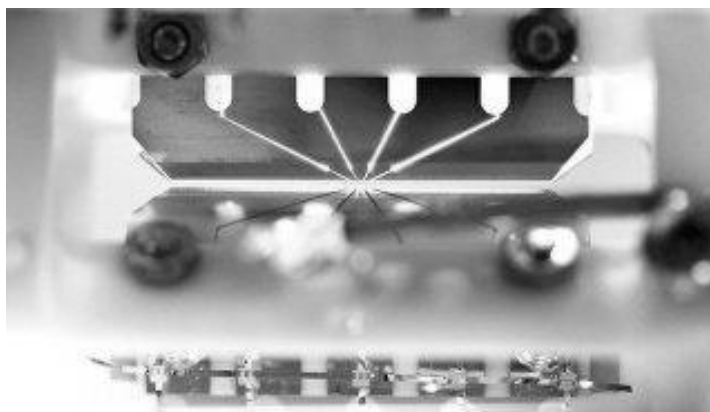


Рис.12.9 Квантовый процессор Google Фото Julian Kelly

В Москве прошла четвертая международная конференция по квантовым технологиям ICQT 2017, организатором которой выступает Российский квантовый центр. Ведущие физики мира, занимающиеся разработкой квантовых компьютеров, технологий квантовой криптографии и систем безопасной передачи данных, представили в ее рамках главные открытия и достижения в этих областях за последние годы.

Профессор Мартинис ведущий квантовый технолог Google рассказал на этой конференции о том, как его лаборатории движутся в сторону так называемого "квантового превосходства" – создания вычислительной системы на базе квантовых битов, кубитов.

Нужно убедиться, что параллельные вычисления внутри компьютера действительно происходят, и что его мощность корректным образом увеличивается по мере наращивания числа кубитов. Если вычислительная мощность и все ресурсы в нашем компьютере будет расти экспоненциально по мере добавления в него новых кубитов, то тогда время получения правильного ответа будет снижаться аналогичным образом. Это покажет, что удалось достичь "квантового превосходства".



© Фото : Shantanu Debnath and Emily Edwards

Рис.12.10. Первый репрограммируемый квантовый компьютер

У научной группы Мартиниса кубиты реализованы на сверхпроводящих элементах. Гибридный подход является особым алгоритмом, который позволяет соединять большое количество кубитов, необходимых для достижения "квантового превосходства" и управлять их поведением, сильно не усложняя при этом устройство всей системы. Сейчас в лаборатории тестируется 22-кубитная машина, она в целом работает. см. рис. 12.9-10.

Квантовые компьютеры больше всего помогут в изучении квантовых процессов в химии.

Они создаются для того, чтобы решать сложные квантовые проблемы и описывать поведение сложных квантовых систем. По текущей статистике, примерно 30-40% мощностей современных суперкомпьютеров тратится на решение задач из квантовой химии и на симуляцию процессов в квантовом мире.

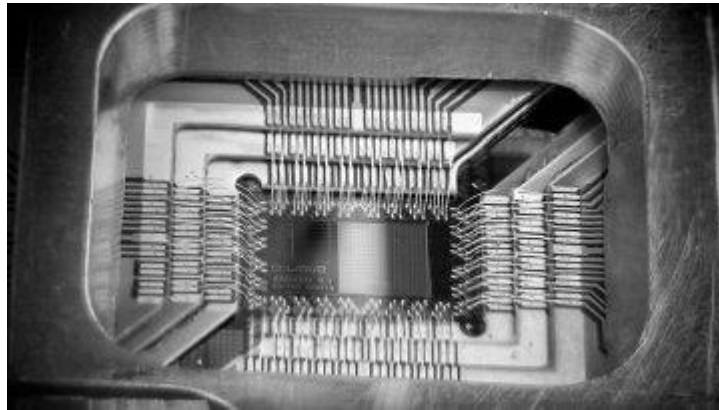
Минимальный уровень производительности квантового компьютера и число кубитов, необходимых для решения таких задач, заметно снизились в последние годы.

Решение многих практически важных задач не требует наличия алгоритмов и систем коррекции ошибок, и более простые квантовые вычислительные системы можно создать уже сегодня. Проблема пока заключается в том, что мы не знаем, будет ли тот или иной "аналоговый" алгоритм работать в каждом конкретном случае из-за отсутствия строгих доказательств, существующих в "мире" универсальных вычислительных машин.

Квантовый компьютер помог физикам подтвердить теорию относительности. Повторяется история развития компьютерной техники в целом – на заре компьютерной эры существовало большое число эвристических алгоритмов, для которых не было доказательств, но работа с ними помогала двигать вычислительную технику вперед.

