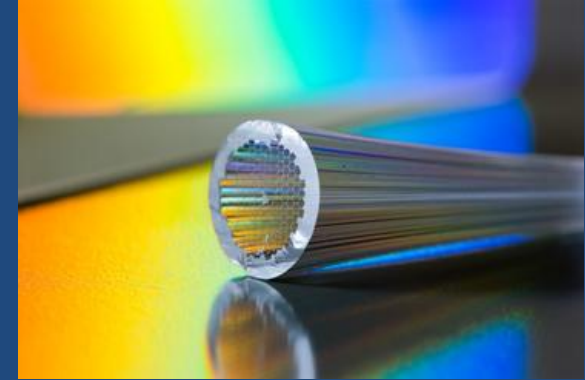


Специальные оптические волокна и их применение



Демидов Владимир Витальевич

научный сотрудник

Научно-исследовательский и технологический институт
оптического материаловедения ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова»

Программа курса «Специальные оптические волокна и их применение»

Неделя	Название	Тип занятия
1	Общие сведения об оптических волокнах	3 лек.
2	Общие сведения об оптических волокнах	2 прак.
3	Расчет параметров оптических волокон связного и специального применения	1 лаб. 1 лек.
4	Специальные оптические волокна для сетей и систем связи	1 прак. 1 лаб.
6	Оптические волокна, легированные редкоземельными элементами	1 лаб. 1 лек.
7	Оптические волокна, сохраняющие поляризацию излучения	1 прак. 1 лек.
8	Фоточувствительные оптические волокна с решетками Брэгга	1 прак. 1 лек.
9	Микроструктурированные и фотонно-кристаллические оптические волокна	1 прак. 1 лек.

Отчетность по курсу «Специальные оптические волокна и их применение»

Экзамен !!!

(два вопроса по курсу + задача)

Допуск к экзамену – посещение $\frac{3}{4}$ лекционных занятий + посещение $\frac{3}{4}$ практических занятий + зачтение $\frac{3}{4}$ лаб. работ

Экзамен «автоматом» – посещение $\frac{3}{4}$ лекционных занятий + посещение $\frac{3}{4}$ практических занятий + все зачтенные лаб. работы + активность на практических занятиях

Литература по курсу «Специальные оптические волокна и их применение»

1. Мидвинтер Дж.Э. Волоконные световоды для передачи информации: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1983. – 336 с.
2. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.
3. Мендес А., Морзе Т.Ф. Справочник по специализированным оптическим волокнам: Пер. с англ. – М.: Техносфера, 2012. – 728 с.
4. Никоноров Н.В., Сидоров А.И. Материалы и технологии волоконной оптики: специальные оптические волокна: учеб. пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 130 с.
5. Шумкова Д.В., Левченко А.Е. Специальные волоконные световоды: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 178 с.
6. Шандаров В.М. Волоконно-оптические устройства технологического назначения: учеб. пособие. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 198 с.

Начальные сведения об оптической связи

История оптической связи

Способ связи	Источник информации	Скорость передачи	Появление	Макс. информац. емкость	Макс. расстояние между регенераторами
Сигнальный костер, сигнальный дым	костер, дым	–	20 тыс. лет назад	1 бит	Прямая видимость невооруженным глазом (5 км в хорошую погоду)
Система сторожевых башен	костер, дым	низкая	500 лет до н.э.	1 бит	Прямая видимость невооруженным глазом (5 км в хорошую погоду)
Водяной телеграф	костер, дым	низкая	400 лет до н.э.	5 бит	Прямая видимость невооруженным глазом (5 км в хорошую погоду)
Факельный телеграф Клеоксена и Демокрита	факелы	очень низкая	100 лет до н.э.	произвольная	Прямая видимость невооруженным глазом (1 км в хорошую погоду)

Начальные сведения об оптической связи

История оптической связи



<i>A</i>	<i>B</i>	<i>Γ</i>	<i>Δ</i>	<i>E</i>
<i>Z</i>	<i>H</i>	<i>Θ</i>	<i>I</i>	<i>K</i>
<i>Λ</i>	<i>M</i>	<i>N</i>	<i>Ξ</i>	<i>O</i>
<i>Π</i>	<i>P</i>	<i>Σ</i>	<i>T</i>	<i>Υ</i>
<i>Φ</i>	<i>X</i>	<i>Ψ</i>	<i>Ω</i>	

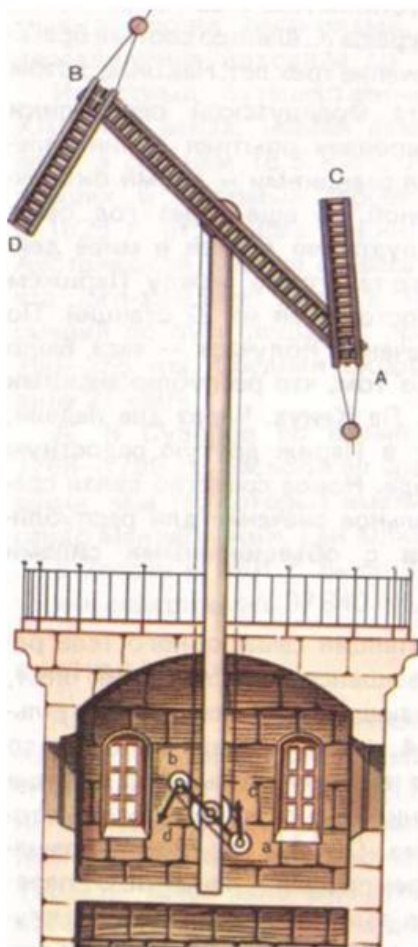
Начальные сведения об оптической связи

История оптической связи

Способ связи	Источник информации	Скорость передачи	Появление	Макс. информац. емкость	Макс. расстояние между регенераторами
Телеграф Шаппа	подвижные планки	средняя	1794 г.	произвольная	Прямая видимость в подзорную трубу (15 км в хорошую погоду)
Волоконно-оптическая связь	лазер	очень высокая	1960 г.	произвольная	В настоящее время около 200 км

Начальные сведения об оптической связи

История оптической связи



Начальные сведения об оптической связи

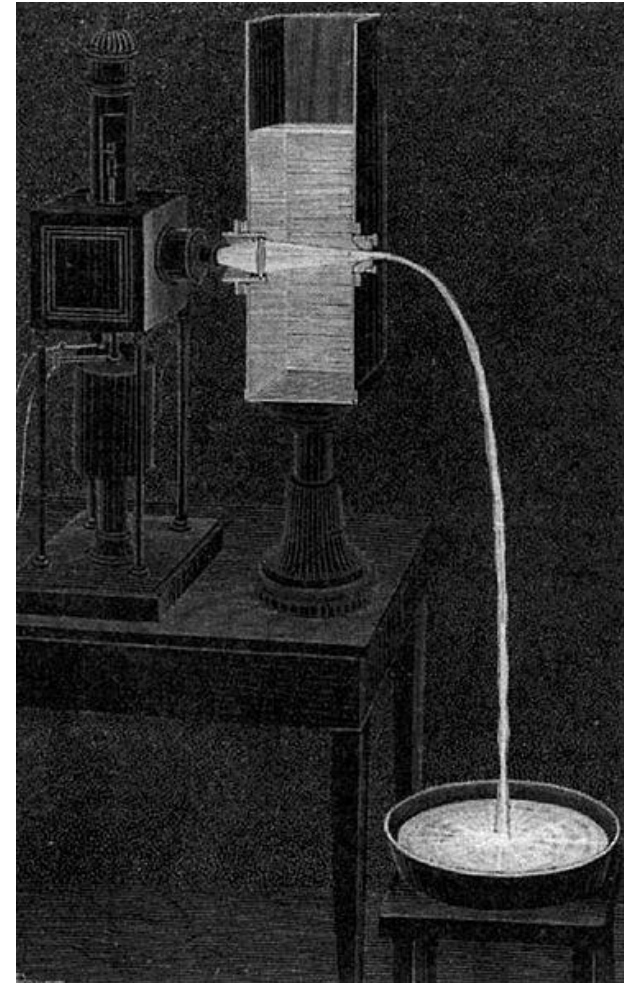
История волоконно-оптической связи

1842 г. – Жан Даниэль Колладон впервые описал «световой фонтан» в работе «Об отражении лучей в середине параболического потока жидкости»

1870 г. – английский физик Джон Тиндалл экспериментально доказал возможность управления светом на основе внутренних отражений в струе очищенной воды

Начальные сведения об оптической связи

История волоконно-оптической связи



Начальные сведения об оптической связи

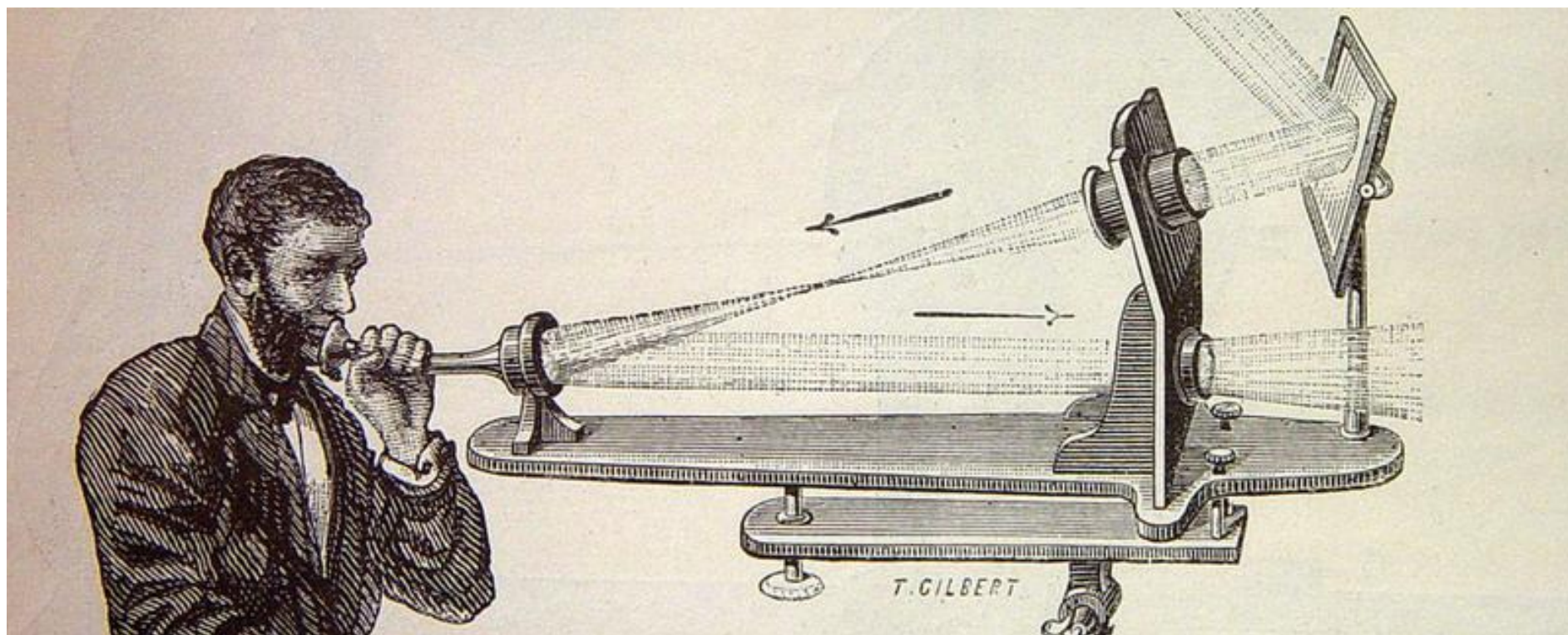
История волоконно-оптической связи

1880 г. – Александр Белл запатентовал фотофон – устройство, в котором направленный свет использовался для передачи голоса

Передатчик передавал сообщение на приемник, но вместо передачи электрического сигнала по проводу, он использовал свет, сфокусированный параболическим зеркалом. В момент передачи сообщения зеркало колебалось, модулируя солнечный свет и варьируя тем самым интенсивность сигнала, получаемого приемником с селеновым чувствительным элементом. Модулированный голосом солнечный свет, поступавший на образец селена, изменял силу тока, протекающего через контур приемного устройства, и воспроизводил голос. Расстояние передачи речевого сигнала составляло 200 м.

Начальные сведения об оптической связи

История волоконно-оптической связи



Начальные сведения об оптической связи

История волоконно-оптической связи

Начало XX века – первые теоретико-экспериментальные исследования диэлектрических волноводов, в том числе, гибких стеклянных стержней

50-ые гг. XX века – Ван Хиил (Голландия), О'Бриен (США) и Капани (Великобритания) независимо друг от друга разработали гибкие жгуты из регулярно уложенных стеклянных волокон для передачи изображения (эндоскопы), нашедшие применение в медицине; затухание сигнала 1000 дБ/км

1956 г. – Капани предложил термин «волоконная оптика»

Начальные сведения об оптической связи

История волоконно-оптической связи

1960 г. – начало разработки принципов создания квантовых генераторов – лазеров

Ч. Таунс, А. Шавлов, А.М. Прохоров, Н.Г. Басов

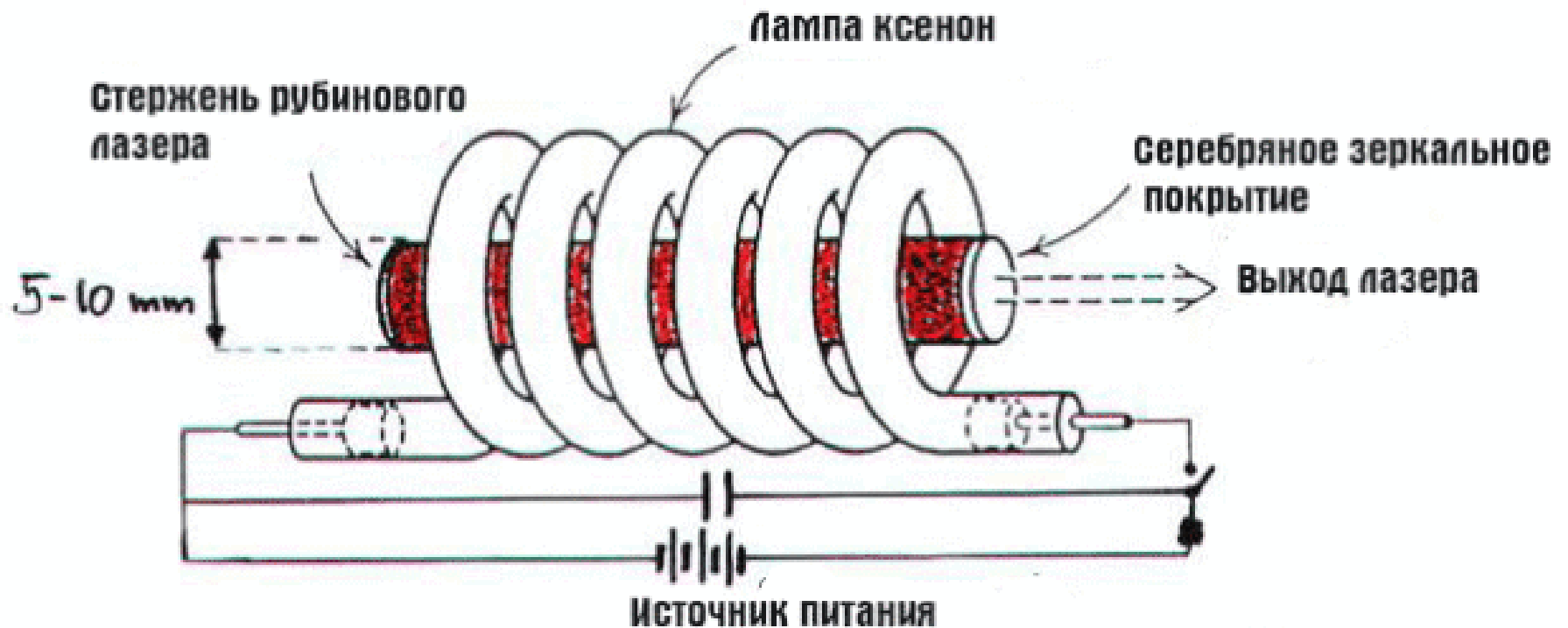
LASER – light amplification by stimulated emission of radiation

1960 г. – Теодор Мэйман создал первый в мире рубиновый лазер ($\lambda = 694.3$ нм), гелий-неоновый лазер ($\lambda = 632.8$ нм)

1962 г. – лазерная генерация впервые была получена на полупроводниковом кристалле

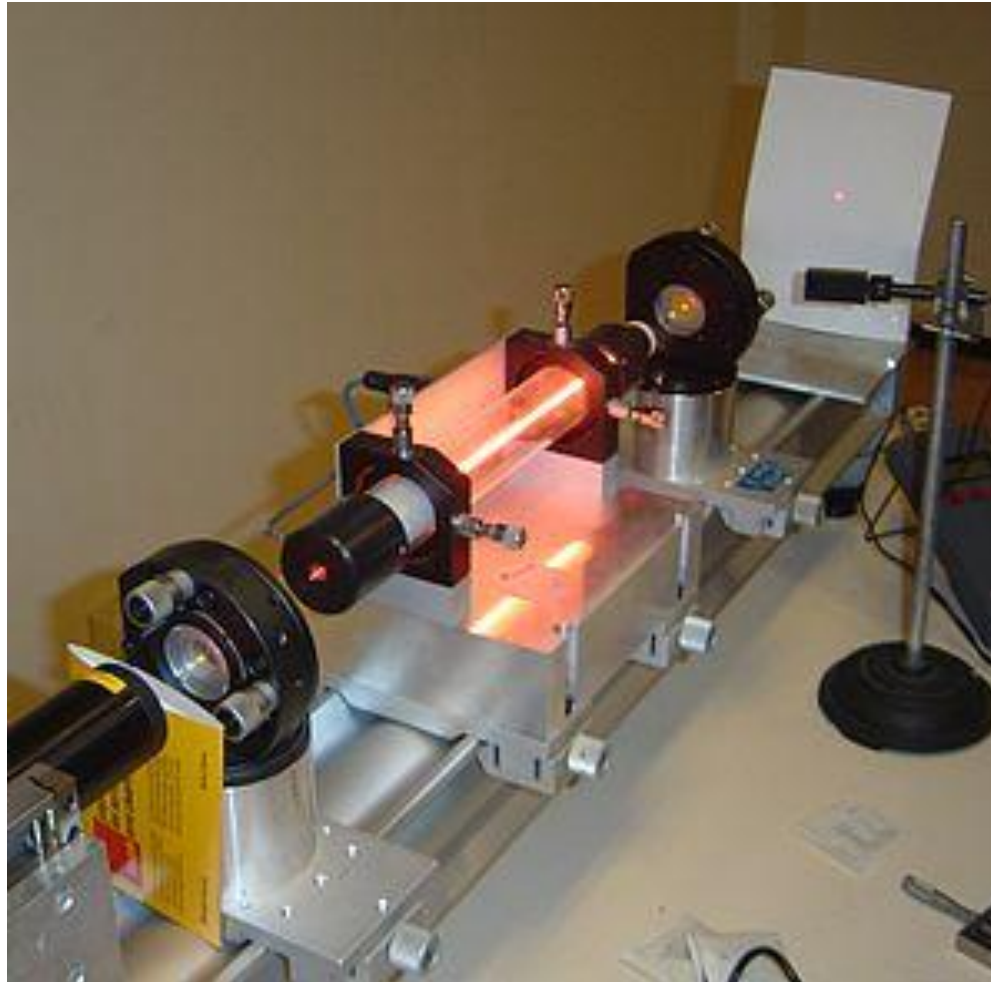
Начальные сведения об оптической связи

История волоконно-оптической связи



Начальные сведения об оптической связи

История волоконно-оптической связи



Начальные сведения об оптической связи

История волоконно-оптической связи

1966 г. – Ч. Као и Дж. Хокхэм (Standard Telephones and Cables) показали принципиальную возможность создания оптического волокна с затуханием излучения менее 20 дБ/км, достигаемым за счет очистки стекла от примесей, и сформулировали требования к протяженным системам передачи информации по таким волокнам

1970 г. – Р. Маурер и Д. Кек (Corning Glass Work) получили оптическое волокно с затуханием 16 дБ/км

1972 г. – в лабораториях Corning Glass Work достигнут уровень потерь 4 дБ/км

Начальные сведения об оптической связи

История волоконно-оптической связи

1974 г. – разработано оптическое волокно с градиентным профилем показателя преломления

1974 г. – описан способ изготовления преформ оптических волокон (MCVD – метод модифицированного газофазного осаждения) (AT&T Bell Laboratories, США)

1976 г. – создана первая в мире промышленная установка для производства оптических волокон

1976 г. – открыто 3-е окно прозрачности ($\lambda = 1550$ нм) систем волоконно-оптической связи (NTT, Япония)

Начальные сведения об оптической связи

История волоконно-оптической связи

1977 г. – разработан метод наружного газофазного осаждения (OVD) для изготовления преформ оптических волокон (Corning, США)

1978 г. – затухание в оптическом волокне снижено до 0.2 дБ/км на длине волны $\lambda = 1550$ нм

1980 г. – первая коммерческая ВОСП между Бостоном и Ричмондом (США) со скоростью передачи информации по многомодовому градиентному волокну 45 Мбит/с

Начальные сведения об оптической связи

История волоконно-оптической связи

1982 г. – скорость передачи информации увеличена до 400 Мбит/с ($\lambda = 1310$ нм) при использовании одномодового оптического волокна

1983 г. – стандартизировано одномодовое оптическое волокно с нулевой дисперсией ($\lambda = 1310$ нм) (G652)

1987 г. – разработан эрбиевый усилитель; начало работ по созданию ВОСП со спектральным уплотнением каналов

1988 г. – первая трансатлантическая ВОСП (ТАТ-8, США, Франция, Великобритания)

Начальные сведения об оптической связи История волоконно-оптической связи

Начало 1990-х гг. – создание одномодового оптического волокна со смещенной нулевой дисперсией ($\lambda = 1550$ нм) (G653)

1994 г. – создание одномодового оптического волокна со смещенной ненулевой дисперсией ($\lambda = 1550$ нм) (G655)

1995 г. – начало практического использования ВОСП со спектральным уплотнением каналов

1998-2000 гг. – создание ВОСП с плотным (DWDM) и сверхплотным (HDWDM) спектральным уплотнением

Начальные сведения об оптической связи

История волоконно-оптической связи

1990 г. – компания Bellcore (США) продемонстрировала возможность передачи оптического сигнала на основе солитонного режима без регенерации со скоростью 2.5 Гбит/с на расстояние 7500 км

1990 г. – компания NTT достигла скорости передачи информации 20 Гбит/с

2000 г. – создание оптического волокна с низким поглощением в области водяного пика ($\lambda \sim 1400$ нм)

Начало 2000-х гг. – рост спроса на специальные волокна

Специальные оптические волокна

Типы. Обзор рынка

В настоящее время в линиях связи по всему миру уложено несколько сотен миллионов километров оптических волокон. Причем около 90 % из них приходится на долю стандартных одномодовых волокон.

В России в настоящее время почти исключительно используются только стандартные одномодовые оптические волокна. В то же время за рубежом в связи с интенсивным развитием WDM систем большое внимание уделяется волокнам с ненулевой смещенной дисперсией.

По различным оценкам, до 10 % мирового потребления оптических волокон составляют специальные волокна.

Специальные оптические волокна Типы. Обзор рынка

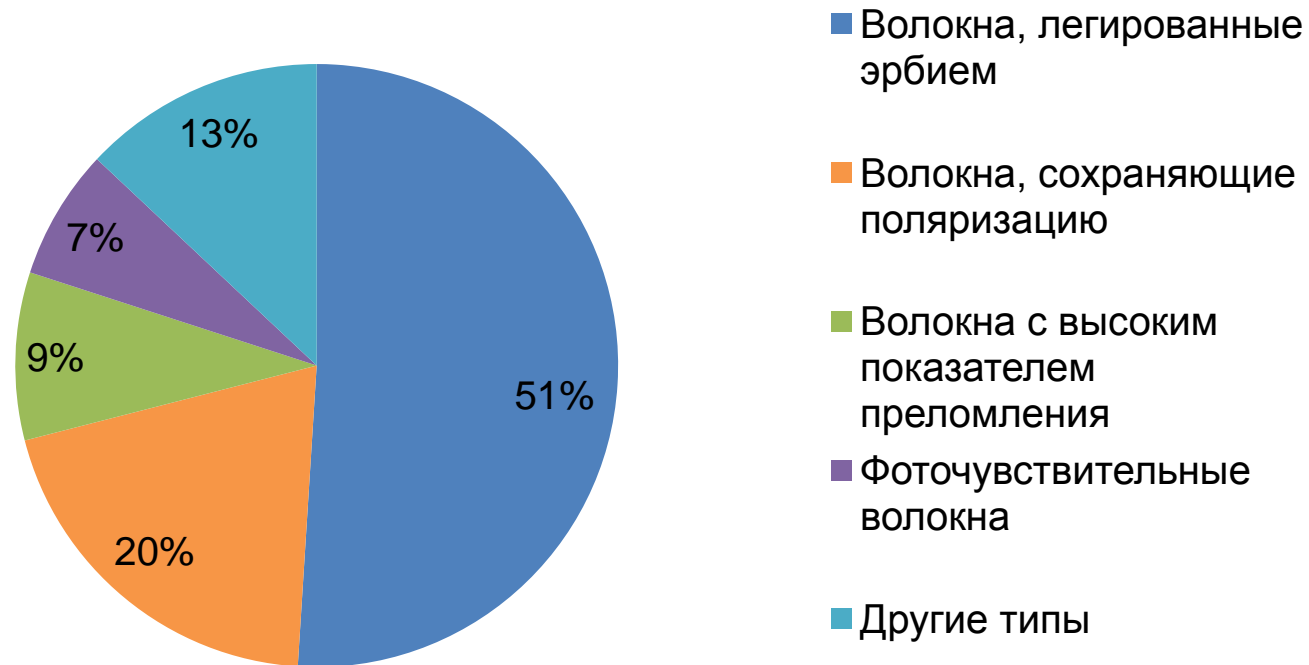
Основные типы специальных оптических волокон:

- активированные ионами редкоземельных металлов волокна для оптических усилителей и лазеров
- анизотропные одномодовые волокна с сохранением линейного состояния поляризации вводимого излучения
- фоточувствительные волокна с брэгговскими волоконными решетками показателя преломления
- волокна с компенсацией дисперсии
- волокна с высоким показателем преломления
- микроструктурированные и фотонно-кристаллические волокна
- волокна для работы в среднем ИК-диапазоне

Специальные оптические волокна

Типы. Обзор рынка

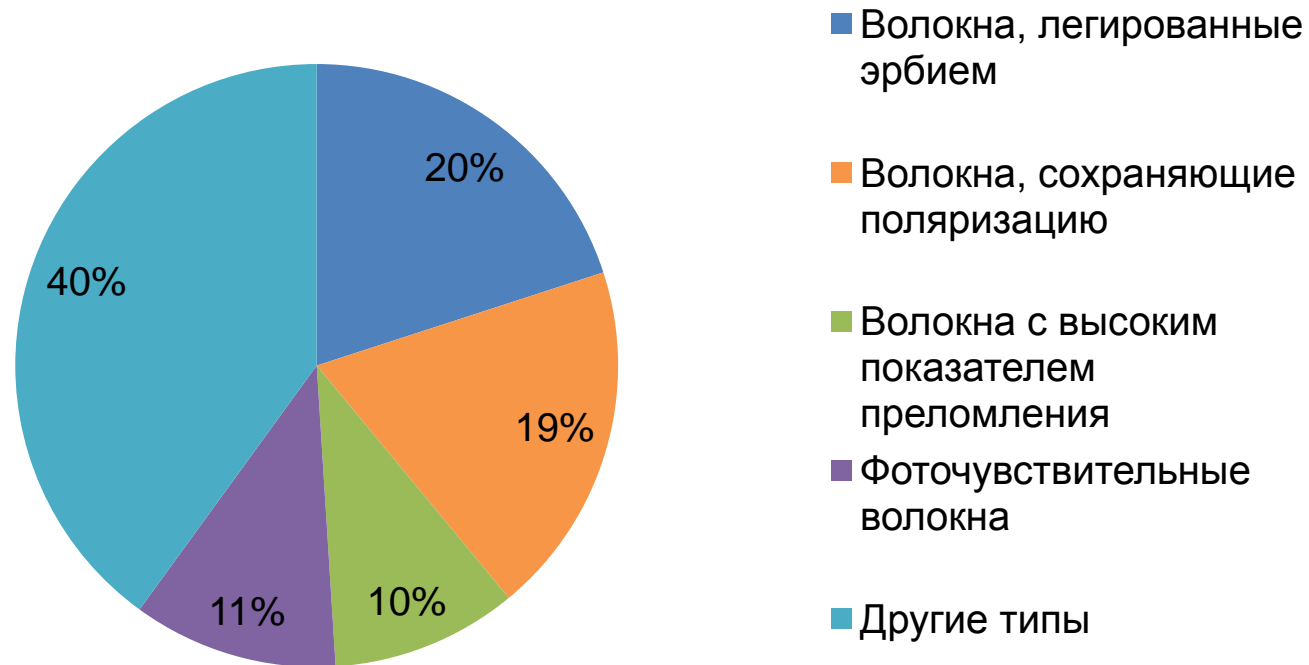
2000 г. – \$ 239 млн.



Специальные оптические волокна

Типы. Обзор рынка

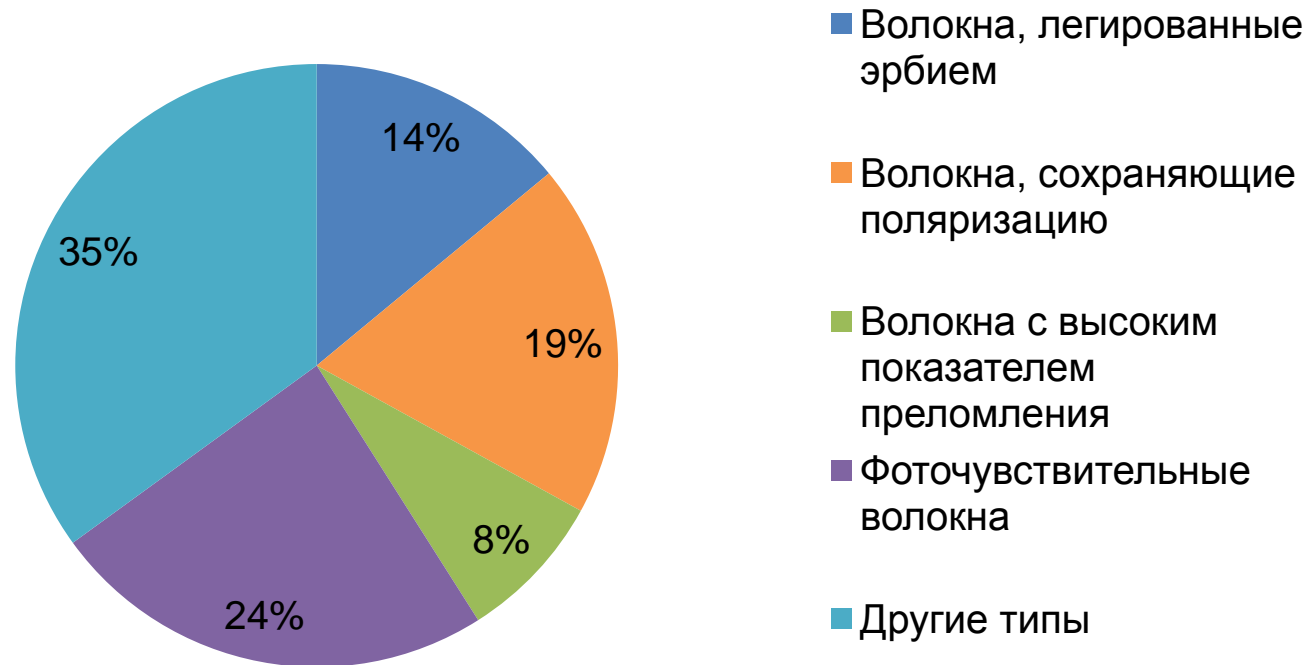
2005 г. – \$ 1124 млн.



Специальные оптические волокна

Типы. Обзор рынка

2010 г. – \$ 4380 млн.



Специальные оптические волокна Типы. Обзор рынка

Стремительный рост спроса на оптические волокна с сохранением поляризации вводимого излучения и фоточувствительные волокна обусловлен потребностью промышленности в волоконно-оптических датчиках:

- деформации
- температуры
- давления
- акустики, вибрации
- газа, жидкости
- электрического и магнитного поля
- и др.

Специальные оптические волокна

Типы. Обзор рынка

Другой фактор роста спроса – разработка развитыми странами новейших систем вооружения, обеспечивающих превосходство тактико-технических характеристик над вероятным противником:

- высокомоощные лазеры
- волоконно-оптические гироскопы
- волокна, устойчивые к изгибам и перепаду температур
- волокна с повышенной механической прочностью
- волокна с поллой сердцевиной
- конусные волокна

Специальные оптические волокна Типы. Обзор рынка

Параметры, имеющие определяющее значение при разработке специальных типов оптических волокон:

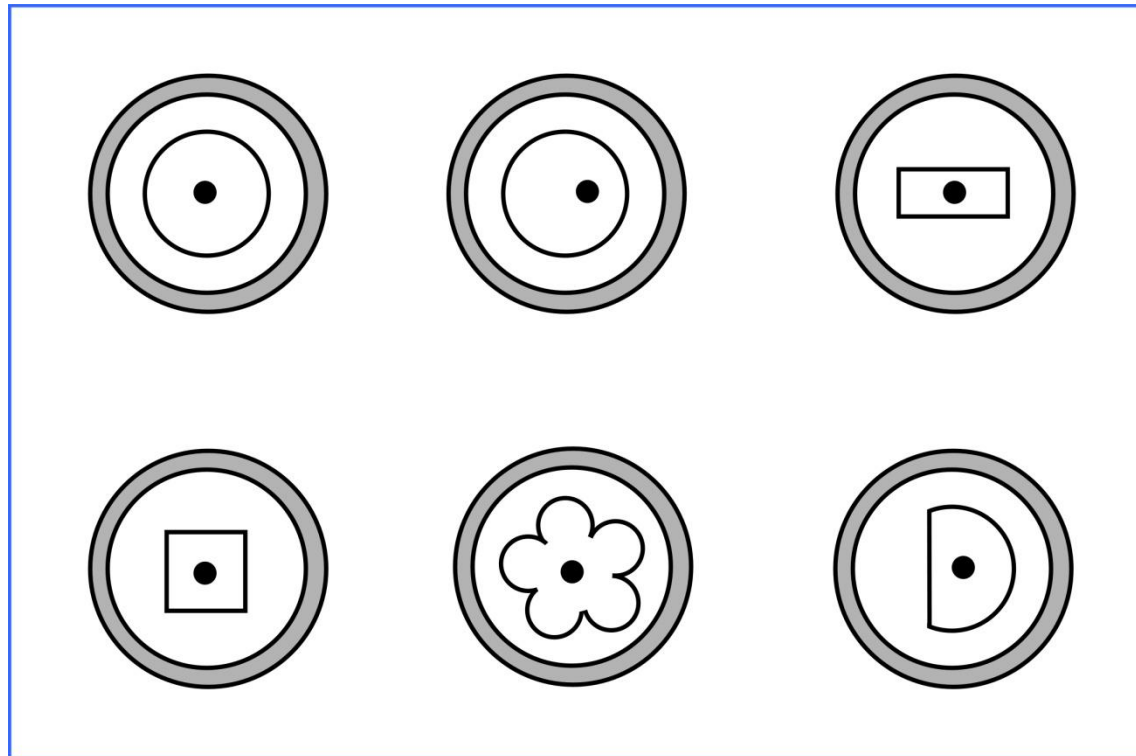
- состав стекла
- волноводная структура
- тип и конструкция защитного покрытия

Малые оптические потери отходят на второй план !!!

