



PERMINATIONAL RESEARCH POLYTECHNIC UNIVERSITY

Факультет прикладной математики и механики Кафедра общей физики

БЕСПРОЗВАННЫХ В.Г.

# МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «НЕЛИНЕЙНАЯ ОПТИКА»

Методические указания утверждены на заседании кафедры общей физики «25» октября 2017 г., протокол № 5



# СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Требования техники безопасности при работе с лазерными источ-	
никами излучения	3
Лабораторная работа № 1. Генерация второй гармоники	6
Лабораторная работа № 2. Исследование излучения накачки	
параметрического генератора света	14
Лабораторная работа № 3. Определение энергетических харак-	
теристик параметрического генератора света	20
Лабораторная работа № 4. Исследование спектральных харак-	
теристик параметрического генератора света	25
Лабораторная работа № 5. Исследование призменного стретчера	
и призменного компрессора	30
Лабораторная работа № 6. Исследование оптического бистабиль-	
ного устройства	36
Лабораторная работа № 7. Определение коэффициента связи мод	
в волоконном световоде	42
Лабораторная работа № 8. Исследование угловой структуры	
второй гармоники	46
Лабораторная работа № 9. Генерация суперконтинуума в опти-	
ческом волокне на основе эффекта фазовой самомодуляции	51
Список литературы	56

# Требования техники безопасности при работе с лазерными источниками излучения

Излучение, генерируемое лазерами, занимает довольно широкий спектр электромагнитных колебаний. Разные длины волн по-разному воздействуют на живые ткани.

Ультрафиолетовое излучение. Энергия квантов ультрафиолетового излучения в диапазоне длин волн от 350 нм до 500 нм меняется в пределах от 3,5 эВ до 25 эВ соответственно. Фотоны с энергией более 10 эВ способны вызвать ионизацию различных атомов и молекул, составляющих основу живой ткани. Степень поражения кожи ультрафиолетовым излучением зависит от поглощенной энергии излучения.

Инфракрасное излучение. Низкая энергия фотонов инфракрасного излучения (менее 1,5 эВ) недостаточна для изменения электронных состояний атомов, входящих в состав живой ткани. Главным эффектом воздействия является нагрев ткани при поглощении инфракрасного излучения. Ввиду того, что вода хорошо поглощает в инфракрасном диапазоне, большинство биологических материалов для этих длин волн непрозрачны. Глубина проникновения зависит от длины волны падающего излучения. Так, например, существует участок высокой прозрачности на длинах волн от 0,75 мкм до 1,3 мкм при максимуме прозрачности в районе 1,1 мкм. На этой длине волны около 20 % энергии, падающей на поверхностный слой кожи, проникает на глубину до 5 мм. Кожа человека достаточно хорошо противодействует инфракрасному облучению, так как она способна рассеивать тепло благодаря кровообращению и понижать температуру ткани вследствие испарения влаги с поверхности. Значительно труднее от инфракрасного облучения защитить глаза, в них тепло практически не рассеивается, и хрусталик, фокусирующий излучение на сетчатке, усиливает эффект биологического воздействия. Все это заставляет при работе с лазерами обращать особое внимание на защиту глаз от инфракрасного облучения.

Видимая область. На пути к сетчатке глаза световое излучение видимой области не испытывает заметного поглощения в тканях и веществах глазной камеры. Энергия световых фотонов сравнительно невелика (1,5...3,5 эВ). При обычном дневном освещении видимое световое излучение вызывает цепную фотохимическую реакцию в светочувствительном веществе – родопсине, входящем в состав клеток сетчатки. Конечным результатом этого

процесса и является ощущение световых зрительных образов. «Вспышечная слепота» человека – явление, обусловленное слепящим действием света, под действие излучения с которым понимается уровнем плотности, достаточную величину, отчетливой превышающим ДЛЯ видимости предметов. Слепящим считается любое световое излучение, которое вместо помощи зрению затрудняет его. По выходе из резонатора лазерное излучение сталкивается с молекулами воздуха, углекислого газа, мельчайшими частицами пыли, аэрозолями и другими частицами, взвешенными в воздухе. Эти частицы рассеивают лазерное излучение, которое может создать уровни энергии, опасные для зрения человека. Наиболее опасным является отраженное лазерное излучение. Величина отраженной энергии зависит от свойств объектов, расположенных поверхности В зоне облучения.

Таким образом, при работе человека с лазерами надо рассматривать три случая поражения лазерным излучением: 1) человек находится под прямым воздействием излучения, 2) человек попадает в зону зеркально отраженного луча, 3) человек находится под воздействием диффузно рассеянного излучения.

Самым опасным для глаз и незащищенных поверхностей кожи человека является воздействие прямого лазерного излучения, при этом уровни плотности энергии, вызывающие тяжелые последствия, сравнительно невелики. Не менее опасным для органа зрения человека является зеркально отраженное лазерное излучение, уровень которого определяется коэффициентом отражения поверхности, мощностью и длительностью лазерного излучения. Представляет опасность для глаз также и диффузно рассеянное отражение от стен, приборов и др. Опасность воздействия излучения лазеров может быть значительно уменьшена путем экранирования рабочих зон, рациональным расположением рабочих мест, а также мерами личной безопасности. Кроме лазерного излучения, на работающий персонал может воздействовать также ряд неблагоприятных факторов, например, в состав оборудования импульсных лазеров входит аппаратура, работающая при высоких напряжениях (накопительные конденсаторы, лампы-вспышки).

Меры защиты от лазерного облучения определяются типом лазера и способом его использования. К работе на лазерных установках следует допускать лиц, сдавших зачет по технике безопасности.

Меры предосторожности. Запрещается прямо смотреть на луч лазера или на его зеркальное отражение. Не следует наводить луч лазера, глядя на него невооруженным глазом, так как наблюдение вдоль оси лазерного луча значительно увеличивает опасность поражения органа зрения в результате отражения. Необходимо принимать меры, исключающие возможность приближения персонала к предполагаемой траектории пучка. Точки фокусировки пучка должны быть защищены диафрагмами; в конце пучка устанавливается ловушка для поглощения излучения. Для уменьшения рассеяния света на кювете, линзе, призме и других элементах, стоящих на пути распространения светового пучка, каждый из них снабжается блендами. На конечном участке лазерного пучка рекомендуется устанавливать поглотитель.

Индивидуальная защита глаз достигается применением специальных светофильтров, оптическая плотность которых на всех длинах волн, излучаемых лазером, должна быть достаточно большой для того, чтобы снизить интенсивность облучения глаз до безопасной величины. Нужно всегда помнить, что защитные очки обеспечивают лишь частичную защиту. Необходимо использовать только те очки, которые рассчитаны на защиту от излучения данного лазера, при этом должна быть исключена возможность ошибочного применения очков, рассчитанных на другую длину волны. Работы с лазерами рекомендуется проводить при ярком общем освещении. В этом случае размеры зрачков наименьшие, что способствует уменьшению энергии излучения, которая может случайно попасть в глаза. Защита от ультрафиолетовых и инфракрасных лучей наиболее ответственна, так как глаза человека не восприимчивы к ним. При работе с такими лазерами мишень должна тщательно экранироваться, а руки и одежду следует держать как можно дальше от нее. Запрещается работать без заземления, со снятыми крышками излучателя, в режимах, превышающих технические данные лазера.

Аварийное выключение лазера производится кнопкой "STOP" на передней панели блока питания. На дверях помещения, в котором расположены особо мошные лазерные установки, вывешиваются предупредительные знаки лазерной опасности. При работе с лазерами правила соблюдать пожарной особенно следует всегда И электробезопасности. Даже при работе с маломощными лазерами существует опасность поражения электрическим током.

# Лабораторная работа № 1. Генерация второй гармоники

## Цель работы:

1. Ознакомление с физическими основами процессов генерации второй гармоники.

2. Закрепление навыков экспериментального исследования характеристик волоконно-оптических элементов и устройств.

3. Определение эффективности генерации второй гармоники.

## Оборудование, приборы и принадлежности:

1. Волоконный ИК-лазер (длина волны 1064 нм).

2. Линза.

3. Нелинейный кристалл LiNbO<sub>3</sub> для генерации второй гармоники (длина волны 532 нм).

4. Светофильтр СЗС-9.

5. Измеритель мощности Ophir Nova 2.

### Краткие теоретические сведения

Эффект генерации суммарных частот заключается в том, что при поступлении в квадратично-нелинейную среду световых волн на частотах  $\omega_1$  и  $\omega_2$  на выходе возникает электромагнитная волна с частотой  $\omega_3$ :

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$$

Если  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ , т.е. в среде распространяются волны одной частоты, то излучение на суммарной частоте является их второй гармоникой:

$$\omega + \omega = 2\omega.$$

Взаимодействие световой волны с диэлектриком описывается с помощью теории поляризации. Вектор поляризованности  $\vec{P}$ , вообще говоря, является некоторой функцией  $\vec{P} = f(\vec{E})$  напряженности электрического поля  $\vec{E}$  световой волны. В приближении, соответствующем области линейной оптики, поляризованность связана с напряженностью поля  $\vec{E}$  линейно:

$$P = \varepsilon_o \chi^{(1)} E, \tag{1.1}$$

где  $\chi^{(1)}$  – линейная оптическая восприимчивость.

Такое приближение достаточно хорошо работает для не очень высоких значений  $\vec{E}$ , т.е. для интенсивностей обеспечиваемых обычными, не лазерными источниками света, даже самыми мощными. При воздействии на среду лазерного излучения с достаточно высокой плотностью потока соотношение (1) уже не выполняется. Если отличие функции  $\vec{P} = f(\vec{E})$  от

линейной не слишком велико (а именно так обстоит дело даже в сильных лазерных полях), то ее можно представить в виде ряда:

$$P = \varepsilon_0 \Big[ \chi^{(1)} E + \chi^{(2)} E^2 + \chi^{(3)} E^3 + \cdots \Big].$$
(1.2)

Первый член материального уравнения нелинейной оптики (1.2) является линейной составляющей, а остальные члены – нелинейной составляющей поляризации. Отношение каждого последующего члена ряда к предыдущему быстро уменьшается. Величины  $\chi^{(2)}$  и  $\chi^{(3)}$  называют *нелинейными восприимчивостями*. Следует отметить, что запись разложения (1.2) в достаточной степени условна, т.к. величины  $\chi^{(1)}$ ,  $\chi^{(2)}$ ,  $\chi^{(3)}$ ,..., вообще говоря, являются тензорами соответственно 2-го, 3-го, 4-го и т.д. рангов.

Появление второй гармоники связано с квадратичным членом  $\chi^{(2)}E^2$  в разложении поляризованности  $\vec{P}$  по степеням электрического поля световой волны. Если в среду входит гармоническая световая волна вида:

$$E = A \cdot \cos(\omega t - kz),$$

то в силу соотношения (1.2) переизлученное поле в среде будет содержать не только частоту  $\omega$ , но и ее гармоники на частотах  $2\omega$ ,  $3\omega$  и т.д. Действительно, в этом случае второй член ряда (1.2) можно представить в виде:

 $\chi^{(2)}E^2 = 0.5\chi^{(2)}A^2 + 0.5\chi^{(2)}A^2 cos2(\omega t - kz).$  (1.3) Второй член в выражении (1.3) описывает переизлученное поле на частоте  $2\omega$  второй гармоники падающей волны. Величину  $\chi^{(2)}$  называют *квадратичной нелинейной восприимчивостью вещества*. Необходимым условием генерации второй гармоники (ГВГ) является отличие  $\chi^{(2)}$  от нуля. Это осуществляется в анизотропных веществах, молекулы которых не имеют центра симметрии. Действительно, если вещество изотропно или имеет центр симметрии, то при изменении направления приложенного электрического поля  $\vec{E}$  поляризованность  $\vec{P}$  должна менять знак. Чтобы удовлетворить этому требованию, члены, содержащие четные степени в разложении (1.2), должны отсутствовать, т.е. величина  $\chi^{(2)}$  должна быть равной нулю.