Аналоговые компьютеры появились намного раньше их цифровых собратьев, и их очень долго использовали для решения серьезных задач, прежде чем

появились современные процессоры с их огромными вычислительными мощностями. Нечто похожее, будет происходить в квантовой индустрии в целом.



© D-Wave Systems, Inc.

Рис.12.11.Квантовый компьютер компании D-Wave.[7]

Кубиты и логические устройства, которые изготавливаются на их базе, используют третий энергетический уровень для своей работы, и поэтому они фактически являются не кубитами, а кутритами. И в целом, это очень хороший подход для создания квантовых вычислительных систем с инженерной точки зрения.

Существуют и другие предложения по использованию многомерных пространств для кодирования информации, но пока у нас нет теории, которая бы описывала поведение подобных кубитов.

Эта теория нужна для того, чтобы мы могли находить и исправлять ошибки, возникающие во время работы универсального квантового компьютера. Без подобной система коррекции ошибок мы не можем их использовать в принципе. Конечно, эти идеи интересны, но мне кажется, что полноценный компьютер на базе таких многоуровневых систем будет очень сложно создать.

Компания D-Wave (см.рис 12.11.) уже продает вычислительные мощности своих вычислительных приборов клиентам, и IBM тоже уже предлагает такие услуги.

Если говорить о самих системах шифрования, то существуют протоколы, защищенные от взлома при помощи квантовых компьютеров на уровне математики. Программисты активно разрабатывают их и приспособливают для практического применения.

Группа Мартиниса на квантовом устройстве Google провела расчет колебаний в атомной решетке графена при сверхвысоких магнитных полях. Они хорошо совпали с экспериментальными данными.

Google создала самый быстрый в мире квантовый компьютер

Компания Google создала в 2018г. квантовый компьютер, который на сегодняшний день является самым быстрым во всем мире. Представители техгиганта рассказали о разработке во время встречи Американского физического

общества. Квантовые компьютеры используются учеными для ускорения выполнения математических задач. Разработчики Google сумели создать 72-кубитное устройство. Трудностью в изготовлении подобных девайсов является влияние окружения, разрушающее квантовые соединения. Сейчас существует планка в 50 кубит. У представленной системы имеются конкуренты, однако они существенно уступают. IBM и Intel в 2017 г. уже презентовали разработки 49-кубитных процессоров для квантовых компьютеров. Ученые Гарвардского университета также создали 51-кубитную технологию, а некоторые рассказали о 53-кубитном симуляторе. На практике пока тестируют новинки и исследуют определенные задачи.

В абстрактной гонке за право прослыть первыми в открытых исследованиях создателями квантового компьютера, впереди в 2017 г. были 51-кубитовый квантовый компьютер группы Лукина из Гарвардского университета и Массачусетского технологического института, затем Google (22-кубитовый квантовый компьютер, в течении года планируется запустить 49-кубитовый), далее идут исследователи IBM (17-кубитовый аппарат).



Рис.12.12. 50-кубитный квантовый компьютер Microsoft.

Физики из Канады и России создают многомерный квантовый компьютер 06.2017

Физики из России и Канады создали первый кремниевый чип, способный и хранить в себе, и манипулировать многомерными кубитами, элементарными

ячейками квантовой памяти, что позволит упростить архитектуру квантовых компьютеров и ускорить их создание, говорится в статье, опубликованной в журнале Nature.

"На данный момент мы научились управлять десятью частотами. В системе из двух фотонов это обеспечило стомерность квантовых состояний. Повышая точность изготовления резонатора и электроники, отвечающей за разложение спектра, можно будет работать почти с сотней различных цветов. Именно такая тонкая настройка позволит нарастить число квантовых состояний системы", — рассказывает Роберто Морандотти (Roberto Morandotti), профессор Университета ИТМО в Санкт-Петербурге.

Кубиты представляют собой одновременно ячейки памяти и вычислительные модули квантового компьютера, которые могут хранить в себе и логический ноль, и единицу благодаря законам квантовой физики. Объединение многомерных кубитов в вычислительную систему позволяет быстро решать математические или физические задачи, которые при помощи перебора требуют время, сопоставимое со сроками жизни Вселенной.

Физики из МФТИ и РКЦ "утрамбовали" квантовый компьютер

Многие ученые, в том числе и ряд физиков из России, пытаются увеличить количество ячеек квантовой информации внутри одного кубита. Условно говоря, такие кубиты, которые ученые называют кудитами или кутритами, могут хранить в себе не один спектр значений, а два, три или даже больше.

Морандотти и его коллеги из зарубежных вузов и научных учреждений создали чип, позволяющий "утрамбовывать" практически неограниченное количество квантовых данных в пары запутанных фотонов и считывать их при необходимости.

