

Лекция 1

ВВЕДЕНИЕ В НЕЛИНЕЙНУЮ ОПТИКУ

Вопросы:

- 1. Интенсивность света и ее влияние на характер оптических явлений. Линейная и нелинейная оптика.**
- 2. Предмет и задачи нелинейной оптики, история и основные этапы ее развития.**

Интенсивность света

$\vec{E} = \vec{E}(\vec{r}, t)$, $\vec{H} = \vec{H}(\vec{r}, t)$ – электрическая и магнитная составляющие световой волны.

$\varepsilon_0 \varepsilon E^2 = \mu_0 \mu H^2$ – соотношение Максвелла.

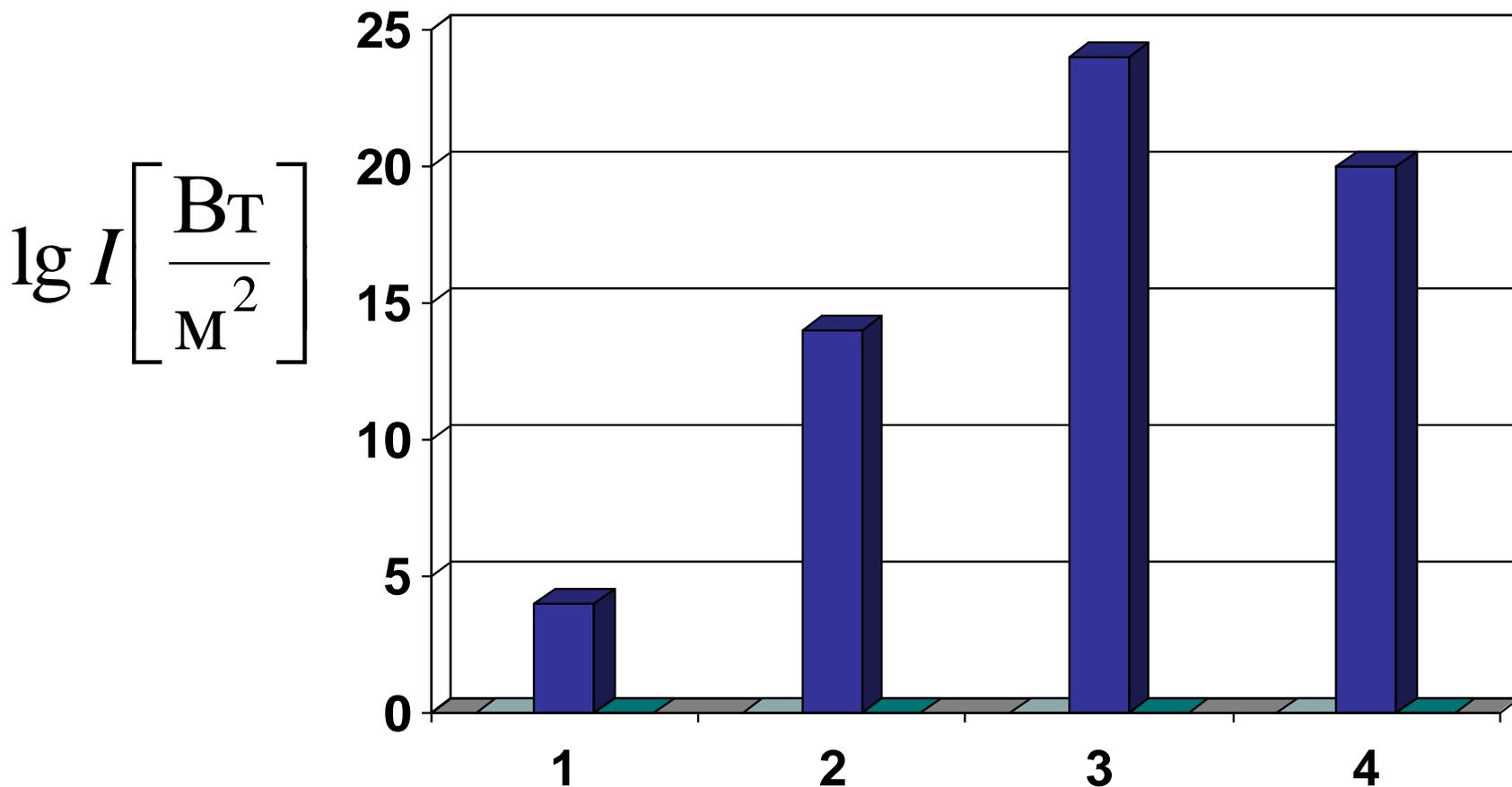
$I = \langle \vec{E} \cdot \vec{H} \rangle = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\mu_0 \mu}} \cdot \langle E^2 \rangle$ – интенсивность световой волны.