Генерация излучения на суммарной (или разностной) частоте происходит наиболее эффективно, если волна с частотой  $\omega_3$ , приходящая к данному элементу объема от предшествующих элементов, находится в нужной фазе с излучением на этой же частоте, которое порождается в этом элементе объема. Интенсивность генерации в таком случае возрастает на несколько порядков, поскольку ее накопление происходит по всей длине нелинейной среды. Такое благоприятное соотношение фаз реализуется, если для волновых векторов выполняется равенство:

$$\overrightarrow{k_1} + \overrightarrow{k_2} = \overrightarrow{k_3}.\tag{1.4}$$

Выражение (1.4) называют условием фазового (волнового) синхронизма.

Условие коллинеарного фазового синхронизма для процесса ГВГ, когда волновые вектора лежат на одной прямой, можно записать в виде:

$$k_{\omega} + k_{\omega} = k_{2\omega} \tag{1.5}$$

где  $k_{\omega,2\omega}$  – модули векторов  $\vec{k}_{\omega,2\omega}$ . Величина k называется волновым числом. Если волна распространяется в среде с показателем преломления n, то  $k = 2\pi n/\lambda$ . Учитывая это, из уравнения (1.5) получим:  $n_{\omega} + n_{\omega} = 2n_{2\omega}$ , т.е. для выполнения условия синхронизма при ГВГ необходимо, чтобы в нелинейной среде выполнялось равенство:

$$n_{\omega} = n_{2\omega} \tag{1.6}$$

В оптических средах с нормальной дисперсией показателя преломления выполнение равенства (1.6) невозможно, т.к. функция  $n(\omega)$  растет с увеличением частоты. Однако в оптически анизотропных (двулучепреломляющих) кристаллах можно выбрать такое направление распространения, для которого показатель преломления обыкновенного луча основной частоты равен показателю преломления необыкновенного луча второй гармоники.

Существует целый ряд нелинейных кристаллов (например, ниобат лития LiNbO<sub>3</sub>), не обладающих центром симметрии, для которых выполняется равенство  $n_1^{o}|_{\omega} = n_2^{e}(\theta_c)|_{2\omega}$  при распространении волн с частотами соответственно  $\omega$  и  $2\omega$  под некоторым углом синхронизма  $\theta_c$  к оптической оси кристалла. Следовательно, по этому направлению выполняется условие синхронизма (1.6) для процесса ГВГ.

Таким образом, если направить излучение основной частоты в нелинейном кристалле как обыкновенную волну под углом θ<sub>c</sub>, в среде будет происходить эффективная генерация ее второй гармоники как необыкновенной волны вдоль этого же направления.

#### Описание экспериментальной установки

#### и метода исследования

Оптическая схема установки приведена на рис 1.1.



Рис.1.1. Общая оптическая схема установки: 1 – лазер на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом, 2 – коллимированный модуль, 3 – фокусирующая линза, 4 – нелинейный кристалл для ГВГ, 5 – светофильтр, 6 – измеритель мощности.

Установка смонтирована на оптическом столе STANDA. Описание элементов установки:

1 – Генератор основного излучения. Им является импульсный твердотельный лазер на синтетическом кристалле иттрий-алюминиевого граната, легированного неодимом (YAG:Nd<sup>3+</sup>). Источником лазерного излучения являются ионы неодима. Длина волны 1064 нм относится к

ближнему инфракрасный диапазон спектра. Длительность импульса генерации 15 нс – это так называемый режим гигантских импульсов, который реализует максимально возможную мощность лазера, а, следовательно, и интенсивность взаимодействующих лучей:

$$I=P/S$$



где *P* – мощность излучения, а *S* – площадь поперечного сечения луча. Излучение имеет линейную поляризацию в горизонтальной плоскости.

2 – Коллимированный модуль. Оптический коллиматор состоит из объектива (в простейшем случае вогнутого зеркала), в фокальной плоскости которого помещён источник света (рис. 1.2). Для получения

большой плотности светового потока используется линза – 3, которая фокусирует световой поток на нелинейном кристалле LiNbO<sub>3</sub> – 4 для ГВГ. Ниобат лития является одноосным отрицательным пьезокристаллом.

5 – Светофильтр СЗС-9 – служит для выделения части спектра излучения (450...540 нм).

6 – Измеритель мощности Ophir Nova II.

Излучение, генерируемое YAG:Nd<sup>3+</sup> лазером твердотельным СВОДЯТ В линзу, фокусируя его на кристалл LiNbO<sub>3</sub>. Поворачивая юстировочным винтом кристалл на небольшие углы, В плоскости, перпендикулярной поляризации излучения, основного можно наблюдать визуально на экране зеленое пятно от излучения второй гармоники  $(\lambda = 0,532 \text{ мкм})$ . Максимальная яркость его соответствует настройке на фазовый Поляризация синхронизм. второй гармоники будет ортогональна



Рис. 1.3. Спектральные характеристики пропускания оптических фильтров.

поляризации исходного луча, т.е. вектор  $\vec{E}$  световой волны ориентирован вертикально.

Установив после нелинейного кристалла фильтр СЗС-9, используемый для отсечки основного излучения, получаем искомую спектральную компоненту видимого диапазона. Спектральные характеристики пропускания различных оптических фильтров представлены на рис. 1.3. Для получения количественных энергетических характеристик за светофильтром устанавливается измеритель мощности.

### Порядок сборки экспериментальной схемы

1. Производится установка на лабораторный стол ИК-лазера, фотография которого приведена на 1.4. В используемом лазере рис. встроены коллимированный модуль и дополнительный источник видимого света (длина волны 650...750 нм), луч которого параллелен основному лучу



Рис. 1.4. ИК-лазер.

и используется в качестве прицела для визуализации генерируемого основного излучения ИК-диапазона.

2. После установки лазера по оси основного луча устанавливаем измеритель мощности Ophir Nova 2. В состав измерителя мощности входит активный элемент (рис. 1.5), через который проходит луч света, и сам измерительный прибор (рис. 1.6).



Рис. 1.5. Активный элемент.



Рис. 1.6. Измерительный прибор.

3. Устанавливаем на оптическую скамью фильтр C3C-9, который пропускает зеленый свет (длина волны второй гармоники 532 нм) и не пропускает ИК-излучение. За фильтром размещается фокусирующая линза, которая концентрирует излучение лазера в точку. По линии основного луча после линзы устанавливаем кристалл ниобата лития LiNbO<sub>3</sub>, на который фокусируется луч лазера, что позволяет наблюдать яркую зелёную точку (длина волны второй гармоники 532 нм).

### Порядок выполнения работы

1. Снять ватт-амперную характеристику ИК-лазера – источника излучения (1 на рис. 1.1). Для этого, поочередно устанавливая значения силы тока, для соответствующих показаний амперметра зафиксировать показания ваттметра (6 на рис. 1.1). Результаты занести в таблицу 1. Построить график зависимости мощности источника излучения *P* от силы тока *I*.

Таблица 1

<i>I</i> , мА					
Р, мВт					

Ватт-амперная характеристика источника излучения

2. Установить кристалл ниобата лития между собирающей линзой (3 на рис. 1.1) и светофильтром (5 на рис. 1.1), затем, увеличивая мощность

излучения, направляемую на кристалл, определить порог генерации излучения на длине волны 532 нм (ГВГ). Зафиксировать это значение в виде мощности на источнике излучения:

$$P_{\text{ген}} = \cdots \text{ MBT}.$$

3. Постепенно увеличивая мощность источника излучения, снять зависимость мощности излучения на длине волны 532 нм от мощности излучения на длине волны 1064 нм, генерируемого ИК-лазером. Результаты занести в таблицу 2. Построить график этой зависимости.

Таблица 2

Зависимость $P_{2\omega} = f(P_{\omega})$					
$P_{\omega}$ , м ${ m Bt}$					
<i>Р<sub>2</sub>ω</i> , мВт					

4. На основании данных таблицы 2 и графика зависимости  $P_{2\omega} = f(P_{\omega})$  оценить во всех точках графика эффективность «перекачки» излучения на основной длине волны в излучение второй гармоники, используя формулу:

$$\eta = \frac{P_{2\omega}}{P_{\omega}} \times 100\%.$$

Результаты занести в таблицу 3, построить график зависимости  $\eta = f(P_{\omega})$ . Дать физическое объяснение этому графику.

Таблица 3

Эффективность перекачки энергии падающего излучения в энергию излучения второй гармоники

$P_{\omega}$ , мВт			
η, %			

5. Вместо измерителя мощности излучения (6 на рис. 1.1) второй гармоники установить спектральный анализатор и с его помощью зафиксировать спектр сгенерированной второй гармоники. Опишите этот спектр (его форму, разброс по значениям длины волны генерируемой второй гармоники).

6. Сделать выводы по проделанной лабораторной работе.

#### Контрольные вопросы

1. Доказать, что генерация второй гармоники является нелинейным оптическим эффектом.

2. В чем состоит условие фазового синхронизма? Каков его физический смысл?

3. Как обеспечивается фазовый синхронизм при генерации второй гармоники?

4. Что такое угол фазового синхронизма?

5. Как можно увеличить интенсивность генерации второй гармоники? От каких факторов зависит эффективность преобразования энергии во вторую гармонику?

6. Сравнить поляризацию основной световой волны и волны второй гармоники в данной работе. Как реализуется данная поляризационная схема?

7. Назначение коллимированного модуля в экспериментальной установке.

8. Где в оптической схеме и с какой целью устанавливается оптический фильтр?

9. Как регистрируется спектральная компонента второй гармоники в данной работе?

10. Охарактеризовать кристалл ниобата лития LiNbO<sub>3</sub> как нелинейный оптический кристалл.

11. Начертить и объяснить графическую зависимость амплитуды волны второй гармоники от пути, пройденного падающей волной в нелинейном кристалле, для двух случаев:

• точное выполнение условия фазового синхронизма;

• приближенное выполнение условия фазового синхронизма.

12. Каково применение эффекта генерации второй гармоники?

# Лабораторная работа № 2. Исследование излучения накачки параметрического генератора света

**Цель работы:** определение порога генерации третьей гармоники лазера YAG:Nd (длина волны 355 нм), которая используется для накачки параметрического генератора света.

## Оборудование, приборы и принадлежности:

1. Лазер YAG:Nd с модуляцией добротности производства фирмы JV LOTIS (модель LS-2134), который используется в качестве лазера накачки параметрического генератора света.

2. Измеритель мощности лазерного излучения Thorlabs PM100D (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Внешний вид пульта управления и сенсорной пироэлектрической головки измерителя мощности производства фирмы Thorlabs.