Специальные оптические волокна

Типы. Обзор рынка

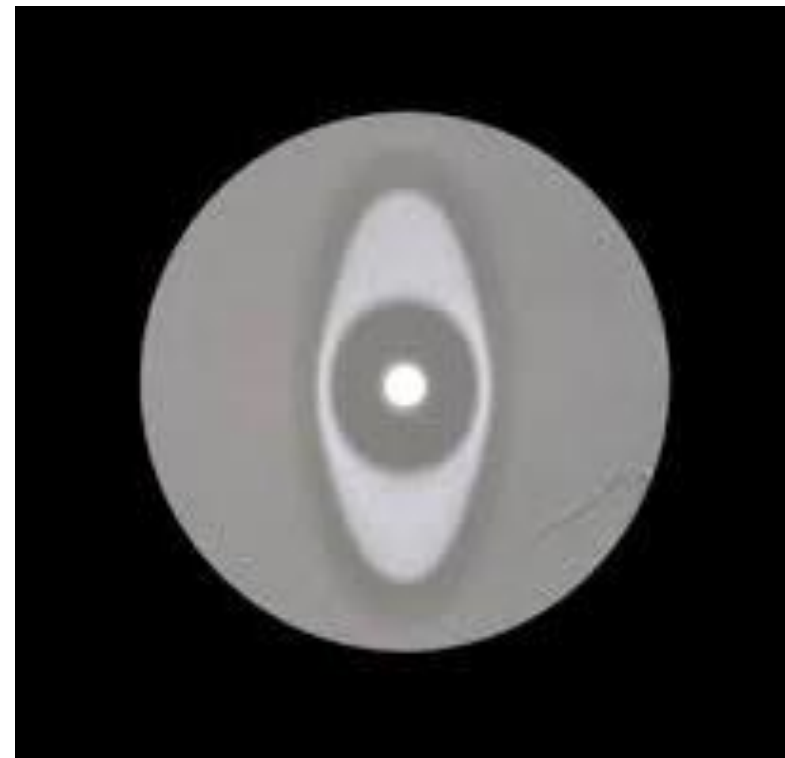
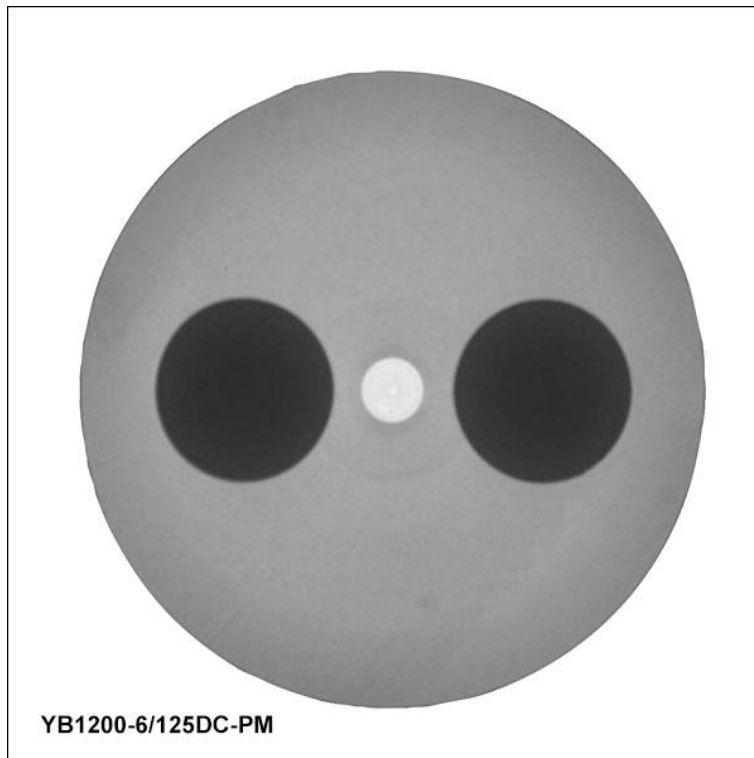
Волокна с двойной оболочкой, легированные ионами редкоземельных металлов (Yb^{3+} , Er^{3+} , Tm^{3+} , Ho^{3+})



Специальные оптические волокна

Типы. Обзор рынка

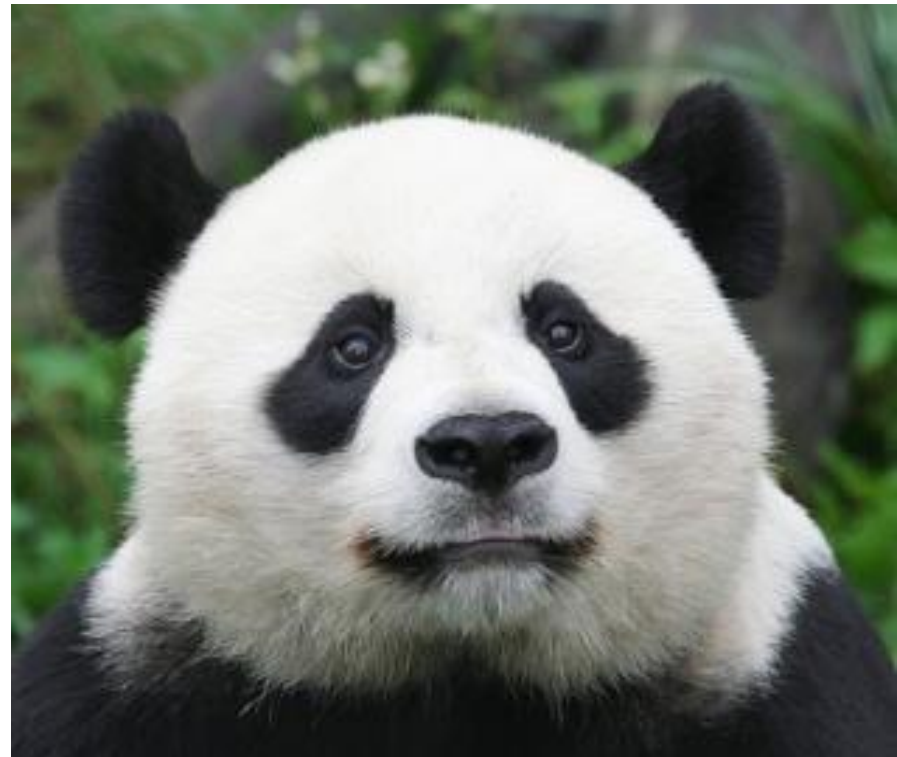
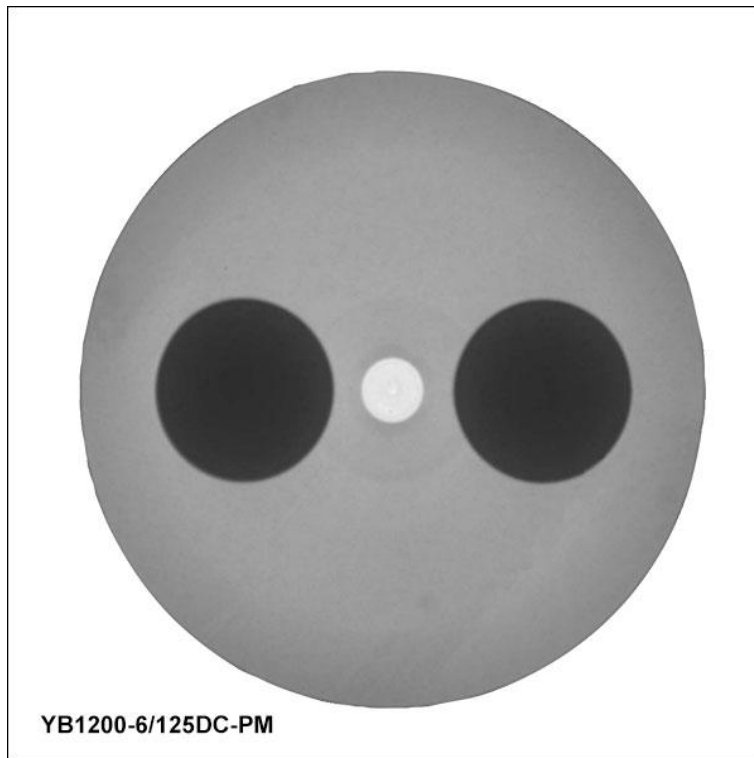
Волокна с сохранением линейного состояния поляризации вводимого излучения (HE_{1X} либо HE_{1Y})



Специальные оптические волокна

Типы. Обзор рынка

Волокна с сохранением линейного состояния поляризации вводимого излучения (HE_{1X} либо HE_{1Y})



Специальные оптические волокна Типы. Обзор рынка

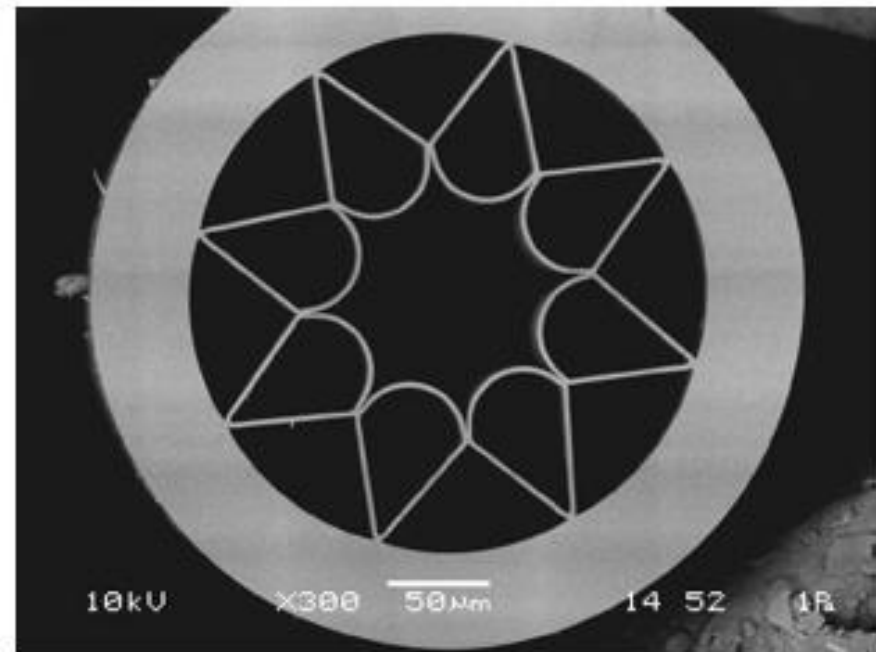
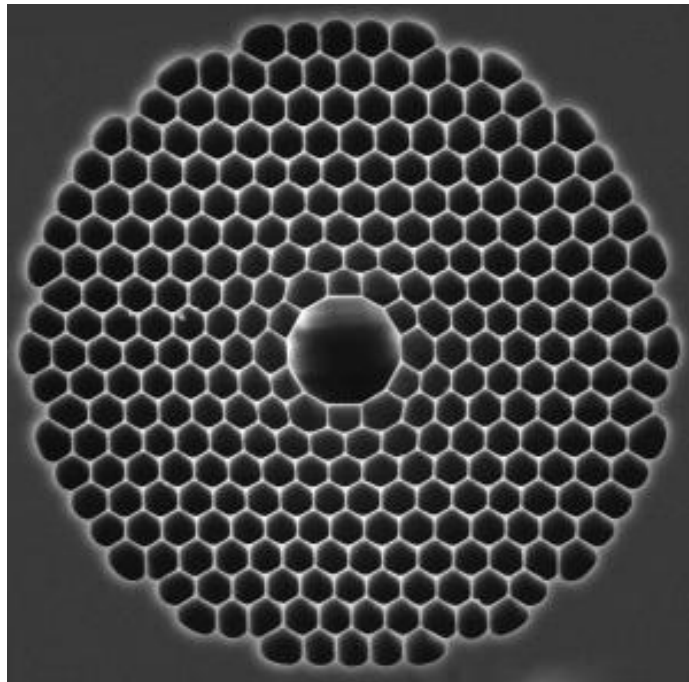
Волокна с сохранением линейного состояния поляризации вводимого излучения (HE_{1X} либо HE_{1Y})



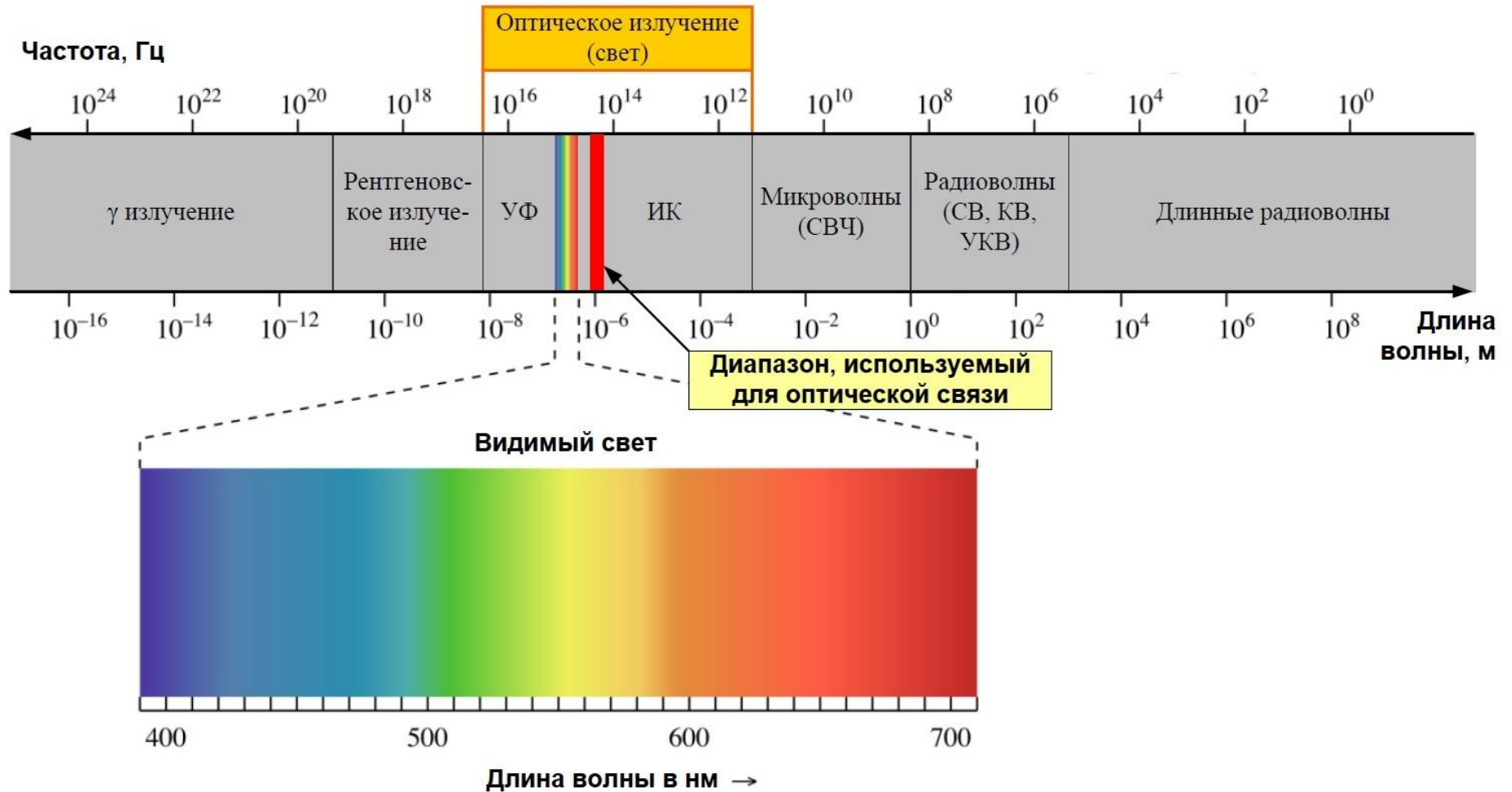
Специальные оптические волокна

Типы. Обзор рынка

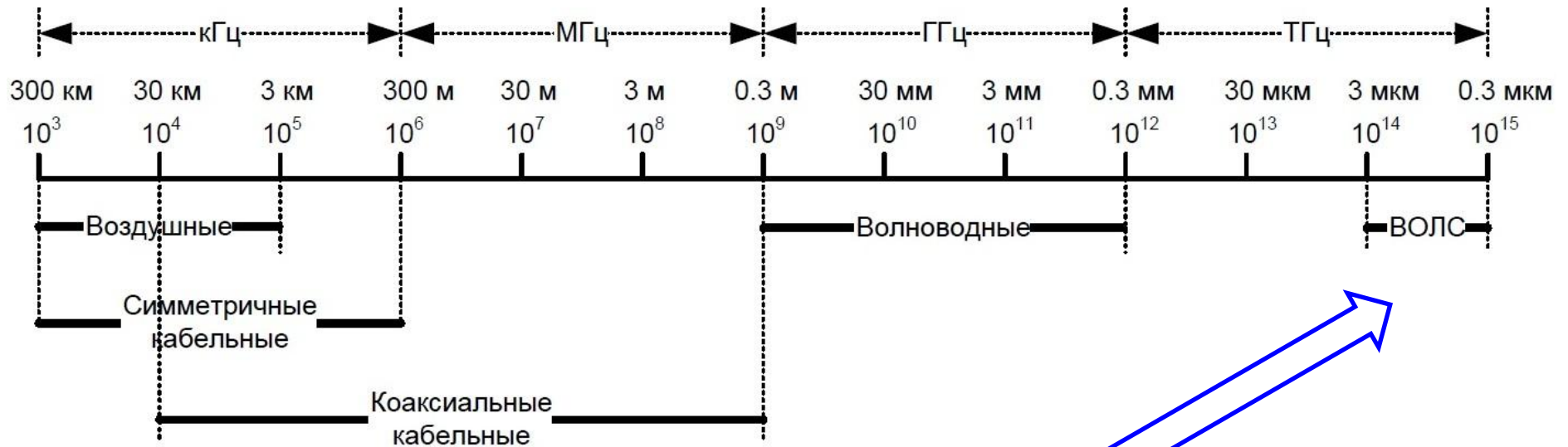
Микроструктурированные волокна с полый сердцевинной (принципиальная возможность снижения затухания до значений менее 0.15 дБ/км)



Оптический диапазон длин волн. Диапазоны работы различных направляющих систем



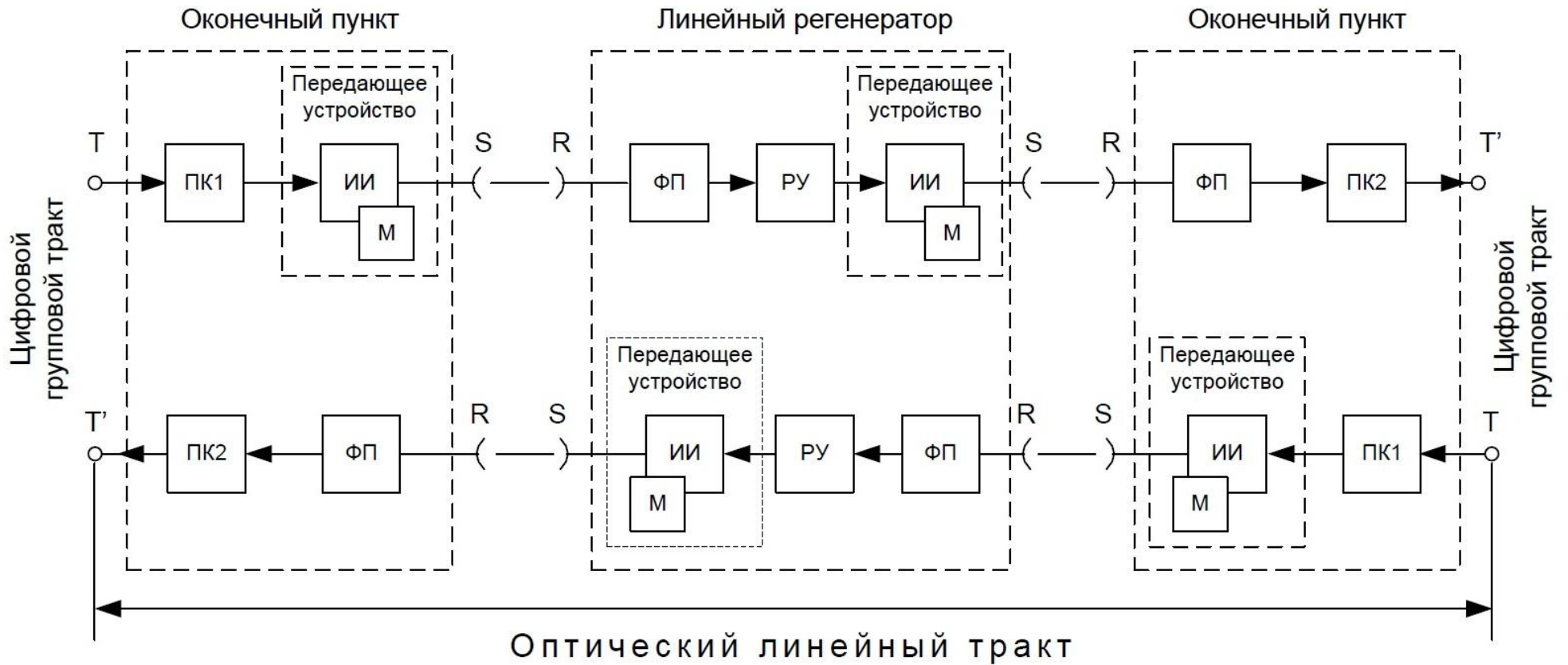
Оптический диапазон длин волн. Диапазоны работы различных направляющих систем



Ширина полосы пропускания ВОЛС:

$$\Delta F = f_{\text{high}} - f_{\text{low}} = 10^{15} - 10^{14} = 10 \cdot 10^{14} - 10^{14} = 9 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$$

Структурная схема волоконно-оптической ЛИНИИ СВЯЗИ



Преимущества и недостатки волоконно-оптических систем связи

Преимущества:

- широкая полоса пропускания сигнала, обусловленная высокой частотой оптической несущей
- малое затухание оптического сигнала в волокне (!!!)
- высокая помехозащищенность
- массогабаритные показатели
- высокая защищенность от несанкционированного доступа
- полная гальваническая развязка между приемной и передающей сторонами

Преимущества и недостатки волоконно-оптических систем связи

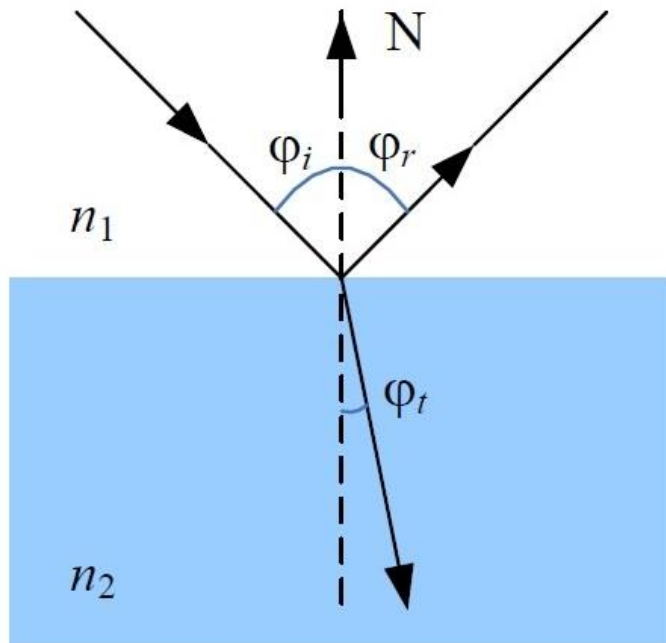
Недостатки:

- высокая стоимость регенерационного оборудования, мультиплексоров/демультиплексоров, технологического и измерительного оборудования
- необходимость высокой квалификации обслуживающего персонала

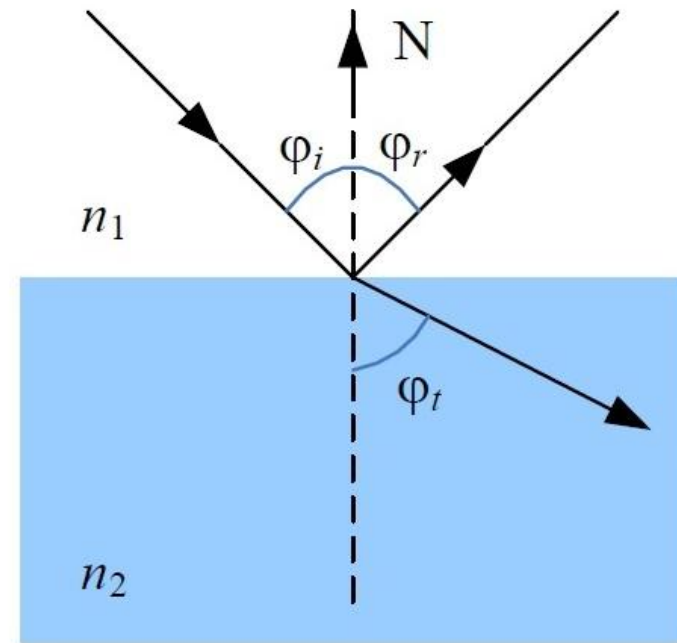
«Окна» прозрачности систем волоконно-оптической связи

Диапазон	Длины волн	Наименование
O	1260.. 1360 нм	Основной (Original)
E	1360.. 1460 нм	Расширенный (Extended)
S	1460.. 1530 нм	Коротковолновый (Short-wavelength)
C	1530.. 1565 нм	Стандартный (Conventional)
L	1565.. 1625 нм	Длинноволновый (Long-wavelength)
U	1625.. 1675 нм	Сверхдлинный (Ultra long-wavelength)

Явления отражения и преломления света на границе раздела двух диэлектриков



$$n_1 < n_2$$



$$n_1 > n_2$$

$n_1 = c/V_{\phi 1}$ – показатель преломления среды 1

$n_2 = c/V_{\phi 2}$ – показатель преломления среды 2

$$V_{\phi} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{1,2}\mu_{1,2}}}$$

$$\epsilon_{1,2} = \epsilon_0\epsilon$$

$$\mu_{1,2} = \mu_0\mu$$

Явления отражения и преломления света на границе раздела двух диэлектриков

Для диэлектриков:

$$\mu = 1$$

$$V_{\phi} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \sqrt{\varepsilon}}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

$$V_{\phi} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}}$$

$$n = \sqrt{\varepsilon}$$

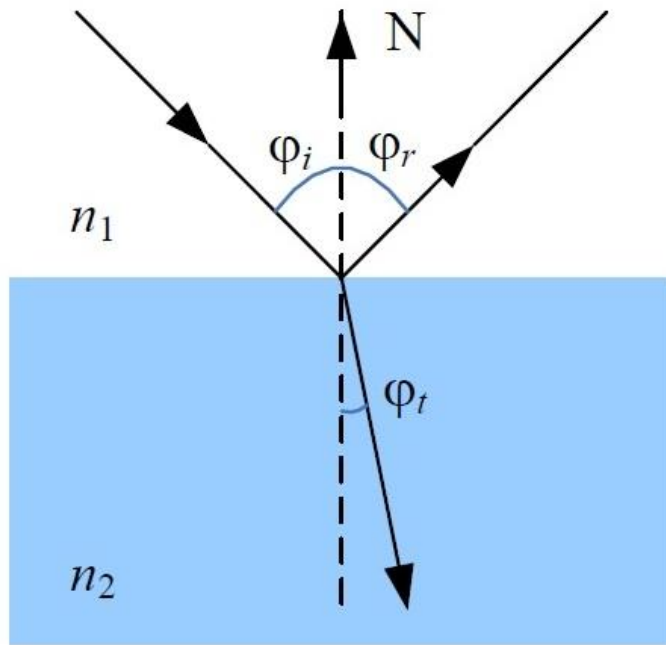
Законы отражения и преломления:

1. Падающий, отраженный и преломленный лучи и нормаль к поверхности раздела сред лежат в одной плоскости (плоскости падения)
2. Частоты падающего, отраженного и преломленного лучей одинаковы
 $\omega_i = \omega_r = \omega_t$
3. Угол падения равен углу отражения
 $\varphi_i = \varphi_r$
4. Закон Снеллиуса
 $n_1 \sin \varphi_i = n_2 \sin \varphi_t$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

Явления отражения и преломления света на границе раздела двух диэлектриков



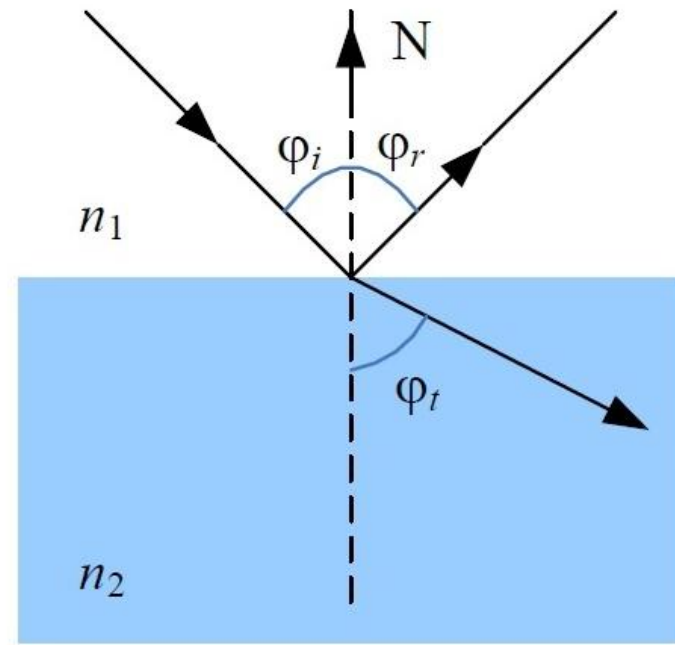
$$n_1 < n_2$$

$$\varphi_i > \varphi_t$$

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \varphi_t}{\sin \varphi_i}$$

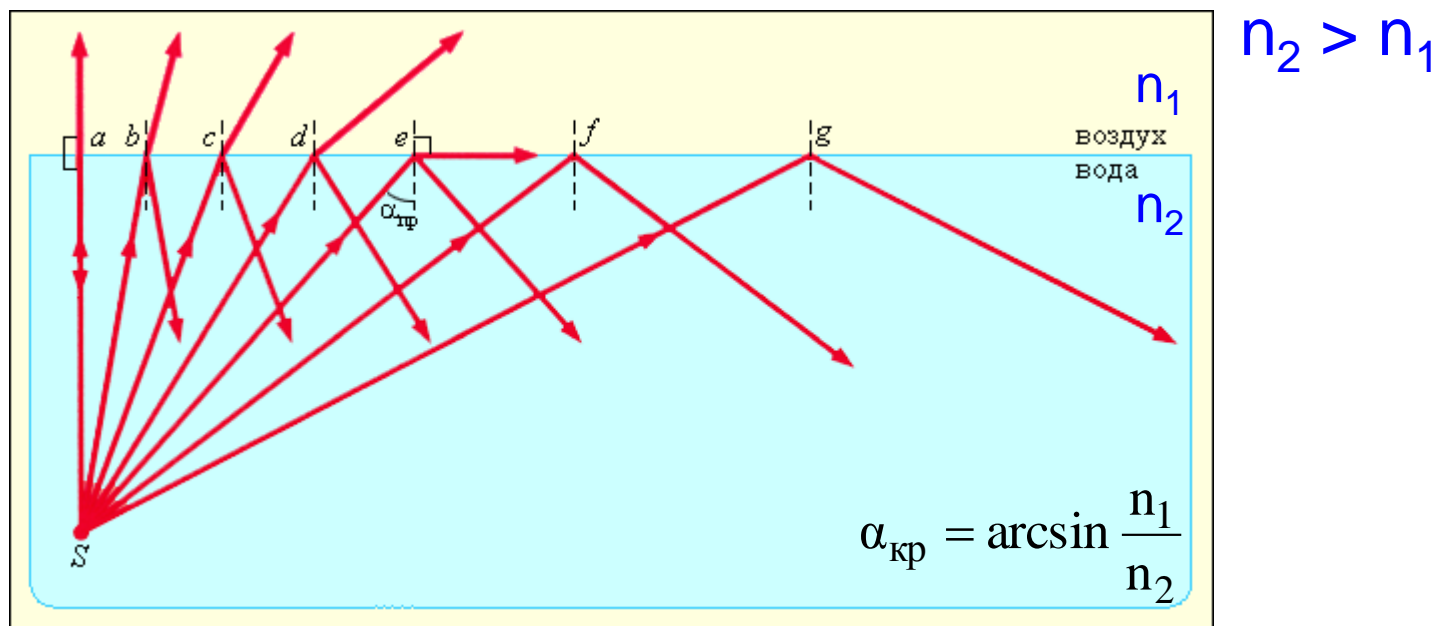
$$n_1 > n_2$$

$$\varphi_i < \varphi_t$$

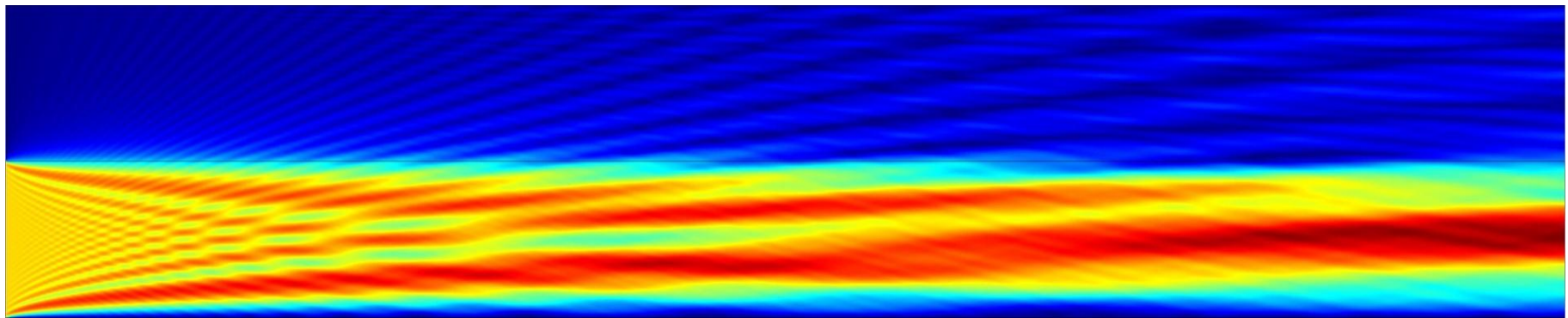


Явление полного внутреннего отражения на границе раздела двух диэлектриков

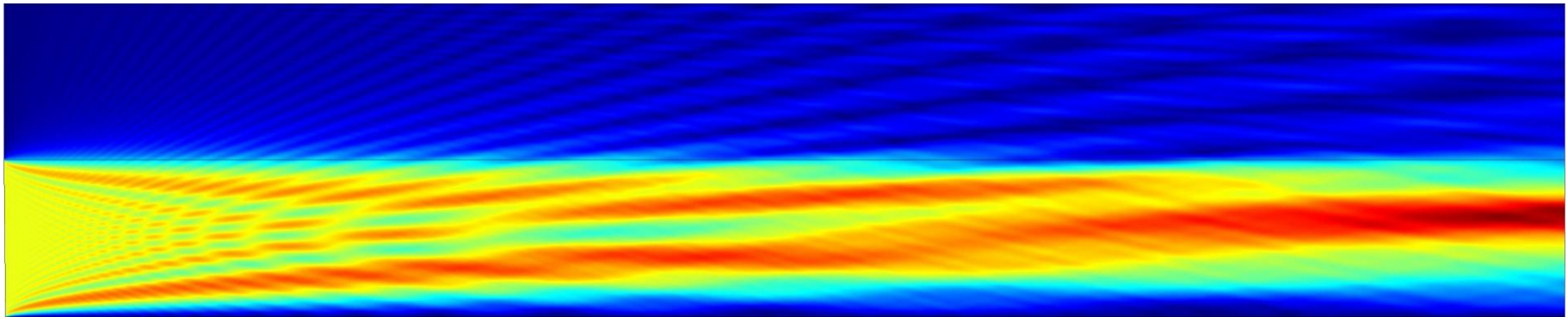
При переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную **ВСЕГДА** существует угол падения, при котором угол преломления станет 90°