Этот чип, представляет собой микрорезонатор — полое кремниевое кольцо, внутри которого свет будет двигаться по кругу, отражаясь от стенок. Чип можно построить таким образом, что определенные импульсы будут усиливаться, а другие — гаситься, что и позволяет получать лазерные импульсы с "гребенчатым" спектром, который удобно использовать для кодирования отдельных ячеек памяти.

Благодаря этому количество значений, кодируемых в подобном световом кубите, будет зависеть только от того, насколько точно приборы смогут видеть эту световую "расческу" и различать ее отдельные "зубья".

Помимо создания квантовых компьютеров, подобные резонаторы и системы кодирования сигнала можно применять и для других целей — передачи запутанных фотонов на большие расстояния и работы сверхточных квантовых линеек. В качестве демонстрации ученые выработали пары запутанных фотонов и передали их на расстояние в 24 километра, используя обычное оптическое волокно.

Главной проблемой подобных многоуровневых кубитов, как признают физики, является то, что частицы света могут периодически теряться при передаче на большие расстояния, что накладывает жесткие ограничения на максимальное число частиц, способных одновременно участвовать

в вычислениях. С другой стороны, данная проблема нивелируется тем, что ученые теперь могут обходить это ограничение, повышая уровень многомерности кубитов.

"Объединив на одном чипе генерацию многомерных запутанных фотонов с их сверхбыстрой обработкой, мы показали, что квантовыми системами можно управлять посредством стандартных телекоммуникационных элементов, таких как модуляторы и частотные фильтры. Это упростит развитие и распространение технологии", — заключает Хосе Азана (Jose Azana), коллега Морандотти по Национальному исследовательскому научному институту Канады в Квебеке.

Многоуровневые кудиты для квантового компьютера[8]

07.2016

Ученые из России придумали способ использования многоуровневых квантовых систем в качестве набора из нескольких одиночных кубитов, элементарных ячеек квантового компьютера, что приближает нас к созданию подобного вычислительного прибора, сообщают пресс-службы МФТИ и РКЦ.

"Мы получаем существенный выигрыш, поскольку многоуровневые кудиты в определенных физических реализациях контролировать проще, чем систему из соответствующего количества кубитов, а значит мы на шаг приближаемся к созданию полноценного квантового компьютера. Многоуровневые элементы обеспечивают преимущества и в других квантовых технологиях, например, в квантовой криптографии", — заявил Алексей Федоров из Российского квантового центра.

Кубиты представляют собой одновременно и ячейки памяти, и вычислительные модули квантового компьютера, которые могут одновременно хранить в себе и логический ноль, и единицу благодаря квантово-механическим эффектам и законам квантовой физики. Объединение нескольких кубитов в единую вычислительную систему позволяет быстро решать те математические или физические задачи, решение которых требует нереального времени.

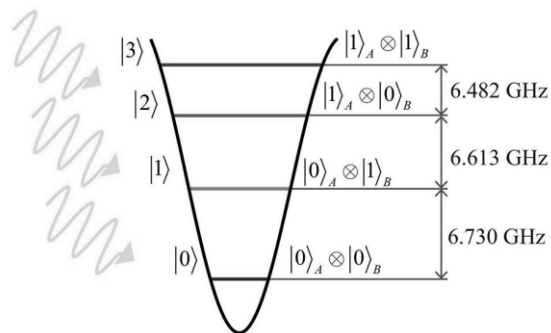
Ученые из РКЦ и МФТИ начали решать задачу управления множеством кубитов и их удержание в связанном состоянии путем уменьшения размера необходимой для вычислений системы.

Сейчас российские физики изучают возможность использования для вычислений не кубитов, а кудитов – квантовых объектов, в которых число возможных состояний составляет не один, как у кубитов, а два или больше. К примеру, существуют кутриты с тремя состояниями и кукварты с четырьмя состояниями. см рис. 12.12.

Расчеты, проделанные в РКЦ и МФТИ показали, что кудиты можно использовать в качестве полноценного аналога двух кубитов, а восьмиуровневую квантовую систему – в качестве "спрессованного" набора из трех кубитов. По его словам, кудит с пятью уровнями уже можно использовать для проведения квантовых вычислений, к примеру, сравнения большого количества чисел.

Сама идея использования многоуровневых систем для эмуляции многокубитных процессоров была предложена ранее в работах российских физиков из Казанского физико-технического института. Так, например,

для реализации двухкубитного алгоритма Дойча предлагалось использовать ядерный спин $3/2$, имеющий четыре различных состояния.