Для плоской монохроматической волны:

$$E(x, t) = A \cdot \cos(\omega t - kx) \Rightarrow I = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\mu_0 \mu}} \cdot A^2$$

Интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды светового вектора.

Рост интенсивности с развитием источников света



1 – тепловые источники света; 2 – стандартный импульсный лазер; 3 – современный сверхмощный лазер; 4 – для сравнения: интенсивность излучения, напряженность электрического поля которого равна внутриатомной напряженности.

Линейная оптика

Для любых обычных (долазерных) источников света с использованием всевозможных оптических схем имеем:

$$I \ll I_{\text{ат}} \quad (\text{или} \quad E \ll E_{\text{ат}})$$

Линейная оптика – это оптика малых интенсивностей света, когда отклик среды на внешнее оптическое воздействие пропорционален (линеен) величине электрического поля в световой волне.

Известные оптические законы распространения света и его взаимодействия со средой, например:

- **прямолинейное распространение света в однородной среде;**
 - **независимость световых пучков при их пересечении;**
 - **линейное поглощение света в оптически прозрачных средах**
- и др. справедливы лишь в предельном случае малых I .**

Принцип суперпозиции и его нарушение в нелинейной оптике

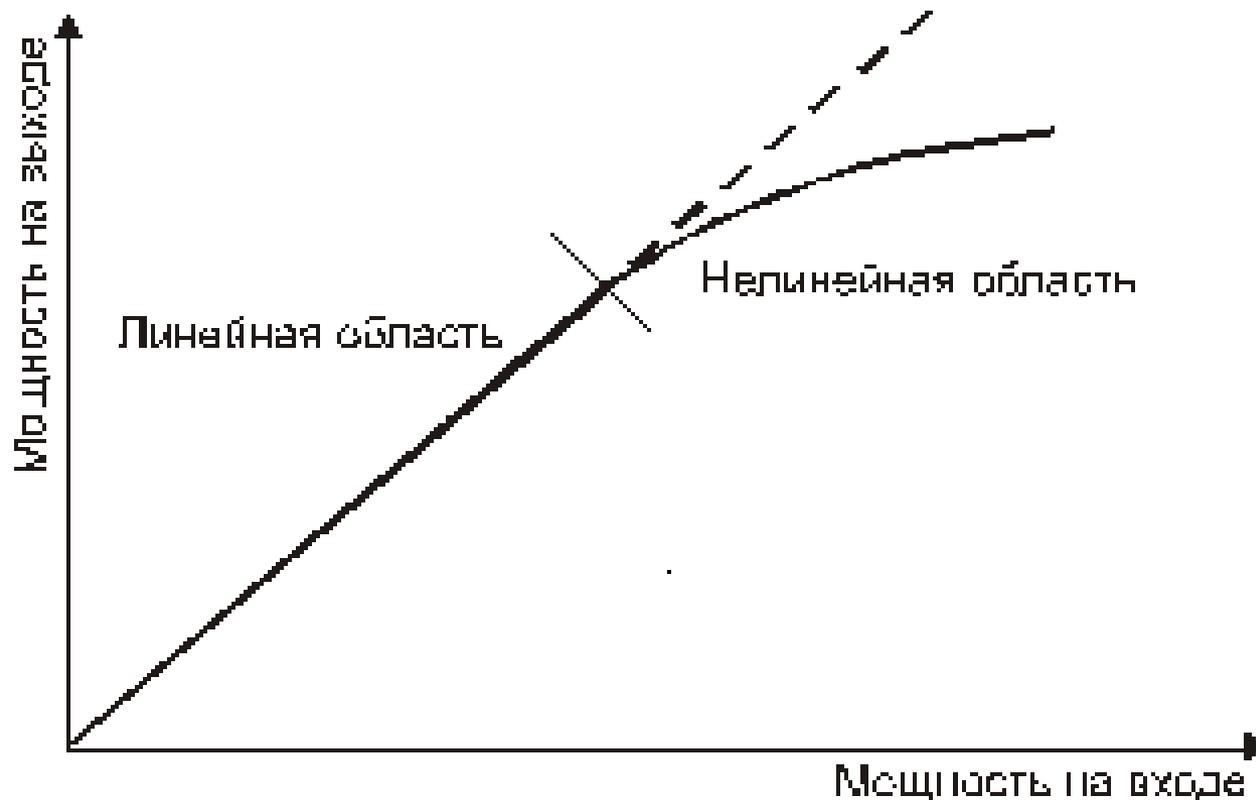
В основе линейной оптики лежит *принцип суперпозиции*:

$$E(x, t) = \sum_{i=1}^n A_i \cdot \cos(\omega_i t - k_i x)$$

(любое волновое поле рассматривается как сумма компонент более простой пространственной конфигурации, например, плоских монохроматических волн, при этом каждая из компонент не зависит от других – *закон независимости световых лучей*).

При большой интенсивности влияние электромагнитного поля волны на свойства среды не является малым, что приводит к нелинейному взаимодействию волн со средой и друг с другом, появлению новых спектральных компонент поля, что свидетельствует о нарушении принципа суперпозиции.

Пример. Нелинейность мощности при распространении лазерных импульсов вдоль оптического волокна.



**Особенности: 1) пороговый характер явления;
2) эффект «насыщения».**

От линейного к нелинейному распространению

- До тех пор пока в **оптическая мощность** в оптическом кабеле **мала**, оптический кабель можно рассматривать как **линейную среду передачи**

Затухание и коэффициент преломления **не зависят** от мощности сигнала

- Когда **оптическая мощность** становится существенно **больше**, оптический кабель становится **нелинейной средой передачи**

Затухание и коэффициент преломления **зависят** от мощности сигнала

Физические причины различий между линейной и нелинейной оптикой

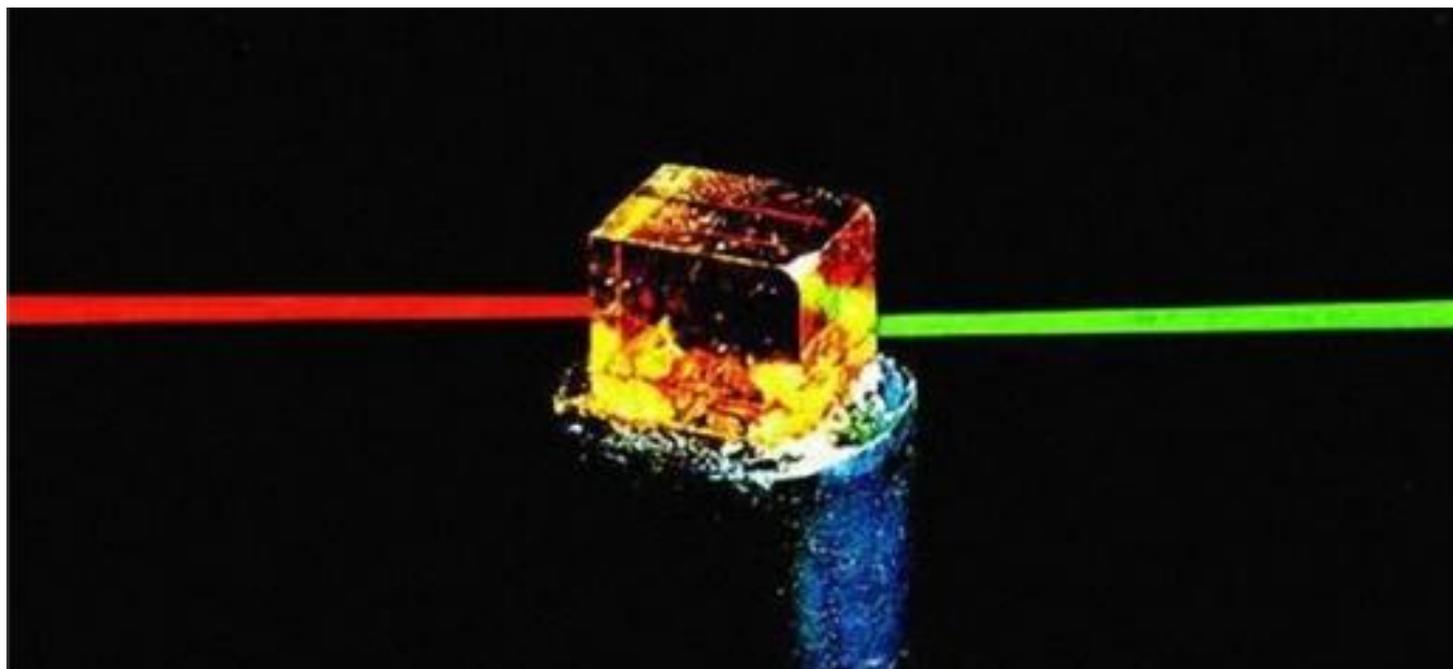
Определение. Нелинейная оптика – это раздел физической оптики, изучающий распространение интенсивных световых волн и взаимодействие их с веществом, при котором характер оптических явлений зависит от интенсивности излучения.