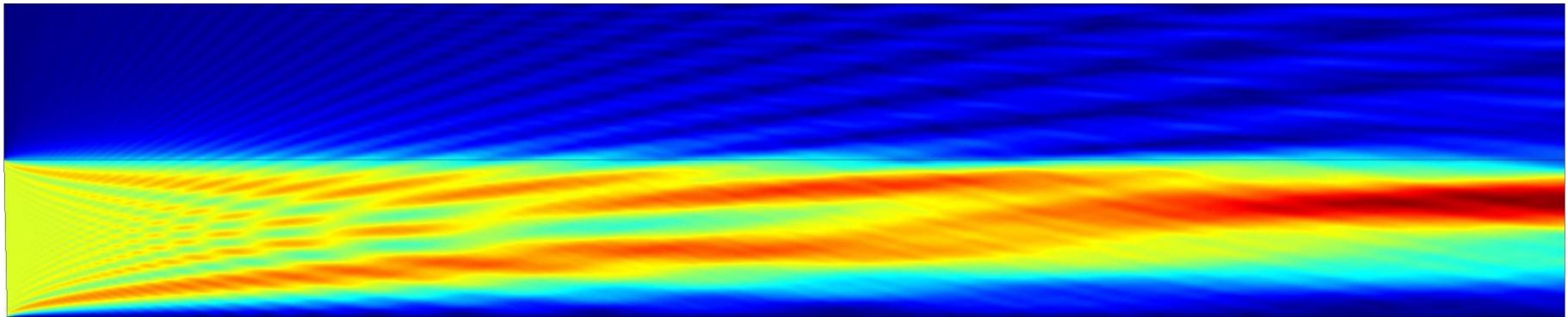
Явление полного внутреннего отражения на границе раздела двух диэлектриков



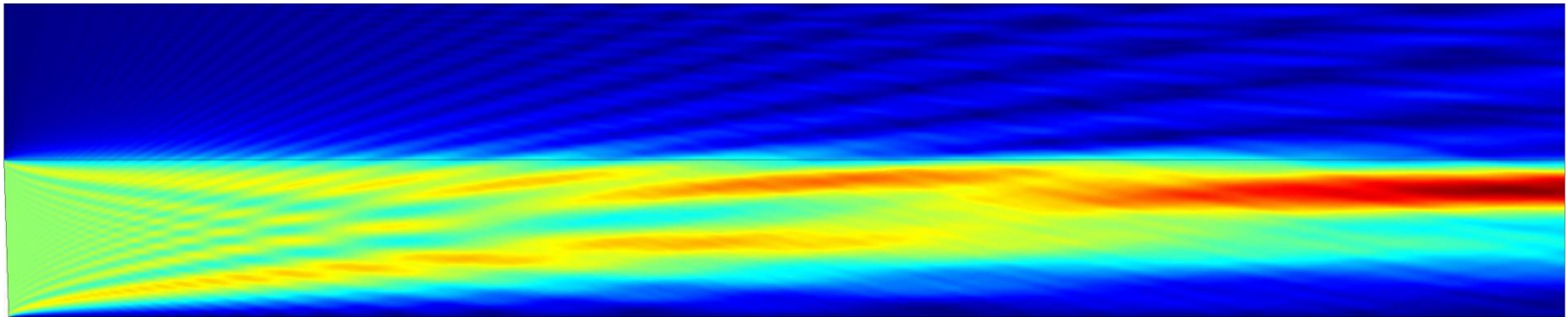
Явление полного внутреннего отражения на границе раздела двух диэлектриков



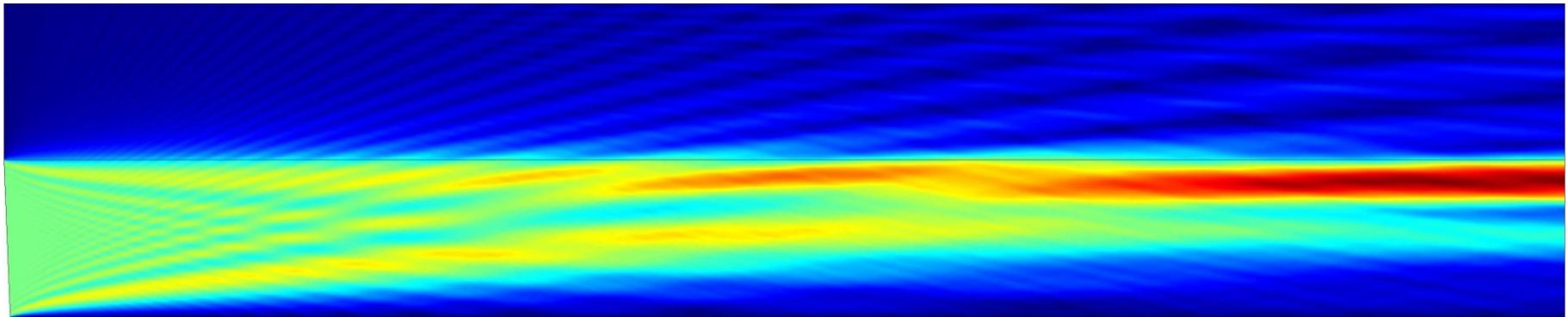
Явление полного внутреннего отражения на границе раздела двух диэлектриков



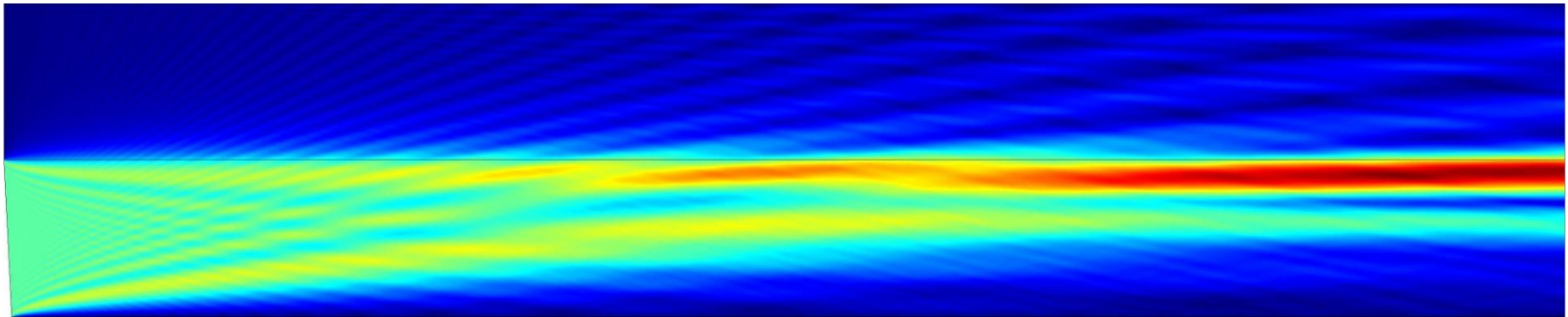
Явление полного внутреннего отражения на границе раздела двух диэлектриков



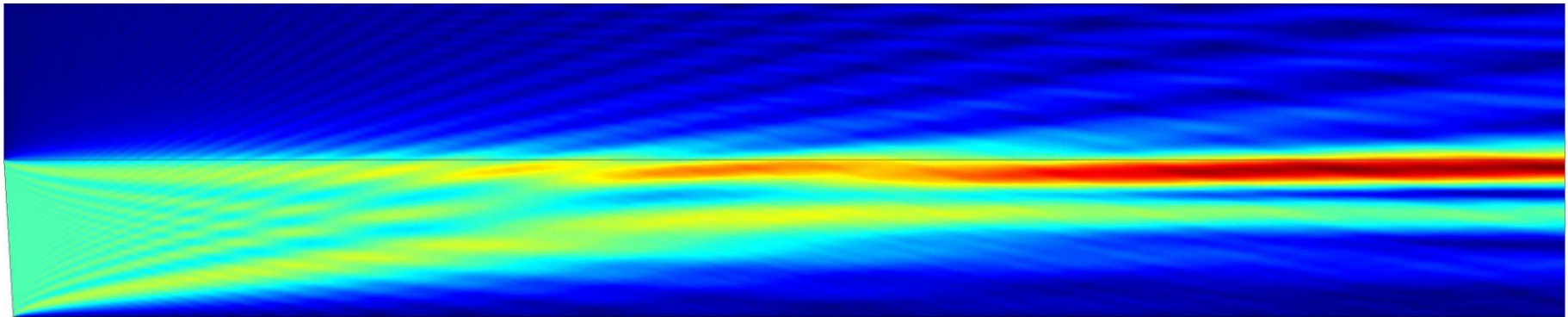
Явление полного внутреннего отражения на границе раздела двух диэлектриков



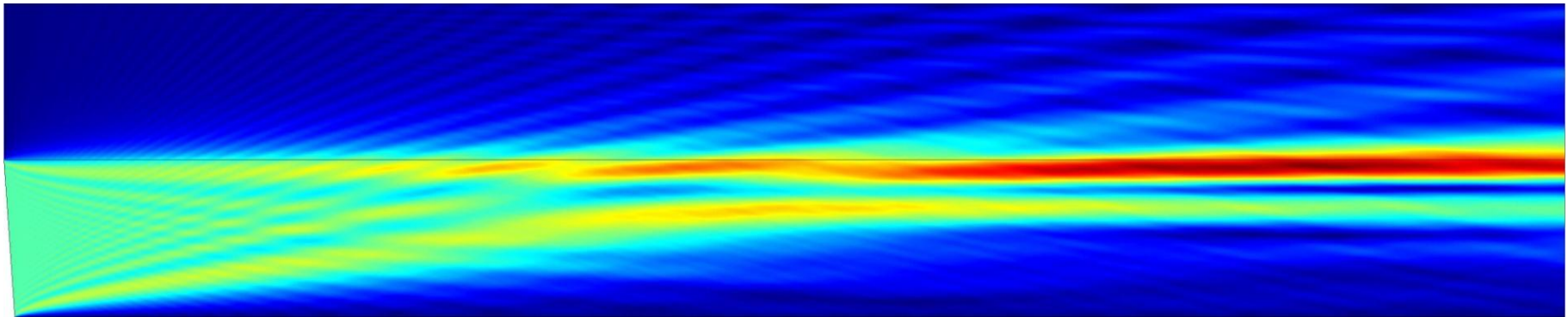
Явление полного внутреннего отражения на границе раздела двух диэлектриков



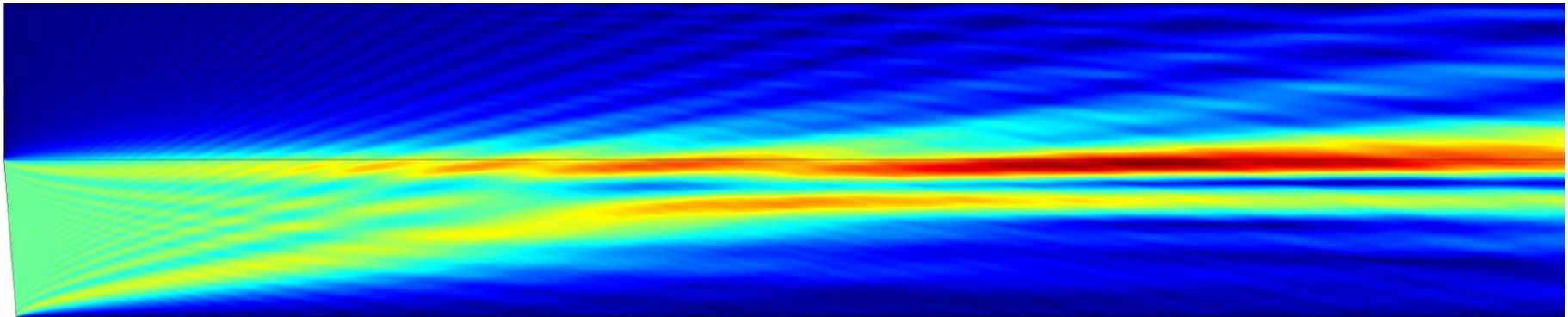
Явление полного внутреннего отражения на границе раздела двух диэлектриков



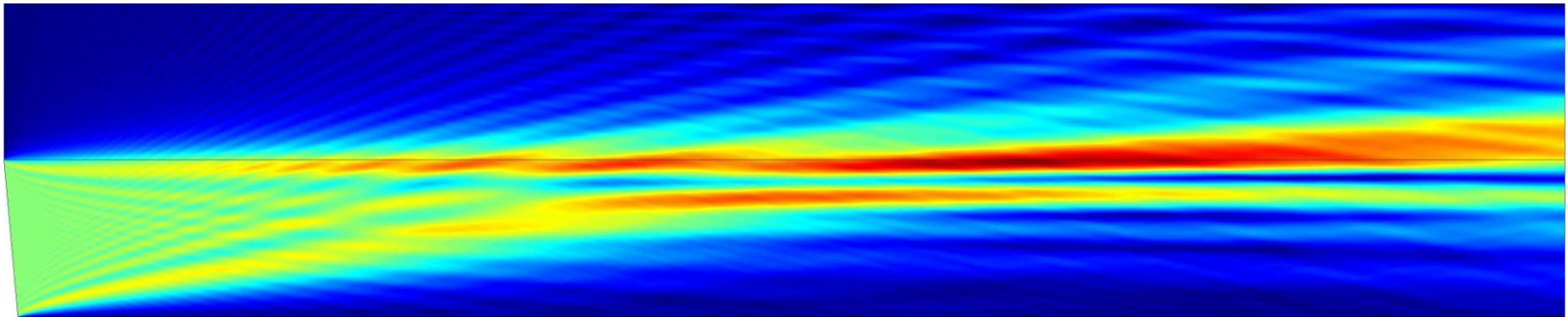
Явление полного внутреннего отражения на границе раздела двух диэлектриков



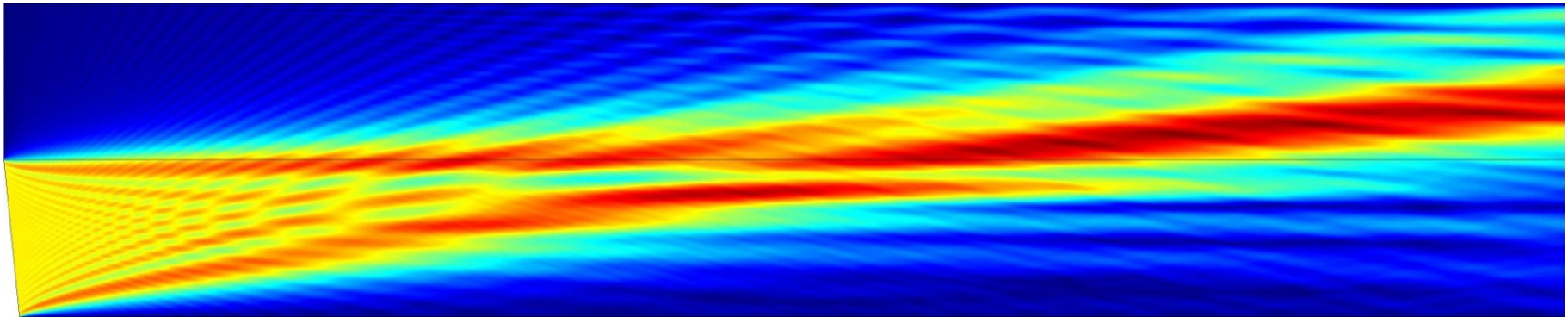
Явление полного внутреннего отражения на границе раздела двух диэлектриков



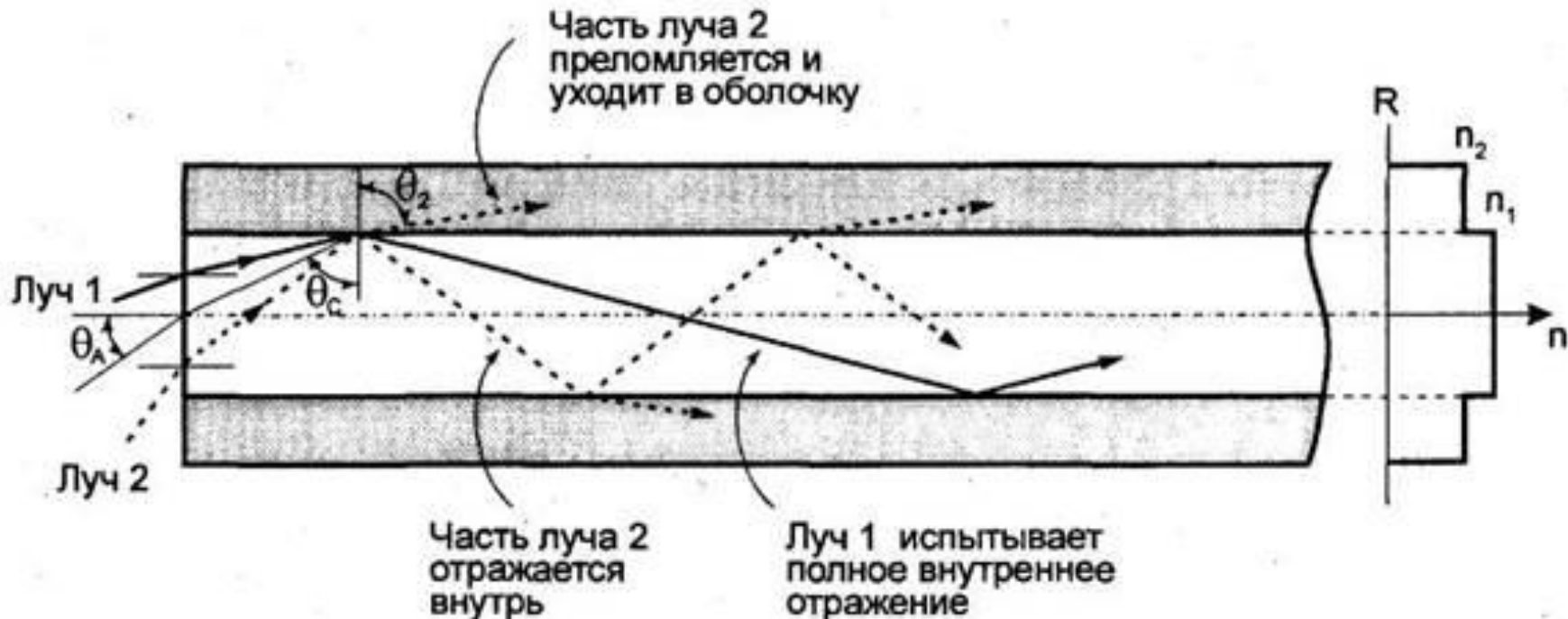
Явление полного внутреннего отражения на границе раздела двух диэлектриков



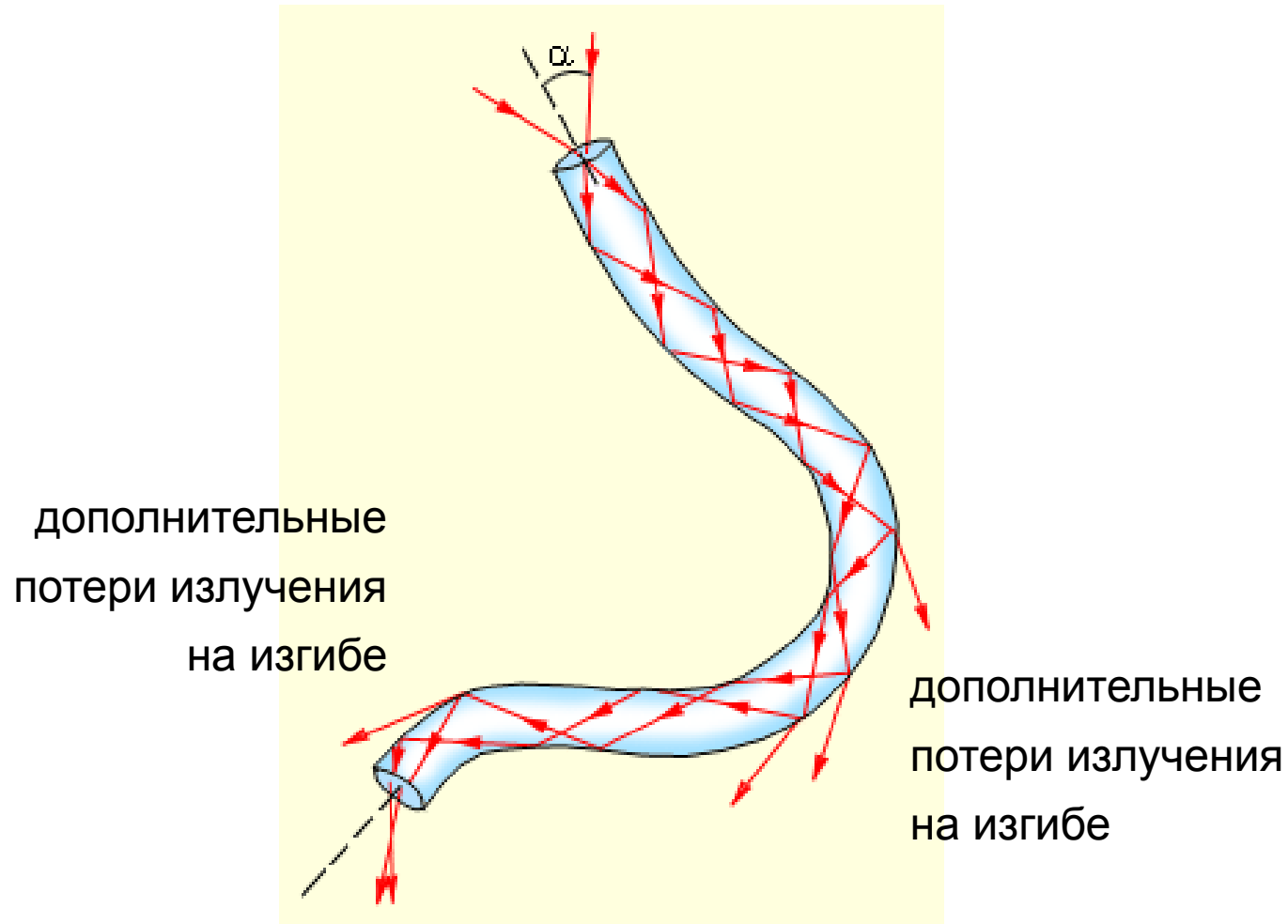
Явление полного внутреннего отражения на границе раздела двух диэлектриков



Распространение излучения по цилиндрическому оптическому волокну



Распространение излучения по цилиндрическому оптическому волокну



Многообразие оптических волокон

Материалы:

- кварцевое стекло
- многокомпонентные стекла
- полимеры

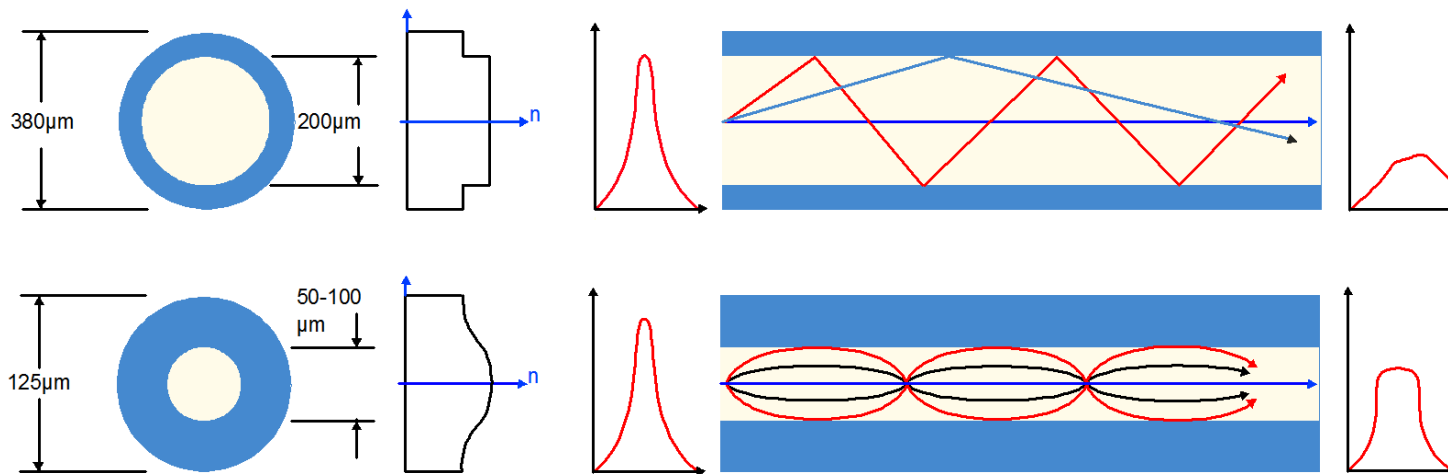
Исполнение:

- единичные волокна
- жгуты
- волоконно-оптические элементы
- оптические кабели

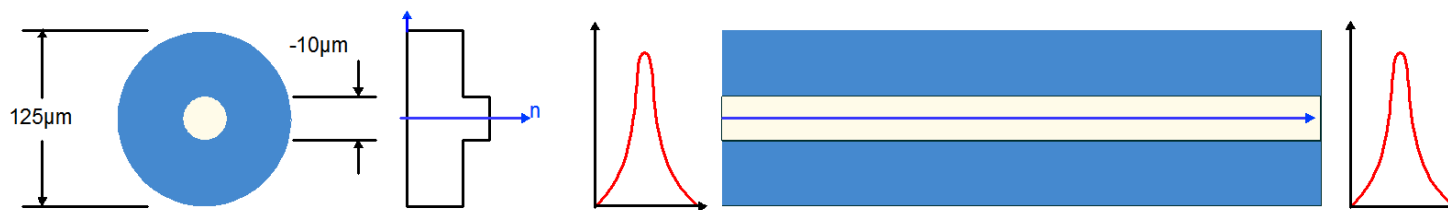


Волноводные режимы распространения оптических сигналов по волокну

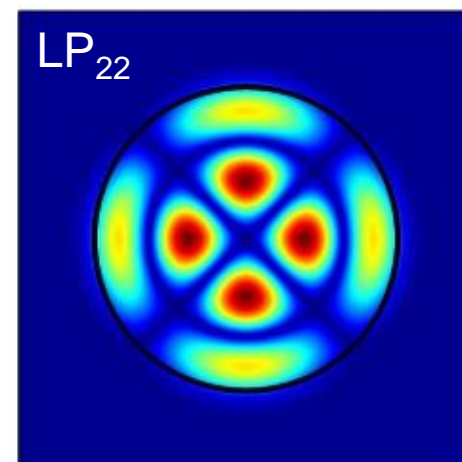
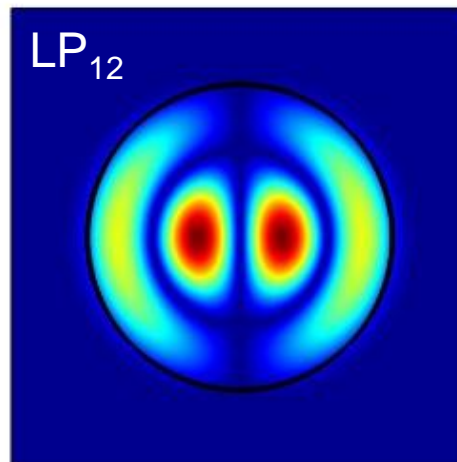
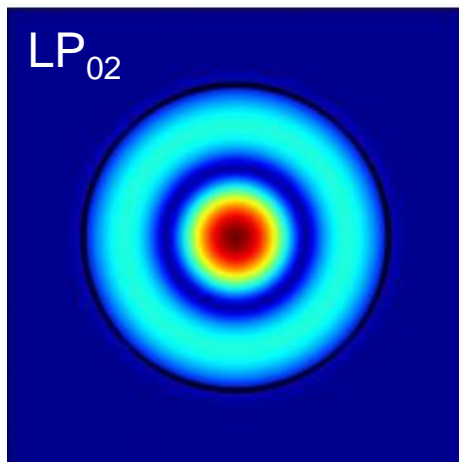
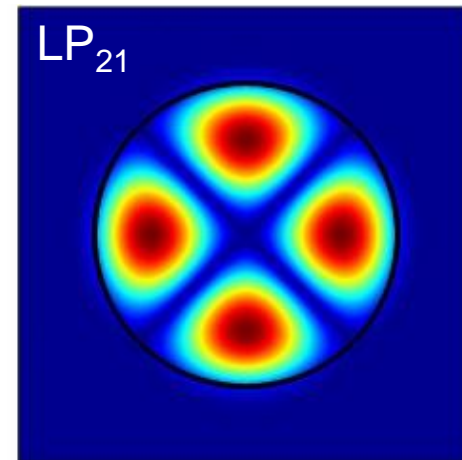
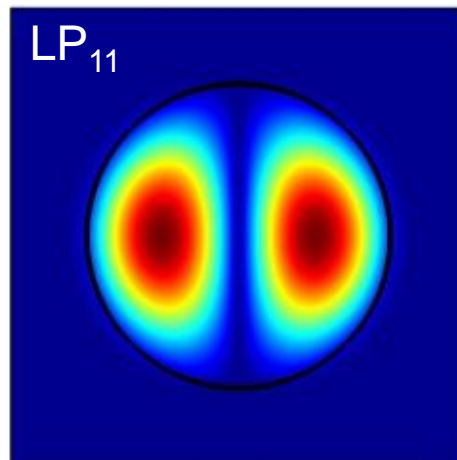
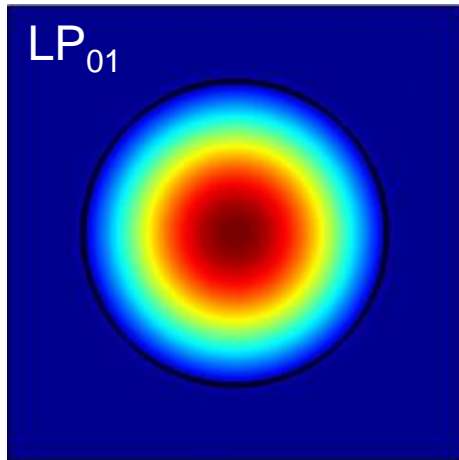
Многомодовые волокна



Одномодовые волокна



Волноводные режимы распространения оптических сигналов по волокну



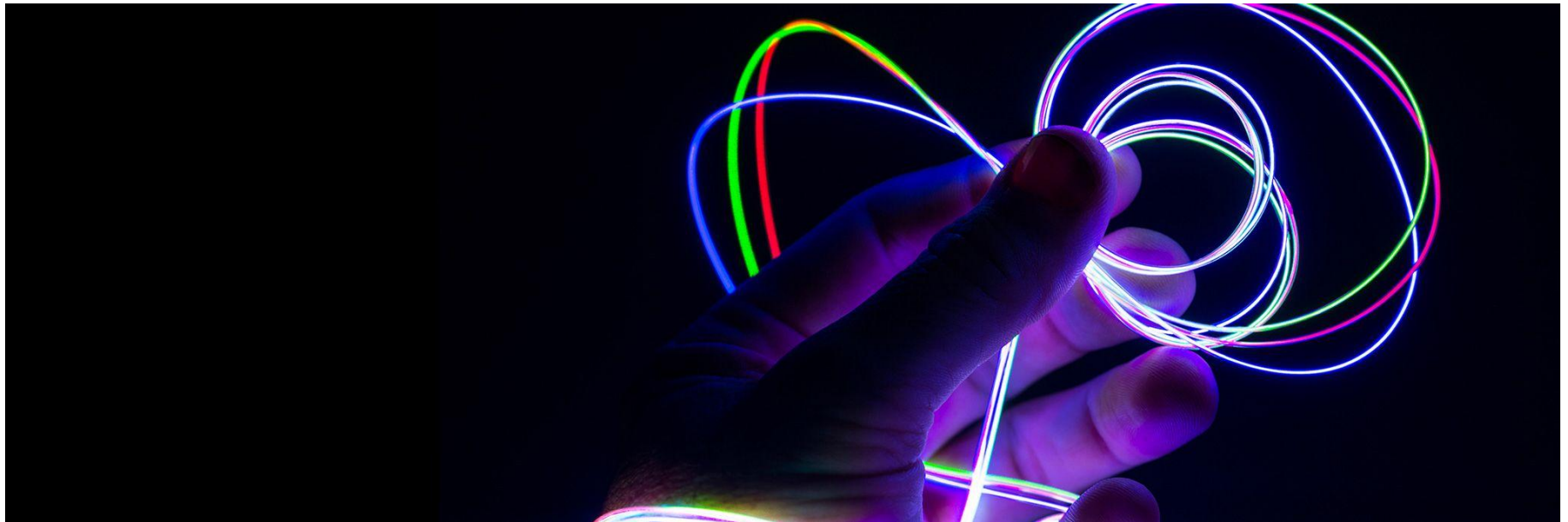
Волноводные режимы распространения оптических сигналов по волокну