© Пресс-служба МФТИ/QMQM 2016

Рис.12.12. Многоуровневый кубит, созданный в МФТИ и РКЦ [8]

В РФ приступили к созданию многокубитового квантового компьютера

26.09. 2018

Российские ученые начали работу над созданием квантового компьютера. Об этом рассказал глава направления информационных исследований Фонда перспективных исследований Сергей Гарбук. Начались работы по созданию нового компьютера, проект будет реализовываться в 2018–2021 годах. Многокубитный квантовый компьютер может появиться в России осенью 2021 года. Для создания квантового компьютера будут использованы две базовые технологии создания квантовых логических элементов: фотонные чипы и нейтральные атомы. Основным исполнителем проекта является центр компетенций Национальной технологической инициативы в области квантовых технологий. Он создан на базе МГУ.

Китайские ученые разработали квантовую память

14.09. 2018

Группа физиков под руководством Ли Чуаньфэна из Китайского научно-технологического университета разработала уникальную квантовую память. Новое запоминающее устройство называется мультиплексной твердотельной квантовой памятью с множественными степенями свободы с возможностью работы в 12 режимах. Результаты эксперимента показывают, что во всех операциях памяти трехмерные квантовые состояния фотонов сохраняют точность приблизительно в 89 процентов. Сейчас расстояние, на которое возможно надежно осуществлять квантовую телепортацию фотона, ограничивается сотней километров. Вариант с использованием устройства для хранения квантовой информации позволит обеспечить квантовую связь на большее расстояние.

Неадиабатические и неабелевы голономические квантовые вентили

15.08.2018

Физики японского Йокогамского государственного университета добились создания голономных квантовых вентилях при нулевом магнитном поле и при комнатной температуре. В опубликованной в журнале *Nature Communications*

статье японские физики описали эксперимент, демонстрирующий так называемые неадиабатические и неабелевы голономические квантовые вентили сообщает Phys.org. Геометрическая фаза, или фаза Берри — ключевой элемент квантовой физики. Голономический квантовый вентиль, манипулирующий геометрической фазой, считается идеальным способом создания отказоустойчивого универсального квантового компьютера. Вентиль геометрической фазы, или голономический квантовый вентиль уже был экспериментально продемонстрирован в нескольких различных квантовых системах. Однако, предыдущие эксперименты требовали манипуляций невырожденным подпространством, что приводило к нарушению точности из-за нежелательных помех динамической фазы. Для того чтобы избежать помех, ученые использовали вырожденное подпространство для создания идеального логического кубита. На основе этого метода, в сочетании с поляризованными микроволнами, они смогли управлять геометрической фазой в алмазе при нулевом магнитном поле при комнатной температуре. Возможность использовать для создания квантового компьютера кристаллы времени доказали недавно финские ученые. Для этого они воспользовались сходством одного из типов кристаллов времени, так называемых майорановских кристаллов, с неабелевыми анионами, потенциальным компонентом квантового компьютера.

Фаза Берри — [фаза](#), набегаящая при прохождении квантовомеханической системой замкнутой траектории в пространстве параметров, когда система подвержена циклическому адиабатическому возмущению. Также называется *геометрической фазой, топологической фазой*, или *фазой Панчаратнама — Берри*.

Литература

1. Валиев К. А. Квантовые компьютеры и квантовые вычисления // УФН. — 2005. — Т. 175. — С. 3—39.
2. Кайе Ф., Лафлам Р., Моска М. Введение в квантовые вычисления. — Ижевск: РХД, 2009. — 360 с.
3. Гринштен Дж. Зайонн А. Квантовый вызов. Современное исследование оснований квантовой механики. Учебн. пособ.-Долгопрудный: Изд.во «Интеллект» 2012.-432 с.
4. Nature / Lee C. Bassett, David D. Awschalom
5. A. S. Dzurak, M. Veldhorst, , and etl., A two-qubit logic gate in silicon // Nature 526, 410–414, 2015.
6. Ivan Khrapach / RQC, MIPT, MIS&S, Institute of Solid State Physics
7. D-Wave Systems, Inc. Рис. 11.11. Квантовый компьютер компании D-Wave.
8. Пресс-служба МФТИ/QMQM 2016
11. Наука и предельная реальность: квантовая теория, космология и сложность/ Ред. сост.: Дж. Барроу, П. Дэвис, Ч. Харпер мл. — М. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2013, — 664 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования в области нанотехнологий фотоники и оптоинформатики ведутся очень интенсивно. Непрерывно появляются сообщения о новых материалах, новых устройствах и приборах, новых технологиях. Одним из направлений является исследование различных нелинейностей в периодических структурах и метаматериалах. Другим важным направлением являются исследования в области квантовых технологий и создания квантового компьютера и нейрокомпьютера.

Специально были рассмотрены технологии и устройства, которые находятся в стадии активной разработки ведущими конкурирующими лабораториями мира, такие как квантовые технологии и квантовые компьютеры на различных физических основах, так и устройства, которые уже созданы, например, солнечные батареи третьего поколения с высоким КПД.