## Краткие теоретические сведения

Оптическая параметрическая генерация представляет собой процесс, обратный генерации на суммарной частоте. Эффект параметрической генерации света заключается в передаче энергии от световой волны накачки в две волны с частотами, смещенными в стоксову область относительно частоты излучения накачки так, чтобы сумма их частот была равна частоте накачки. Эти волны часто называют сигнальной и холостой волнами, заимствуя терминологию из физики СВЧ. В корпускулярном представлении явление параметрической генерации света можно описать, как процесс исчезновения фотона с  $\omega_3$ , в то время как образуется фотоны с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . При этом полные энергия и импульс сохраняются, т.е. должны выполняться условия согласования частот и фазового синхронизма:

$$\hbar\omega_3 = \hbar\omega_1 + \hbar\omega_2, \tag{2.1}$$

$$\overrightarrow{k_3} = \overrightarrow{k_1} + \overrightarrow{k_2}.$$
(2.2)

В изотропных кристаллах в области нормальной дисперсии удовлетворить одновременно обоим условиям невозможно. Для того чтобы показать это, предположим, что все три волны распространяются в одном направлении. Тогда выражение (2.2) перепишется следующим образом:

$$\omega_3 n_3 = \omega_1 n_1 + \omega_2 n_2, \qquad (2.3)$$

где  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$  – показатели преломления среды для соответствующих частот. С учетом (2.1) выражение (2.3) можно записать в виде:

$$(n_3 - n_1)\omega_1 - (n_3 - n_2)\omega_2 = 0.$$
(2.4)

Однако, для изотропных кристаллов соотношение (2.4) ни при каких условиях не может быть выполнено. Дело в том, что в случае нормальной дисперсии показатель преломления на более высокой частоте всегда больше аналогичного показателя для меньшей частоты излучения или:

$$n_3 - n_1 > 0$$
,  $n_3 - n_2 > 0$ .

Невыполнение равенства (2.4), а, следовательно, и равенства (2.2) означает, что в независимости от направления распространения пучков волновое число  $k_3$  всегда больше суммы волновых чисел  $k_1$  и  $k_2$ . Поэтому условие фазового синхронизма нельзя удовлетворить для изотропных кристаллов в области нормальной дисперсии даже в случае различных направлений векторов  $\vec{k_1}$ ,  $\vec{k_2}$  и  $\vec{k_3}$ .

Однако в анизотропных кристаллах условие фазового синхронизма можно удовлетворить между обыкновенной и необыкновенной волнами. Например, для кристалла BBO (β-бората бария), который будет исследоваться в лабораторной работе, синхронизм реализуется для следующего типа взаимодействия:

$$\overline{k_3^e} = \overline{k_1^o} + \overline{k_2^e},\tag{2.5}$$

где индексам «о» и «е» при волновых векторах соответствуют обыкновенный и необыкновенный лучи.

Различают скалярный И векторный синхронизм. Если направления излучения накачки, сигнальной и холостой волн являются коллинеарными, то говорят о скалярном (коллинеарном) варианте фазового синхронизма. В случае неколлинеарности взаимодействующих волн используют понятие векторного фазового синхронизма. Схемы реализации скалярного и векторного синхронизма различны.

Для описания процесса параметрической генерации света рассмотрим интенсивную световую волну с частотой  $\omega_p$  (излучение накачки) и слабую волну с частотой  $\omega_s$ , распространяющиеся в нелинейном кристалле. В результате нелинейной поляризации среды волна с частотой  $\omega_p$  образует биения с волной, имеющей частоту  $\omega_s$ , что приводит к возникновению компоненты поляризации с частотой  $\omega_i = \omega_p - \omega_s$ . При выполнении условия фазового синхронизма интенсивность световой волны с частотой  $\omega_i$  будет возрастать по мере своего прохождения через кристалл. В дальнейшем между волнами с частотой соответственно  $\omega_i$  и  $\omega_p$  также возникают биения, которые приводят к появлению компоненты поляризации с частотой  $\omega_s = \omega_p - \omega_i$ . Эта поляризация вызовет нарастание волны  $\omega_s$ . Следовательно, от волны с частотой  $\omega_p$  энергия будет передаваться волнам с частотами  $\omega_s$  и  $\omega_i$ .

При реализации параметрической генерации схему генератора делают такой, чтобы осуществлять перестройку лазерного излучения в широком диапазоне частот. Для коллинеарных схем параметрической генерации можно выделить четыре способа перестройки частоты:

1) поворот нелинейного кристалла. В данном случае изменяется угол между оптической осью кристалла и направлением пучка накачки (направлением оси резонатора). Если при одной ориентации кристалла резонатор «выделяет» направление синхронизма для волн с частотами  $\omega_{\rm s}, \omega_{\rm i}$  и  $\omega_{\rm p}$ , удовлетворяющими условию согласования частот, то при другой ориентации окажется «выделенным» направление синхронизма для волн с Перестройка иным набором частот. частот поворотом кристалла перестройкой; относительно пучка накачки называется угловой

2) варьирование температуры кристалла. Перестройка частоты связана с тем, что показатели преломления обыкновенной и необыкновенной волн зависят от температуры, и, следовательно, угол синхронизма также зависит от температуры (температурная перестройка);

3) прикладывание внешнего постоянного электрического поля. Под воздействием внешнего электрического поля происходит изменение оптической индикатрисы кристалла (электрооптическая перестройка частоты);

4) изменение частоты волны накачки  $\omega_{\rm p}$ .

С практической точки зрения наибольший интерес представляют угловая и температурная способы перестройки частоты. Перестройка электрическим полем малоэффективна и используется лишь для стабилизации длины волны генерации или для высокочастотной модуляции излучения параметрического генератора света. Перестройка изменением длины волны накачки реализуется, когда лазер накачки является перестраиваемым, но на практике такой способ перестройки используется редко.

Использование описанных выше способов позволяет осуществить с помощью параметрического генератора света перестройку частоты лазерного излучения в широком диапазоне оптических частот, какой не может быть реализован с помощью лазеров в традиционном их понимании. В настоящее время хорошо зарекомендовали себя оптические параметрические генераторы, излучающие в диапазоне ДЛИН ОТ видимого волн ЛО инфракрасного (0,5...3,5 мкм).

В качестве нелинейных материалов для параметрической генерации света в диапазоне длин волн 0,3...5 мкм используются кристаллы дигидрофосфата калия KH2PO4 (KDP), дейтерированный гидрофосфат калия KD2PO4 (DKDP), аммония дигидрофосфат NH4H2PO4 (ADP), CsH2AsO4 (CDA), йодат лития LiIO3, ниобат лития LiNbO3, ниобат калия KNbO3, а также органический кристалл мочевины (NH2)2CO.

Кристалл ниобата калия (KNbO<sub>3</sub>) имеет максимальную нелинейность а, значит, минимальный порог параметрической генерации (3,5 MBt/cm<sup>2</sup>). Этот кристалл негигроскопичен и позволяет реализовать синхронизм с температурной перестройкой. Вместе с тем, он является нестойким к излучению и его невозможно выращивать до достаточно больших размеров. Кристалл LiNbO3 эффективен в видимом и ИК-диапазонах (до 5 мкм), кристалл KDP – в УФ и видимом диапазонах при накачке второй или четвертой гармоникой неодимового лазера. Благодаря высокой оптической прочности кристаллы KDP, ADP можно использовать при больших интенсивностях накачки – до 10 ГВт/см<sup>2</sup>.

### Порядок выполнения работы

1. Включить лазер YAG:Nd, повернув ключ на передней панели блока питания.

2. На пульте управления лазера нажать кнопку "LAMP" и дать прогреться лазеру в течение 10 минут. О готовности лазера к работе свидетельствует непрерывное свечение зеленого индикатора над "LAMP" кнопкой на пульте управления лазера. 3. Снять заглушку с отверстия для выхода излучения третьей (355 гармоники HM) передней панели блока излучателя. на

4. Переключить работу лазера YAG:Nd в режим модуляции

добротности, выбрав пункт "INTERNAL" при помощи кнопки «QSW MODE» в нижней части пульта управления лазера.

 5. Включить управление электрооптическим затвором лазера с помощью кнопки "Q-SWITCH" пульта управления лазера.
 6. Открыть шторку кнопкой "SHUTTER".

7. Установить минимальное значение энергии лампы, при котором (355 нм) можно выходящее излучение детектировать при помощи визуализатора. Энергия лампы регулируется кнопками, находящимися на лазера. Текущее энергии пульте управления значение лампы на табло (при включении лазера оно по умолчанию равно указано 5,0 Дж).

8. Подсоединить пироэлектрическую головку измерителя мощности к блоку управления измерителя мощности Thorlabs.

9. Установить пироэлектрическую головку измерителя мощности напротив выходного отверстия лазера YAG:Nd на расстоянии 10...15 см так, чтобы «пятно» лазерного излучения не выходило за пределы чувствительной части головки измерителя (рис. 2.2).



Рис. 2.2. Схема экспериментальной установки. 1 – лазер YAG:Nd; 2 – измеритель мощности оптического излучения Thorlabs.

10. Используя измеритель мощности лазерного излучения Thorlabs, 355 YAG:Nd измерить энергию излучения лазера на HM при YAG:Nd различной мощности накачки активного элемента лазера (указанной преподавателем).

YAG:Nd. 11. Завершив измерения, выключить лазер Для ЭТОГО уменьшить 5 значение энергии лампы Дж, закрыть шторку ДО И "SHUTTER" И "Q-SWITCH" лазера, используя кнопки затвор на пульте управления лазера.

12. Построить график зависимости энергии излучения лазера на длине волны 355 нм от мощности накачки активного элемента лазера. Оценить значение пороговой энергии накачки.

13. Сделать выводы по проделанной лабораторной работе.

# Контрольные вопросы

1. Принцип работы параметрического генератора света.

2. Перестройка частоты при параметрической генерации света.

3. Принцип работы используемого в лабораторной работе лазера YAG:Nd.

4. Дать физическое объяснение построенному графику (см. п. 12).

5. От чего зависит порог лазерной генерации?

6. Что означает термин «высокая оптическая прочность»?

7. Определить место длины волны лазерного излучения 355 нм на шкале электромагнитных волн.

8. Для чего в работе используется измеритель мощности?

9. Каков порядок оценки величины пороговой энергии накачки?

# Лабораторная работа № 3. Определение энергетических характеристик параметрического генератора света

**Цель работы:** изучение зависимости энергии параметрической генерации света от энергии накачки и определение энергетического порога возникновения параметрической генерации.

### Оборудование, приборы и принадлежности:

1. Лазер YAG:Nd с модуляцией добротности производства фирмы JV LOTIS (модель LS-2134), который используется в качестве лазера накачки параметрического генератора света.

2. Параметрическая приставка-преобразователь производства фирмы JV LOTIS (модель LT-2215). Представляет собой параметрический генератор света и предназначена для преобразования излучения третьей гармоники (355 HM) YAG:Nd<sub>3+</sub> модулированной лазера c добротностью В перестраиваемое излучение ближней ИК и видимой областей спектра. В «активного» нелинейный качестве элемента используется кристалл ВВО.

3. Измеритель мощности оптического излучения Thorlabs PM100D.

### Краткие теоретические сведения

В зависимости от источника накачки различают параметрическую генерацию света при непрерывной и импульсной накачке. Ввиду того, что для возбуждения параметрической генерации необходимы достаточно большие интенсивности излучения, ДЛЯ накачки используются преимущественно импульсные источники (нанопикосекундной И длительности).