1. Одномодовый режим (только одна мода LP_{01})
2. Многомодовый режим (большое количество мод, как правило 100-1000)
3. Квазиодномодовый режим (мода LP_{01} с примесью различных мод высокого порядка $\rightarrow LP_{11}, LP_{21}, LP_{02}, LP_{31}$; достижение «чистого» одномодового режима зависит от дополнительных условий, например, изгиба)
4. Маломодовый режим (несколько пространственных мод, как правило, 10-50)

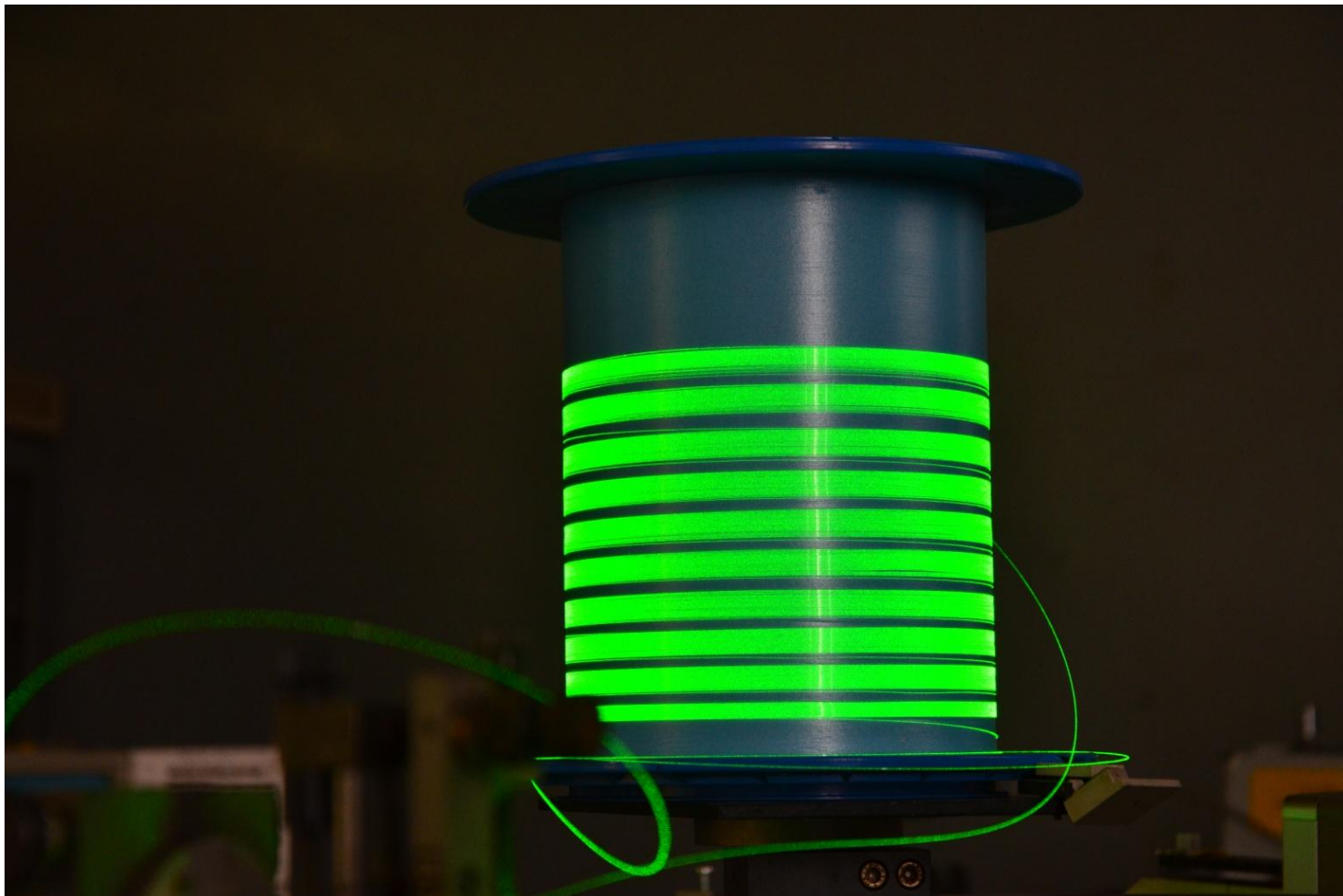
Основные области применения оптических волокон

- Магистральные инфокоммуникационные сети связи с предельно высокой скоростью передачи данных
- Волоконно-оптические датчики физических величин
- Специальные приложения, подразумевающие манипуляции со световыми потоками (усиление сигнала, преобразование частот и др.)
- Линии/сети передачи данных малой либо ограниченной протяженности
- Эндоскопия
- Системы локального и удаленного освещения

CORNING® FIBRANCE® LIGHT-DIFFUSING FIBER

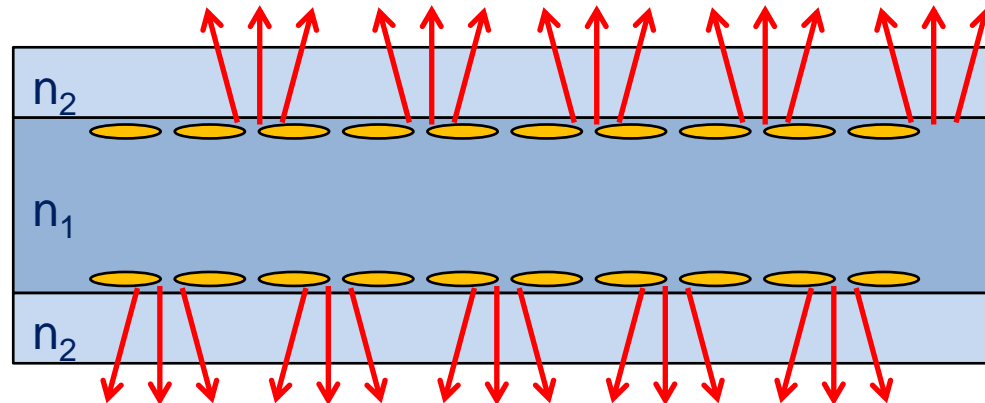


Диффузно-рассеивающее волокно НИТИОМ



Диффузно-рассеивающее волокно НИТИОМ

Corning

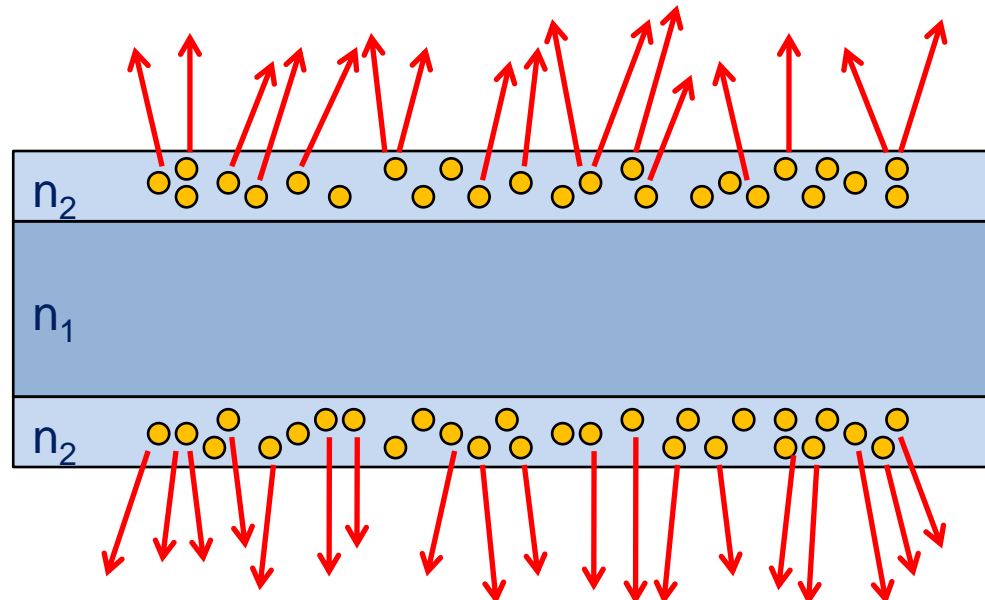


Оболочка

Сердцевина

Оболочка

НИТИОМ

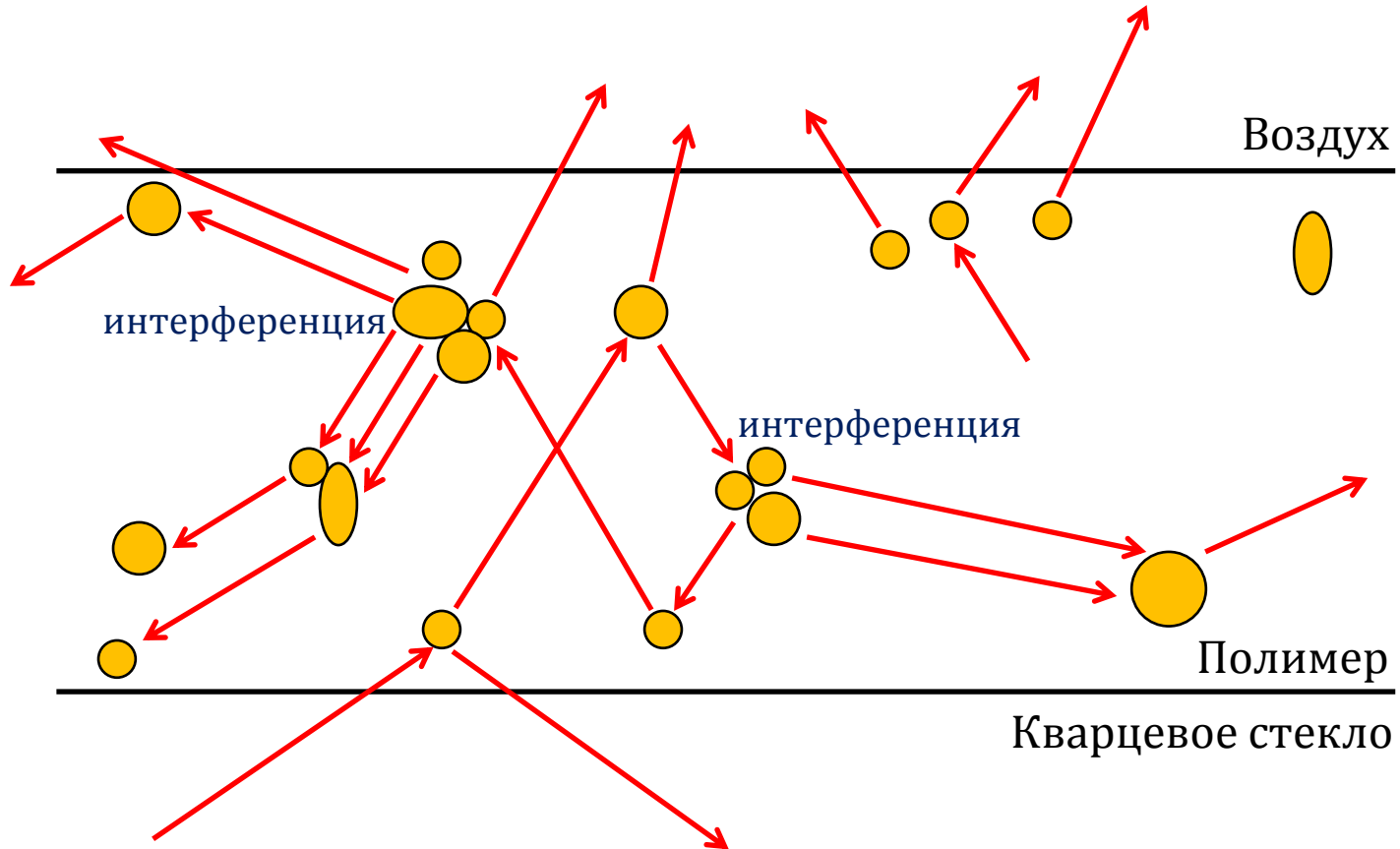


Оболочка

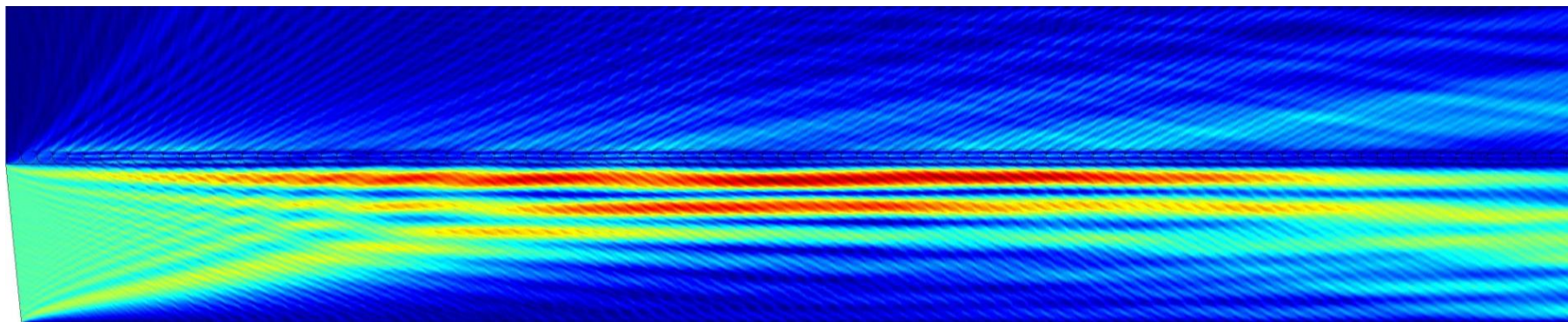
Сердцевина

Оболочка

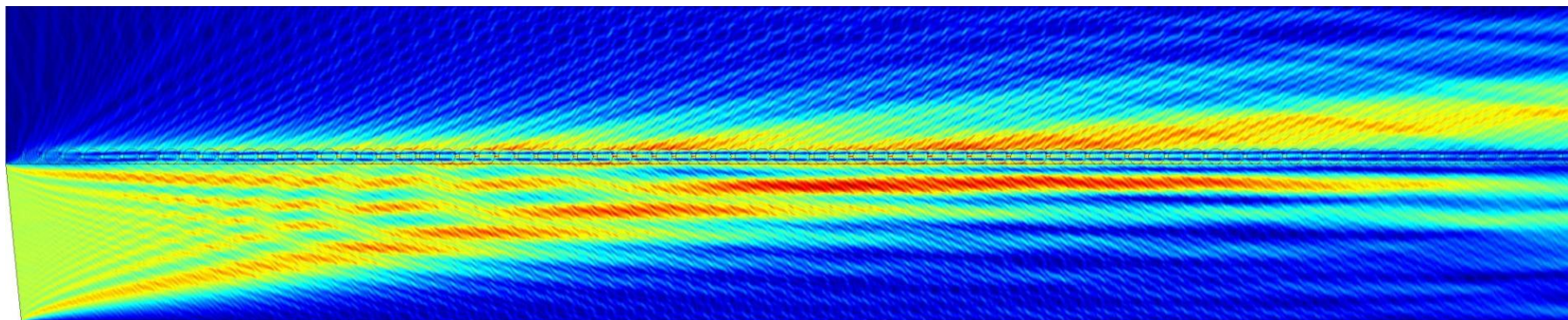
Диффузно-рассеивающее волокно НИТИОМ



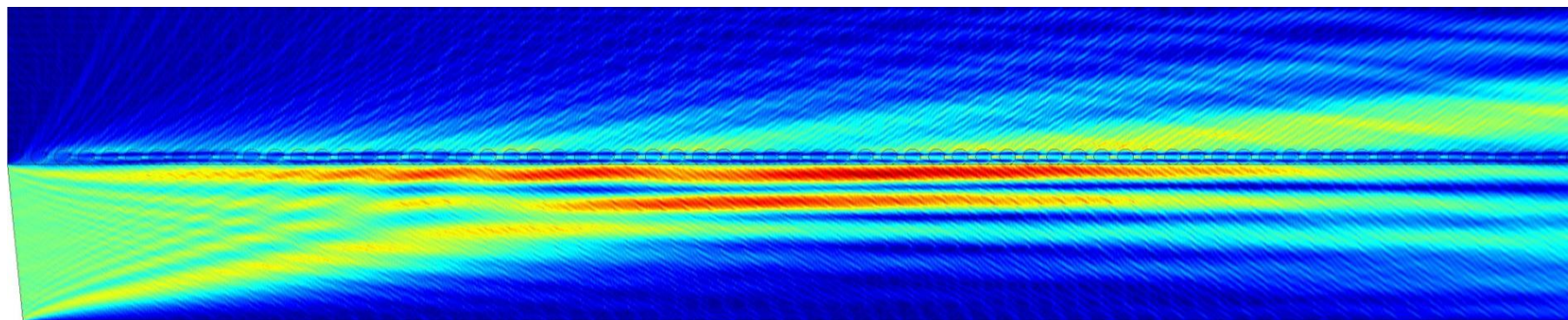
Диффузно-рассеивающее волокно НИТИОМ



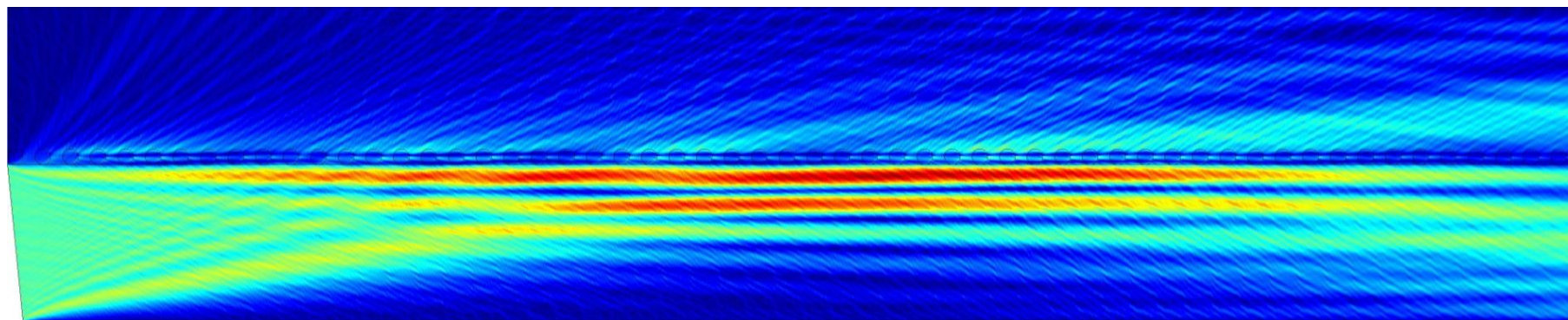
Диффузно-рассеивающее волокно НИТИОМ



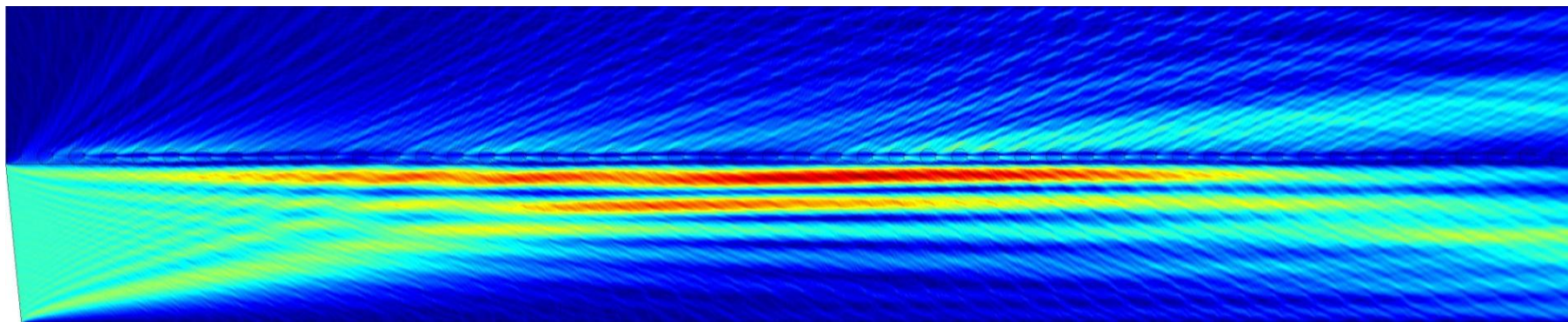
Диффузно-рассеивающее волокно НИТИОМ



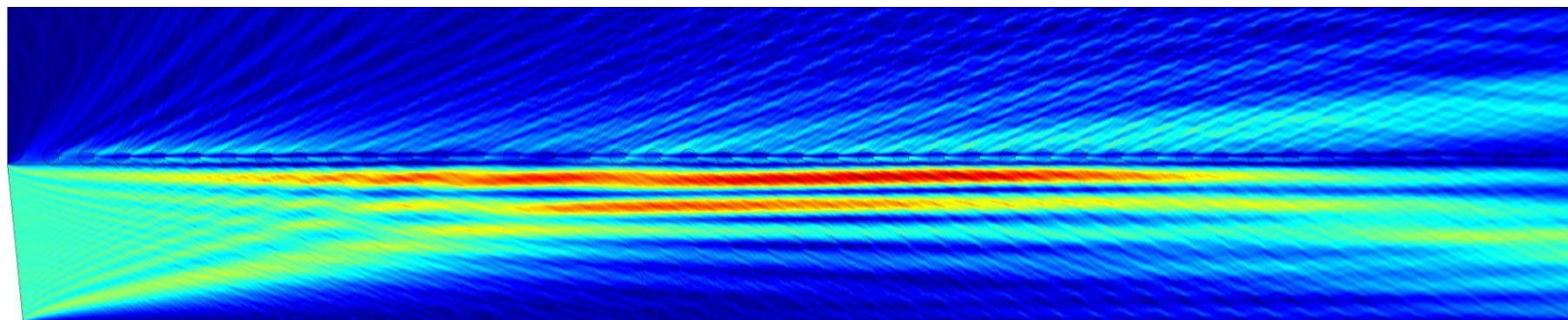
Диффузно-рассеивающее волокно НИТИОМ



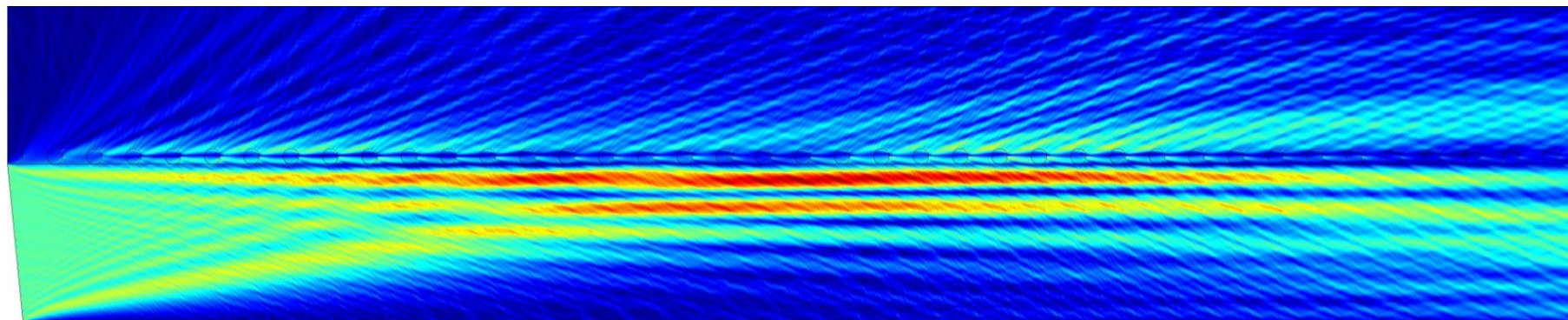
Диффузно-рассеивающее волокно НИТИОМ



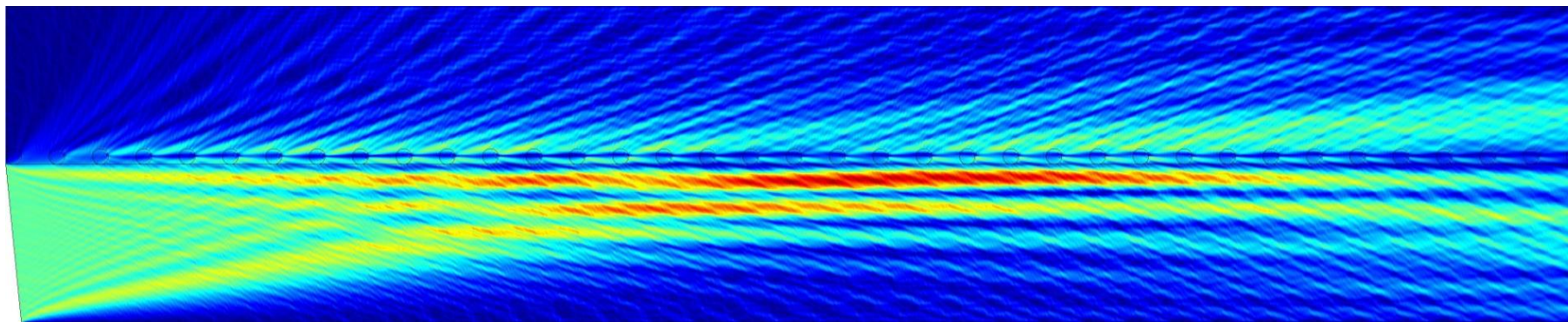
Диффузно-рассеивающее волокно НИТИОМ



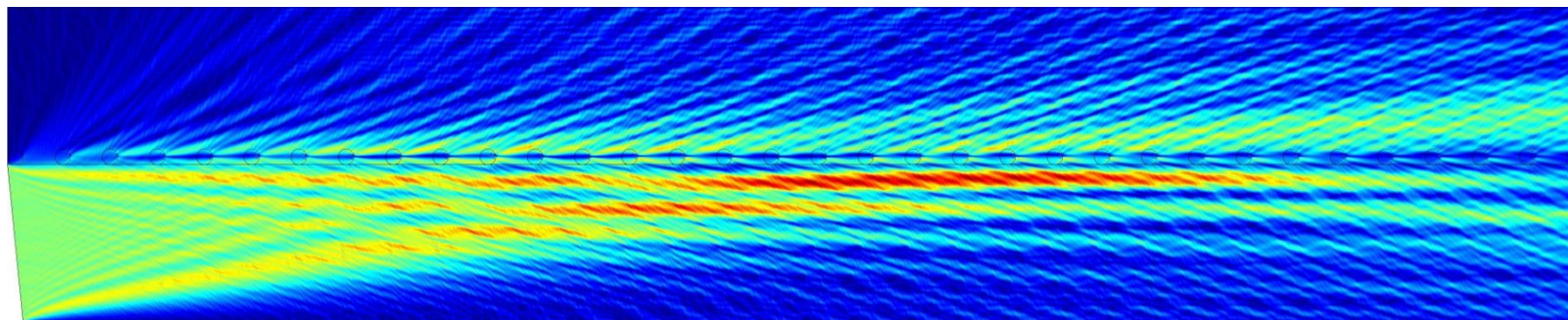
Диффузно-рассеивающее волокно НИТИОМ



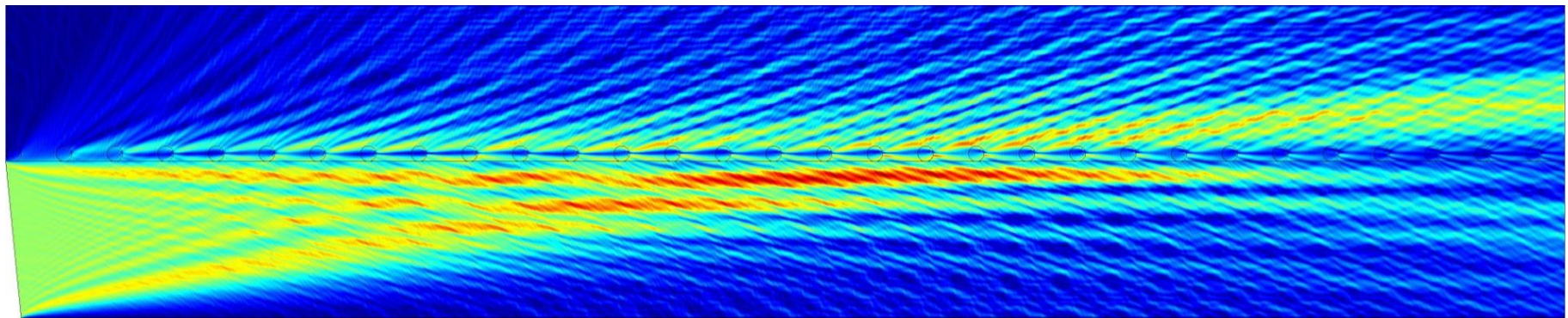
Диффузно-рассеивающее волокно НИТИОМ



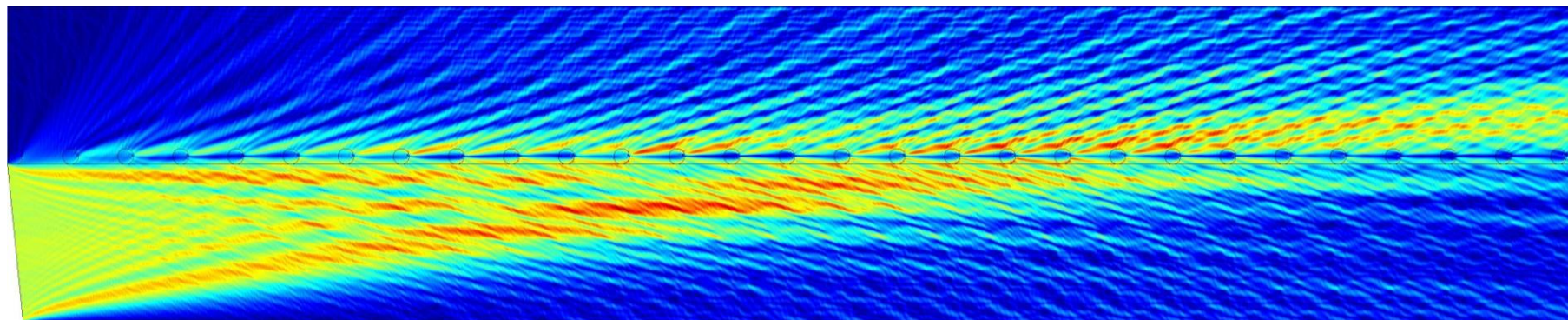
Диффузно-рассеивающее волокно НИТИОМ



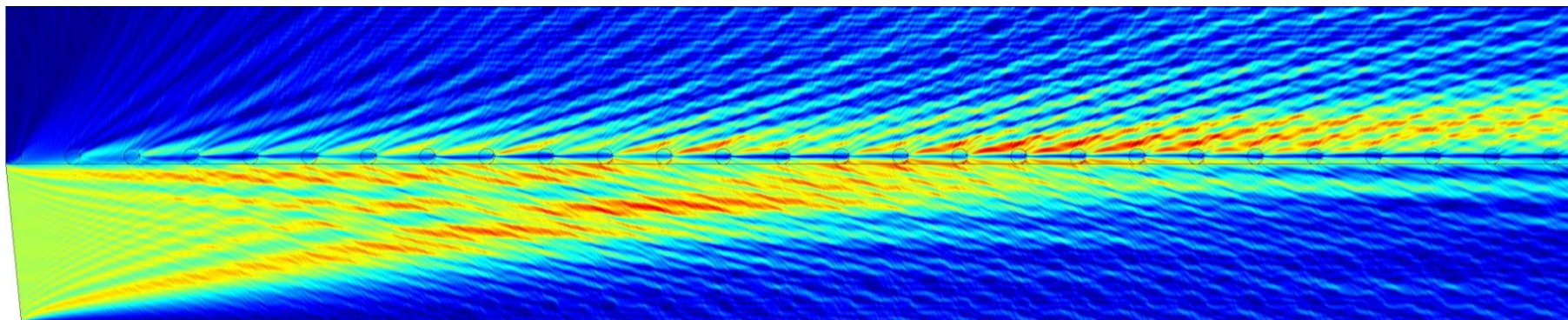
Диффузно-рассеивающее волокно НИТИОМ



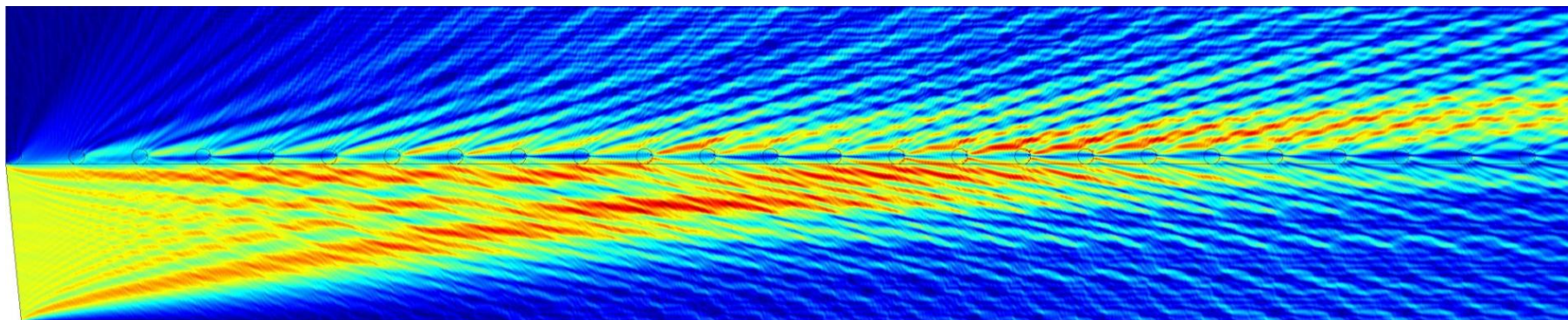
Диффузно-рассеивающее волокно НИТИОМ



Диффузно-рассеивающее волокно НИТИОМ



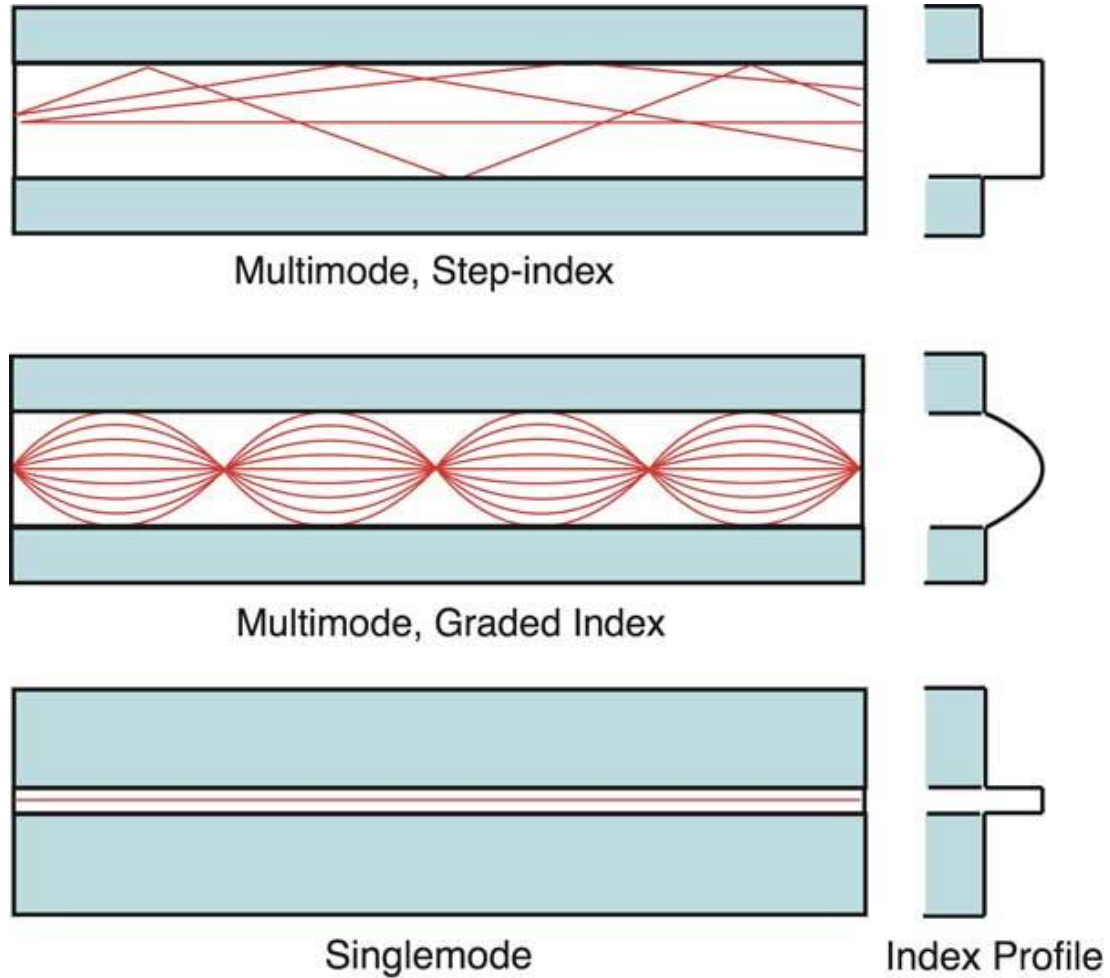
Диффузно-рассеивающее волокно НИТИОМ



Оптические характеристики волокон

- Профиль показателя преломления
- Режим работы (одномодовый, многомодовый)
- Числовая апертура (угловая расходимость излучения для одномодовых волокон)
- Рабочая длина волны
- Длина волны отсечки высшей моды (для одномодовых волокон)
- Затухание сигнала
- Ширина полосы пропускания (величина межмодовой дисперсии)
- Поляризационная модовая дисперсия