В настоящее время около 30% валового национального продукта США производится на основе квантовой механики. Квантовая механика стремительно превращается в инженерную науку, технику и технологию.

Быстро развивающиеся **NBIC**-технологии (**N**ано-нанотехнологии) включая новые нанотехнологии фотоники и оптоинформатики, (**B**io-биотехнологии клеточные и молекулярные), (**I**nform-информационные технологии), (**C**ognito-технологии познания, искусственный интеллект) являются ключевыми технологиями. Они вносят решающий вклад в шестой технологический уклад и начинающуюся четвертую промышленную революцию в двадцатых годах XXI века, которая приведет нас в «новый дивный мир веществ и существ».

После Указа Президента РФ «О стратегии научно-технологического развития РФ» от 1.12. 2016 г. правительством после 1 марта 2017 г. утвержден план мероприятий по реализации Указа «Дорожная карта» по восьми программам объемом 8 млрд руб.:

AutoNet –беспилотные авто

AeroNet- беспилотные летательные аппараты

MarinNet- морские интеллектуальные системы

EnergyNet-умная энергетика

SafeNet-системы безопасности

NeuroNet - нейротехнологии

HealthNet-персональная медицина

FoodNet - система персонального производства еды.

NV-центр [П1]

NV-центр (англ. nitrogen-vacancy center) или азото-замещённая вакансия в алмазе — это один из многочисленных точечных дефектов алмаза. Дефект представляет собой нарушение строения кристаллической решётки алмаза, возникающий при удалении атома углерода из узла решётки и связывания образовавшейся вакансии с атомом азота.

Уникальность дефекта заключается в том, что его свойства практически аналогичны свойствам атома, «замороженного» в кристаллической решётке алмаза. Электронные спины индивидуального центра легко манипулируются светом, магнитным, электрическим и микроволновыми полями, что позволяет записывать квантовую информацию на спине ядра центра. Такая манипуляция возможна даже при комнатной температуре. Центр имеет продолжительное, достигающее нескольких миллисекунд, время хранения наведённой спиновой поляризации. В настоящее время N-V центр может рассматриваться как базовый элемент будущего квантового процессора, необходимого для создания компьютера, линий связи с квантовым протоколом безопасности и других применений спинтроники.

Основным преимуществом "алмазных кубитов" над их сверхпроводящими аналогами, является то, что их можно использовать для создания "долгой" квантовой памяти благодаря возможности перенесения кубита на ядерный спин.

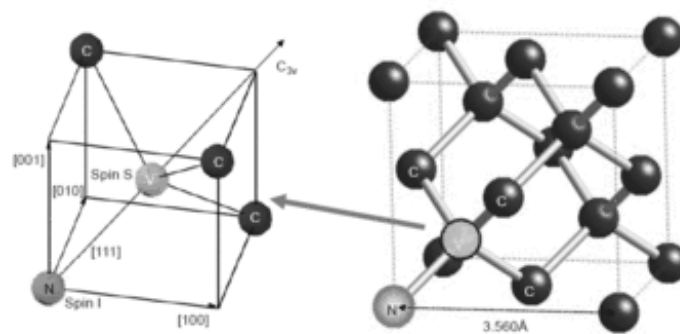


Рис. П.1. Упрощенная структура N-V– центра.

NV центр является дефектом кристаллической решётки алмаза. Дефект включает в себя вакансию решётки со связанным с ней атомом азота. Размер решётки составляет 3,5 ангстрема. Ось симметрии проходит по линии, соединяющей вакансию и атом азота, и проходит по линии [111].

Методы исследования

Из спектроскопических исследований известно, что этот дефект может иметь отрицательный (N-V⁻) или нейтральный (N-V⁰) заряд. В исследованиях использовались различные методы: оптическое поглощение, фотолюминесценция (ФЛ) электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) и оптически детектируемый магнитный резонанс (ОДМР) который можно считать гибридом ФЛ и ЭПР. Наиболее подробную картину взаимодействия дает ЭПР. Атом азота имеет пять

валентных электронов. Три из них ковалентно связаны с близлежащими атомами углерода, а два — с вакансией. Дополнительный электрон центр захватывает со «стороны» (видимо, от другого атома азота). Иногда центр теряет этот электрон превращаясь в нейтральный[9].

У отрицательно заряженного центра N-V⁻ электрон находится рядом с вакансией, образуя спиновую пару S=1 с одним из валентных электронов вакансии. Как и в N-V0 электроны вакансии обмениваются ролями, сохраняя полную тригональную симметрию. Состояние N-V⁻ обычно называют NV центром. Электрон находится большую часть времени (90 %) вблизи вакансии NV-центра

NV центры как правило случайно разбросаны в теле алмаза. Однако ионная имплантация позволяет создавать центры в определенно заданном месте.