Основные причины, определяющие различный характер взаимодействия световых полей малой и большой интенсивности с веществом.

При большой интенсивности определяющую роль играют не однофотонные, а многофотонные процессы (в элементарном акте взаимодействия с атомом поглощаются несколько фотонов).

При большой интенсивности под действием светового поля исходные характеристики вещества изменяются (среда становится нелинейной), и световая волна испытывает самовоздействие.

***Пример.* Возникновение новых спектральных компонент светового поля в нелинейном кристалле.**



Пример. Изменение направления распространения света в однородной среде из-за зависимости показателя преломления от интенсивности света.

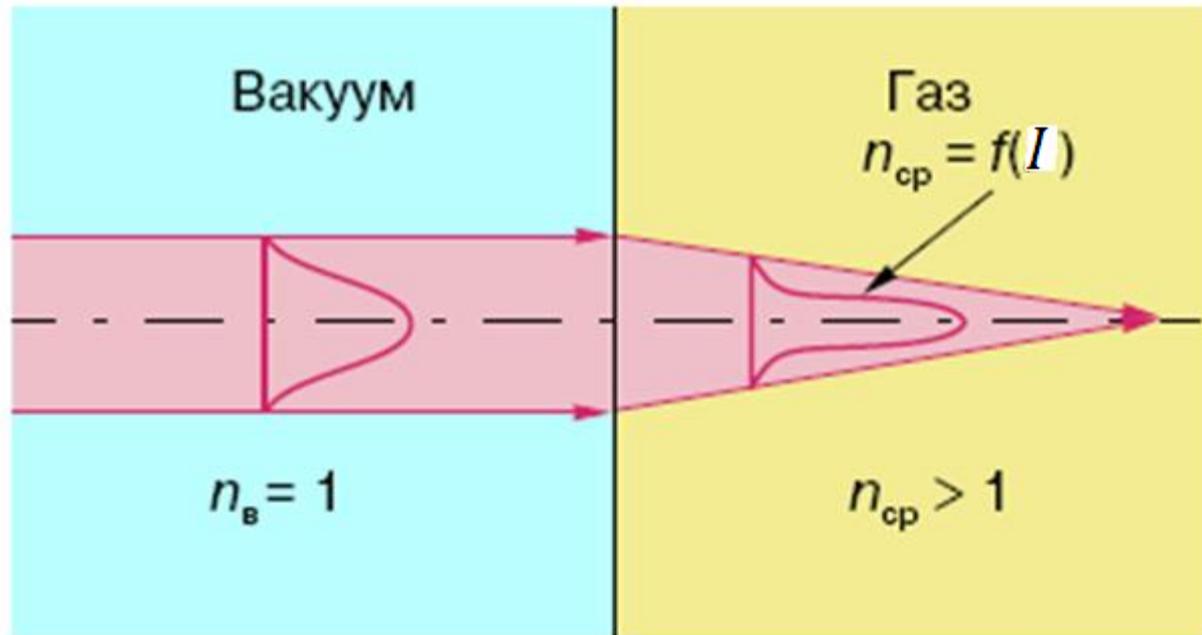


Схема самофокусировки света

$$n = n_0 + n_2 \cdot I + n_4 \cdot I^2 + \dots, \quad n_2 > 0 \text{ — рефракционный индекс.}$$

Важнейшей областью проявления нелинейных оптических явлений является волоконная оптика.