Профиль показателя преломления



Профиль показателя преломления

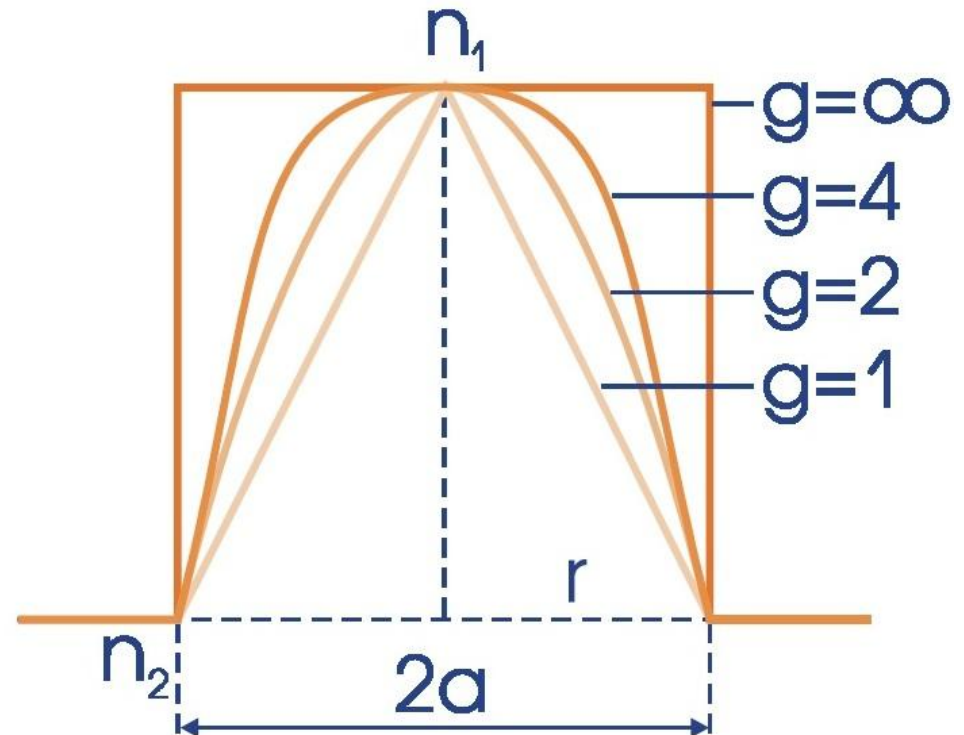
$$\text{при } r \leq a \quad n(r) = n_1 \left(1 - \Delta \left(\frac{r}{a} \right)^{2g} \right)$$

$$\text{при } r > a \quad n(r) = n_2$$

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$$

относительная
разность показателей
преломления

сердцевины (n_1) и
оболочки (n_2)



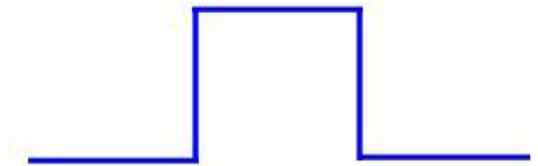
g – параметр профиля
 $g = 2$ – оптимальный параболический
профиль, гарантирующий минимальную
межмодовую дисперсию



Режим работы (одномодовый, многомодовый)

Для оптического волокна со ступенчатым профилем показателя преломления количество возбуждаемых модовых компонент определяется параметром нормированной частоты V :

$$V = ka\sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$



Step Index Profile

a – радиус сердцевины

n_1 – показатель преломления сердцевины

n_2 – показатель преломления оболочки

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ волновое число}$$

Условие волноводного распространения:

$$\beta_2 < \beta_{\text{eff}} < \beta_1$$
$$kn_2 < k_{\text{neff}} < kn_1$$

Режим работы (одномодовый, многомодовый)

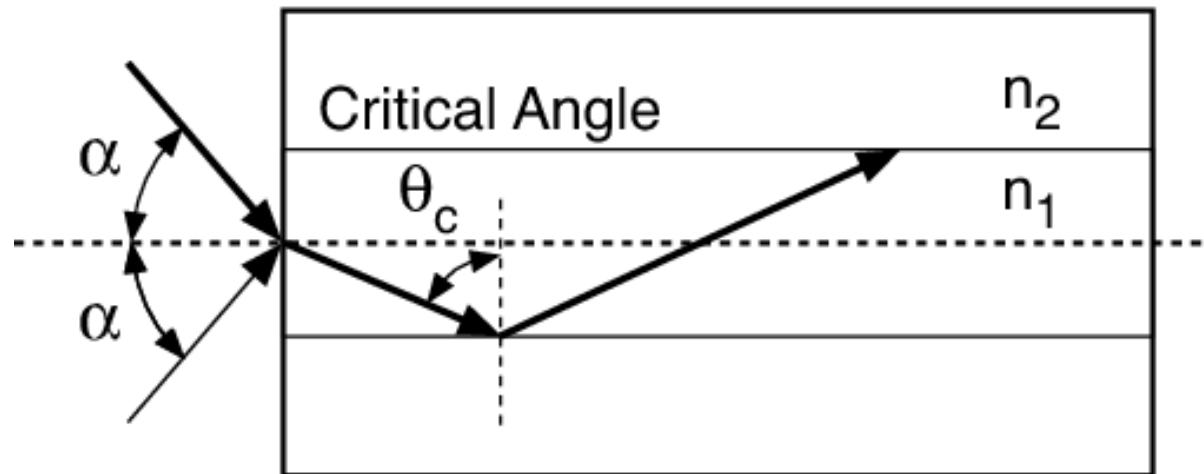
Одномодовый режим не определяется исключительно конструкцией оптического волокна (выбором диаметра сердцевины) !!!

Не менее важное значение имеют **рабочая длина волны** и **разность показателей преломления сердцевины и оболочки** !!!

$$V = ka\sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi}{\lambda} a \text{ NA} < 2.405$$

Числовая апертура оптического волокна

Numerical Aperture



$$NA = \sin \alpha = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$\text{Full Acceptance Angle} = 2\alpha$$

Затухание излучения в оптическом волокне

Затухание характеризует ослабление оптического сигнала по мере распространения его по оптическому волокну:

$$\frac{dP}{dz} = -\gamma P$$

γ – коэффициент затухания
 P – оптическая мощность

Закон Бугера-Ламберта-Беера $P_{\text{out}}(z) = P_{\text{in}} e^{-\gamma z}$

$$\gamma = 10 \lg \frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{out}}}$$

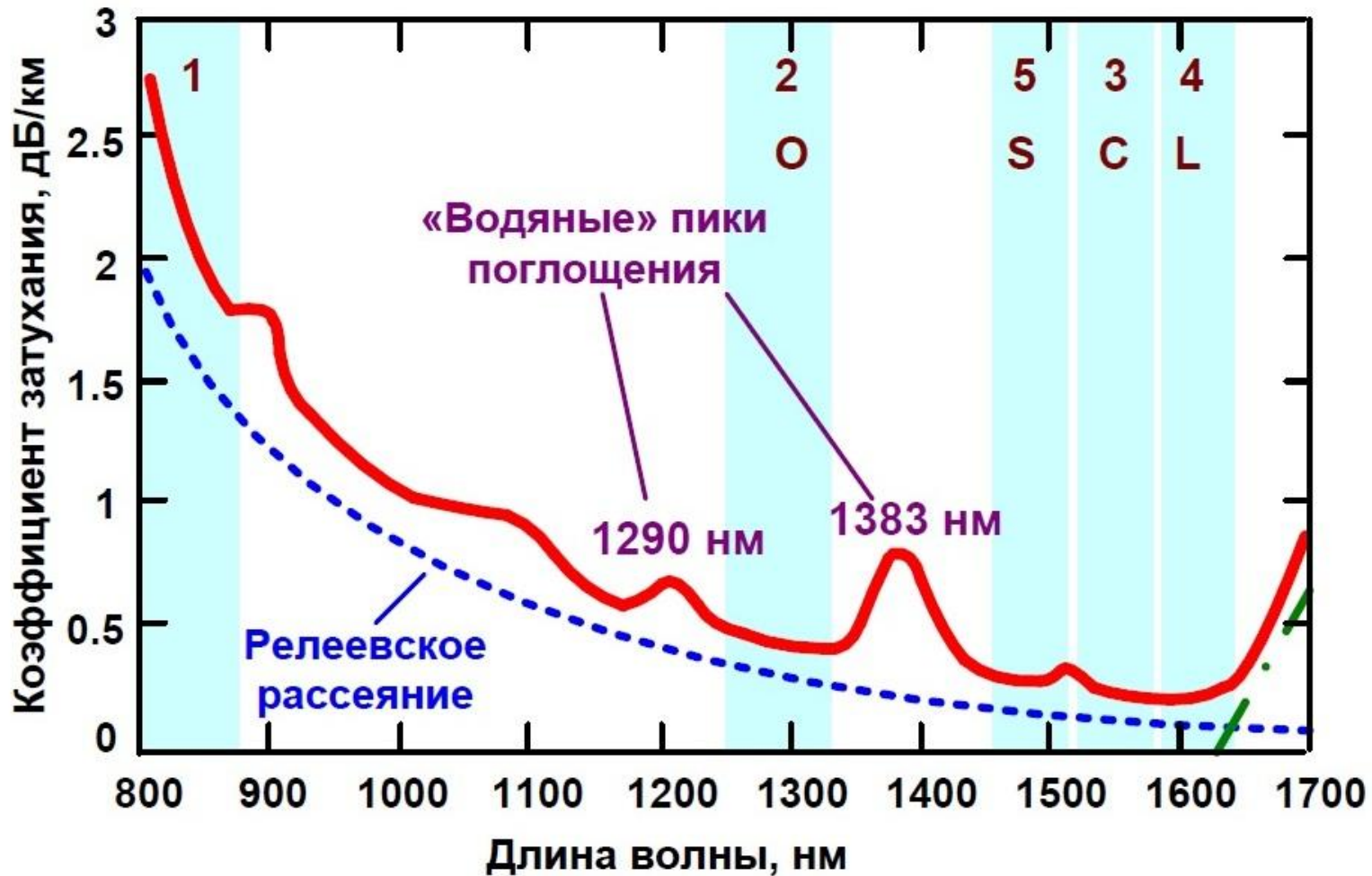
выражается в дБ (децибел)

выражается в дБ/км

$$\alpha = \frac{\gamma}{L}$$

L – длина участка волокна

Затухание излучения в оптическом волокне



Затухание излучения в оптическом волокне

1. Собственные потери

- потери на рассеяние (рэлеевское рассеяние)
- потери на поглощение (УФ, ИК области спектра)

2. Дополнительные потери

- потери при вводе/выводе излучения
- потери при стыковке
- изгибные потери
- потери, обусловленные микродеформациями

3. Кабельные потери

Затухание излучения в оптическом волокне

Рэлеевское рассеяние

размеры неоднородностей
сопоставимы с длиной волны



Интенсивность рассеяния:

$$I \sim C/\lambda^4 \text{ (для кварцевого стекла } C = 0.7-0.9 \text{ дБ/(км}\cdot\text{мкм}^4\text{))}$$

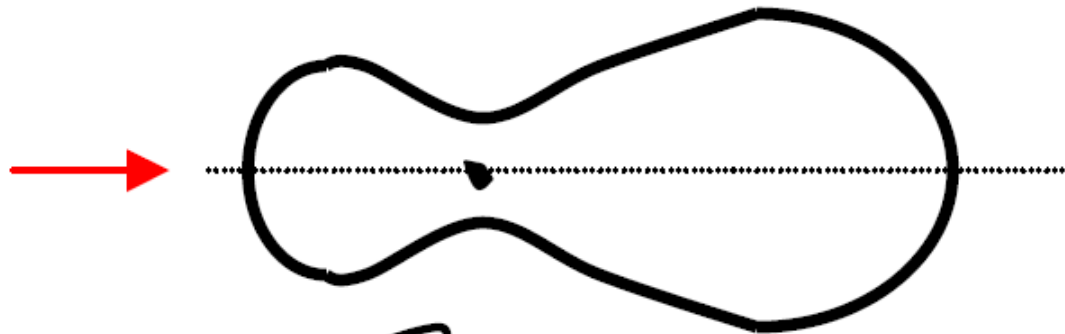
Затухание излучения в оптическом волокне

Рассеяние Ми

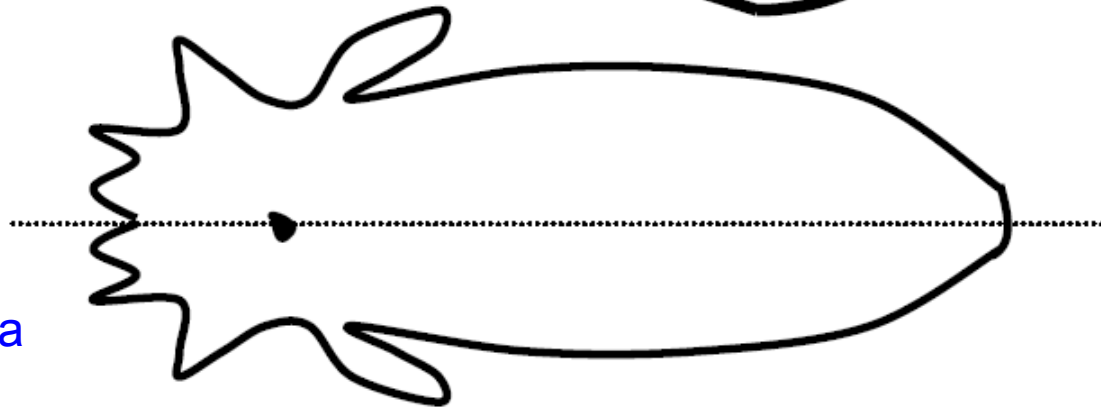
размеры неоднородностей
больше длины волны

как правило, не превышают
0.03 дБ/км

$\lambda = 850-$
 1550 нм



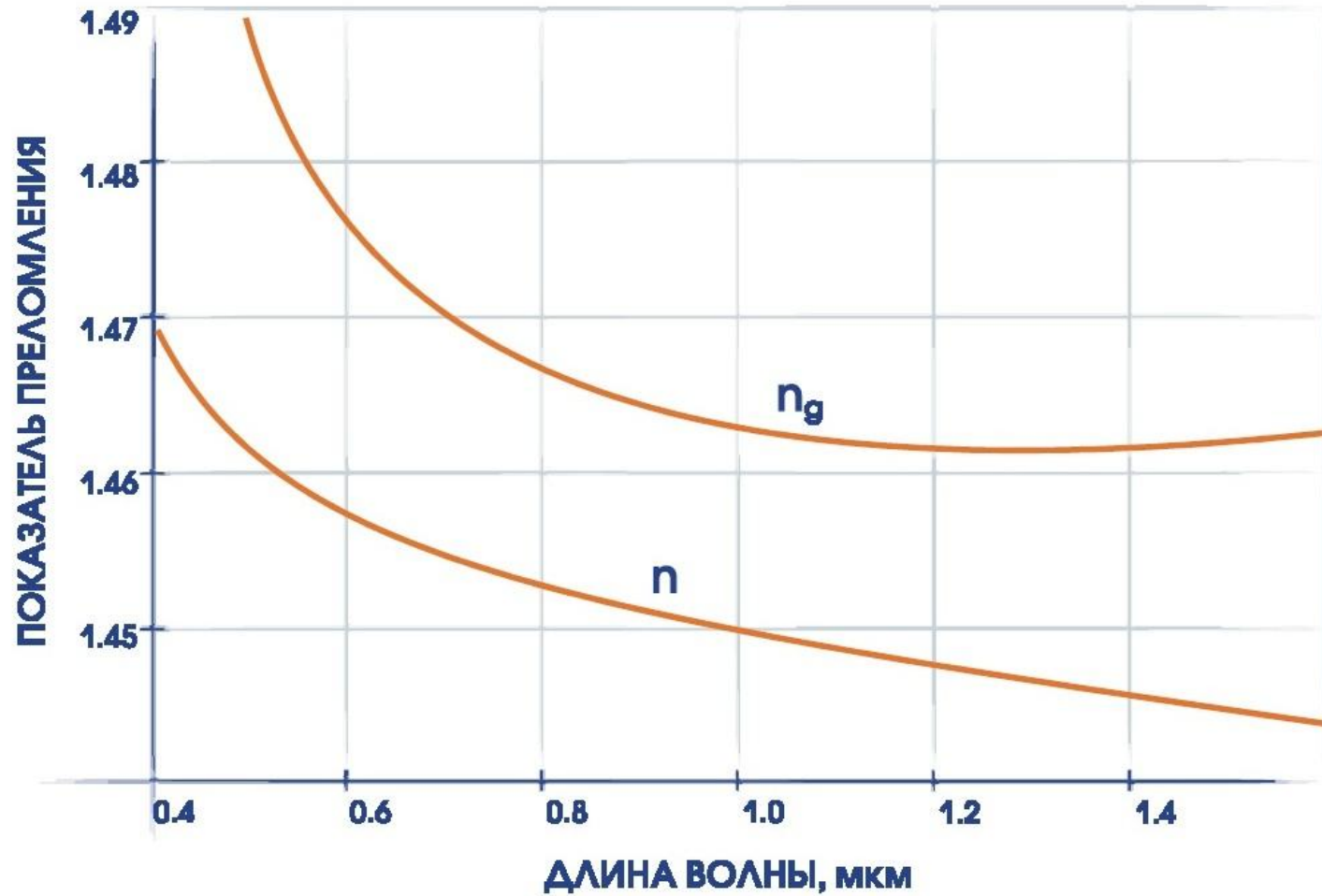
$a \approx \lambda/4$



$a > \lambda/4$

индикатриса
рассеяния

Дисперсия в оптическом волокне



Дисперсия в оптическом волокне

Хроматическая дисперсия

1. Материальная (D_M)

$$n_g = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}$$

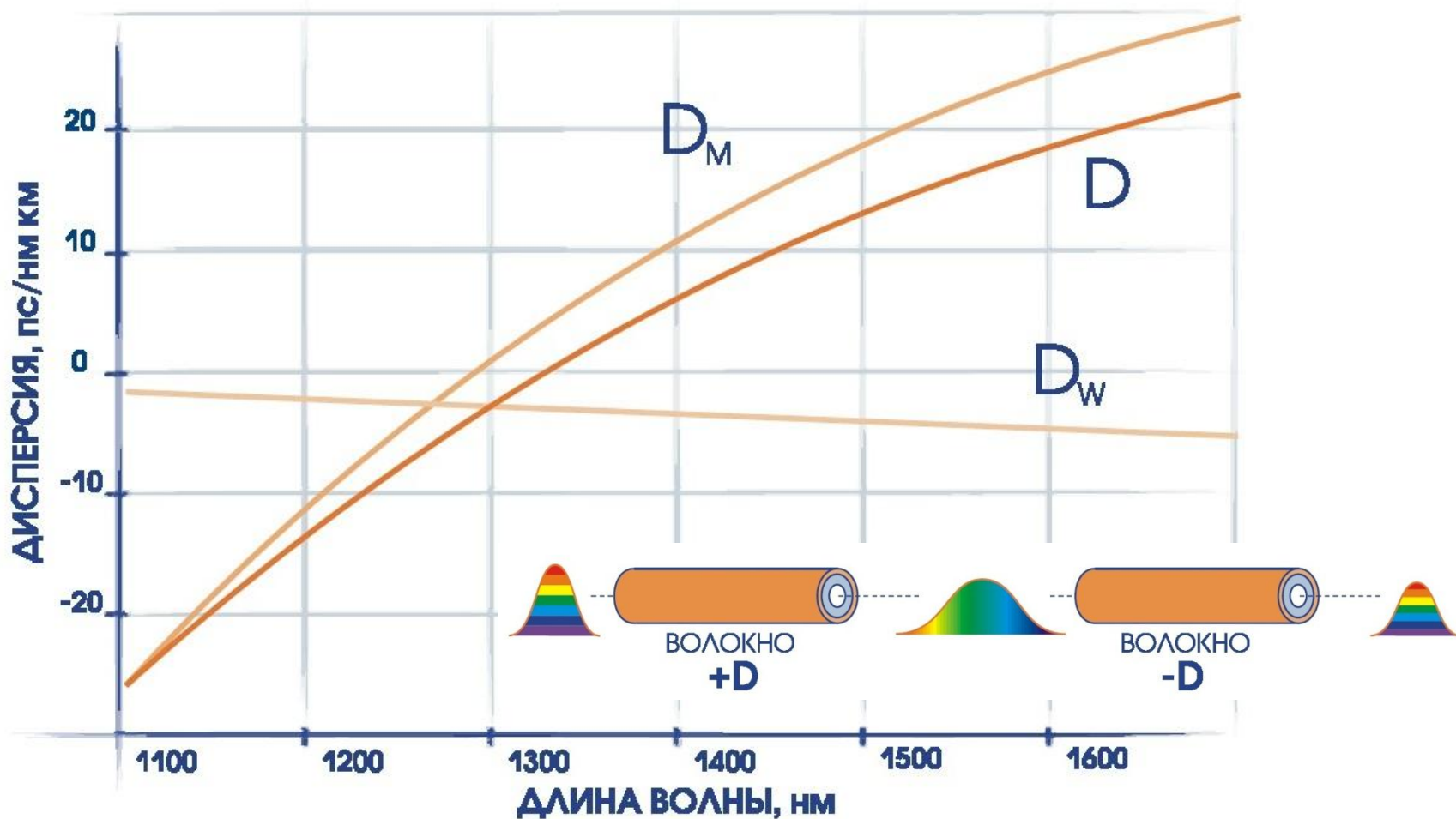
$$D_M(\lambda) = \frac{1}{c} \frac{dn_g}{d\lambda}$$

2. Волноводная (D_W)

$$D_W(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2n}{d\lambda^2}$$

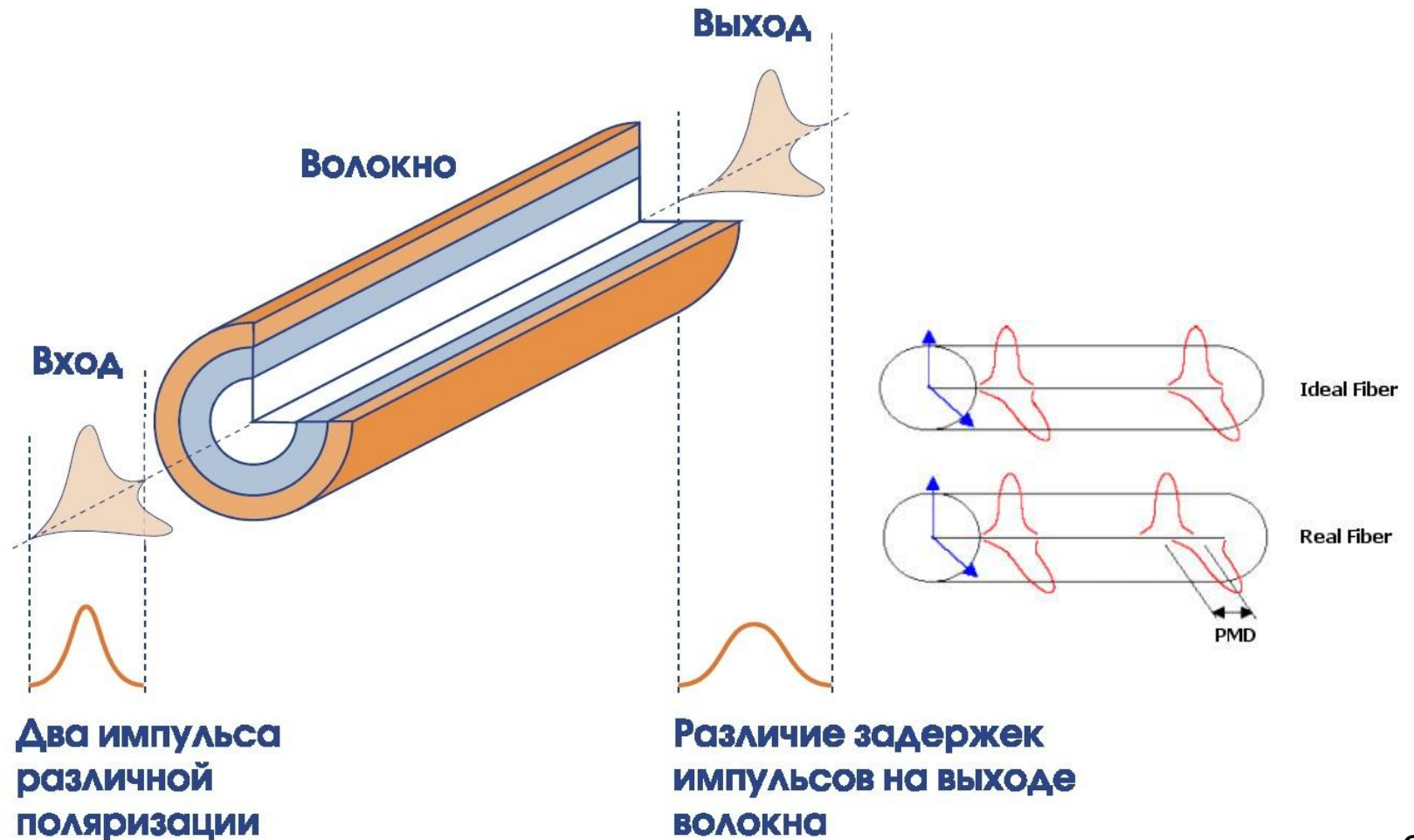
Дисперсия в оптическом волокне

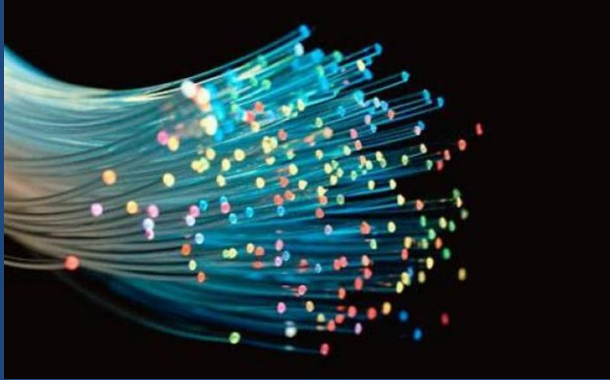
Хроматическая дисперсия



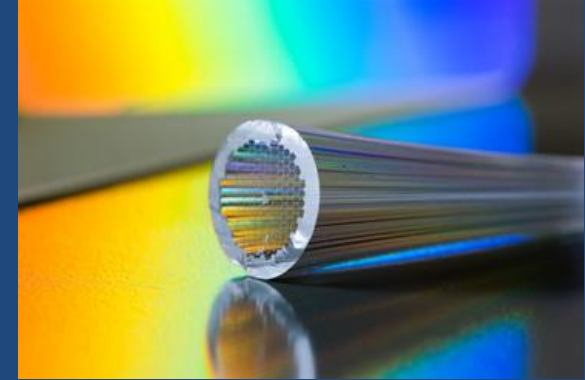
Дисперсия в оптическом волокне

Поляризационная модовая дисперсия





Специальные оптические волокна и их применение



Демидов Владимир Витальевич

научный сотрудник

Научно-исследовательский и технологический институт
оптического материаловедения ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова»

Программа курса «Специальные оптические волокна и их применение»

Неделя	Название	Тип занятия
1	Общие сведения об оптических волокнах	3 лек.
2	Общие сведения об оптических волокнах	2 прак.
3	Ознакомление с процессами изготовления кварцевых оптических волокон	2 лаб.
4	Расчет параметров оптических волокон связного и специального применения	1 прак. 1 лаб.
6	Специальные оптические волокна для сетей и систем связи	1 прак. 1 лек.
7	Оптические волокна, легированные редкоземельными элементами	1 прак. 1 лек.
8	Оптические волокна с сохранением поляризации; светочувствительные волокна	1 лаб. 1 лек.
9	Микроструктурированные и фотонно-кристаллические оптические волокна	1 прак. 1 лек.

Отчетность по курсу «Специальные оптические волокна и их применение»

Экзамен !!!

(два вопроса по курсу + задача)

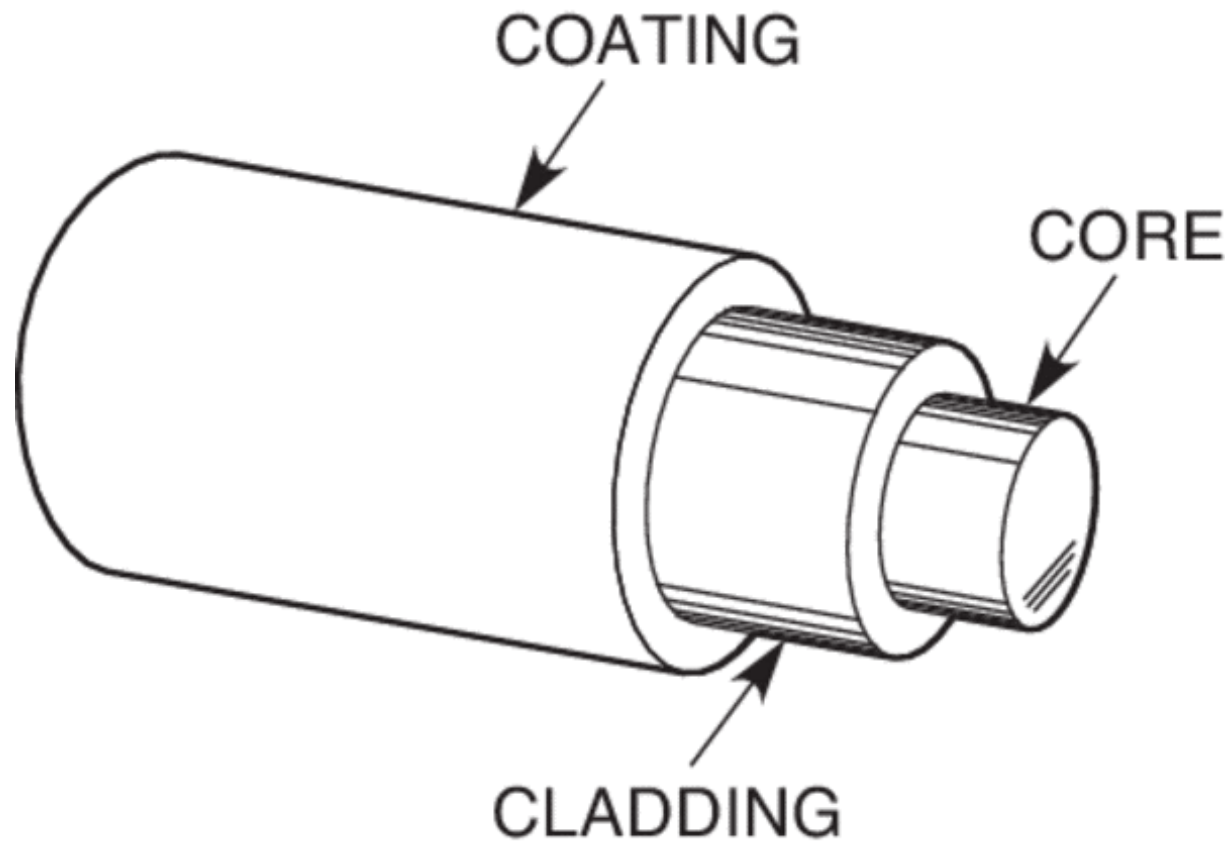
Допуск к экзамену – посещение $\frac{3}{4}$ лекционных занятий + посещение $\frac{3}{4}$ практических занятий + зачтение $\frac{3}{4}$ лаб. работ + сданные тесты

Экзамен «автоматом» – посещение $\frac{3}{4}$ лекционных занятий + посещение $\frac{3}{4}$ практических занятий + все зачтенные лаб. работы + положительный балл за тест + активность на практических занятиях

Литература по курсу «Специальные оптические волокна и их применение»

1. Мидвинтер Дж.Э. Волоконные световоды для передачи информации: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1983. – 336 с.
2. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.
3. Мендес А., Морзе Т.Ф. Справочник по специализированным оптическим волокнам: Пер. с англ. – М.: Техносфера, 2012. – 728 с.
4. Никоноров Н.В., Сидоров А.И. Материалы и технологии волоконной оптики: специальные оптические волокна: учеб. пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 130 с.
5. Шумкова Д.В., Левченко А.Е. Специальные волоконные световоды: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 178 с.
6. Шандаров В.М. Волоконно-оптические устройства технологического назначения: учеб. пособие. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 198 с.