Энергетическая структура уровней NV центра

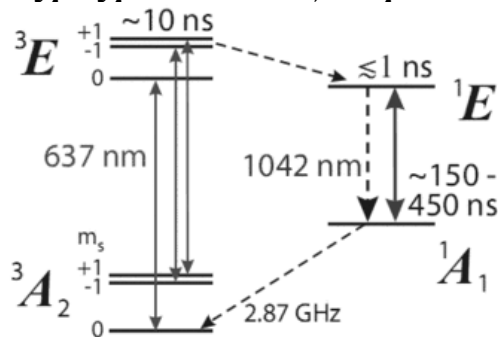


Рис.П.2. Схема уровней N-V⁻ центра.

Электронные переходы между основными ³A и возбужденными ³E состояниями, разделенными 1.945 eV (637 nm) и определяющими спектр поглощения и люминесценции. Состояние ³A расщеплено на 1027 гаусс (~5.6 μeV), а состояние ³E — на 508 gauss (~2.9 μeV). Числа 0, ±1 обозначают величину спина; расщепление из-за спин-орбитального вырождения не показано.

Энергетическая структура N-V⁻ центров изучалась теоретически и экспериментально. В экспериментах, в основном, применялся комбинированный способ возбуждения — метод электронного параметрического резонанса и лазерное излучение.

Гамильтониан

Спиновый гамильтониан центра, у которого в вакансии находится изотоп азота ¹⁴N, имеет вид

$$\hat{H} = D\hat{S}_z^2 + g\beta\hat{S}_zB + AIS + g_n\beta_n\hat{I}_zB + Q\hat{I}_z^2 \quad (\text{П.1})$$

где D и A — тензоры тонкого и сверхтонкого расщепления, Q — тензор квадрупольного ядерного расщепления, $g, g_n, \beta, \beta_{e,n}$ — электронный и ядерный факторы g и магнетоны Бора.

$\hat{S} = (\hat{S}_x, \hat{S}_y, \hat{S}_z)$ - эффективный электронный спиновой оператор. $\hat{I} = (\hat{I}_x, \hat{I}_y, \hat{I}_z)$ - оператор спина ядра.

Таблица П 1			
	D, MHz	A, MHz	Q, MHz
3	2870	-2.166	4.945
3	1420	40	

Схема уровней представлена на рис.П.2. Для того чтобы определить собственные состояния центра, его рассматривают как молекулу, а в расчётах применяют метод линейной комбинации атомных орбиталей. Также используется теория групп, учитывающая как симметрию алмазной кристаллической структуры, так и симметрию самого NV. Энергетические уровни помечены в соответствии с симметрией группы C_{3v} , A_1 , A_2 и E. Числа 3 в $^3A_2$ и 1 в $^1A_1$ представляют число разрешённых m_s спиновых состояний, или спиновую мультиплетность, лежащую от $-S$ до S при полном числе $2S+1$ возможных состояний. Если $S = 1$, m_s может принимать значения $m_s = -1, 0, 1$. Уровень $^1A_1$ предсказан теорией и играет важную роль в подавлении фотолюминесценции, но прямого экспериментального наблюдения этого состояния пока не было.

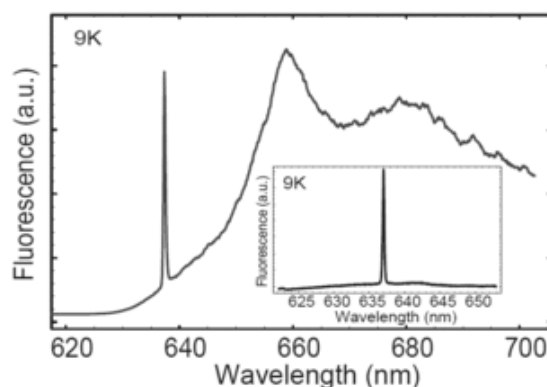


Рис. П.3. Спектр флуоресценции N-V- центра при температуре 9 К. Узкий пик является т. н. люминесценцией нулевой фононной линии (англ. zero phonon line). В этом пике содержится около 4 % всей люминесценции.

В отсутствие внешнего магнитного поля основное и возбужденное состояния расщеплены магнитным взаимодействием между двумя неспаренными электронами N-V- центра: при параллельных спинах электронов ($m_s = \pm 1$) их энергия больше, чем в случае с антипараллельными спинами ($m_s = 0$).