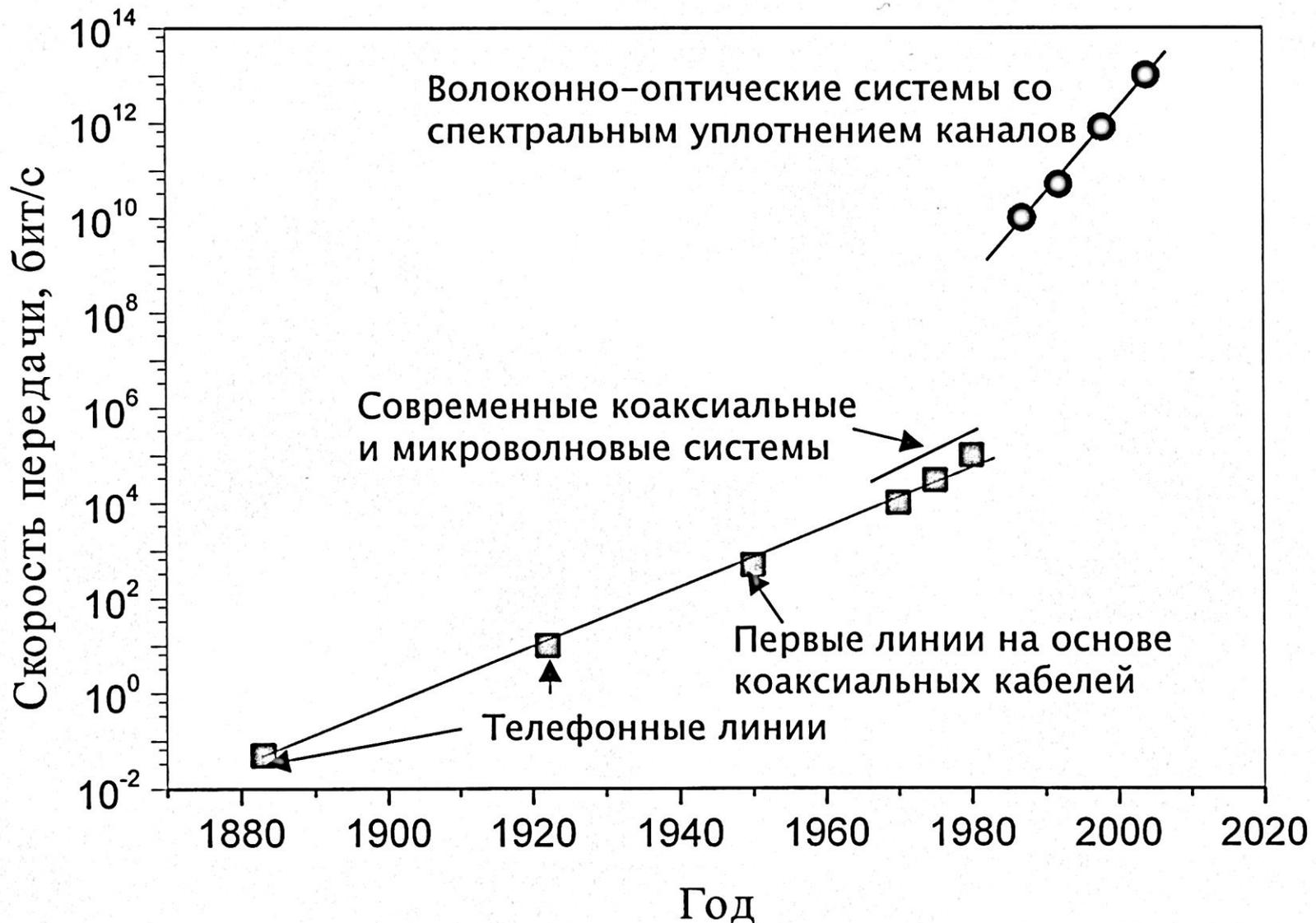
**Новые технологии в волоконной оптике,
тесно связанные с физикой нелинейных эффектов**

Разработка и совершенствование солитонных линий связи

Технология уплотнения по длинам волн (DWDM – Dense wavelength division multiplexing)