Типичная конструкция оптического волокна



Что важно при разработке оптических волокон связного и специального применения ?

1. Состав стекла сердцевины и оболочки

- оптические потери
- числовая апертура
- генерация стимулированного излучения
- сохранение поляризации излучения
- светочувствительность (формирование брэгговских решеток)
- радиационно-оптическая устойчивость

2. Волноводная структура

- режим работы
- хроматическая дисперсия
- межмодовая дисперсия

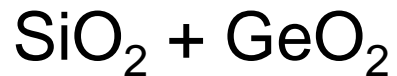
3. Тип и конструкция защитного покрытия

- высокая механическая прочность
- агрессивные условия эксплуатации

Стекла для создания сердцевины и оболочки оптического волокна

1. Силикатные стекла (SiO_2)

2. Двухкомпонентные стекла



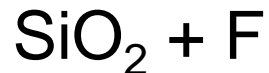
пп ↑



пп ↑



пп ↓



пп ↓

3. Трехкомпонентные стекла



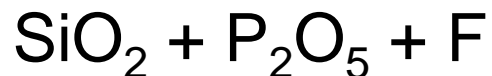
серцевина



серцевина



оболочка



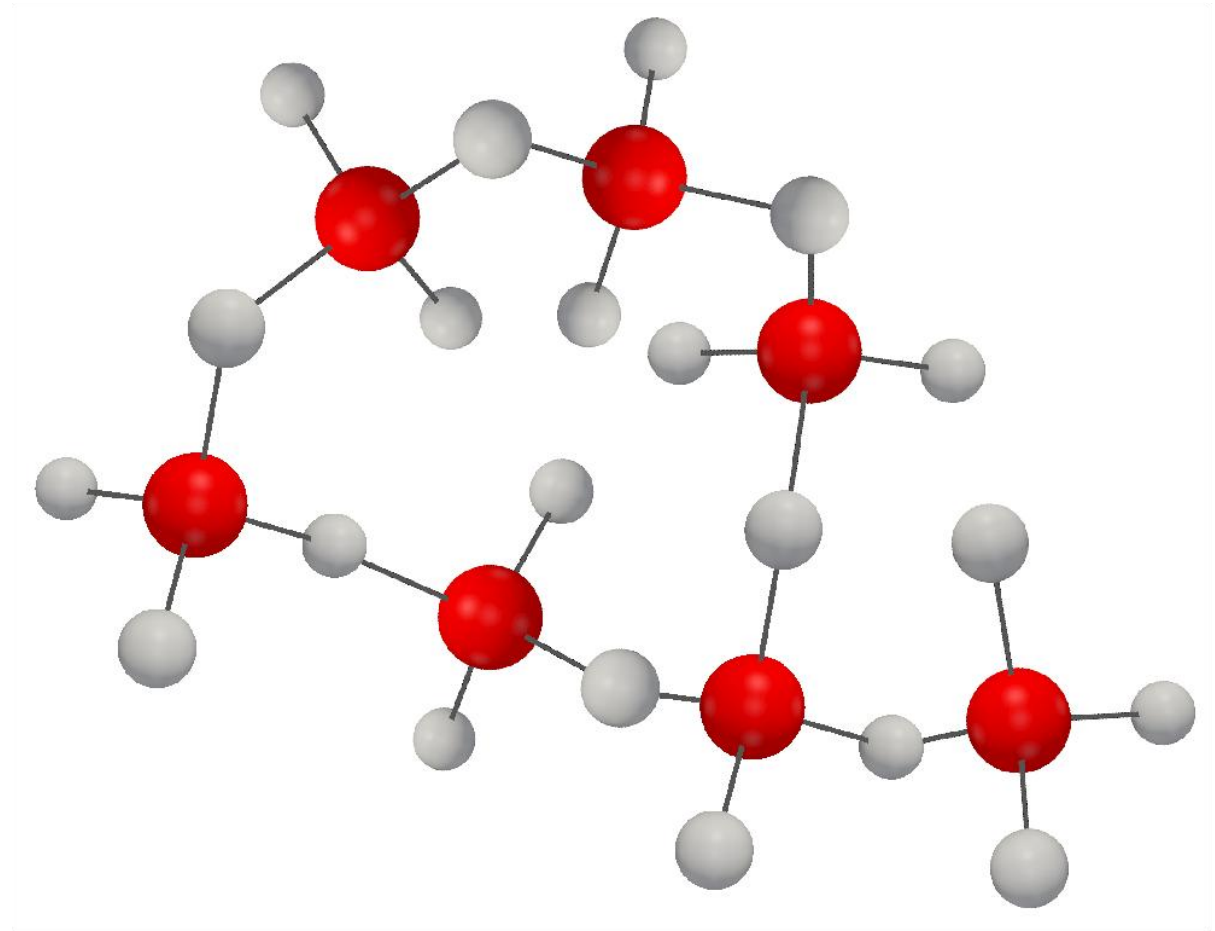
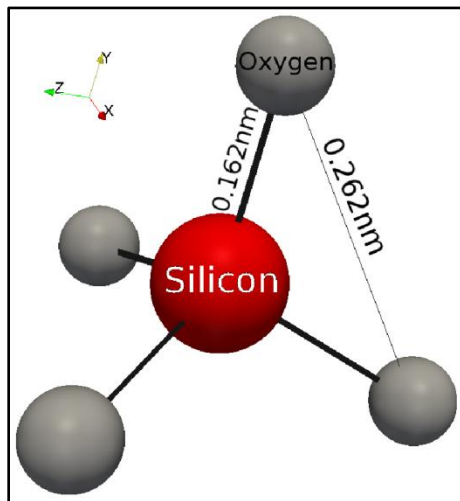
оболочка

Стекла для создания сердцевины и оболочки оптического волокна

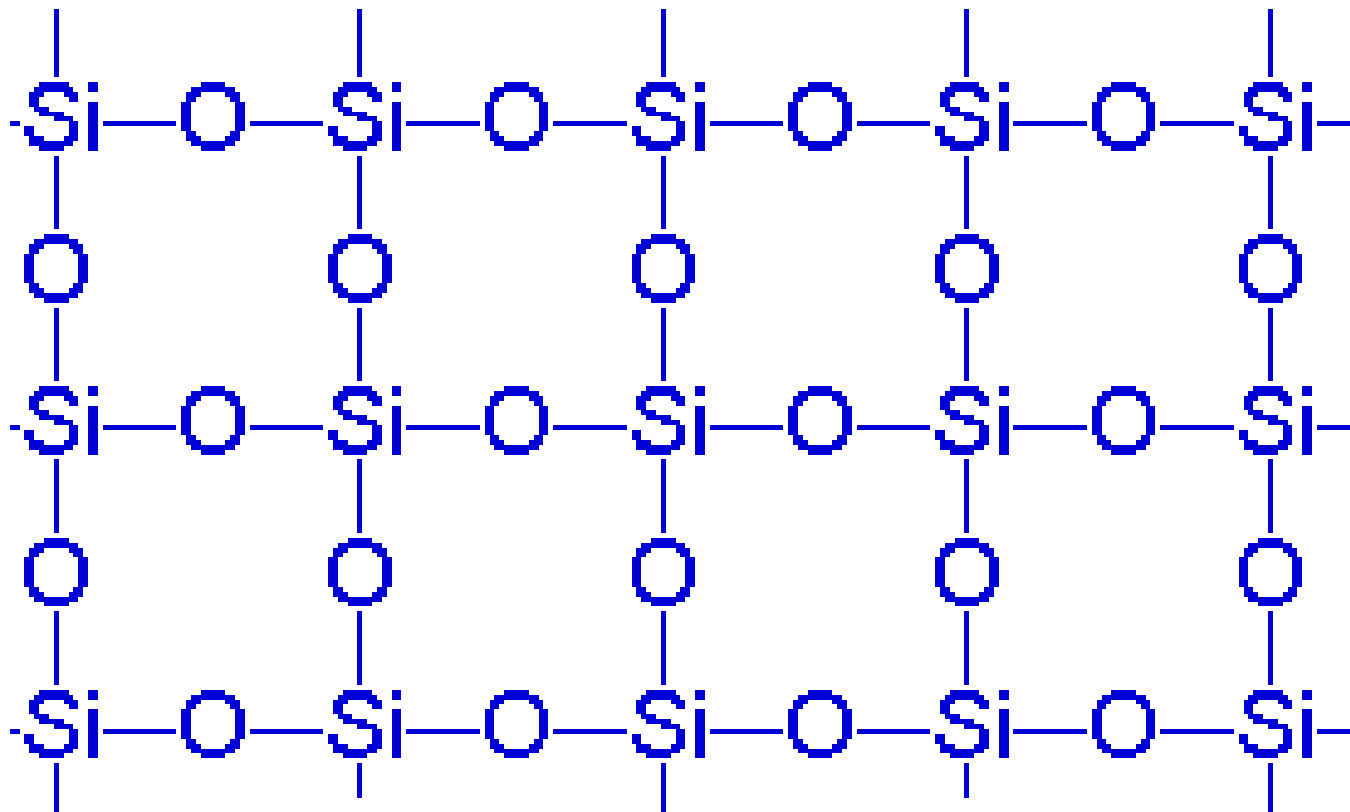
Название	Химическая формула	Исходное вещество
Диоксид германия	GeO_2	GeCl_4
Пентаоксид фосфора	P_2O_5	POCl_3
Оксид бора	B_2O_3	BCl_3 BBr_3
Фтор	F	SiF_4 SF_6 CCl_2F_2

Структура (сетка, матрица) кварцевого стекла

Кремниево-кислородный тетраэдр



Структура (сетка, матрица) кварцевого стекла



Зависимость показателя преломления стекла от длины волны излучения

Уравнение, или ряд Селлмейера:

$$n^2(\lambda) = \sum_{i=1}^k \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2} + 1$$

λ_i – резонансные длины волн

A_i – безразмерные коэффициенты

Использование уравнения Селлмейера для определения показателя преломления кварцевого стекла

$$k = 3$$

$$A_1 = 0.6961663$$

$$A_2 = 0.4079426$$

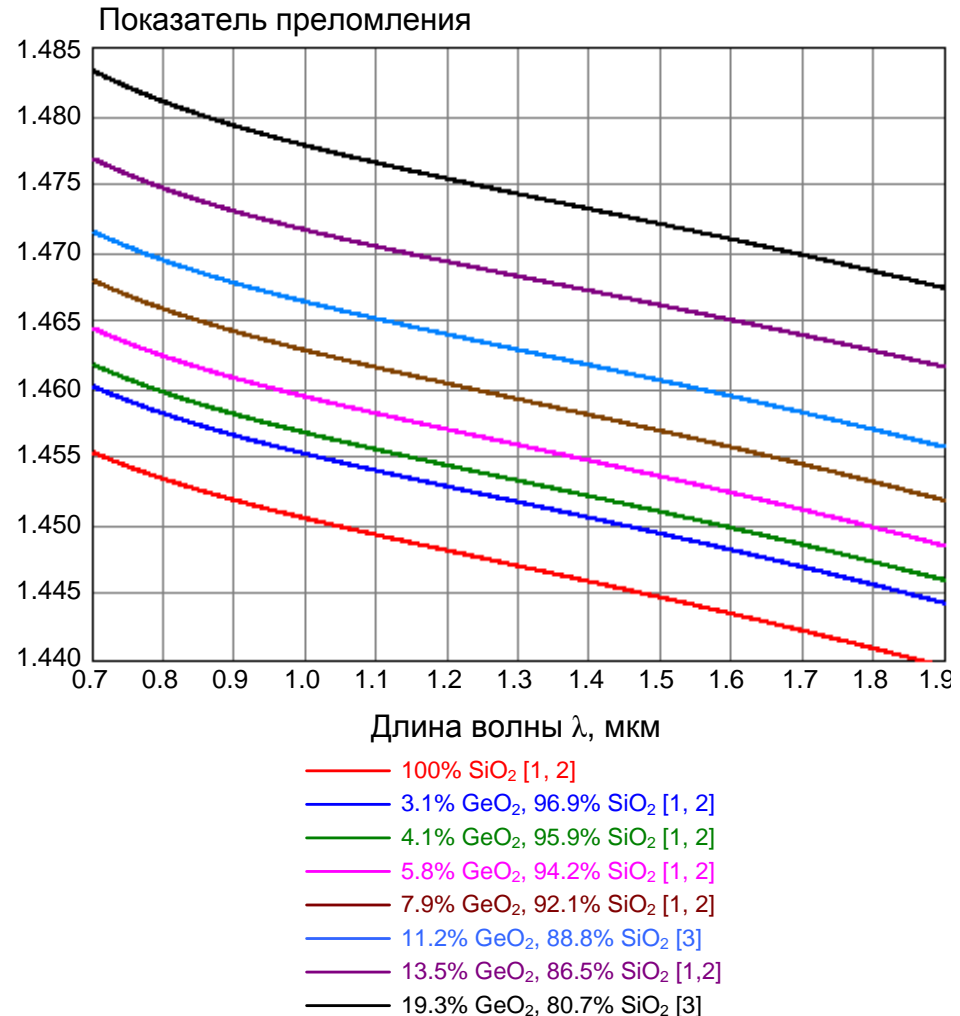
$$A_3 = 0.8974794$$

$$\lambda_1 = 0.0684043, \text{ мкм}$$

$$\lambda_2 = 0.1162414, \text{ мкм}$$

$$\lambda_3 = 9.896161, \text{ мкм}$$

<http://refractiveindex.info>



Зависимость показателя преломления системы из двух стекол от длины волны излучения

$$n_d(\lambda, p) = n_{Si}(\lambda) + A_d p$$

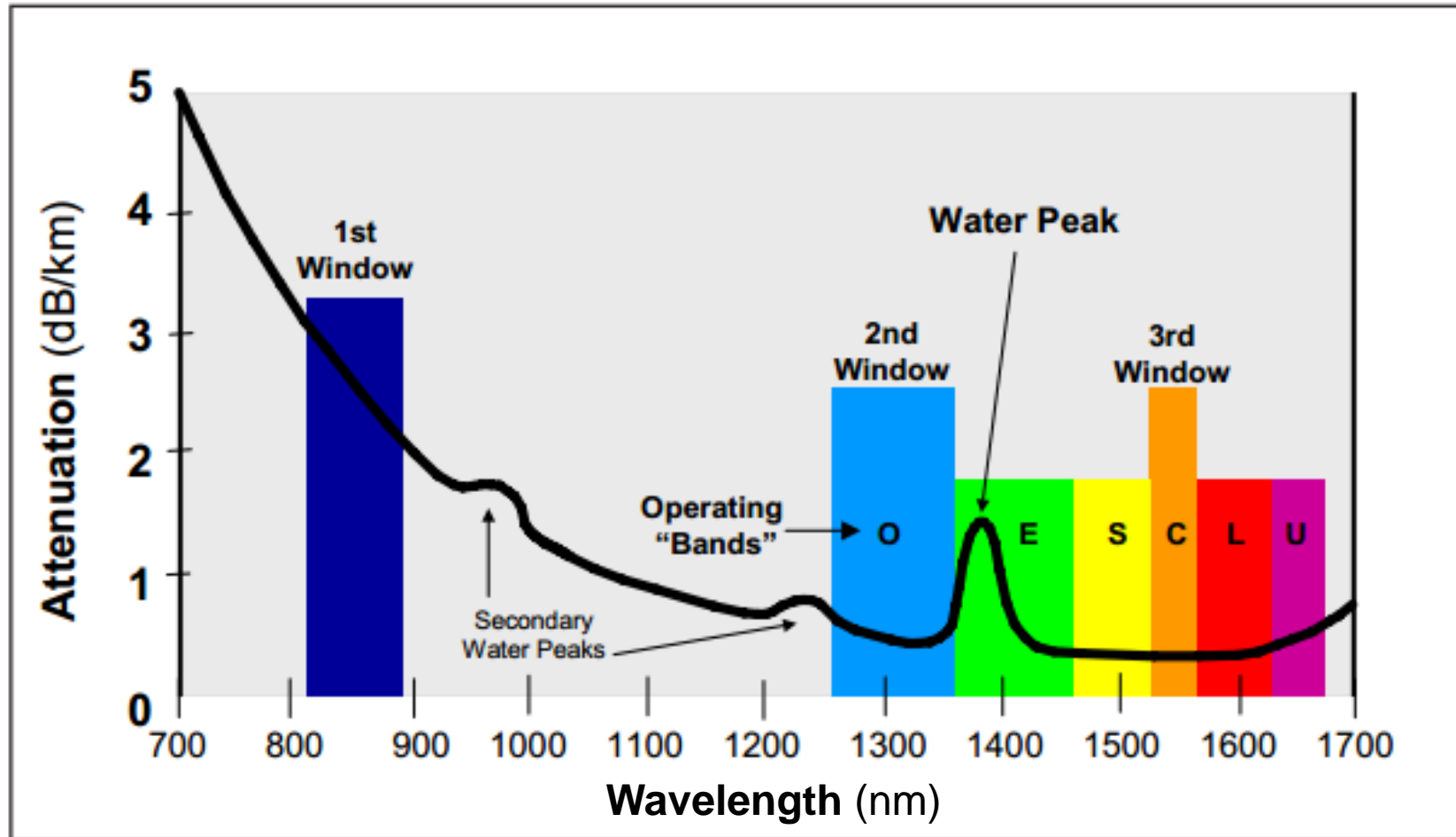
p – содержание легирующей добавки в молярных %

n_{Si} – показатель преломления чистого (нелегированного) кварцевого стекла

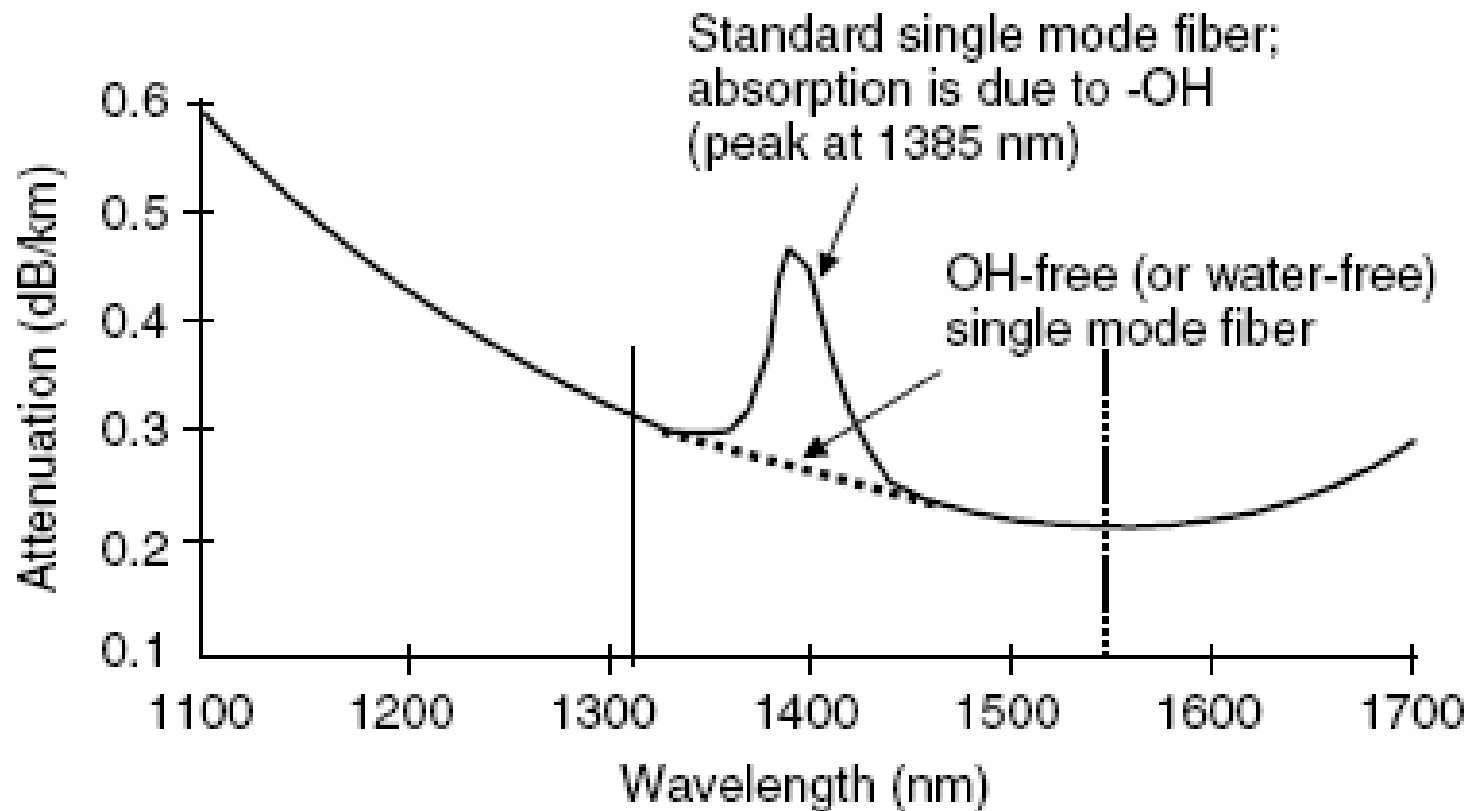
A_d – коэффициент аппроксимации

Легирующая добавка	A_d
Оксид германия GeO_2	$1.4145 \cdot 10^{-3}$
Пентаоксид фосфора P_2O_5	$1.6520 \cdot 10^{-3}$
Оксид бора B_2O_3	$-3.760 \cdot 10^{-4}$
Фтор F	$-4.6650 \cdot 10^{-3}$

Затухание излучения в оптическом волокне на основе кварцевого стекла

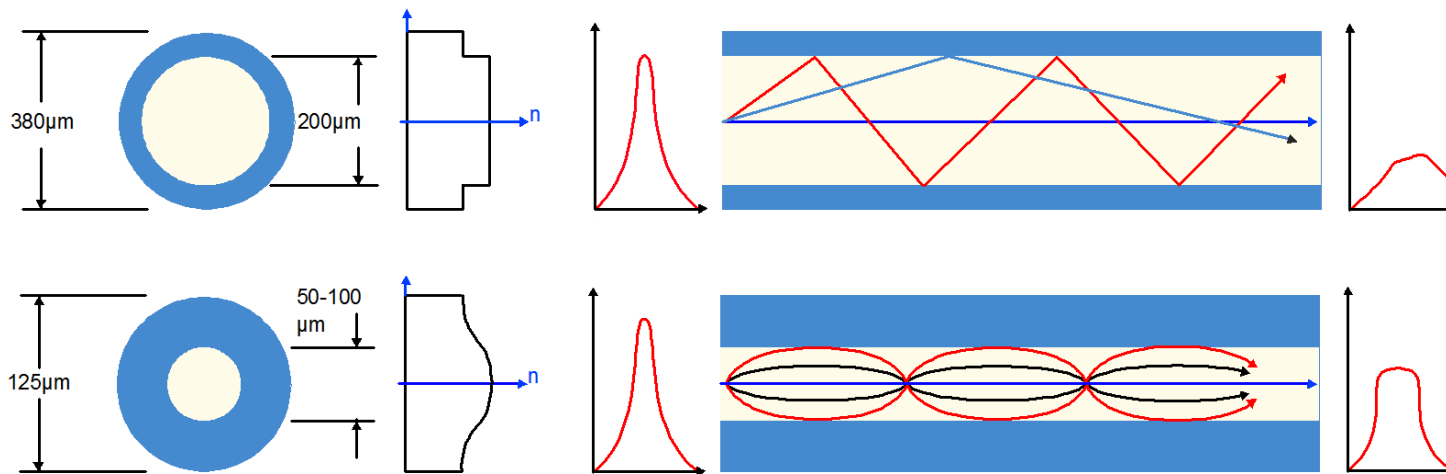


Оптические волокна с нулевым водяным пиком

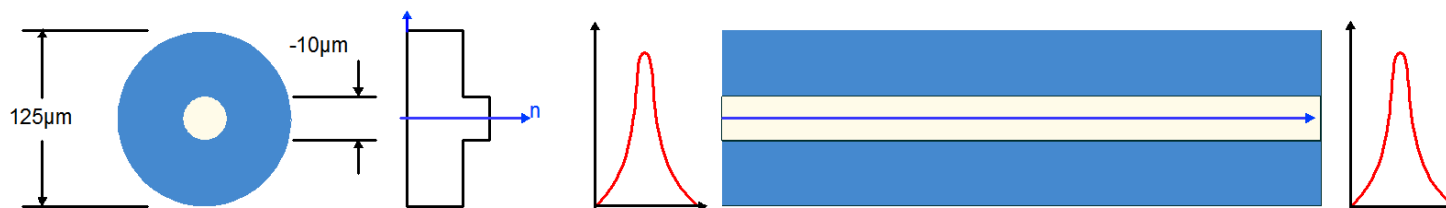


Изменение (профиль) показателя преломления в оптическом волокне

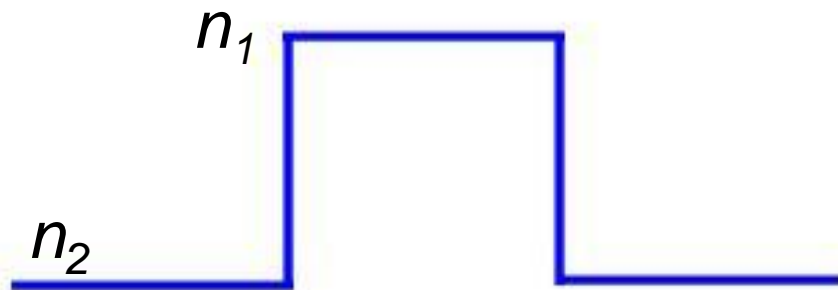
Многомодовые волокна



Одномодовые волокна

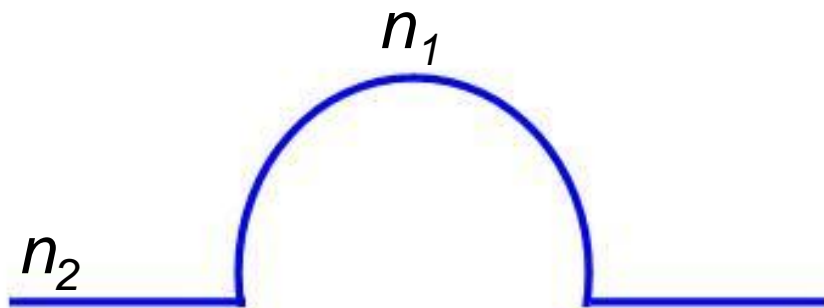


Изменение (профиль) показателя преломления в ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ



Step Index Profile

$$n(r) = \begin{cases} n_1 & r \leq r_{core} \\ n_2 & r_{core} < r \leq r_{clad} \end{cases}$$



Graded Index Profile

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \left(1 - \Delta \left(\frac{r}{r_{core}} \right)^g \right) & r \leq r_{core} \\ n_2 & r_{core} < r \leq r_{clad} \end{cases}$$

Изменение (профиль) показателя преломления в оптическом волокне

Условие слабой направляемости излучения:

$$n(r, \theta),$$

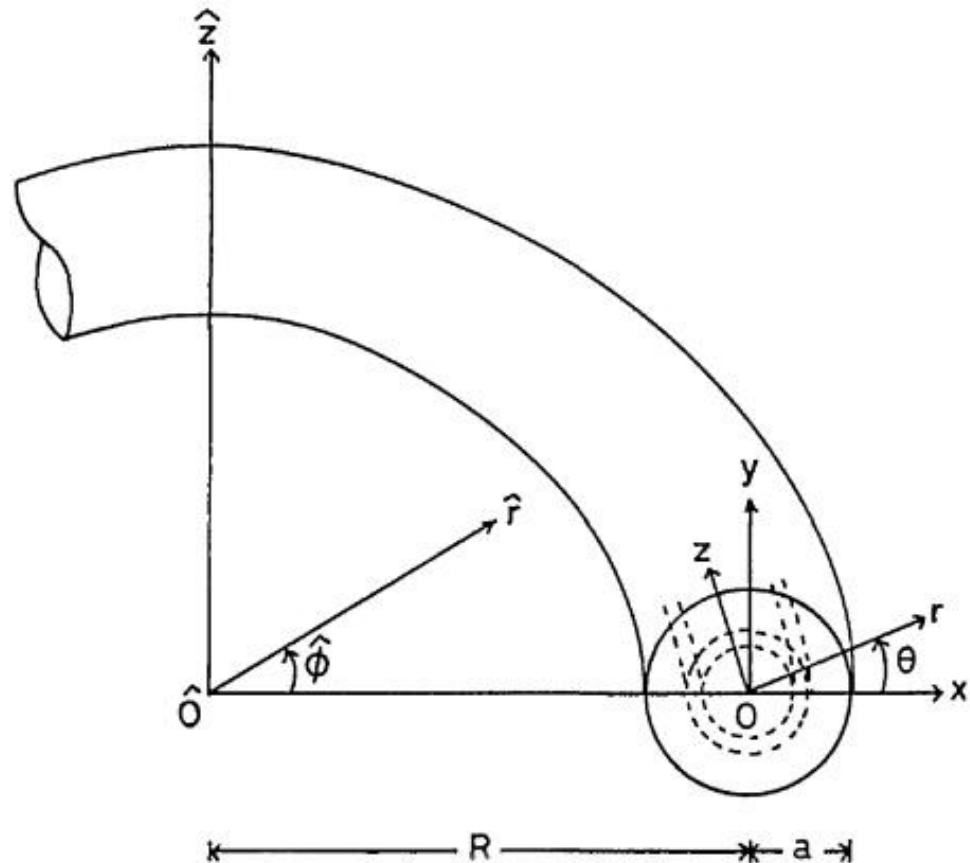
где r и θ – полярные
координаты

$$0 \leq r \leq r_{clad}$$

$$0 \leq \theta \leq 2\pi$$

$$\rightarrow n(r)$$

$$\Delta \ll 1$$



Волноводные режимы распространения излучения по оптическому волокну

1. Одномодовый режим (только одна мода LP_{01})
2. Многомодовый режим (большое количество мод, как правило, 50-1000)
3. Квазиодномодовый режим (мода LP_{01} с примесью различных мод высшего порядка $\rightarrow LP_{11}, LP_{21}, LP_{02}, LP_{31}$)
4. Маломодовый режим (существенно ограниченное количество мод, как правило, 2-50)

Распространение электромагнитных волн в свободном пространстве

Система уравнений Максвелла:

$$1. \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_V$$

$$2. \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$3. \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

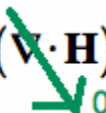
$$4. \quad \nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}$$



James Clerk Maxwell.