Рассмотрим параметрическую генерацию света при непрерывной накачке. В этом режиме генерации можно выделить два последовательных процесса. Сначала (при включении накачки) происходит переходный процесс развития генерации, начинающийся от уровня шумов. Этот процесс завершается установлением стационарной генерации. Условием самовозбуждения параметрической генерации в резонаторной схеме является преобладание параметрического усиления над пассивными И излучательными потерями В резонаторе. Однако коэффициент параметрического усиления изменяется со временем. Динамика поведения среднего по длине коэффициента параметрического усиления представлена

на рис. 3.1. Из рисунка видно, что после включения накачки (момент включения t = 0) коэффициент усиления уменьшается от начального значения  $\sigma_0$  до стационарного значения  $\sigma_{ct} = \sigma_{пор}$ . За это время интенсивность параметрического излучения S возрастает от флуктуационного значения до стационарного значения S<sub>ct</sub>. Иными словами, за это время происходит завершение процесса развития параметрических колебаний и устанавливается стационарный режим генерации. Таким образом, для развития процесса усиления параметрического шума необходимо, чтобы  $\sigma_0 > \sigma$  пор, в противном случае параметрическая генерация света невозможна.



Рис. 3.1. Динамика изменения во времени среднего по длине коэффициента параметрического усиления о и интенсивности параметрического излучения S.

Рассмотрим параметрическую генерацию при импульсной накачке. Процесс параметрической генерации при импульсной накачке может иметь нестационарный характер, связанный с тем, что время развития импульса параметрической генерации (время установления параметрических колебаний) т<sub>разв</sub> может быть порядка длительности импульса накачки т<sub>н</sub> или даже больше. В этом случае из-за относительно малой длительности импульса накачки стационарные параметрические волны могут не успеть установиться, и коэффициент преобразования по энергии окажется весьма малым.

Нестационарный режим параметрической генерации случае В прямоугольного импульса накачки, длительность которого удовлетворяет соотношению  $\tau_{\rm H} < \tau_{\rm pase}$ , изображен на рис. 3.2. Если же  $\tau_{\rm H} > \tau_{\rm pase}$ , то после установления параметрических колебаний начинается генерация импульса параметрического излучения в квазистационарном режиме. Это означает, что, несмотря на изменение интенсивности накачки BO времени, интенсивность параметрически генерируемых волн строго соответствует интенсивности накачки в каждый момент времени. Итак, сразу после начала

генерации от уровня шумов процесс всегда нестационарен, но затем по истечении времени  $\tau_{pa3B}$  (при  $\tau_{H} > \tau_{pa3B}$ ) устанавливается квазистационарный режим генерации.



Рис. 3.2. Сопоставление интенсивностей накачки  $S_p$  и импульса параметрической генерации  $S_s$  в случае прямоугольного импульса накачки при  $\tau_{\rm H} < \tau_{\rm paзb}$ .

На рис. 3.3 представлено сопоставление интенсивности излучения импульса накачки (кривая 1) и импульса параметрической генерации (кривая 2) для случая, когда импульс накачки имеет гауссову форму. При этом длительность импульса накачки больше времени развития импульса параметрической генерации. В качестве t = 0 выбран момент включения накачки. Развитие импульса параметрической импульса генерации начинается В момент времени t1, когда плотность мощности накачки достигает порогового значения. Через t2 обозначен условный момент когда развитие импульса параметрической генерации можно времени, считать завершившимся. Начиная С момента t = t2 реализуется параметрической генерации. Штриховкой квазистационарный режим показана область, в пределах которой параметрическая генерация не оказывает обратного воздействия на волну накачки.



Рис. 3.3. Сопоставление интенсивности излучения импульса накачки (кривая 1) и импульса параметрической генерации (кривая 2) при τ<sub>н</sub> > τ<sub>разв</sub>.

### Порядок выполнения работы

1. Подключить блок управления лазера к персональному компьютеру (ПК) через USB кабель.

2. На компьютере запустить программу «LT-22XX\_PC.exe».

3. Включить лазер YAG:Nd, повторив пункты 1 – 6 лабораторной работы № 2.

4. Установить длину волны параметрической генерации, указанную преподавателем. Установка длины волны параметрического излучения производится в окошке «Wave, nm» (рис. 3.4) программы «LT-22XX\_PC» (1). После ввода значения длины волны нажать кнопку «ENTER» на клавиатуре и кнопку «SET WAVE» (2). Затем открыть шторку в параметрической приставке-преобразователе, нажав кнопку «SHUTTER» (3).

Signal Wave 700,8 nm	Idler Wa	YE	Wave, nm 718,300
			Set wave
700,8 nm 7	18,3 nm		Shutter 🔶
Scan p	anel No WS 🗖 Sc	an mode is OFF 🗖	Shutter closed

Рис. 3.4. Внешний вид монитора ПК при работе с программой «LT-22XX\_PC.exe».

5. Установить минимальное значение энергии лампы накачки лазера YAG:Nd, при котором выходящее излучение параметрического генератора можно детектировать при помощи визуализатора. При установке энергии лампы следуйте пункту 7 лабораторной работы № 2.

6. Установить пироэлектрическую головку измерителя мощности Thorlabs напротив выходного отверстия параметрического генератора на расстоянии 10...15 см так, чтобы «пятно» параметрического чувствительной излучения не выходило за пределы части головки измерителя (рис. 3.5).



Рис. 3.5. Схема экспериментальной установки: 1 – лазер YAG:Nd; 2 – параметрическая приставка-преобразователь; 3 – измеритель мощности Thorlabs.

7. Измерить энергию параметрического излучения при различной мощности накачки активного элемента лазера YAG:Nd (указанной преподавателем).

8. Завершив измерения, выключить лазер. Для этого уменьшить значение энергии лампы до 5 Дж, закрыть шторку и затвор лазера YAG:Nd, используя кнопки «SHUTTER» и «Q-SWITCH» на пульте управления лазера. Закрыть шторку параметрической приставке-В преобразователе, кнопку **«SHUTTER»** «LTнажав в программе 22XX PC».

9. Построить в виде графика зависимость энергии параметрического излучения от энергии накачки. Оценить порог возникновения параметрической генерации света.

10. Сделать выводы по проделанной лабораторной работе.

### Контрольные вопросы

1. Какова связь между поляризацией нелинейной среды на разностной частоте и параметрической генерацией света?

2. Объяснить, как определить пару частот, которые будут усиливаться на выходе из параметрического генератора света.

3. Принцип работы используемой в лабораторной работе параметрической приставки-преобразователя.

4. Дать энергетическую характеристику параметрической генерации света при непрерывной и импульсной накачке.

5. Дать физическое объяснение графику зависимости энергии параметрического излучения от энергии накачки.

6. Пояснить схему экспериментальной установки, используемой в лабораторной работе.

7. Каков порядок оценки величины пороговой энергии возникновения параметрической генерации света?

8. Как производится установка длины волны параметрической генерации в лабораторной работе?

9. Каковы основные требования техники безопасности при выполнении лабораторной работы?

# Лабораторная работа № 4. Исследование спектральных характеристик параметрического генератора света

**Цель работы:** исследование диапазона перестройки параметрического генератора света и оценка погрешности при установке длины волны генерации.

# Оборудование, приборы и принадлежности:

1. Лазер YAG:Nd с модуляцией добротности производства фирмы JV LOTIS (модель LS-2134), который используется в качестве лазера накачки параметрического генератора света.

2. Параметрическая приставка-преобразователь производства фирмы JV LOTIS (модель LT-2215).

3. Матовая пластинка.

4. Волоконно-оптический кабель.

5. Спектрометр StellarNet. Имеет встроенную ПЗС матрицу И волоконно-оптический исследуемого излучения. Внешний ввод ВИД спектрометра представлен рис. 4.1. Спектрометр на позволяет регистрировать оптическое излучение в диапазоне длин волн от 200 нм до 1100 Спектральное разрешение прибора оставляет 0.5 HM. HM. Минимальное время интегрирования сигнала составляет 3 мс.



Рис. 4.1. Внешний вид спектрометра StellarNet.

# Краткие теоретические сведения

Принципы параметрической генерации света были предложены в 1962 г. советскими учеными С.А.Ахмановым и Р.В.Хохловым и независимо – американскими учеными Н.Кроллом и Р.Кингстоном. Впервые в эксперименте параметрическую генерацию в нелинейном кристалле ниобата лития LiNbO<sub>3</sub> получили Д.Джордмейн и Р.Миллер (США) в 1965 г.

Параметрическая генерация света – это нелинейно-оптическое преобразование мощной световой волны накачки в когерентные световые волны меньших частот, значения которых могут перестраиваться.

При воздействии на кристалл излучения с частотой  $\omega_3$  в направлении фазового синхронизма излучение с частотами  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  усиливается вдоль направления распространения. Заметим, что волны на всех частотах с минимальной амплитудой и необходимым направлением распространения всегда существуют в среде при ненулевой температуре за счет флуктуаций полей. Для того, чтобы эффект был заметен, необходимо увеличивать либо интенсивность поля накачки, либо длину кристалла. Использование сверхкоротких лазерных импульсов длительностью менее 100 пс позволяет создать параметрический генератор света на кристалле длиной в несколько сантиметров.

Можно поступить проще, вернув излучение на одной из частот  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  на вход кристалла (рис. 4.2) – тем самым превратив усилитель в генератор, т.е. создать обратную связь.



Рис. 4.2. Параметрический генератор света: 1 – нелинейный кристалл, 2 – резонатор, обеспечивающий обратную связь.

Именно на этом принципе создан параметрический генератор, в котором функцию обратной связи несет резонатор, состоящий из двух зеркал, установленных перпендикулярно оси резонатора. Именно резонатор позволяет выделить всякий раз те конкретные частоты  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ , на которые «расщепляется» частота  $\omega_3$  волны накачки. В этом случае устройство способно генерировать излучение на частотах  $\omega_1$  и  $\omega_2$  с эффективностью около 10 % и выше. Какие частоты из широкого набора будут при этом генерироваться? Те, которые удовлетворяют условию фазового синхронизма. При повороте кристалла либо при изменении его температуры этому условию будет удовлетворять уже другая пара частот  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ . Так осуществляется плавная перестройка частоты параметрического генератора. Генератор будет работать только в том случае, когда усиление волн с частотами  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  будет превосходить потери за один проход по резонатору, т.е. в случае высокой добротности. Если резонатор имеет высокую добротность на обеих частотах  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , то говорят о *двухрезонаторной* схеме генератора. Если же добротность резонатора высока только на одной из двух частот, а на другой резонатор фактически отсутствует, то говорят об *однорезонаторной* схеме генератора. Наиболее распространенные схемы построения однорезонаторных (слева) и двухрезонаторных (справа) параметрических генераторов света показаны на рис. 4.3. Здесь НК – нелинейный кристалл, R – коэффициенты отражения зеркал.



Рис. 4.3. Схемы построения параметрических генераторов света.

### Порядок выполнения работы

1. Включить лабораторную установку, повторив пункты 1 – 3 лабораторной работы № 3.

2. Подключить спектрометр StellarNet к ПК через USB кабель. На компьютере запустить программу «SpectraWiz Shortcut».

3. В данной работе исследуется диапазон перестройки сигнальной и холостой волн параметрического генератора. Для одновременного получения на выходе сигнальной и холостой волн установить в программе «LT-22XX\_PC» флажок «NO WS» (1). Дальнейшее нажатие кнопки «SET WAVE» (2) приведет в действие подвижной механизм, который уберет спектроделительные зеркала, расположенные на выходе параметрического генератора (рис. 4.4).

LT2215-PC			
	Signal Wave + Idler Wave	Wave, nm	
	5₩= /U3,4 nm; 1₩=/U3,3 nm;	709,400	~
		Set wav	(2
	5\#= 709,4 nm; l\#=709,5 nm;	Shutter	
Done!	Scan panel No WS 🔽 Scan mode is OFF	Shutter opened	
Connected to "Con	3" ( 115200/8/NoParity/One_0 ( 1 ) Moto	or speed -> 100%	

Рис. 4.4. Внешний вид монитора ПК при работе с программой «LT-22XX\_PC.exe».