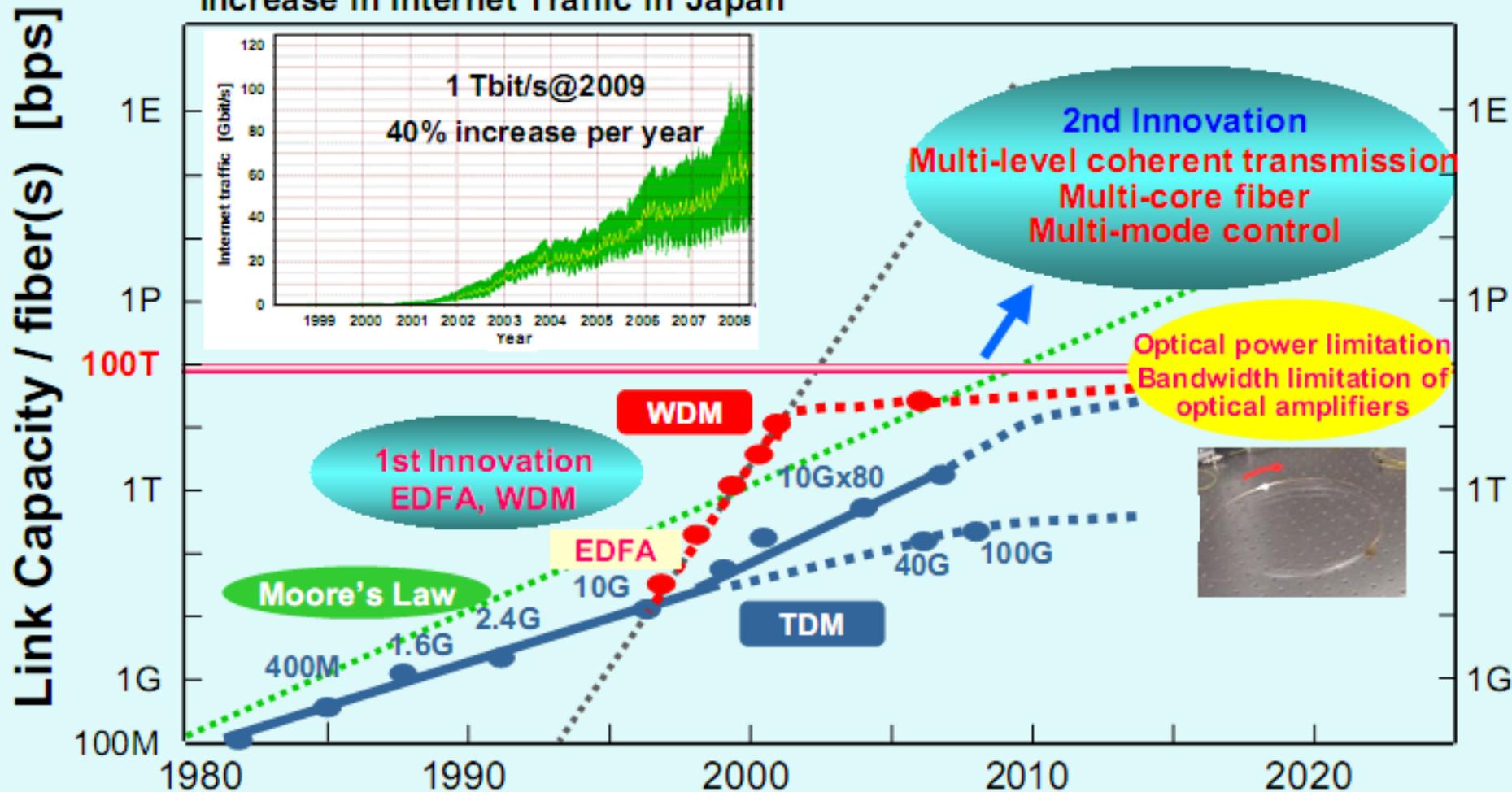
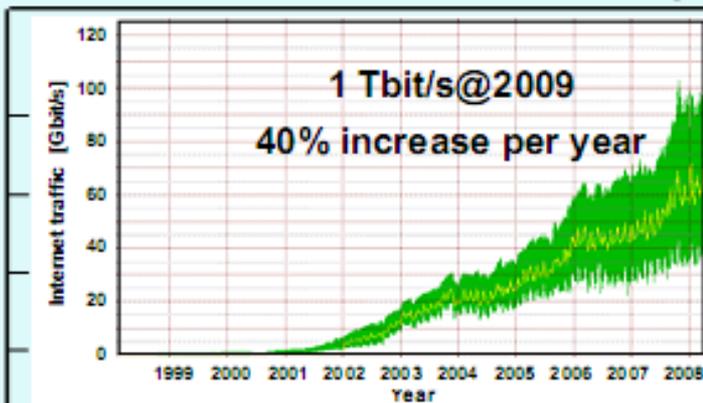
Разработка широкополосных волоконно-оптических систем на основе волоконных генераторов суперконтинуума