Распространение электромагнитных волн в свободном пространстве

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{H} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{H}) - \nabla^2 \mathbf{H}$$

$\nabla(\nabla \cdot \mathbf{H})$ (this doesn't matter because it's zero)


$$\nabla^2 \mathbf{H} = \nabla^2 \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial z^2} \\ \frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} \\ \frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial z^2} \end{bmatrix}$$

Распространение электромагнитных волн в свободном пространстве

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{H} = -\nabla^2 \mathbf{H}$$

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\nabla^2 \mathbf{E}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{H})$$

Распространение электромагнитных волн в свободном пространстве

$$\begin{aligned}\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} &= -\nabla^2 \mathbf{E} = \\ &= -\mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{H}) \quad (\text{substitute in Ampere's Law}) \\ &= -\mu \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \right) \quad (\mathbf{J} \text{ is zero because source free region}) \\ &= -\mu \epsilon \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)\end{aligned}$$

www.maxwells-equations.com

$$\Rightarrow \boxed{\nabla^2 \mathbf{E} = \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}} \quad [\text{The Vector Wave Equation}]$$

Распространение электромагнитных волн в свободном пространстве

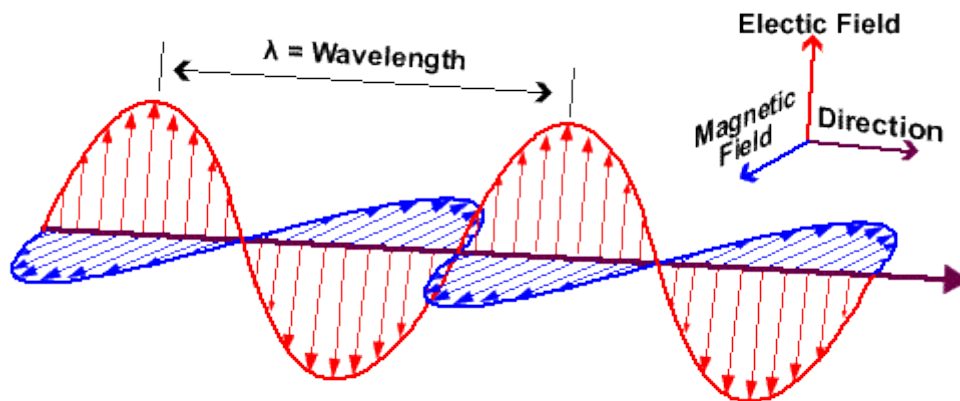
$$\nabla^2 E_x = \mu\epsilon \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} \quad [\text{Scalar Wave Equation}]$$

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2}$$

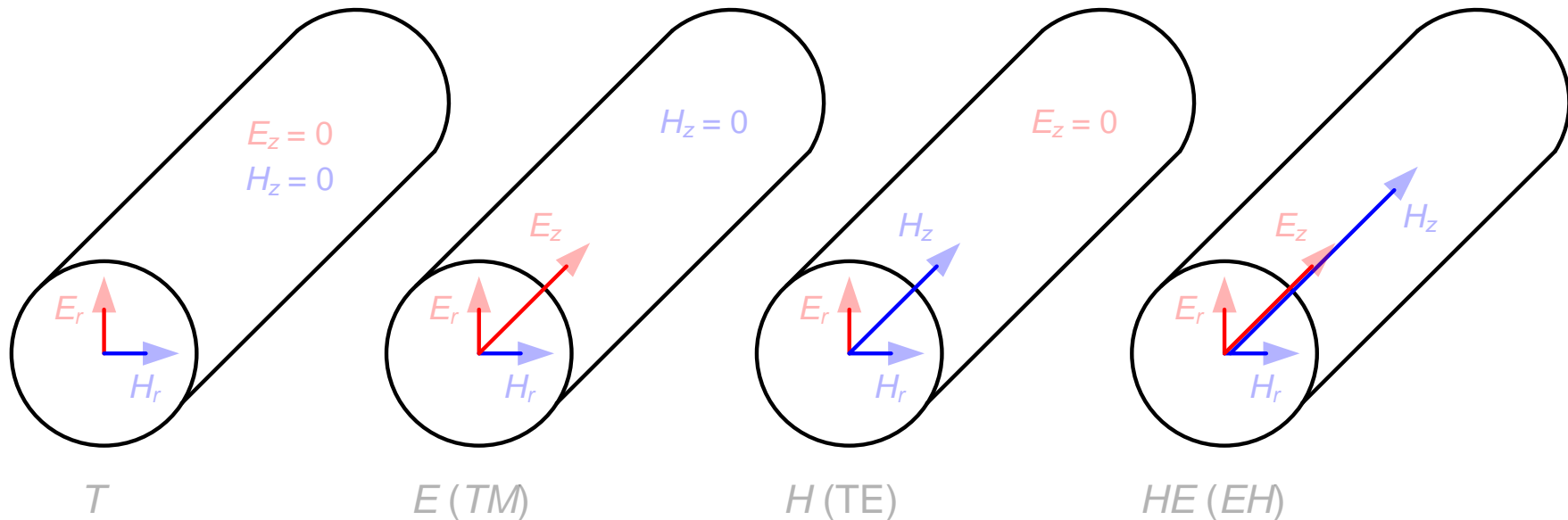
Распространение электромагнитных волн в свободном пространстве

Решение волнового уравнения \rightarrow уравнение
электромагнитной волны:

$$\mathbf{E}(z, t) = \mathbf{E}_0(x, y) \exp \left[j \left(\omega t - \frac{\omega}{c} n_{eff} z \right) \right]$$



Классификация электромагнитных волн в оптическом волокне



1. Волна T – поперечная электромагнитная (в волокне не существует)
2. Волны E (TM) – электрическая (поперечная магнитная) и H (TE) – магнитная (поперечная электрическая)
3. Волны EH и HE – гибридные (смешанные)

Типы (моды) электромагнитных волн в оптическом волокне

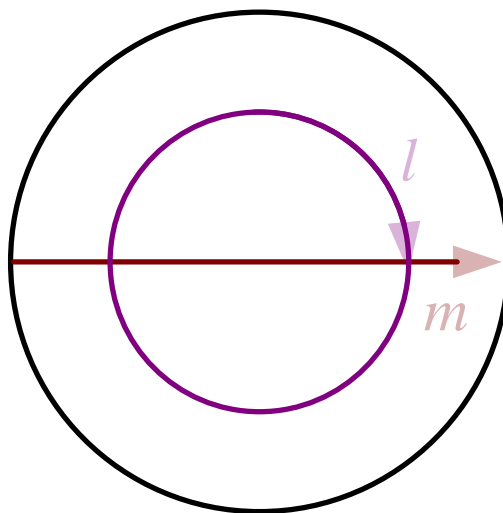
По оптическому волокну с осесимметричным профилем показателя преломления может распространяться определенный дискретный набор электромагнитных волн

Тип волны регламентируется сложностью структуры поля в поперечном сечении волокна

Каждую такую волну можно охарактеризовать двумя целыми числами (индексами) l и m ($l, m = 0, 1, 2, \dots$). Индекс l описывает азимутальные (угловые) свойства волны, а m – радиальные.

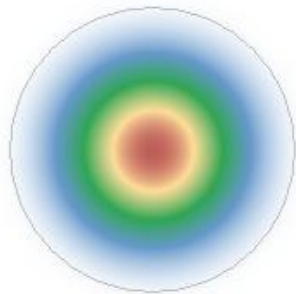
Типы (моды) электромагнитных волн в оптическом волокне

Приближение линейно-поляризованных мод (LP_{lm}):

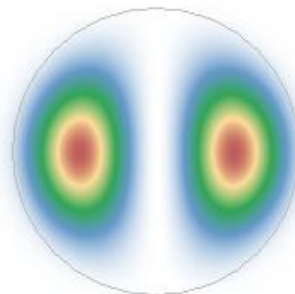


l – число полных изменений напряженности поля по окружности, m – число полных изменений напряженности поля по диаметру

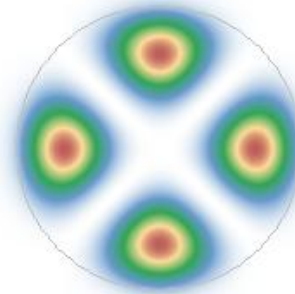
Типы (моды) электромагнитных волн в оптическом волокне



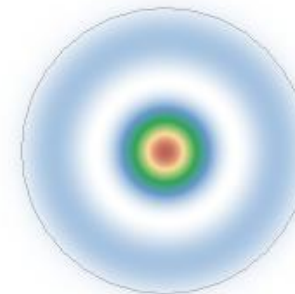
LP_{0,1}



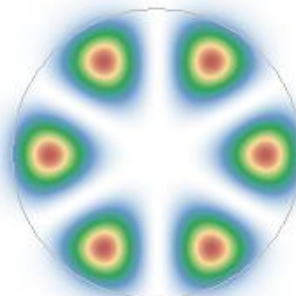
LP_{1,1}



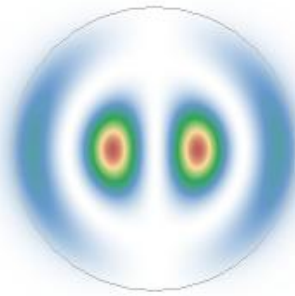
LP_{2,1}



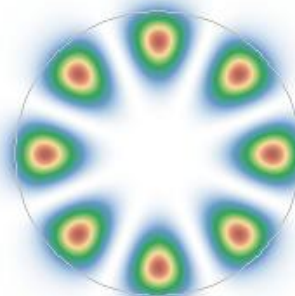
LP_{0,2}



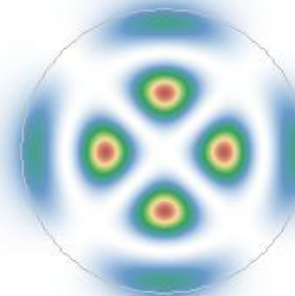
LP_{3,1}



LP_{1,2}



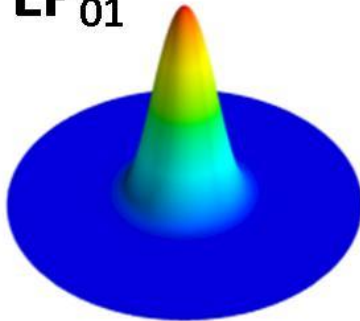
LP_{4,1}



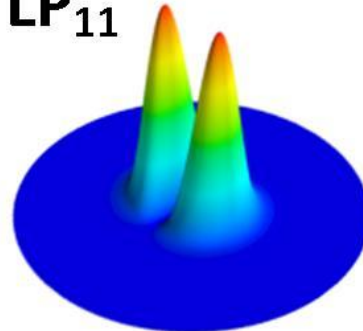
LP_{2,2}

Типы (моды) электромагнитных волн в оптическом волокне

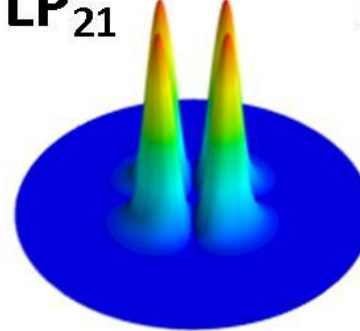
LP_{01}



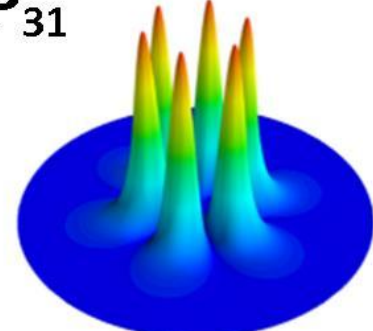
LP_{11}



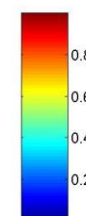
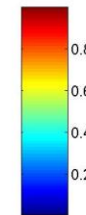
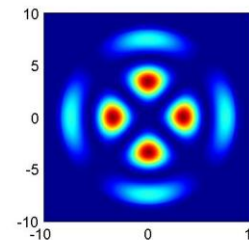
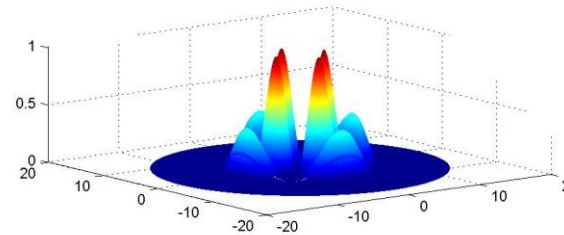
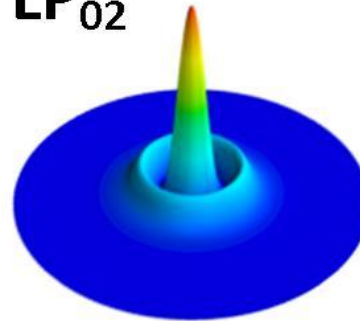
LP_{21}



LP_{31}



LP_{02}



Направляемые моды в оптическом волокне

Поля мод в волокне с осесимметричным ППП:

$$E(r, \varphi, z) = E_t(r, \varphi) \exp(i\beta z) \quad E_t(r, \varphi) = E_{\max} \Psi(r, \varphi)$$

$$H(r, \varphi, z) = n_{10} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} E_t(r, \varphi) \exp(i\beta z)$$

r, φ, z – цилиндрические координаты, E_{\max} – амплитуда напряженности электрического поля, $\Psi(r, \varphi)$ – функция, описывающая изменение напряженности электрического поля в поперечном сечении волокна, β – постоянная распространения, n_{10} – показатель преломления на оси волокна, $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная, $\mu_0 = 1.257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнитная постоянная

Направляемые моды в оптическом волокне

Волокно с осесимметричным ППП обладает круговой симметрией, поэтому функцию $\Psi(r, \varphi)$ можно записать:

$$\Psi(r, \varphi) = R(r) \cdot \exp(il\varphi)$$

l – целое число ($l \geq 0$), i – мнимая единица

Функция $R(r)$ является решением скалярного волнового уравнения

$$\frac{d^2 R(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR(r)}{dr} + \left[k^2 n^2(r) - \beta^2 - \frac{l^2}{r^2} \right] R(r) = 0$$

Направляемые моды в оптическом волокне

В общем случае для каждого значения $l > 1$ и $m \geq 1$ уравнение описывает 4 гибридные моды с постоянными распространения β_{lm} :

- четную и нечетную моды $HE_{(l+1)m}$
- четную и нечетную моды $EH_{(l-1)m}$

Четная и нечетная моды имеют взаимно перпендикулярные направления поляризации

Направляемые моды в оптическом волокне

Все 4 гибридные моды, являющиеся решением уравнения и имеющие одинаковые индексы l и m , характеризуются одинаковым распределением амплитуд напряженностей электрического и магнитного полей в поперечном сечении волокна

Они отличаются направлением поляризации, а также фазами напряженностей электрического и магнитного полей

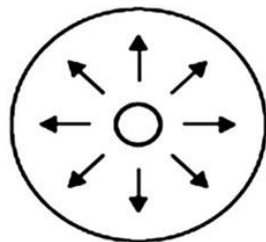
Направляемые моды в оптическом волокне

Случай $l = 0$:

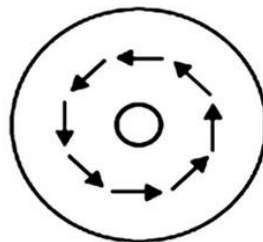
Уравнение описывает 2 гибридные моды – четную и нечетную HE_{1m}

Случай $l = 1$:

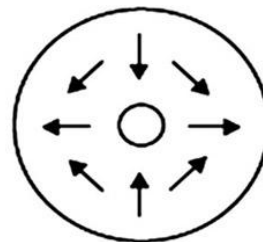
Уравнение описывает 4 моды – четную и нечетную HE_{2m} , а также E_{0m} и H_{0m}



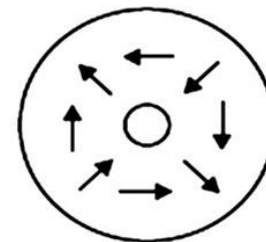
TM_{01}



TE_{01}

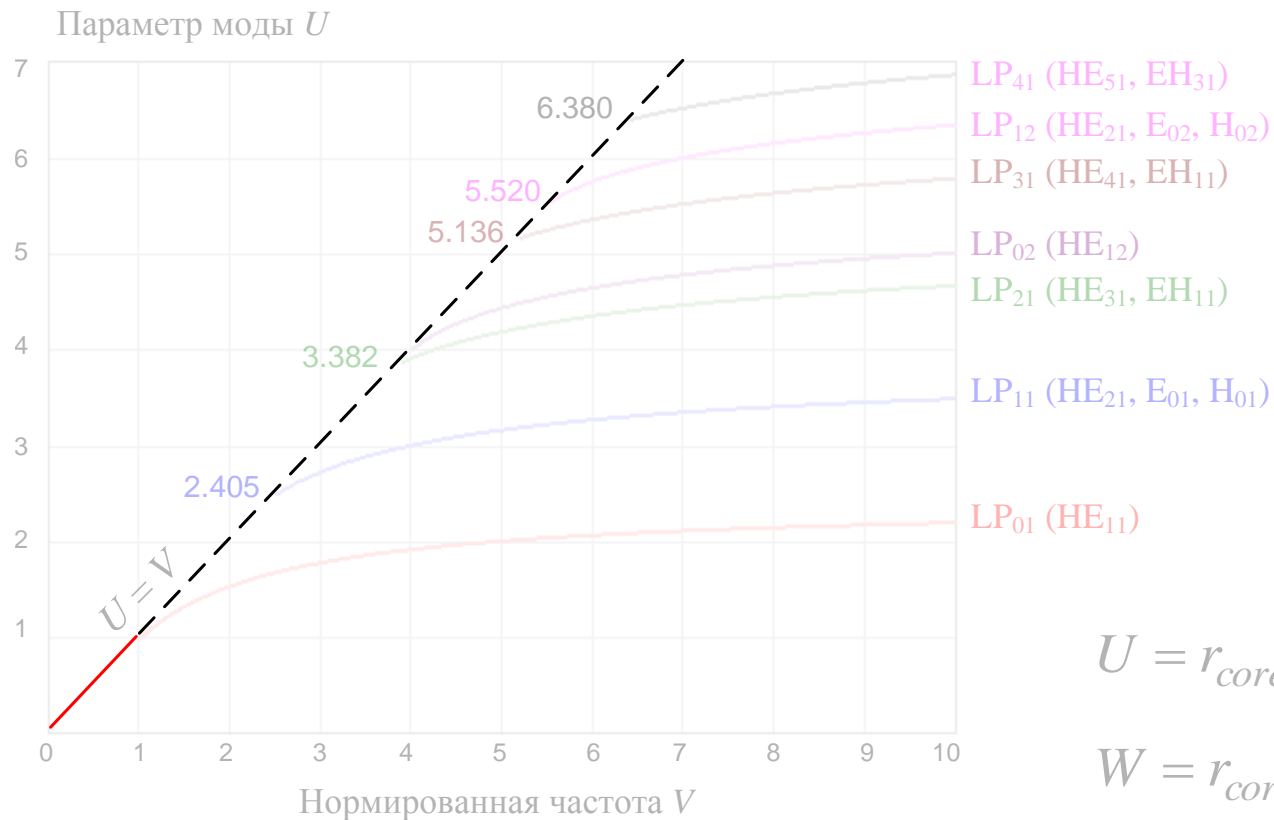


HE'_{21}



HE''_{21}

Отсечка мод высшего порядка в оптическом волокне со ступенчатым профилем показателя преломления



$$U = r_{core} \sqrt{k^2 n_1^2 - \beta^2}$$

$$W = r_{core} \sqrt{\beta^2 - k^2 n_2^2}$$

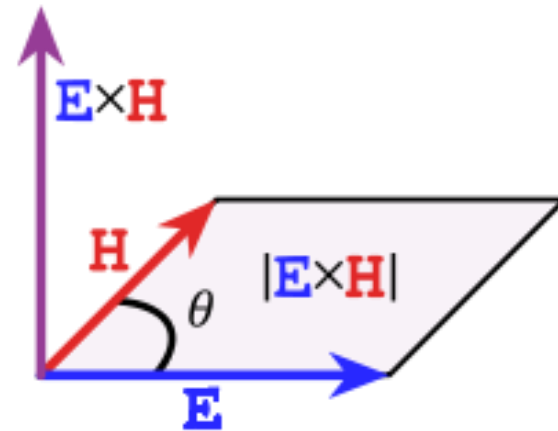
$$U^2 + W^2 = r_{core}^2 (k^2 n_1^2 - \beta^2 + \beta^2 - k^2 n_2^2) = r_{core}^2 k^2 (n_1^2 - n_2^2) = V^2$$

Энергетические параметры направляемых мод оптического волокна

Вектор Умова-Пойнтинга:

$$\mathbf{S} = [\mathbf{E} \times \mathbf{H}]$$

$$\bar{\mathbf{S}} = \frac{1}{2} [\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*]$$



Интенсивность излучения распространяющейся
электромагнитной волны:

$$I = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} E H^*$$

$$I = \frac{|E_{max}|^2}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} R^2(r)$$

Энергетические параметры направляемых мод оптического волокна

Интенсивность излучения распространяющейся электромагнитной волны:

$$I_{lm} = \frac{|E_{max(lm)}|^2}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_1 R_{lm}^2(r)$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$$

$$\mu_0 = 1.257 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$$

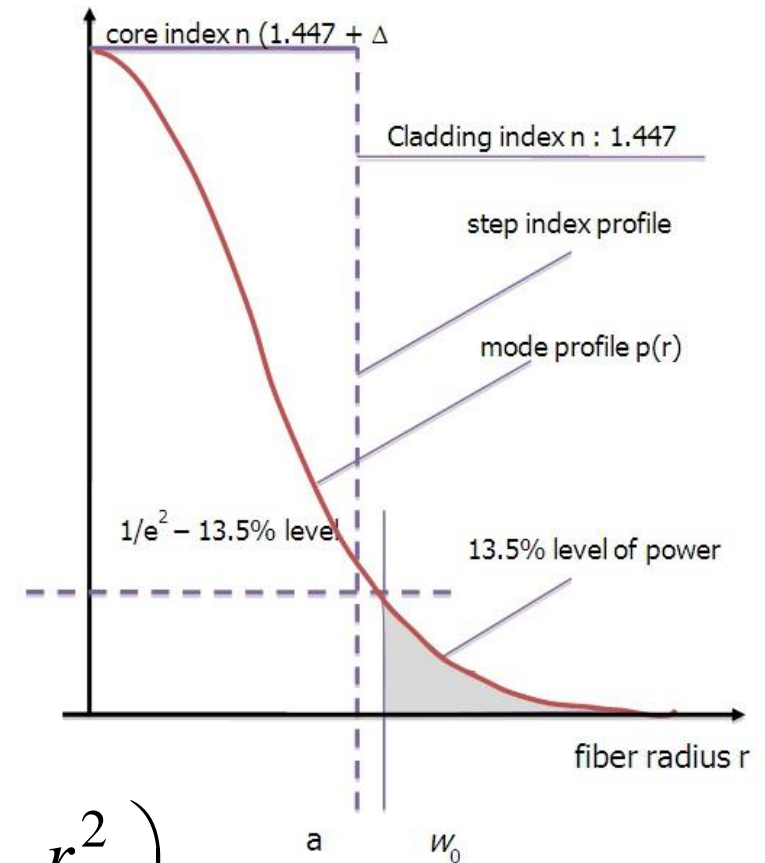
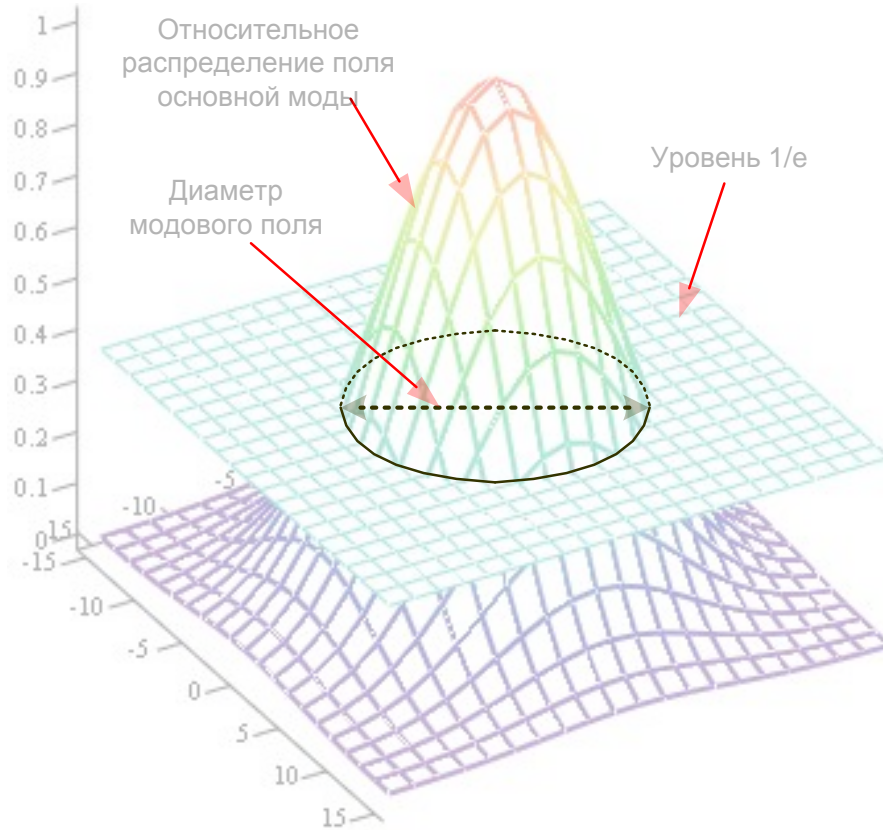
Радиус поля (пятна) фундаментальной моды оптического волокна

Для одномодовых волокон вместо диаметра сердцевинны и числовой апертуры нормируется радиус поля моды – области поперечного сечения, в которой сосредоточена основная часть энергии:

$$w = \sqrt{2 \frac{\int_0^{\infty} R_{01}^2(r) r dr}{\int_0^{\infty} \left(\frac{dR_{01}(r)}{dr} \right)^2 r dr}} \quad A_{eff} = \pi w^2 = \frac{\left(\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |E_z(x, y)|^2 dx dy \right)^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |E_z(x, y)|^4 dx dy}$$

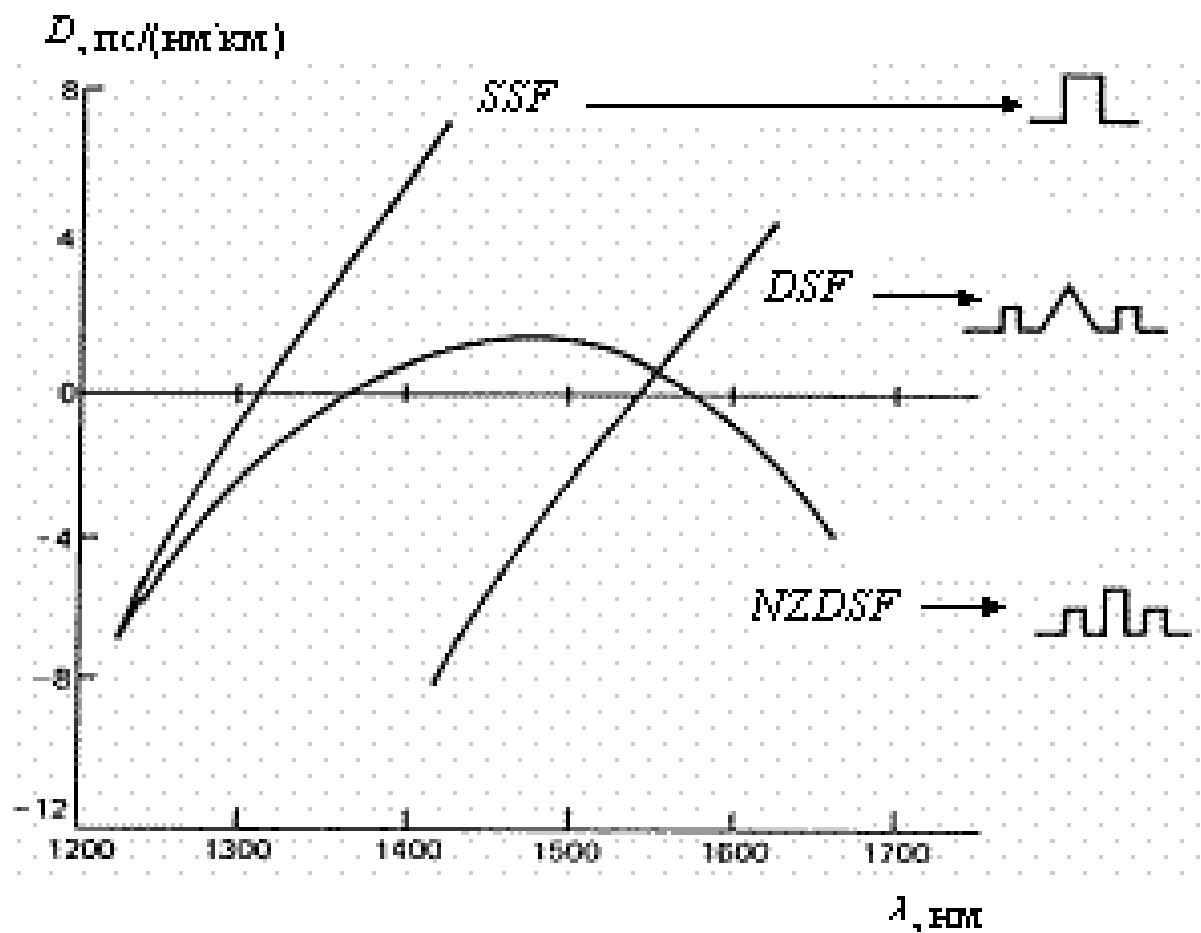
$$w \approx r_{core} \left(0.65 + 1.619 \cdot V^{-3/2} + 2.879 \cdot V^{-6} \right)$$

Радиус поля (пятна) фундаментальной моды оптического волокна



$$R_{01}(r) \approx \exp\left(-\frac{r^2}{w^2}\right)$$

Влияние профиля показателя преломления на положение нулевой дисперсии



Типы защитных покрытий оптических волокон

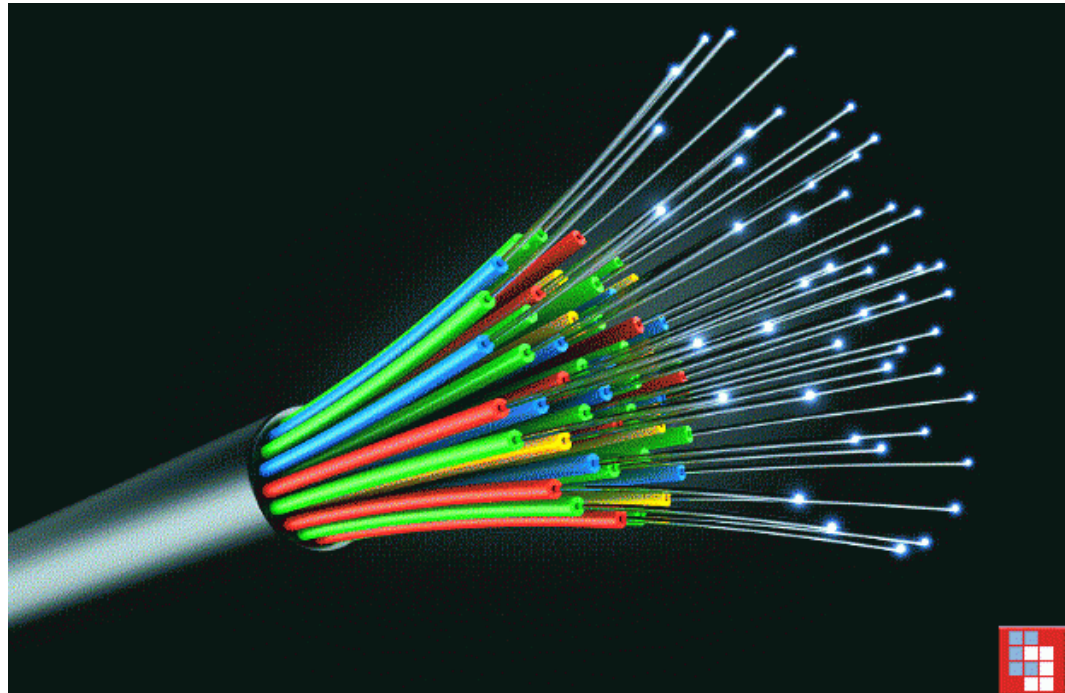
1. Полимеры

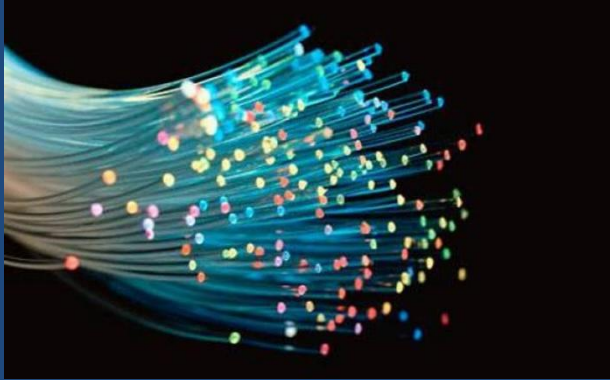
- эпоксиакрилат
- уретанакрилат

2. Металлы

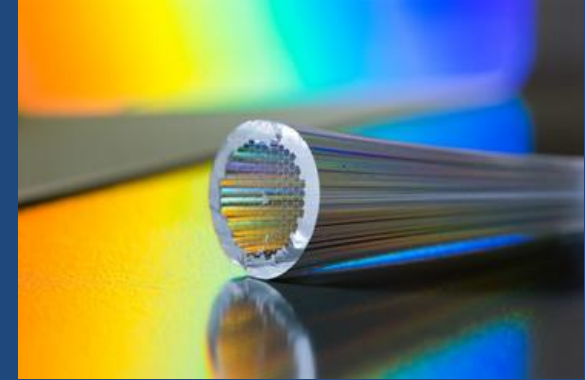
- олово
- алюминий
- медь
- золото и др.

3. Углерод





Специальные оптические волокна и их применение



Демидов Владимир Витальевич

научный сотрудник

Научно-исследовательский и технологический институт
оптического материаловедения ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова»

Программа курса «Специальные оптические волокна и их применение»

Неделя	Название	Тип занятия
1	Общие сведения об оптических волокнах	3 лек.
2	Общие сведения об оптических волокнах	2 прак.
3	Ознакомление с процессами изготовления кварцевых оптических волокон	2 лаб.
4	Расчет параметров оптических волокон связного и специального применения	1 прак. 1 лаб.
6	Специальные оптические волокна для сетей и систем связи	1 прак. 1 лек.
7	Оптические волокна, легированные редкоземельными элементами	1 прак. 1 лек.
8	Оптические волокна с сохранением поляризации; светочувствительные волокна	1 лаб. 1 лек.
9	Микроструктурированные и фотонно-кристаллические оптические волокна	1 прак. 1 лек.

Отчетность по курсу «Специальные оптические волокна и их применение»

Экзамен !!!

(два вопроса по курсу + задача)

Допуск к экзамену – посещение $\frac{3}{4}$ лекционных занятий + посещение $\frac{3}{4}$ практических занятий + зачтение $\frac{3}{4}$ лаб. работ + сданные тесты

Экзамен «автоматом» – посещение $\frac{3}{4}$ лекционных занятий + посещение $\frac{3}{4}$ практических занятий + все зачтенные лаб. работы + положительный балл за тест + активность на практических занятиях

Литература по курсу «Специальные оптические волокна и их применение»

1. Мидвинтер Дж.Э. Волоконные световоды для передачи информации: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1983. – 336 с.
2. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.
3. Мендес А., Морзе Т.Ф. Справочник по специализированным оптическим волокнам: Пер. с англ. – М.: Техносфера, 2012. – 728 с.
4. Никоноров Н.В., Сидоров А.И. Материалы и технологии волоконной оптики: специальные оптические волокна: учеб. пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 130 с.
5. Шумкова Д.В., Левченко А.Е. Специальные волоконные световоды: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 178 с.
6. Шандаров В.М. Волоконно-оптические устройства технологического назначения: учеб. пособие. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 198 с.