4 Установить длины волн сигнального И холостого параметрического излучения в видимом диапазоне спектра. Установка длины волны для Signal Wave производится в окошке «Wave, nm» программы «LT-22XX PC» (1). Расчет длины волны для Idler Wave происходит волны нажать автоматически. После ввода значения длины кнопку «ENTER» на клавиатуре и кнопку «SET WAVE» (2). Затем открыть параметрической приставке-преобразователе, шторку В нажав кнопку «SHUTTER» (3) – см. рис. 3.4 в лабораторной работе № 3.

5. Установить минимальное значение энергии лампы лазера YAG:Nd, при котором выходящее излучение параметрического генератора можно детектировать при помощи визуализатора. При установке энергии лампы следуйте пункту 7 лабораторной работы № 2.

6. Расположить матовую пластинку напротив выходного отверстия параметрического преобразователя на расстоянии 10...15 см, так чтобы «пятно» параметрического излучения не выходило за ее пределы.

7. Подсоединить один конец волоконно-оптического кабеля к спектрометру. Второй конец расположить за матовой пластинкой, так чтобы в волоконно-оптический кабель заходило только рассеянное излучение от параметрического генератора. Способ расположения волоконно-оптического кабеля представлен на рис. 4.5.



Рис. 4.5. Схема экспериментальной установки: 1 – лазер YAG:Nd; 2 – параметрическая приставка-преобразователь; 3 – матовая пластинка;

4 – волоконно-оптический кабель; 5 – спектрометр StellarNet.

8. В программе «SpectraWiz Shortcut» произвести вычитание «темнового» фона при закрытой шторке лазера накачки YAG:Nd.

9. Установить длины волн сигнального и холостого параметрического излучения в начало диапазона перестройки. Выставить необходимую энергию лампы накачки лазера YAG:Nd. Диапазон и шаг перестройки, энергия лампы накачки лазера YAG:Nd задаются

преподавателем. При установке длины волны параметрической генерации и энергии лампы необходимо следовать пункту 4 данной работы и пункту 7 лабораторной работы № 2 соответственно.

10 Изменяя длину волны параметрической генерации с помощью «LT-22XX PC» программы произвести измерения амплитуды И длины волны сигнального и холостого параметрического излучения. Длины параметрического излучения, зарегистрированные с волн помощью вспомогательного окна Peak Tool в программе «SpectraWiz Shortcut», будут отличаться от значений, выставленных в программе «LT-22XX PC». Для измерения амплитуды спектральных линий сигнального и холостого параметрического излучения используйте строку текущего состояния программы «SpectraWiz Shortcut».

11. Завершив измерения, выключить лазер. Для этого уменьшить значение энергии лампы до 5 Дж, закрыть шторку и затвор лазера YAG:Nd, используя кнопки «SHUTTER» и «Q-SWITCH» на пульте управления лазера. Закрыть шторку в параметрической приставке-преобразователе, нажав кнопку «SHUTTER» в программе «LT-22XX\_PC».

12. Построить зависимость амплитуды параметрической генерации от длины волны для сигнального и холостого излучения.

13. Оценить погрешность установки длины волны параметрической генерации с помощью программы «LT-22XX\_PC».

14. Сделать выводы по проделанной лабораторной работе.

# Контрольные вопросы

1. Как определить пару частот, которые будут усиливаться на выходе из параметрического генератора света?

2. Пояснить схему экспериментальной установки.

3. Почему волоконно-оптический кабель подключается так, чтобы в него заходило только рассеянное излучение от параметрического генератора?

4. Для чего в работе производится вычитание «темнового» фона при закрытой шторке лазера накачки YAG:Nd?

5. Дать физическое объяснение зависимости амплитуды параметрической генерации от длины волны для сигнального и холостого излучения.

6. Порядок оценки погрешности длины волны параметрической генерации.

7. В чем различие между однорезонаторной и двухрезонаторной схемами параметрического генератора света?

# Лабораторная работа № 5. Исследование призменного стретчера и призменного компрессора

### Цель работы:

1. Знакомство с устройствами растяжения и сжатия во времени сверхкоротких импульсов, используемых в системах фемтосекундной оптики.

2. Изучение механизмов создания систем с отрицательной дисперсией с помощью оптических призм.

3. Выявление особенностей компрессии сверхкоротких импульсов.

4. Анализ зависимостей получаемых длительностей сверхкоротких импульсов от геометрического расположения элементов стретчера и компрессора.

### Оборудование, приборы и принадлежности:

1. Персональный компьютер.

2. Призменный стретчер, состоящий из двух призм (рис. 5.1).

3. Призменный компрессор, состоящий из двух призм и зеркала (рис. 5.2).



Рис. 5.1. Схема призменного стретчера.



Рис. 5.2. Схема призменного компрессора.

#### Краткие теоретические сведения

Согласно принципу неопределенности Гейзенберга, между длительностью светового импульса и шириной его спектра должна существовать определенная связь, из которой следует, что импульсы очень короткой длительности должны иметь очень широкий спектр. Для гауссова импульса, это соотношение имеет вид:  $\Delta \nu \Delta \tau > 0,441$ , где  $\Delta \nu$  – ширина спектра и  $\Delta \tau$  – длительность импульса. Для импульса длительностью 50 фс на длине волны 800 нм соответствующая ширина спектра составляет более 18 нм. Оптическое устройство, способное задерживать определенную частоту спектра импульса относительно других, может растягивать короткий импульс до больших длительности или, с другой стороны, сжимать длинный импульс до короткой длительности.

Призма, которая рассеивает разные частоты под разными углами, может служить основой такого оптического устройства. Пара призм может быть юстирована так, чтобы свет более высокой частоты (синяя компонента спектра) проходил больший путь, чем свет с более низкой частотой (красная часть спектра), тем самым растягивая оптический импульс. Такой импульс имеет положительную дисперсию групповых скоростей, и называется положительно чирпированным. С другой стороны, если задержать красные компоненты импульса относительно синих, то положительно чирпированный импульс будет сжиматься.

Призменный компрессор – оптическое устройство, предназначенное для сжатия сверхкоротких лазерных импульсов, имеющих положительный чирп. В схеме компрессора, показанной на рис. 5.2, красными линиями указан путь лучей, имеющих большие длины волн по сравнению с синими – более коротковолновыми. Расположение красных, зеленых и синих компонент после компрессора отображено в масштабе.

Хотя дисперсия материала призмы приводит к тому, что различные компоненты длин волн распространяются по различному пути, компрессор устроен таким образом, что все компоненты длин волн покидают его в различные моменты времени, но в одном направлении. Если различные компоненты длин волн лазерного импульса уже разделены во времени, то призменный компрессор может сделать их перекрывающимися, таким образом, укорачивая импульс.

Почти все оптические материалы, прозрачные для видимого света имеют положительную дисперсию: показатель преломления уменьшается с увеличением длины волны. Это значит, что более короткие длины волн рас-

пространяются медленнее через эти материалы. То же самое верно и для призм в призменном компрессоре. Однако положительная дисперсия призм меняется благодаря дополнительному отрезку между призмами, на котором коротковолновые компоненты длин волн проходят больший путь, чем длинноволновые. Тщательно подбирая геометрию расположения призм (рис. 5.3), появляется возможность получить отрицательную дисперсию, которая будет компенсировать положительную дисперсию других оптических компонент.



Рис. 5.3. Геометрия призменного компрессора.

Как показано на примере (рис. 5.4), сдвигая призму P2 вверх или вниз, можно получать как отрицательную дисперсию компрессора около значения показателя преломления n = 1.6 (красная кривая), так и положительную (синяя кривая). Отрезок, на котором может быть получена отрицательная дисперсия, достаточно небольшой, поскольку, призма P2 может быть смещена только на короткую дистанцию вверх, до места, где световые лучи начнут распространяться, минуя призму.



Рис. 5.4. Эффективная длина пути для призменного компрессора с A = 100 мм,  $\theta = 550$ ,  $\alpha = 100$  и различными параметрами В. Обозначения те же, что и на рис. 5.3.

Угол  $\alpha$  можно менять для настройки дисперсионных свойств призменного компрессора. На практике, однако, геометрию подбирают таким образом, чтобы падающий и преломленный лучи имели тот же самый угол, что и центральная длина волны сжимаемого спектра. Эта конфигурация известна под названием «угол минимального отклонения».

Схема призменного стретчера, обеспечивающего растяжение импульсов во времени, представлена на рис. 5.1. Можно показать, что оптический путь, который вносит вклад в дисперсию, равен  $l = 2L \cos \beta$ . Вводя  $L \sin \beta = 4r$ , получаем формулу для дисперсии групповой скорости – второй производной от длины пути на соответствующей длине волны:

$$\frac{d^2l}{d\lambda^2} = 16r \left[ \frac{d^2n}{d\lambda^2} + 2n \left( \frac{dn}{d\lambda} \right)^2 \right] - 8L \left( \frac{dn}{d\lambda} \right)^2, \tag{5.1}$$

где *г* – радиус пучка. Для моделирования процесса растяжения импульсов используется уравнение (5.1).

В результате, зависимость, описывающая растяжение импульсов в стретчере выглядит следующим образом:

$$\Delta \tau = \tau_0 + \frac{l_b - l_r}{c},\tag{5.2}$$

где  $\tau_0$  — длительность импульса на входе в стретчер, *l*<sub>b</sub> и *lr* — длины оптических путей «синих» и «красных» компонент импульса на половине максимальной интенсивности, *c* – скорость света.

Зависимость, описывающая сжатие импульсов в компрессоре, выглядит следующим образом:

$$\Delta \tau = \tau_0 - \left| \frac{l_b - l_r}{c} \right| \,. \tag{5.3}$$

#### Принцип работы виртуальной лабораторной установки

При исследовании призменного стретчера пользователем задается длительность импульса  $\tau_0$ , входящего в стретчер и указывается длина волны излучения. Программа моделирует нормированный импульс гауссовой формы  $I(\lambda)$ , который будет сжиматься в стретчере, вычисляет его полуширину и выдает крайние координаты длин волн  $\lambda_b$  и  $\lambda_r$ , необходимые для определения  $l_b$  и  $l_r$ . И наконец, вычисляется длительность импульса на выходе из стретчера в соответствии с (5.2). Пользователем задается интервал L, на котором производится расчет растяжений импульса в результате прохождения через призмы стретчера. Результаты расчета отображаются в виде графика  $\Delta \tau(L)$ .

При исследовании призменного компрессора задается длительность импульса  $\tau_0$ , входящего в компрессор, и указывается длина волны излучения, а также ширина спектра. Пользователем, как и в случае со стретчером, задается интервал L, на котором производится расчет компрессии импульса в результате прохождения через призмы компрессора в соответствии с (5.3). Результаты расчета отображаются в виде графика  $\tau(L)$ .

### Порядок выполнения работы

Стретчер:

1. Изучить, как меняется длительность уширенных импульсов для трех различных материалов призм (различных  $n(\lambda)$ ), сравнить получившиеся значения  $\Delta \tau$ .

2. Измерить зависимость  $\Delta \tau(\tau_0)$ .

3. Рассчитать полуширину спектрально-ограниченного импульса гауссовой формы для исследуемой в работе длины волны.