Увеличение скорости передачи информации



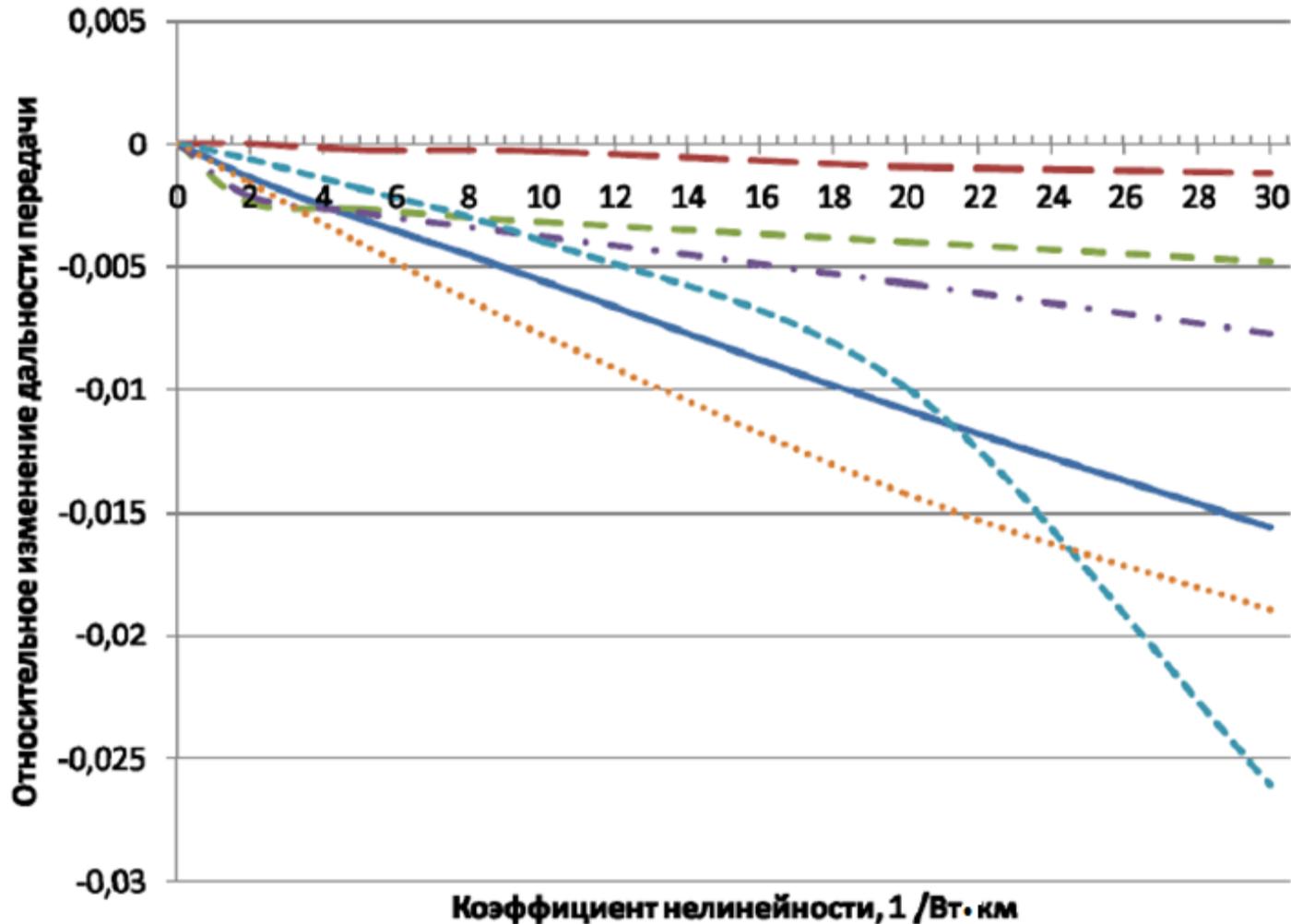
Technological overview of optical fiber transmission