Чем дальше отделены электроны, тем слабее взаимодействие D (приблизительно $D \sim 1/r^3$). Иными словами, меньшее расщепление возбужденного состояния означает большую удалённость друг от друга электронов. Когда N-V- находится во внешнем магнитном поле, оно не влияет ни на состояния $m_s = 0$ ни на $^1A_1$ состояние (из-за того, что $S = 0$), но оно расщепляет $m_s = \pm 1$ уровни. Если магнитное поле сориентировано вдоль оси дефекта и его

величина достигает 1027 Гаусс (или 508 Гаусс), то $m_s = -1$ и $m_s = 0$ уровни в основном (или возбужденном) состоянии имеют одинаковую энергию. При этом они сильно взаимодействуют через т. н. спиновую поляризацию, что очень сильно влияет на интенсивность оптического поглощения и люминесценции этих уровней.

Необходимо иметь в виду, что переходы между электронными состояниями происходят с сохранением полного спина. По этой причине переходы ${}^3E \leftrightarrow {}^1A$ and ${}^1A \leftrightarrow {}^3A$ безизлучательные и тушат люминесценцию (см.рис.П.2). Тогда как переход $m_s = -1 \leftrightarrow m_s = 0$ запрещён в отсутствие поля и становится разрешённым, когда магнитное поле перемешивает $m_s = -1$ и $m_s = 0$ уровни основного состояния. Результатом является то, что интенсивность люминесценции можно сильно модулировать магнитным полем.

Возбуждённое состояние ${}^3E$ дополнительно расщеплено благодаря орбитальному вырождению и спин-орбитальному взаимодействию. Это расщепление может быть промодулировано внешним статическим как электрическим, так и магнитным полями. Расстояние между уровнями $m_s = 0$ и $m_s = \pm 1$ приходится на микроволновый диапазон (~ 2.88 ГГц). Облучая центр микроволновым полем, можно изменять населённость подуровней основного состояния и тем самым модулировать интенсивность люминесценции. Эта техника называется методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР).

Сила осциллятора перехода (${}^3A \leftrightarrow {}^3E$)

Сила осциллятора-безразмерная величина которая равна вероятности квантовых переходов в процессах излучения, фотопоглощения и кулоновского возбуждения атомных, молекулярных или ядерных систем. В случае электронных переходов в атомах электрические дипольные силы осцилляторов составляют десятые доли единицы, для магнитных дипольных и электрических квадрупольных переходов порядка $10^{-6} \div 10^{-8}$.

Сила осциллятора для электрического дипольного перехода между состояниями и с энергиями $E_i = \hbar\omega_i$, $E_f = \hbar\omega_f$

$$F_{fi} = \frac{2m}{\hbar e^2} (\omega_f - \omega_i) \left| \langle f | \hat{D}_z | i \rangle \right|^2, \quad (\text{П.2})$$

где m и e масса и заряд электрона, $\hat{D}_z$ -оператор проекции дипольного момента.

Переход из основного триплетного состояния A^3 в возбужденное триплетное состояние E^3 имеет большую силу осциллятора — 0,12 (для сравнения D1 линия Rb87 имеет 0.6956), что позволяет легко детектировать этот переход оптическими методами. Хотя тонкая структура возбужденного состояния сильно зависит от окружения центра, но известно, что переход из возбужденного $m_s=0$ (${}^3E$) в основное $m_s=0$ (${}^3A$) состояние сохраняет спин состояния. Тогда как переход из состояний $m_s=\pm 1$ (${}^3E$) в $m_s=0$ (${}^3A$) происходит безизлучательным способом. Этот переход осуществляется в два этапа — через синглетное состояние $1A$.

Существует также дополнительное расщепление состояний $m_s = \pm 1$ являющееся результатом сверхтонкого взаимодействия между ядерным и

электронным спинами. В итоге, спектр поглощения и люминесценции N-V– центра состоит приблизительно из дюжины узких линий разделённых на несколько МГц-ГГц. Интенсивность и положение этих линий может быть промодулированы различными способами.

Изготовление NV-центров

Даже высокочистый природный и синтетический (IIa типа) алмаз содержит небольшую концентрацию NV-центров. (Высокочистый синтетический алмаз изготавливают с помощью химического осаждения из паровой фазы (CVD)). Если же концентрация центров недостаточна, то образцы облучают и отжигают. Облучение ведут высокоэнергетическими частицами (10-80 кэВ). Это может быть поток электронов, протонов, нейтронов и гамма-частиц. NV–центры создаются на глубине до 60 мкм. Интересно, что NV0 в основном залегают до 0.2 мкм глубин. Созданные вакансии при комнатной температуре малоподвижны, однако, при повышении температуры (выше 800С) их подвижность значительно вырастает. Атом азота, внедрённый в решётку, захватывает одну из вакансий и создает с другой соседней вакансией.