4. Объяснить, как изменится длительность выходного импульса при изменении дисперсии.

Компрессор:

1. Для установленных по умолчанию параметров найдите оптимальное для компрессии расстояние *L*.

2. Проследите изменение процесса сжатия *τ* в зависимости от ширины пучка.

Задания для обоих призменных устройств:

1. Для стретчера и компрессора получить зависимости  $\Delta \tau(L)$  и  $\tau(L)$ , построить графики, сравнить и объяснить результаты.

2. На основе данных, полученных в ходе лабораторной работы, предложить схему стретчера и компрессора, которые бы растягивали импульс с 30/120 фс до 10 пс, а затем сжимали бы его обратно до 30/120 фс.

3. Произведите сравнение величин растяжения и компрессии импульсов для излучения *Er*<sup>3+</sup>-волоконного лазера.

4. Дать физическое объяснение полученным зависимостям для длительностей импульсов, проходящих через стретчер и компрессор.

### Контрольные вопросы

1. Пояснить принципы растяжения и сжатия оптических импульсов во времени.

2. Что такое чирпированный импульс?

3. Почему для моделирования работы призменного стретчера достаточно указать только длительность импульса, а для призменного компрессора необходимо также указать ширину спектра?

4. Как создаются системы с отрицательной дисперсией с помощью оптических призм?

5. Порядок расчета полуширины спектрально-ограниченного импульса гауссовой формы.

6. Дать физическое объяснение графику зависимости длительности импульса от ширины расчетного интервала  $\tau(L)$ .

7. Какие исходные данные необходимы для исследования растяжения и компрессии оптических импульсов применительно к излучению *Er*<sup>3+</sup>-волоконного лазера?

8. Каковы особенности компрессии сверхкоротких оптических импульсов по сравнению с импульсами большей длительности?

# Лабораторная работа № 6. Исследование оптического бистабильного устройства

# Цель работы:

1. Изучить принцип работы кольцевого оптического резонатора, создающего бистабильную зависимость интенсивности света на выходе оптического резонатора от интенсивности накачки на основе нелинейных оптических эффектов.

2. Получить и проанализировать петлю гистерезиса при работе кольцевого оптического резонатора.

3. Исследовать вопрос о построении логических элементов на основе петли гистерезиса.

# Оборудование, приборы и принадлежности:

1. Виртуальная лабораторная установка на базе ПК, общий вид показан на рис. 6.1.



Рис. 6.1. Общий вид виртуальной лабораторной установки.

### Краткие теоретические сведения

Оптическая бистабильность – одно из проявлений самовоздействия света *в нелинейных системах с обратной связью*, при котором определенной интенсивности и поляризации падающего излучения соответствуют два возможных устойчивых стационарных состояния поля прошедшей волны, отличающихся амплитудой и (или) параметрами поляризации. Передаточные характеристики таких систем неоднозначны и обладают ярко выраженными гистерезисными свойствами.

Если устойчивы два из стационарных состояний поля прошедшего излучения, то в оптической системе реализуется оптическая бистабильность,

если больше – то мультистабильность. Наряду со стационарными состояниями в нелинейной системе с обратной связью могут возникать режимы устойчивого, периодического, субгармонического и хаотического изменения интенсивности и поляризации света.

Возникновение оптической бистабильности удобно пояснить на примере кольцевого оптического резонатора, содержащего изотропную нелинейную среду (рис. 6.2). В такой системе возможна дисперсионная бистабильность, которая возникает, если от интенсивности света зависит показатель преломления.



Рис. 6.2. Схема кольцевого оптического резонатора.

На вход нелинейной системы (представлена на схеме в виде прямоугольника) помимо излучения интенсивностью  $I_0$  подается часть  $\beta I'_{\rm T}$  отраженного от полупрозрачного зеркала выходного излучения интенсивностью  $I'_{\rm T}$ , т.е. система охвачена положительной обратной связью ( $\beta > 0$ ). Таким образом, интенсивность излучения внутри системы равна:

$$I_{\rm in} = I_0 + \beta I_T'.$$

Коэффициент пропускания системы

$$T'(I_{\rm in}) = \frac{I'_T}{I_0} = -\frac{1}{\beta} + \frac{1}{\beta I_0} \cdot I_{\rm in}$$
(6.1)

представляет собой нелинейную зависимость. Правая часть уравнения (6.1) представляет собой прямую с наклоном  $1/(\beta I_0)$ . Решением этого уравнения будут точки пересечения нелинейной кривой  $T' = T'(I_{in})$ с данной прямой.

На рис. 6.3 представлена зависимость для кольцевого оптического резонатора как нелинейной насыщающейся системы: линейный рост пропускания сменяется его резким увеличением с ростом интенсивности на входе  $I_0$  и затем насыщением при относительно больших значениях  $I_0$ . При увеличении  $I_0$  уменьшается наклон прямой, и коэффициент пропускания

плавно увеличивается до точки 1. В этой точке происходит резкое увеличение пропускания (скачок из точки 1 в точку 2) и затем снова его плавное изменение. При обратном движении имеет место резкое уменьшение пропускания (скачок из точки 3 в точку 4) при некотором меньшем значении входной интенсивности.



Рис. 6.3. Зависимость коэффициента пропускания от интенсивности света внутри нелинейной системы.

Таким образом, в области значений интенсивности света на входе

$$I_0^{\downarrow} < I_0 < I_0^{\uparrow}$$

возникает многозначность пропускания (бистабильный режим работы): выходная интенсивность излучения принимает два устойчивых значения при заданной входной интенсивности *I*<sub>0</sub>. Штриховой линией обозначена неустойчивая область решения.

Такое бистабильное поведение лежит в основе работы двоичных переключающих устройств. Оптическая бистабильность наблюдается в пассивных оптических резонаторах с различными нелинейными средами.

## Описание работы виртуальной лабораторной установки

Работа установки начинается в окне, представленном на рис. 6.1. В окне **Parameters** вводятся параметры, характеризующие конфигурацию оптического резонатора: коэффициент отражения кольцевого зеркал (Reflection index), нелинейная константа среды (Alpha), длина волны излучения (Wavelength), длина нелинейной среды (Media length), начальная фаза волны (Initial phase). После введения этих параметров в левом верхнем окне вводится диапазон подаваемых на вход резонатора интенсивностей. Нажатием на кнопку Next появляется новое окно (рис. 6.4). В этом окне графически решается система уравнений.



Рис. 6.4. Второе окно виртуальной лабораторной установки.

В ячейки System roots Tc1, Tc2, Tc3 необходимо ввести найденный из графиков коэффициент пропускания (Transmittance coefficient). После заполнения ячеек необходимо нажать кнопку Next, тем самым увеличить подаваемую на вход интенсивность на величину выбранного шага. Соответственно изменится наклон красной прямой, после чего необходимо будет записать в ячейки System roots новые корни системы уравнений. Удобно также пользоваться курсором для более точного определения координаты Tc (Transmittance coefficient). Курсор включается постановкой галочки на ячейку Cursor Enable, при этом на графике появляется желтый курсор. Поставив его на место пересечения графиков в левой нижней ячейке Y coordinate, получим искомое значение координаты с точностью до 4 знака.

Количество корней не всегда будет равно трем, поэтому:

• когда имеется всего один корень, необходимо ввести Tc1=Tc2=Tc3;

• при ситуации, когда имеются 2 корня, в первом случае (рис. 6.5а) вводить **Tc1** и **Tc2=Tc3**, во втором случае (рис. 6.5б) вводить **Tc1=Tc2** и **Tc3**.



Рис. 6.5. Возможные случаи взаиморасположения графиков.

После того, как будут промерены все точки, программа перейдет в первое окно (рис. 6.1), где по точкам будет построен график гистерезисной зависимости интенсивности на выходе резонатора от интенсивности на входе (рис. 6.6).



Рис. 6.6. Получаемая из построения петля гистерезиса.

### Порядок выполнения работы

1. Получить конфигурацию оптического резонатора: r — коэффициент отражения зеркал, L — длина нелинейной среды,  $\lambda$  — длина волны,  $\alpha$  — константа среды, также полезно менять начальную фазу  $\Phi_0$  (менять параметры удобно для получения в конечном итоге оптимального графического отображения системы уравнений, описывающей коэффициент пропускания  $T_c$ ).

2. Меняя значения входной интенсивности *I*<sub>вх</sub> с определенным шагом, построить график петли гистерезиса. В новом окне найти графически корни системы уравнений. Для большей точности нахождения корней удобно использовать курсор на графике (включается галочкой **Cursor Enable**).

3. Пользуясь полученным графиком в качестве примера, построить элементарные логические функции «AND», «OR», «NOT». При введении корректных значений информационных сигналов зависимость интенсивности на выходе системы от интенсивности на входе будет описываться данными логическими функциями.

4. Из анализа значений интенсивности сделать вывод о зависимости работы логических переключателей от вида гистерезисной петли и, соответственно, о зависимости вида петли от параметров на входе в кольцевой резонатор.

5. Представить полученный график гистерезисной зависимости интенсивности света на выходе резонатора от интенсивности на входе.

6. Получить логические элементы, работающие на основе полученного гистерезиса.

#### Контрольные вопросы

1. Доказать, что оптическая бистабильность является нелинейным эффектом.

2. Объяснить, почему для случая бистабильности имеется только два стабильных состояния системы, а третье состояние является нестабильным.

3. Каковы необходимые свойства систем с оптической бистабильностью?

4. Дать характеристику петли гистерезиса при работе кольцевого оптического резонатора.

5. Дать характеристику нелинейного уравнения (6.1) и метода его решения.

6. Дать характеристику участка 1-3 на графике зависимости коэффициента пропускания от интенсивности света внутри нелинейной системы (рис. 6.3).

7. Как могут быть использованы на практике бистабильные оптические системы?

8. Каковы исходные параметры для задания конфигурации кольцевого оптического резонатора?

9. Какие элементарные логические функции могут быть получены на основе полученного в работе графика гистерезисной зависимости интенсивности света на выходе резонатора от интенсивности на входе?

10. Дать физическое объяснение полученным в лабораторной работе результатам и зависимостям.

### Лабораторная работа № 7.

### Определение коэффициента связи мод в волоконном световоде

### Цель работы:

1. Знакомство с теорией связанных мод.

2. Изучение работы направленных волоконных ответвителей.

3. Измерение коэффициента связи мод в оптических световодах.

Оборудование, приборы и принадлежности: лазер, два волокна со спилом, микрообъектив, фотоприемник (фотоприемный зонд), вольтметр, измерительный держатель, платформа.

### Краткие теоретические сведения

Многие задачи волноводной и нелинейной оптики, касающиеся обмена мощностью между поверхностными волнами или модами волоконного световода (ВС), можно рассматривать на основе теории связанных волн. Любое возмущение параметров волновода приводит к связи его мод, амплитуды которых медленно изменяются вдоль направления ИХ распространения, причем предполагается, что на расстояниях порядка длины световой волны изменение амплитуд мод мало. В общем случае теория связанных волн рассматривает связь между всеми модами ВС, образующими полную ортогональную систему, т.е. в их число включаются и моды излучения.

Для большинства видов связи волн в ВС можно ограничиться двухволновым приближением, когда учитывают связь только двух мод, для которых выполняется условие фазового синхронизма и обеспечивается значительный обмен мощностью, a всеми другими межмодовыми взаимодействиями пренебрегают. Представим эти две интересующие нас монохроматические волны, являющиеся собственными модами невозмущенного световода, в следующем виде:

$$E_m(z,t) = A_m exp[i(\omega t - \beta_m z)], \qquad (7.1)$$

$$E_n(z,t) = A_n exp[i(\omega t \pm \beta_n z)], \qquad (7.2)$$

где Am, и An – комплексные амплитуды волн,  $\beta m$  и  $\beta n$  – их постоянные распространения.