Increase in Internet Traffic in Japan



Нелинейные оптические эффекты создают ограничения по характеристикам ВОЛС

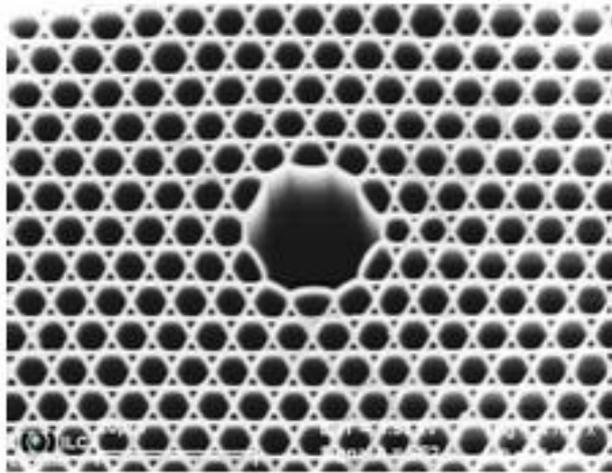
Влияние нелинейных оптических эффектов на дальность передачи информации в ВОЛС



$$\gamma = \frac{n_2 \omega}{c S_{\text{эфф}}}$$



Новейшие оптоволоконные технологии, основанные на нелинейных физических механизмах



Микроструктурированный
(фотонно-кристаллический)
волоконный световод



Цельноволоконный фемтосекундный
эрбиевый лазер

Предметом нелинейной оптики являются изменения оптических свойств вещества в зависимости от интенсивности светового поля, а также обусловленные этими изменениями нелинейные оптические эффекты.

Основные задачи нелинейной оптики

- 1. Теоретическое и экспериментальное исследование нелинейных оптических явлений и создание научно-методической базы для других областей физики (фотоника, оптоинформатика, интегральная и волоконная оптика и др.)**
- 2. Разработка новых нелинейных оптических устройств передачи, обработки и хранения информации в волоконно-оптических системах.**
- 3. Создание новых нелинейных оптических материалов с заданными свойствами для исследования волновых и быстропротекающих процессов в атомах, молекулах и кристаллах, а также различных волоконно-оптических системах.**

История и основные этапы развития нелинейной оптики

1. Начальный (долазерный) этап.

- **XIX в.** – Открытие нелинейных оптических эффектов (Поккельса, Керра, Фарадея и др.), действующих в слабых световых полях.
- **1923** – Опыты С.Вавилова и В.Левшина по резонансному просветлению оптических сред.
- **1947-1950** – Работы Г.Горелика по оптическому смещению.
- **1955** – Эксперименты А.Форрестера (США) по наблюдению нелинейных взаимодействий световых волн.
- **1958** – Создание оптических волокон с оболочкой (О'Брайен, Х.Хансен, США) с относительно высокими потерями.

2. Создание лазеров и разработка теоретических и экспериментальных основ нелинейной оптики.

- **1961** – Опыт П.Франкена (США) по генерации 2-ой гармоники.
- **1962** – Открытие самофокусировки света в нелинейной среде.
- **1964** – Создание первого волоконного лазера (США).

История и основные этапы развития нелинейной оптики

(продолжение)

- **Середина-конец 60-х г.г.** – Создание отечественной научной школы по нелинейной оптике под рук. Р.Хохлова.
 - **Вторая половина 60-х г.г.** – Работы Ч.К.Као по обоснованию возможности создания оптоволоконных линий связи.
 - **1967** – Первые исследования распространения сверхкоротких световых импульсов в нелинейных материалах.
 - **1970** – Создание оптического волокна с потерями 20 дБ/км.
 - **1979-1980** – Первое экспериментальное исследование оптических солитонов в волоконных световодах (Л.Молленауэр, США).
- 3. Современный этап. Разработка эффективных нелинейно-оптических технологий и устройств с улучшенными характеристиками для различных областей применения.**

Выдающиеся ученые, внесшие существенный вклад в развитие нелинейной оптики



Академик Сергей Иванович Вавилов (1891 – 1951) – советский физик, автор фундаментальных работ в области физической оптики.



Академик Рем Викторович Хохлов (1926 – 1977) – один из создателей отечественной научной школы по нелинейной оптике.



Николас Бломберген (род. в 1920 г.) – нидерландский физик, лауреат Нобелевской премии по физике 1981 г. за вклад в развитие нелинейной оптики и лазерной спектроскопии.



Чарльз Куэн Као (род. в 1933 г.) – американский ученый китайского происхождения, лауреат Нобелевской премии по физике 2009 г. за достижения в развитии оптоволоконных систем связи.