Алмаз известен тем, что его решетка имеет внутренние напряжения, которые расщепляют, смещают и уширяют уровни NV-центра. Для регистрации узких линий (~10 MHz) на переходе $^3A \leftrightarrow ^3E$ нужно принимать особые меры к качеству кристалла. Для этого используют высоко-чистый природный алмаз или синтетически изготовленный (IIa типа). Для исследования центров обычно применяют конфокальный сканирующий микроскоп, имеющий субмикронное разрешение (~250 нм).

Литература.

1. NV –центры //Nature 526, 410–414 ,2015

Тематический план
дисциплины «ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ ФОТОНИКИ И
ОПТОИНФОРМАТИКИ»

Тема 1 НАНОФОТОНИКА и ОПТОИНФОРМАТИКА

Тема 2 ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Тема 3 ФОТОПРИЕМНИКИ

Тема 4 МОДУЛЯТОРЫ

Тема 5 ОПТИКА НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД

Тема 6 ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

Тема 7 ТЕХНОЛОГИИ НАНОПЛАЗМОНИКИ

Тема 8 ОПТИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ, ХРАНЕНИЕ И СЧИТЫВАНИЕ
ИНФОРМАЦИИ

Тема 9 ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

Тема 10 ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Тема 11 КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ И ОПЕРАЦИИ

Тема 12 КВАНТОВЫЙ КОМПЬЮТЕР

Примерные вопросы к экзамену по дисциплине

«ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ ФОТОНИКИ И ОПТОИНФОРМАТИКИ»

1. Светоизлучающие диоды. Материалы и структуры. Квантово-размерные лазеры и лазеры с микрорезонаторами.
2. Полупроводниковые вертикально-излучающие лазеры (VCSEL). Фотонно-кристаллические лазеры с микрорезонаторами. Случайные лазеры.
3. Полупроводниковые детекторы фотонов для оптических приемников.
4. Солнечные элементы на основе металлоорганических перовскитов (МОП).
5. Электрооптические модуляторы. Интегрально-оптические модуляторы света. Электропоглощающие модуляторы на основе Эффекта Келдыша-Франца и квантоворазмерного эффекта Штарка
6. Магнитооптические модуляторы света. Акустооптические модуляторы света
7. Характеристики волоконных световодов. Технология изготовления и применения световодов. Специальные волноводы. Фоконы, Граданы, Сельфок.
8. Активные элементы интегральной оптики. Технология интегральной оптики.
9. Волоконно-оптические системы связи. Волноводные оптические усилители и лазеры. Волоконный усилитель легированный эрбием (EDFA).
10. Фотонные кристаллы. Фотонные фракталы.
11. Квантовая наноплазмоника. Нанолазер на поверхностных плазмонах (спейзер). Устройства наноплазмоники. Плазмонный графеновый чип.
12. Оптические метаматериалы. «Правые» и «Левые» изотропные среды. Оптические плазмонные метаматериалы. Применение оптических метаматериалов.
13. Элементы памяти на макроскопических структурных изменениях (нарушениях формы) носителя. Магнитные элементы памяти. Электрические элементы памяти.
14. Оптические элементы памяти. Амплитудная бистабильность в пассивном кольцевом оптическом резонаторе. Бистабильные оптические устройства.
15. Голографические элементы памяти. Оперативные запоминающие голографические устройства.
- Сегнетоэлектрические энергонезависимые запоминающие устройства
16. Оптические технологии. Оптические логические устройства на основе оптической бистабильности
- Аналоговые процессоры.
17. Коммерческий оптический компьютер EnLight 256. Технология Lenslet. Элементная база Enlight256.
- Мемристор
18. Квантовая нанотехнология. Постулаты квантовой механики. Квантовая суперпозиция состояний.
19. Получение запутанных квантовых состояний. Спонтанное параметрическое рассеяние света. Бифотоны.
20. Мысленный эксперимент Эйнштейна-Подольского-Розена-Бома. Неравенства Белла. Формализм. Нарушение неравенства Белла. Экспериментальная проверка неравенств Белла.
21. Квантовая телепортация состояний. Алгоритм передачи.

22.Измерение. Кубиты. Однокубитовые вентили. Трёхмерная визуализация кубита-сферы Блоха.

Логические элементы, действующие на два кубита. Универсальные квантовые вентили. базис Белла

23.Теорема о запрете клонирования. Доказательство.

24.Структура квантового компьютера. Идеальный квантовый компьютер. Сравнение квантового компьютера с оптическим компьютером.

25.Физические проблемы квантовых компьютеров. Методы подавления декогеренции. Фазовая декогеренция кубита. Общие требования для реализации квантового компьютера.

26.Квантовый компьютер на основе спектрометра ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Квантовые компьютеры на различной физической основе.