При наличии возмущения в световоде возникает связь и обмен мощностью между модами  $E_m$  и  $E_n$  в направлении их распространения. В большинстве интересующих нас случаев возмущение параметров BC можно представить в виде распределенного источника поляризации

среды, а сам процесс связи и обмена мощностью между модами – как взаимодействие поверхностных волн с волнами поляризации. Для поверхностных волн (7.1) и (7.2) изменения их амплитуд определяются системой уравнений связанных волн:

$$\frac{dA_m}{dz} = -i\beta_m A_m - ik_{mn} A_n, \tag{7.3}$$

$$\frac{dA_n}{dz} = \pm i\beta_n A_n - ik_{nm} A_m, \tag{7.4}$$

где  $k_{mn}$  и  $k_{nm}$  – коэффициенты связи волн; ( $\beta_m - \beta_n$ )/2 =  $\delta$  – расстройка фаз связанных волн. Знак минус в показателе экспоненты в (7.2) и соответственно в уравнении (7.4) соответствует однонаправленной связи волн, когда их фазовые скорости имеют одинаковые направления, а знак плюс – разнонаправленной их связи. В общем случае величина  $\delta$  зависит не только от разности постоянных распространения  $\beta_m$  и  $\beta_n$ , но и от пространственных изменений возмущения параметров BC, а точнее – от разности постоянных распространения возбуждаемых и возбуждающих волн. Из закона сохранения энергии следует, что:  $k_{mn} = \pm k_{nm}^*$ , где знак плюс соответствует однонаправленной, а знак минус – разнонаправленной связи волн.

При значительном фазовом рассогласовании мод, когда  $|\delta/k| >> 1$ , обмен мощностью между модами пренебрежимо мал. Примерами устройств, использующих однонаправленную связь волн, могут служить конверторы и направленные ответвители, включая призменный ответвитель (призменное устройство ввода-вывода излучения). Эта связь лежит в основе различных нелинейных взаимодействий волн, фазовой синхронизации периодическим возмущением параметров световода, электро- и акустооптических взаимодействий и модуляции поверхностных волн.

Разнонаправленную связь поверхностных волн имеют лазеры с распределенной обратной связью и распределенными брэгговскими зеркалами.

Для случая разнонаправленной связи волн решение системы уравнений (7.3) и (7.4) при  $\delta = 0$  и обычных граничных условиях  $A_m(0) = 1$  и  $A_n(L) = 0$  дает следующие выражения для коэффициентов отражения  $R_n$  обратной и пропускания  $T_m$  прямой волн:

$$R_n(0) = th^2(kL), \ T_m(L) = \frac{1}{ch^2(kL)},$$

где *L* – длина нелинейного взаимодействия.

Значение коэффициента связи *k* определяет степень связи волн или расстояние, на котором происходит заданный обмен мощностью между ними и зависит от конкретной физической причины возмущения параметров BC, определяемой интегралом перекрытия составляющих электрических полей связанных волн.



Описание экспериментальной установки

Рис. 7.1. Схема экспериментальной установки.

Лабораторная установка, схема которой представлена на рис. 7.1, состоит из двух связанных ВС 1 и 2, лазера 3, микрообъектива 4, фотодиодного зонда 5, вольтметра 6, измерительного держателя 7 из оргстекла и платформы 8. Каждый ВС имеет спил, представляющий собой область ВС с полностью удаленной оболочкой и частично спиленной и отполированной сердцевиной. В результате состыкованные спилами ВС образуют два связанных *полосковых волновода*.

С помощью микрообъектива 4 излучение лазера 3 вводится через входной торец связанного ВС 1. В области спилов благодаря эффекту оптического туннелирования излучение перераспределяется между обоими ВС 1 и 2. Оба ВС вклеены в бруски из оргстекла, которые располагаются на платформе 8. Все три свободных торца двух ВС закреплены в измерительном держателе 7, высверленные отверстия в котором позволяют поочередно вставлять фотодиодный зонд для измерения сигнала, выводимого из торцов ВС. Сигнал с зонда регистрируется вольтметром 6.

На рис. 7.1 буквами *b*, *c* и *d* обозначены выходные торцы BC, а буквой *a* – входной торец BC 1.

#### Порядок выполнения работы

1. Включить источник питания лазера и вольтметра. К измерениям можно приступать после 20 минут прогрева источника питания лазера.

2. Измерьте по очереди с помощью фотодиодного зонда и вольтметра

интенсивности излучения  $I_b$ ,  $I_c$  и  $I_d$ , выводимого из торцов b, c и d. Повторить измерения не менее 10 раз.

3. Оценить величину коэффициента *k* связи, полагая, что выполнено условие фазового синхронизма, а длина области взаимодействия связанных ВС равна длине спиленной части сердцевины. Излучательными потерями пренебречь, а интенсивность введенного в ВС 1 излучения считать равной:

$$I_0 = I_a = I_b + I_c + I_d$$

4. Оценить степень направленности ответвителя *D* на связанных ВС:

$$D = \frac{I_b + I_c}{I_d} \,. \tag{7.5}$$

5. Выполнить оценку погрешностей измерений и сделать выводы по работе.

#### Контрольные вопросы

1. В чем заключаются основные положения теории связанных волн?

2. Перечислить основные приближения и допущения, сделанные при описании исследуемого эффекта связи мод в данной работе.

3. Где на практике используется однонаправленная и разнонаправленная связь электромагнитных волн оптического диапазона?

4. Объяснить физический смысл коэффициента связи мод.

5. Начертить график для коэффициента пропускания прямой волны

$$T_m(L) = \frac{1}{ch^2(kL)}$$

и дать физическое объяснение данному графику.

6. Каковы технологические особенности связанных волоконных световодов, используемых в данной работе?

7. Каково назначение фотодиодного зонда, применяемого в лабораторной установке?

8. Что характеризует степень направленности ответвителя D(7.5)?

9. Порядок оценки погрешностей измерений в данной работе.

# Лабораторная работа № 8. Исследование угловой структуры второй гармоники

**Цель работы:** зарегистрировать и исследовать полную картину угловой структуры второй гармоники, получающуюся при фокусировке лазерного излучения в нелинейный кристалл, с помощью фотопленки.

## Оборудование, приборы и принадлежности:

- 1. Лазер.
- 2. Нелинейный кристалл КDР для генерации второй гармоники.
- 3. Автоколлиматор и осветитель, используемые для юстировки оптической системы.
- 4. Калориметр для измерения энергии лазерного излучения.
- 5. Оптические элементы (линзы, фильтры).

### Краткие теоретические сведения

В некоторых анизотропных кристаллах можно выбрать такое направление распространения, для которого показатель преломления для обыкновенного луча основной частоты, равен показателю преломления необыкновенного луча второй гармоники. Для отрицательного одноосного кристалла на произвольной фиксированной частоте имеем:  $n_{\rm e} < n_{\rm o}$ . Именно (дигидрофосфат таким кристаллом является кристалл KDP калия). применяемый в настоящей лабораторной работе.

На практике излучение лазера обладает конечной расходимостью так, что условие синхронизма не может быть выполнено для всего пучка основного излучения. Распределение интенсивности второй гармоники вблизи направления синхронизма можно получить из формулы:

$$I_{2\omega} = const \cdot \left\{ \frac{sin[2\pi l(n_1 - n_2)/\lambda]}{2\pi (n_1 - n_2)/\lambda} \right\}^2,$$
(8.1)

найдя зависимость расстройки  $\Delta n = n_1 - n_2$  от угла  $\alpha$ , отсчитываемого от угла синхронизма  $\theta_c$ . Здесь  $\lambda$  – длина основной волны в вакууме;  $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления среды на основной и удвоенной частотах соответственно; l – длина кристалла.

Распределение интенсивности второй гармоники будет иметь вид полос, так как в направлении, перпендикулярном главной плоскости (проходящей через луч и оптическую ось),  $\Delta n$  слабо зависит от угла, а при  $\theta_c = 90^\circ$ , т.е. в экваториальной плоскости, не зависит совсем.

На рис. 8.1 представлен график функции (8.1) в зависимости от угла *α* вблизи направления синхронизма.



Рис. 8.1. Зависимость интенсивности второй гармоники от угла.

Расстояние между минимумами находится из условия обращения в нуль функции (8.1), что имеет место при выполнении соотношения:

$$\frac{2\pi l}{\lambda_1}\Delta n=m\pi$$
, где  $m=1,2,...$ 

Отсюда ширина каждой полосы (угловое расстояние между соседними минимумами) внутри кристалла равна:

$$\delta \alpha = \frac{\lambda_1}{2\gamma l}.\tag{8.2}$$

Центральная полоса, соответствующая направлению синхронизма, в два раза шире боковых полос. В отличие от минимумов максимумы функции (8.1) не являются эквидистантными.

Таким образом, полная картина угловой структуры второй гармоники, получающаяся при фокусировке основного излучения в кристалл, имеет следующий вид: для углов  $\theta > \theta_c$  наряду с полосатой структурой наблюдается сплошной фон, обусловленный синхронным взаимодействием пересекающихся пучков; для углов  $\theta < \theta_c$  – только полосатая структура.

### Описание лабораторной установки

Данная лабораторная работа выполняется на экспериментальной установке, блок-схема которой показана на рис. 8.2.



Рис. 8.2. Блок-схема экспериментальной установки.

Лазер состоит из лазерной головки, в которую вмонтированы стержень из стекла с неодимом и импульсные лампы, зеркал и блока питания. Лазер работает в импульсном режиме. От выпрямителя заряжаются накопительные конденсаторы, и при подаче на лампы импульса поджига конденсаторы разряжаются через них. Длительность вспышки света составляет примерно 0,5...1 мс. Излучение лазера представляет собой набор вспышек – «пичков», длительностью 0,1...0,3 мкс каждая. Длина волны неодимового лазера лежит в ближнем инфракрасном диапазоне и составляет 1060 нм = 1,06 мкм.

Установка оснащена системой блокировки, исключающей доступ к высоковольтным частям, а также выключающей блок питания лазера с одновременным закорачиванием накопительных конденсаторов во время юстировки оптической системы. Нелинейный кристалл для удвоения частоты лазерного излучения вырезан так, что нормаль к его торцам приблизительно совпадает с направлением синхронизма (отклонение до 1...2 градусов). При поисках синхронизма и исследовании генерации второй гармоники в пучках различной структуры используются линзы  $\mathcal{J}_1$  и  $\mathcal{J}_2$  (см. рис. 8.2). Фильтр  $\Phi_1$  пропускает инфракрасное излучение лазера и поглощает видимый свет. Это устраняет паразитную засветку экрана от импульсных ламп, мешающую наблюдению второй гармоники. Фильтр  $\Phi_2$  поглощает излучение лазера и порогускает излучение второй гармоники.

Для крепления оптических элементов установки служит оптическая скамья. Часть элементов (лазерная головка, зеркала, кристалл) укреплена на поворотных столиках и в юстируемых оправах. Все элементы можно перемещать по горизонтали и вертикали и тем самым юстировать по лучу света, создаваемого осветителем и коллиматором.

### Порядок выполнения работы

Для регистрации угловой структуры второй гармоники используется фотопленка, помещенная в фокальной плоскости объектива автоколлиматора. Для удобства экспозиции и обработки фотопленка заряжается в фотоаппарат, с которого снят объектив. Фотографирование угловой структуры второй гармоники произвести в двух случаях: без линз между лазером и кристаллом; в случае, когда перед кристаллом помещена рассеивающая линза. Негативы, полученные в этих случаях, позволят сделать заключение о следующих характеристиках:

• расходимость лазерного луча (на основании пространственной структуры, полученной без линз). За оценочное значение угла расходимости

можно принять величину  $\alpha = d/f$ , где d – размер пятна второй гармоники по вертикали, f – фокусное расстояние линзы;

• структура излучения второй гармоники, т.е. закон  $(sin x/x)^2$ , по которому зависит интенсивность второй гармоники от расстройки (из анализа пространственной структуры, полученной с использованием рассеивающей линзы). Измерением расстояния между максимумами и минимумами полос можно произвести сравнение эксперимента с теорией – формулой (8.2) или аналогичной ей (для расстояния между максимумами). Для расчета воспользоваться указанными в табл.1 значениями показателей преломления.

Таблица 1

λ, мкм	n <sub>o</sub>	n <sub>e</sub>
1,06	1,494347	1,460325
0,53	1,512974	1,470974

Расчет провести для взаимодействий «оое» и «оее» и сделать заключение о том, какой тип взаимодействия имеет место в нашем образце кристалла KDP (обратить внимание на то, что формула (8.2) дает угол внутри кристалла). Все расчеты и экспериментальные данные (включая промежуточные) занести в рабочую тетрадь.

Результаты, которые должны быть представлены при сдаче работы:

1. График зависимости энергии генерации лазера от энергии накачки. Значения пороговой энергии накачки.

2. Рисунок, иллюстрирующий, в какую сторону отклонено направление синхронизма от нормали к торцу кристалла. Величина этого отклонения. Интервал углов, в котором наблюдается вторая гармоника без использования рассеивающей линзы.

3. Негативы угловой структуры второй гармоники с указанием, в каких условиях каждый из них получен.

4. Оценочная величина угла расходимости лазерного луча.

5. Расчетные значения угловой ширины полос в структуре второй гармоники для взаимодействий «оое» и «оее».

6. Измеренное значение угловой ширины полос.

Сделать выводы по проделанной лабораторной работе.

### Контрольные вопросы

1. В чем отличие генерации второй гармоники, полученной с помощью импульсного излучения от генерации второй гармоники, полученной с помощью непрерывного излучения?

2. Какими свойствами должен обладать нелинейный кристалл для эффективной генерации второй гармоники?

3. Возможно ли совпадение фазовых и групповых скоростей первой и второй гармоники в оптическом кристалле?

4. Дать характеристику кристалла KDP (дигидрофосфат калия), применяемого в данной лабораторной работе.

5. Как влияет конечная расходимость лазерного пучка на выполнение условия фазового синхронизма?

6. Что представляет собой полная картина угловой структуры второй гармоники, получающаяся при фокусировке лазерного излучения в нелинейный кристалл?

7. Назначение системы блокировки, имеющейся в экспериментальной установке.

8. Каковы особенности фотографирования угловой структуры второй гармоники в данной работе?

9. Дать физическое объяснение графикам, полученным в данной работе.

# Лабораторная работа № 9.

# Генерация суперконтинуума в оптическом волокне на основе эффекта фазовой самомодуляции

# Цель работы:

1. Знакомство с принципом работы генератора суперконтинуума и его конструкционными особенностями.

2. Исследование выходных параметров генератора супер-континуума.

# Оборудование, приборы и принадлежности:

1. Фемтосекундный лазер (источник излучения).

2. Микрообъектив.

- 3. Генератор белого света.
- 4. Калориметр для измерения энергии лазерного излучения.
- 5. Спектрометр.
- 6. ПК.

## Краткие теоретические сведения

Суперконтинуум, или белый свет, – это излучение с широким непрерывным спектром, полученное методом нелинейно-оптического преобразования сверхкоротких лазерных импульсов. Это излучение обладает высокой спектральной яркостью и регулируемой временной длительностью. Суперконтинуум используется для решения задач оптической связи, управления предельно короткими импульсами, в нелинейной спектроскопии, в микроскопии и лазерной биомедицине. Основным нелинейным процессом, определяющим генерацию суперконтинуума фазовая является самомодуляция.

Кроме этого процесса, в формировании спектра суперконтинуума участвуют вынужденное комбинационное рассеяние и параметрическое четырёхволновое смешение. Новые спектральные компоненты, возникающие в результате этих процессов, затем также уширяются за счет фазовой само- и кросс-модуляции, сливаясь и приводя к генерации излучения с широким непрерывным спектром.

фазовой Рассмотрим влияние самомодуляции на генерацию Если мощный лазерный суперконтинуума. импульс С гауссовым распределением интенсивности по времени (рис. 9.1а) распространяется в кубично-нелинейной среде (кристаллы с центром симметрии, жидкости и  $\chi^{(3)}$ , восприимчивостью кубично-нелинейной газы) то показатель С

преломления вещества становится переменной величиной, приобретая нелинейную добавку, зависящую от интенсивности света:

$$n(t) = n_0 + n_2 I(t), (9.1)$$

где  $n_0$  – линейный показатель преломления,  $n_2$  – рефракционный индекс, связанный с нелинейной восприимчивостью  $\chi^{(3)}$ .



Рис. 9.1. Лазерный импульс с гауссовым распределением интенсивности (а) и зависимость модуляции его частоты от времени (б).

Предположим, что плоская волна распространяется в нелинейном веществе:

$$E(x,t) = Aexp[i(\omega_0 t - kx)].$$

Тогда фазу этой волны можно представить в следующем виде:

$$\Phi(t) = \omega_0 t - \frac{\omega_0}{c} n(t) x . \qquad (9.2)$$

Поскольку мгновенная частота является производной от фазы волны по времени, то, сравнивая (9.1) и (9.2), запишем модуляцию частоты в виде следующего соотношения:

$$\delta\omega(t) = \omega(t) - \omega_0 = -\frac{\omega_0 n_2 x}{c} \cdot \frac{dI(t)}{dt}.$$
(9.3)

Вид функции (9.3) представлен на рис. 9.16. Из анализа этой кривой можно сделать вывод о том, что при возникновении процесса фазовой самомодуляции в веществе с положительным значением  $n_2$  при возрастании интенсивности лазерного импульса возникают новые низкочастотные оптические компоненты, а при уменьшении интенсивности лазерного импульса – новые высокочастотные компоненты.

Генерация суперконтинуума наблюдается при фокусировке сверхкоротких лазерных импульсов во многих веществах, например, в газах, различных оптических стёклах, стандартных и микроструктурированных оптических волокнах.

Следует отметить, что оптические волокна обеспечивают большие длины нелинейно-оптического взаимодействия лазерных импульсов с

достаточно высокой интенсивностью, позволяя радикально снизить требования к мощности лазерного излучения, необходимого для генерации суперконтинуума. На рис. 9.2 представлена иллюстрация уширения спектра сверхкороткого лазерного импульса с разной энергией при прохождении оптического волокна и связанной с этим фазовой самомодуляцией.



Рис. 9.2. Спектральное уширение лазерного импульса при фазовой самомодуляции: спектр на входе в оптическое волокно (кривая 1); спектр на выходе из волокна при энергии импульса 0,1нДж (кривая 2); 0,2 нДж (кривая 3); 0,3 нДж (кривая 4).

### Экспериментальная установка

Принципиальная блок-схема экспериментальной установки для выполнения лабораторной работы приведена на рис. 9.3.



Рис. 9.3. Блок-схема лабораторной установки.

## Порядок выполнения работы

1. Собрать схему эксперимента согласно рис. 9.3 с использованием микрообъектива, генератора белого цвета, калориметра и спектрометра. Юстировка согласования выходящего из микрообъектива излучения с входной апертурой волокна осуществляется с помощью прецизионного трёхкоординатного столика.

2. С помощью калориметра измерить выходную мощность лазера. Установить максимальное значение энергии излучения лазера, прошедшего через генератор белого света, используя калориметр. Провести измерения энергетических характеристик лазера, данные занести в таблицу.

3. Включить спектрометр и измерить спектральные характеристики излучения белого света для различных значений силы тока диода усилителя. Для получения спектров пользоваться компьютерной программой «Respect». Сохранить спектр в виде электронного файла. Данные занести в таблицу.

4. Провести расчеты зависимости полуширины генерируемого спектра Δλ (*I*) от интенсивности излучения.

Таблица

Определение КПД генерации суперконтинуума				
Р <sub>0</sub> , мВт	Р <sub>СК</sub> , мВт	η, %		
Определение спектральных характеристик суперконтинуума (СК)				
Сила тока диода	Δλ. ΗΜ	λ ΗΜ		
усилителя	<b>2</b> 70, 1101	Max, IIII		
500 мА				
250 мА				
100 мА				

Исследование выходных параметров генератора белого цвета

5. Заполнив столбцы таблицы, рассчитать КПД η преобразования мощности лазерного излучения в мощность излучения суперконтинуума.

6. Построить график зависимости  $\Delta \lambda$  (*I*).

7. Сделать общие выводы по проделанной лабораторной работе.

8. Сделать вывод о возможности использования генератора белого света.

### Контрольные вопросы

1. Дать характеристику суперконтинуума.

2. Каково влияние фазовой самомодуляции на процесс генерации суперконтинуума?

3. Объяснить, почему фазовая модуляция сопровождается частотной модуляцией.

4. Какова зависимость спектрального уширения лазерных импульсов за счет фазовой самомодуляции от энергии импульсов?

5. Каково назначение 3-хкоординатного столика в лабораторной установке?

6. Порядок расчета КПД генерации суперконтинуума.

7. Какие спектрометрические измерения проводятся в данной лабораторной работе?

8. Дать физическое объяснение графику зависимости полуширины генерируемого спектра суперконтинуума  $\Delta\lambda$  (*I*) от интенсивности излучения.

9. Какова роль других нелинейных оптических явлений (вынужденное комбинационное рассеяние, четырехволновое смешение) в формировании спектра суперконтинуума?

### Список литературы

1. Беспрозванных В.Г., Первадчук В.П. Нелинейная оптика: учебное пособие. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2011. – 200 с.

2. Б. Салех, М. Тейх. Оптика и фотоника: принципы и применения. Учебное пособие в 2-х томах. Т. 2. – Долгопрудный: Изд. дом «Интеллект», 2012. – 784 с.

3. Г. Агравал. Применение нелинейной волоконной оптики: учебное пособие. – СПб: Лань, 2011. – 592 с.

4. Воронин В.Г., Наний О.Е. Основы нелинейной волоконной оптики: учебное пособие. – М.: Университетская книга, 2011. – 128 с.

5. Петров Н.В., Городецкий А.А., Беспалов В.Г. и др. Фемтосекундная оптика и фемтотехнологии: виртуальный лабораторный практикум. – СПб: НИУ ИТМО, 2011. – 64 с.

6. Павлов В.В., Семашко В.В. Оптический параметрический генератор: учебно-методическое пособие к лабораторному практикуму. – Казань: Изд-во КФУ, 2014. – 68 с.

7. Санников Д.Г. Интегральная и волоконная оптика: специальный лабораторный практикум. – Ульяновск: Изд-во УлГУ, 2007. – 77 с.

8. Иванов Н.А. Генерация второй оптической гармоники: методические рекомендации. – Иркутск: Изд-во ИрГУ, 2005. – 10 с.