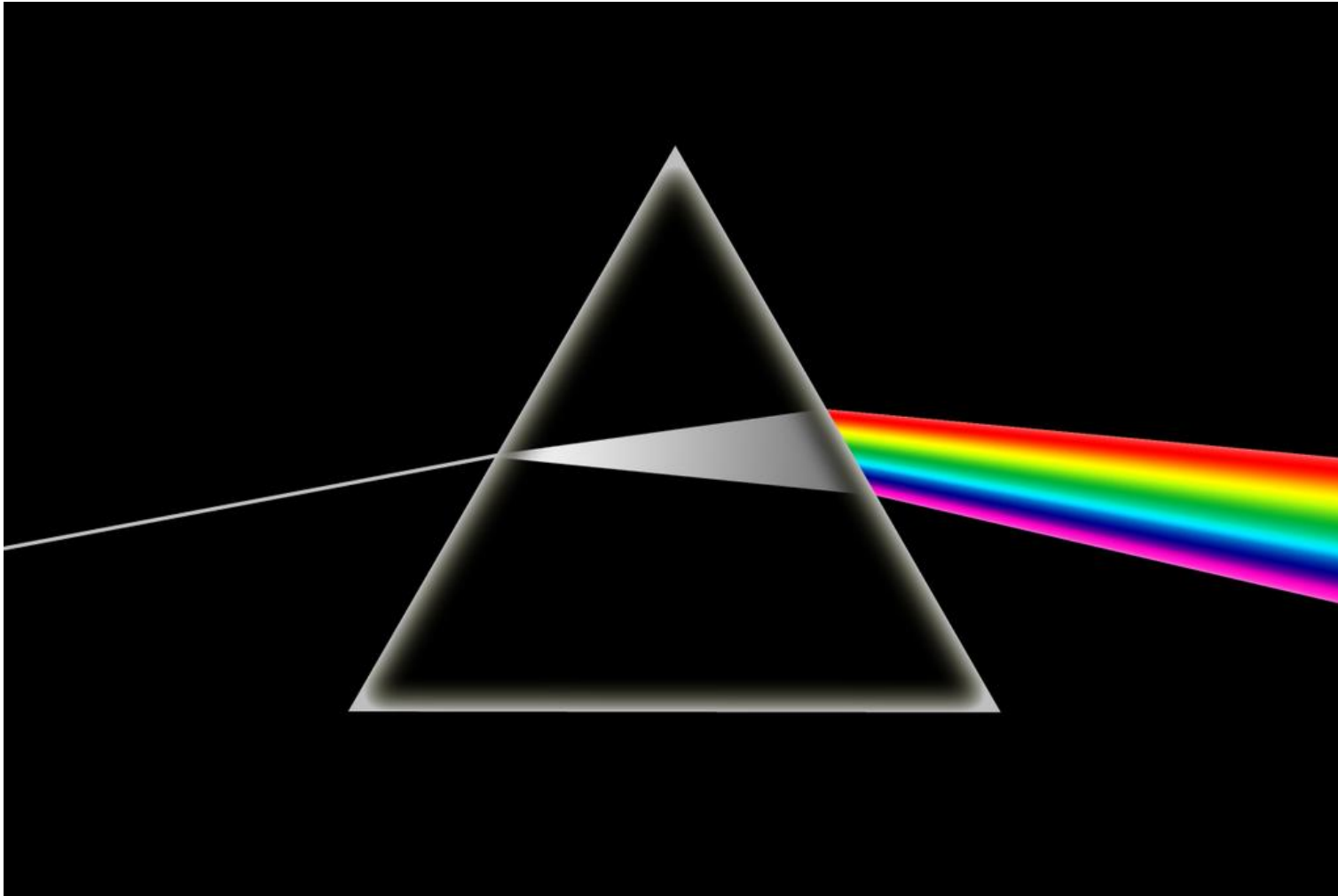
Явление дисперсии света

Дисперсия – совокупность явлений, обусловленных зависимостью абсолютного показателя преломления вещества от частоты (длины волны) света, или, то же самое, зависимостью фазовой скорости света в данном веществе от частоты (длины волны) [Wikipedia]

$$n(\nu) \quad \longrightarrow \quad n(\lambda)$$

$$v_{\phi}(\nu) \quad \longrightarrow \quad v_{\phi}(\lambda)$$

Явление дисперсии света (опыт И. Ньютона, 1666 г.)



Нормальная и аномальная дисперсия света

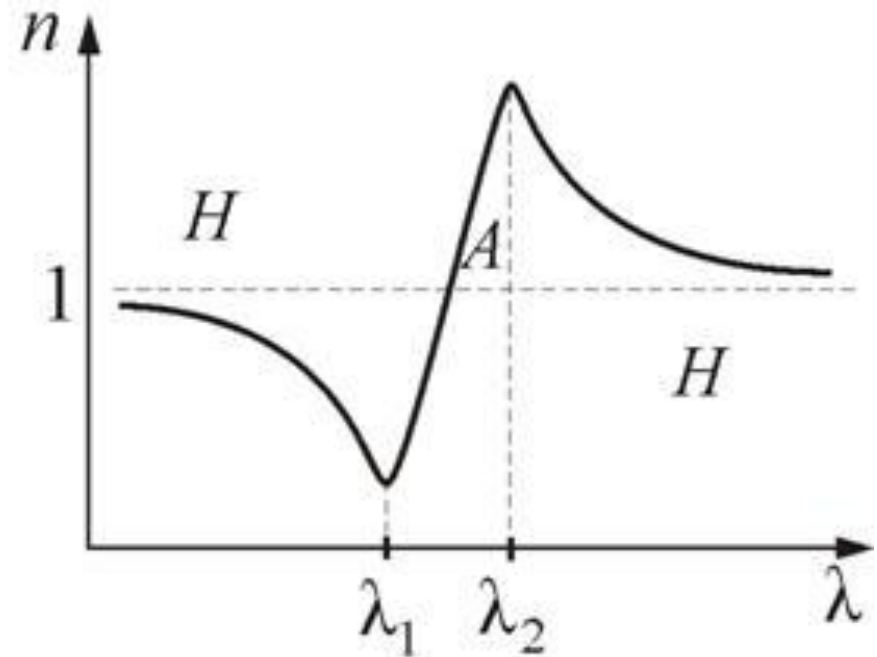
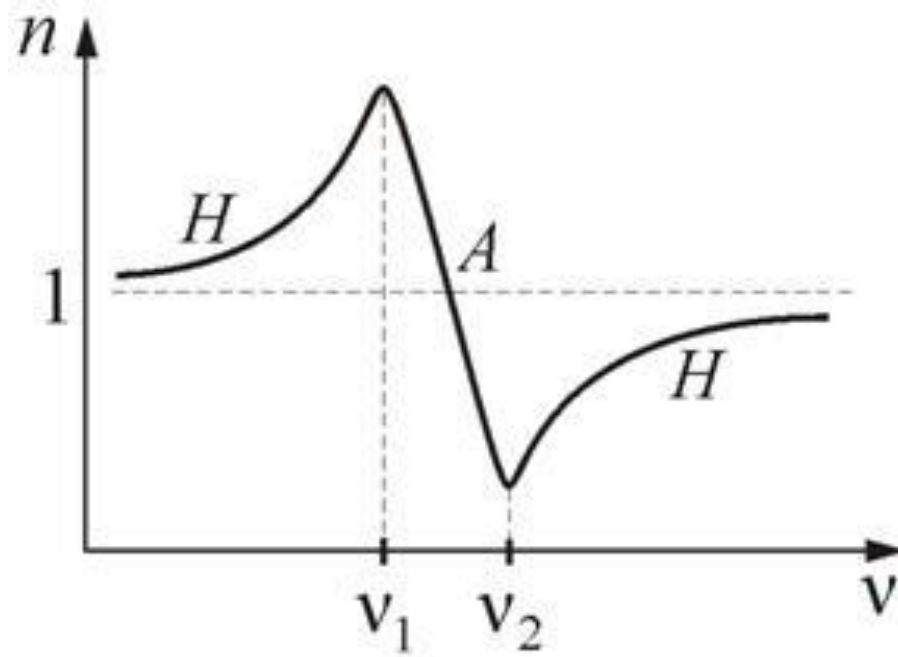
Нормальная дисперсия (с ростом частоты показатель преломления увеличивается); пример – стекло в видимой области спектра

$$\frac{dn}{d\nu} > 0 \left(\frac{dn}{d\lambda} < 0 \right)$$

Аномальная дисперсия (с ростом частоты показатель преломления уменьшается); пример – стекло в УФ и ИК областях спектра, где наблюдается поглощение света

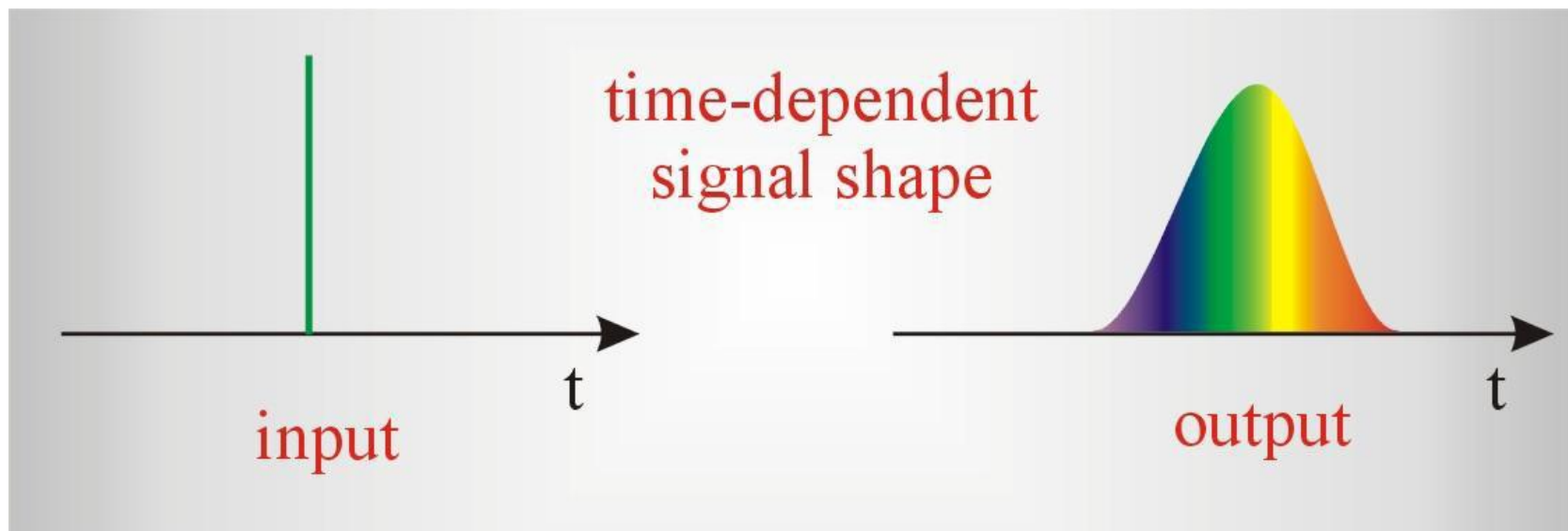
$$\frac{dn}{d\nu} < 0 \left(\frac{dn}{d\lambda} > 0 \right)$$

Нормальная и аномальная дисперсия света



Дисперсия света в оптическом волокне, выполненном на основе кварцевого стекла

Различные компоненты передаваемого по световоду оптического сигнала распространяются с различными скоростями → происходит уширение исходного сигнала во времени



Дисперсия света в оптическом волокне, выполненном на основе кварцевого стекла

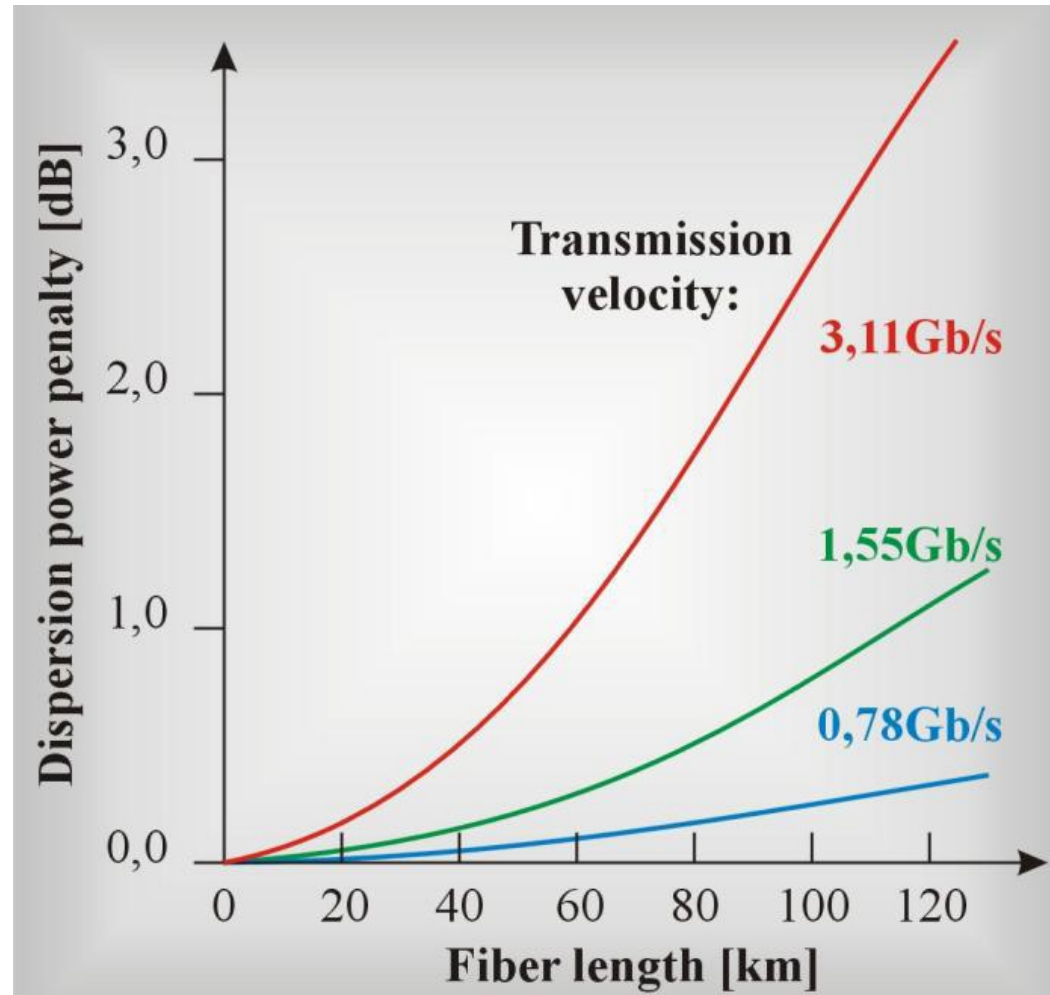
1. Хроматическая дисперсия

- материальная
- волноводная
- поляризационная

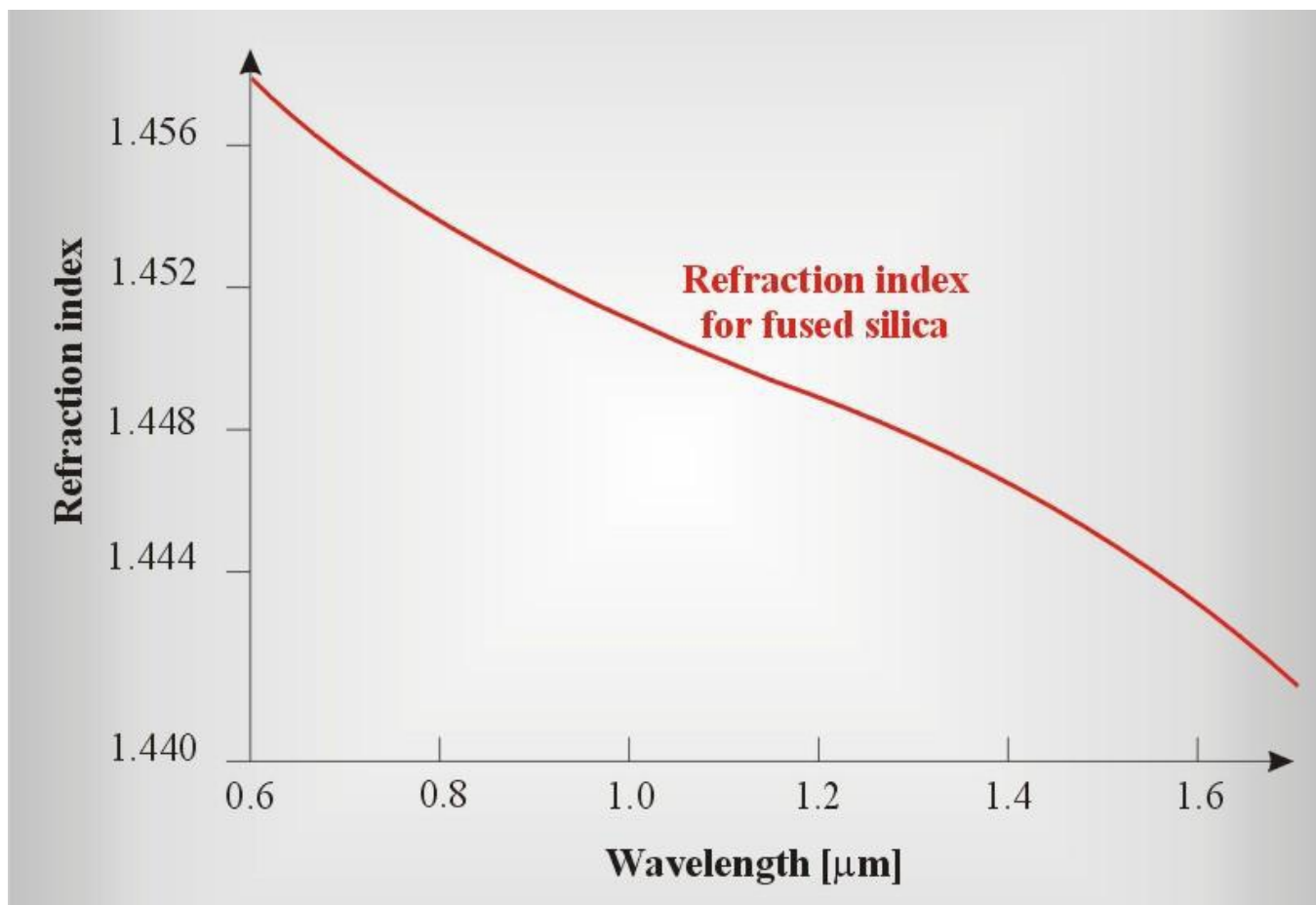
2. Межмодовая дисперсия

В кварцевом оптическом волокне всегда существуют две составляющие дисперсии: материальная и волноводная

Дисперсия света в одномодовом оптическом волокне в области третьего окна прозрачности



Материальная составляющая хроматической дисперсии в оптическом волокне



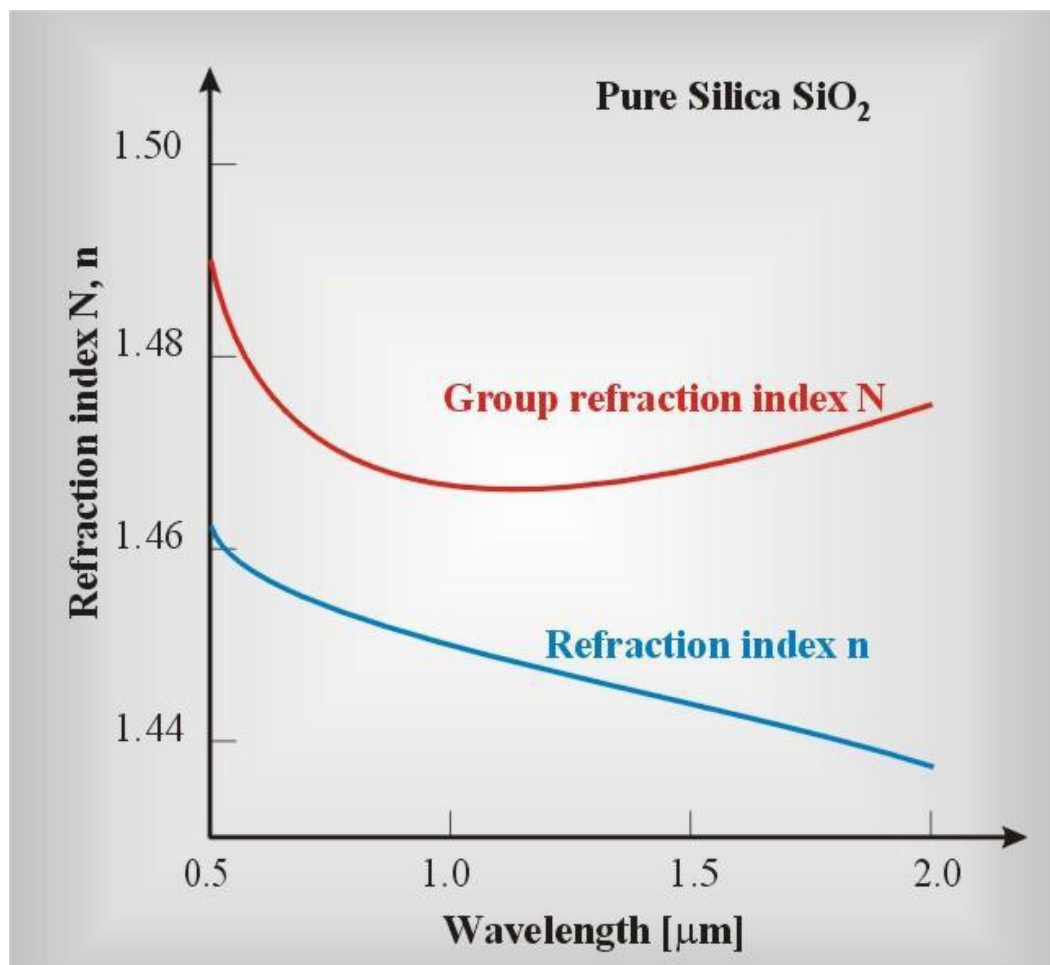
Материальная составляющая хроматической дисперсии в оптическом волокне

Излучение коротких длин волн распространяется в среде с большим показателем преломления относительно длинноволнового излучения, поэтому на различных длинах волн оптический сигнал передается с различной скоростью

Существенное значение имеет ширина спектральной линии излучения $\Delta\lambda$ источника:

- многомодовый лазер Фабри-Перо $\Delta\lambda \sim 2$ нм
- одномодовый лазер Фабри-Перо $\Delta\lambda \sim 0.1$ нм
- одномодовый РБО-лазер $\Delta\lambda \sim 0.05$ нм

Материальная составляющая хроматической дисперсии в оптическом волокне



Материальная составляющая хроматической дисперсии в оптическом волокне

Связь «обычного» и группового показателей преломления обеспечивается выражением

$$n_g = N = n(\lambda) - \lambda \frac{dn}{d\lambda}$$

$$v_{ph} = \frac{c}{n} = \frac{\omega}{k} \quad v_g = \frac{d\omega}{d\beta} \quad \tau_g = \frac{1}{v_g} = \frac{d\beta}{d\omega}$$

Материальная составляющая хроматической дисперсии в оптическом волокне

$$D_M = \frac{d\tau_g}{d\lambda} \quad [\text{пс/нм/км}]$$

Коэффициент D_M определяет уширение импульса в пикосекундах после прохождения сигналом 1 км оптического волокна при ширине спектральной линии источника излучения $\Delta\lambda = 1$ нм

Материальная составляющая хроматической дисперсии в оптическом волокне

$$\tau_{\text{gg}} = \frac{1}{v_{\text{gg}}} = \frac{n_{\text{gg}}}{c} = \frac{n(\lambda) - \lambda \frac{dn}{d\lambda}}{c}$$

$$D_{\text{M}} = \frac{1}{c} \frac{dn_{\text{gg}}}{d\lambda}$$

Материальная составляющая хроматической дисперсии в оптическом волокне

Длина волны нулевой дисперсии λ_0 [нм] является длиной волны излучения, при которой хроматическая дисперсия обращается в нуль

$$D = 0 \quad \longrightarrow \quad \frac{dn_g}{d\lambda} = 0$$

Это происходит в случае, когда зависимость $n_g(\lambda)$ имеет экстремум

Материальная составляющая хроматической дисперсии в оптическом волокне

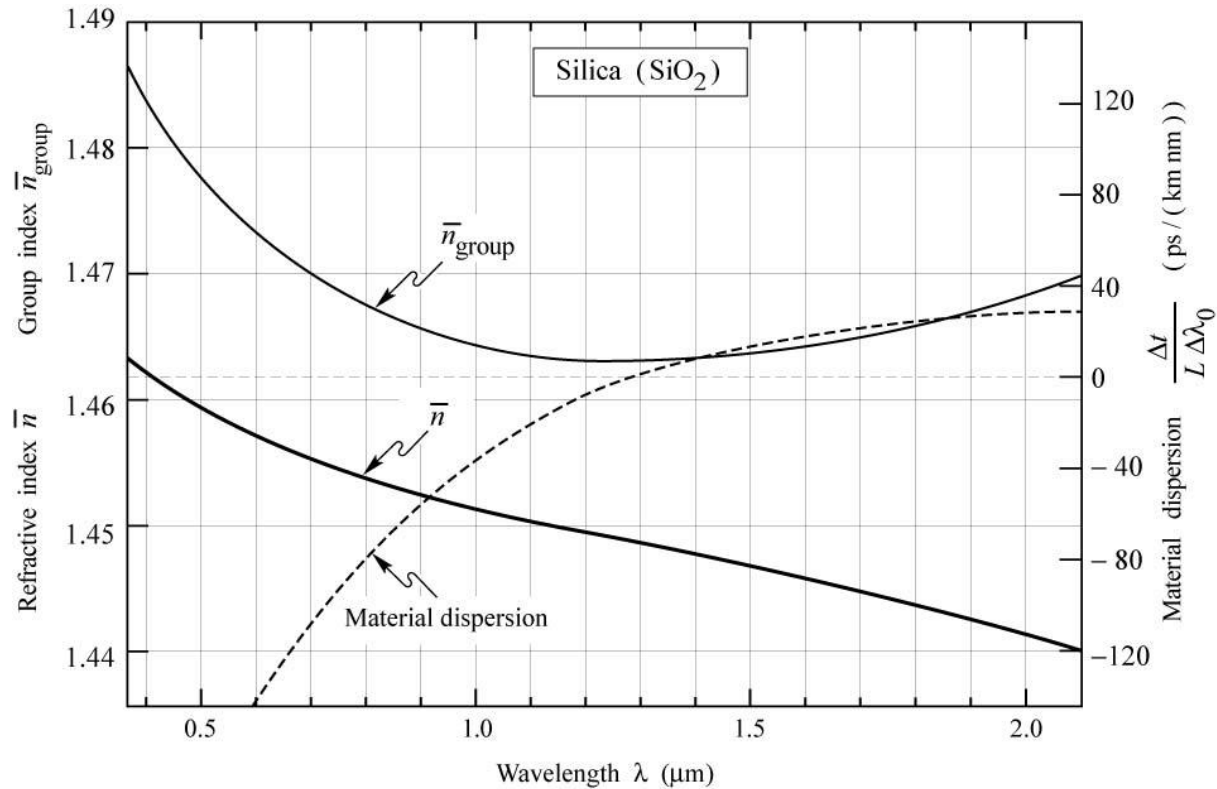


Fig. 22.5. Refractive index, group index, and material dispersion of a silica fibers for an optical signal spectral width $\Delta\lambda_0$ in vacuum. The material dispersion of regular silica fibers is zero at $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$.

Волноводная составляющая хроматической дисперсии в оптическом волокне

Волноводный характер дисперсии обусловлен тем, что оптический сигнал распространяется частично в сердцевине и частично в оболочке, которые имеют различные показатели преломления

$$n_2 < n_{\text{eff}} < n_1$$

$$v_2 > v_{\text{eff}} < v_1$$

При уменьшении V -параметра электрическое поле моды в большей степени проникает в оболочку, что приводит к изменению волноводной составляющей дисперсии

Волноводная составляющая хроматической дисперсии в оптическом волокне

В общем виде волноводный характер дисперсии определяется зависимостью

$$n_{\text{eff}}(V)$$

В световоде со сложным распределением профиля показателя преломления можно изменять форму зависимости дисперсии от частоты (длины волны)

Волноводная составляющая хроматической дисперсии в оптическом волокне

$$\beta(\omega) = n(\omega) \frac{\omega}{c} = \beta_0 + \beta_1 (\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \beta_2 (\omega - \omega_0)^2 + \dots$$

$$\beta_m = \left[\frac{d^m \beta}{d\omega^m} \right]_{\omega=\omega_0}$$

$$\beta_1 = \frac{1}{c} \left(n + \omega \frac{dn}{d\omega} \right) = \frac{n_g}{c} = \frac{1}{v_g}$$

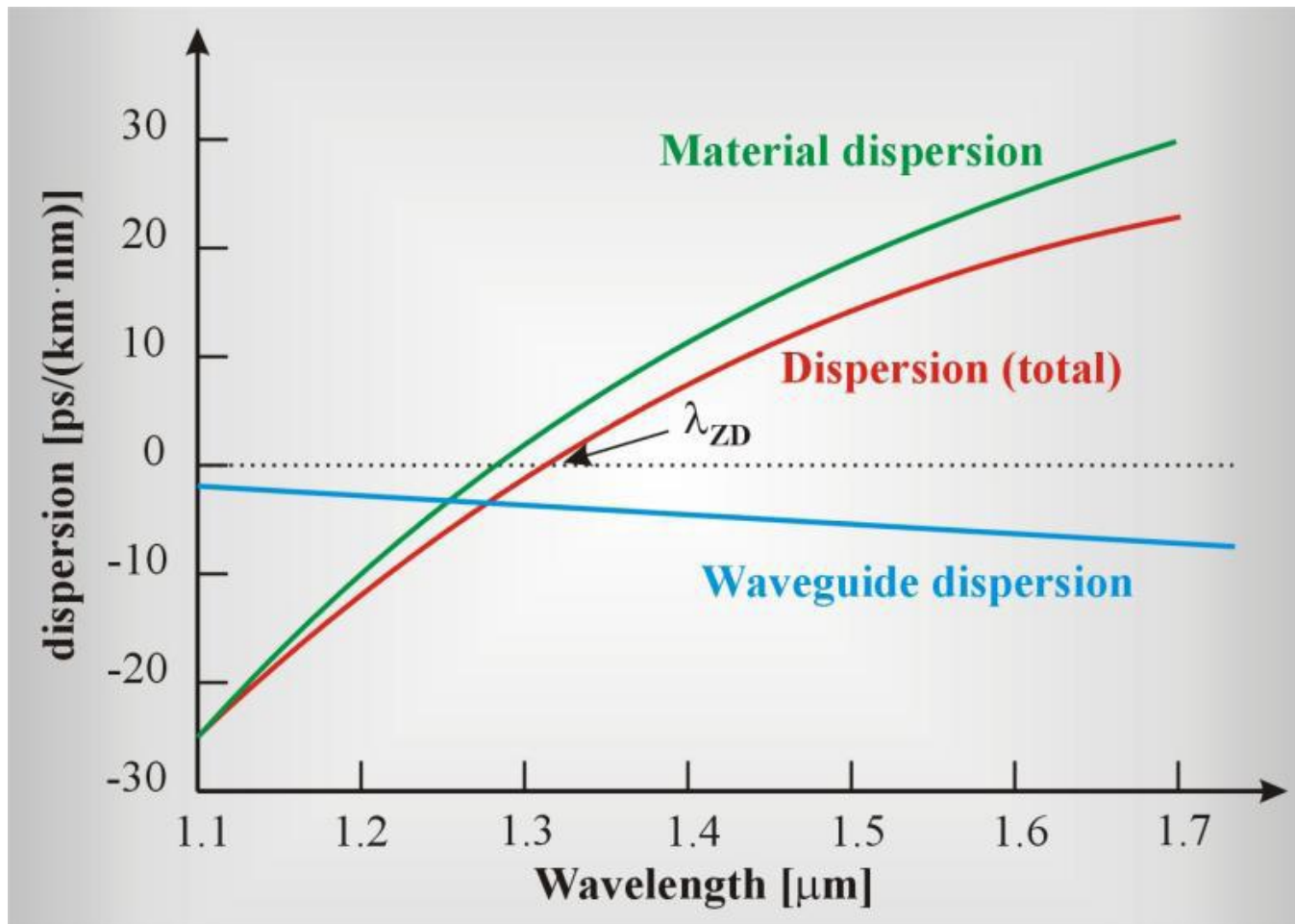
$$\beta_2 = \frac{1}{c} \left(2 \frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{d^2 n}{d\omega^2} \right) \approx \frac{\omega}{c} \frac{d^2 n}{d\omega^2} \approx \frac{\lambda^3}{2c^2 \pi} \frac{d^2 n}{d\lambda^2}$$

Волноводная составляющая хроматической дисперсии в оптическом волокне

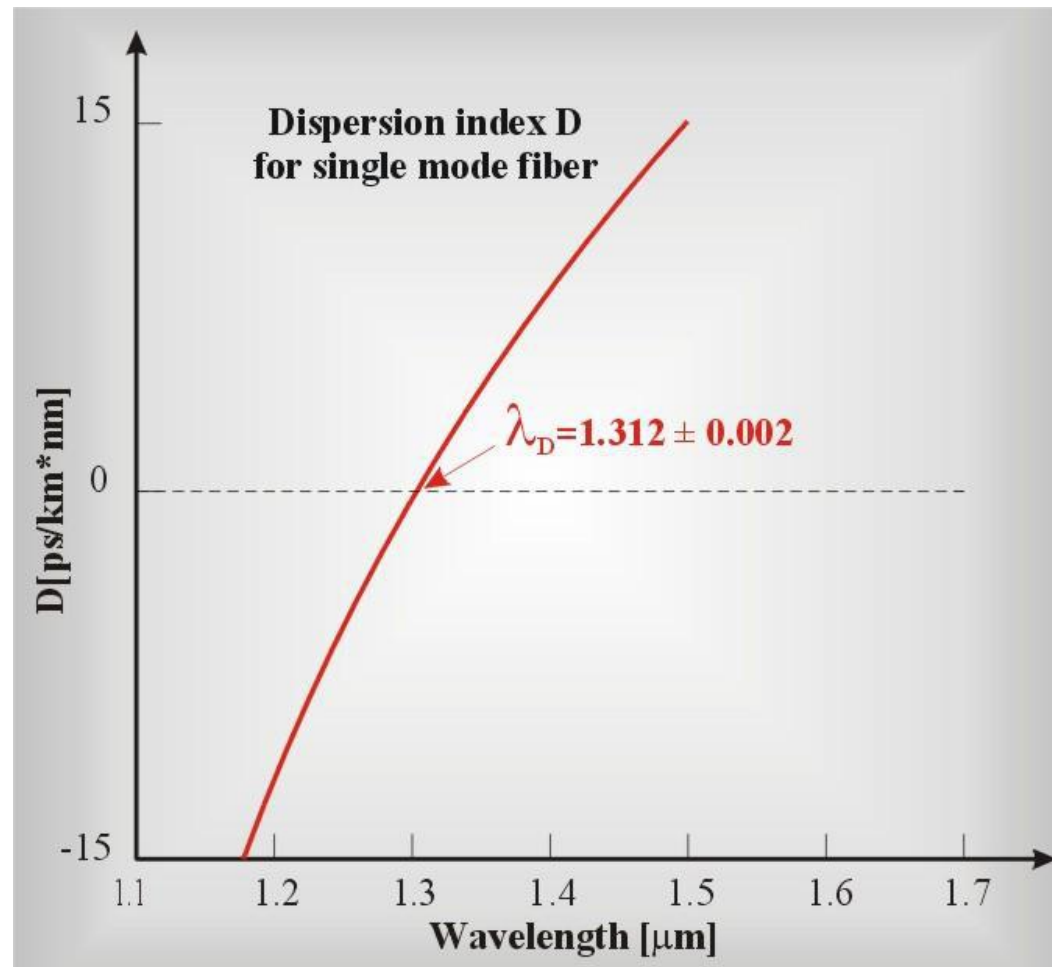
$$D_V = \frac{d\beta_1}{d\lambda} = -\frac{2\pi n}{\lambda^2} \beta_2 \approx -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2}$$

Вклад волноводной дисперсии в D (или β_2) зависит от параметров оптического волокна: радиуса сердцевины и разности показателей преломления сердцевины и оболочки

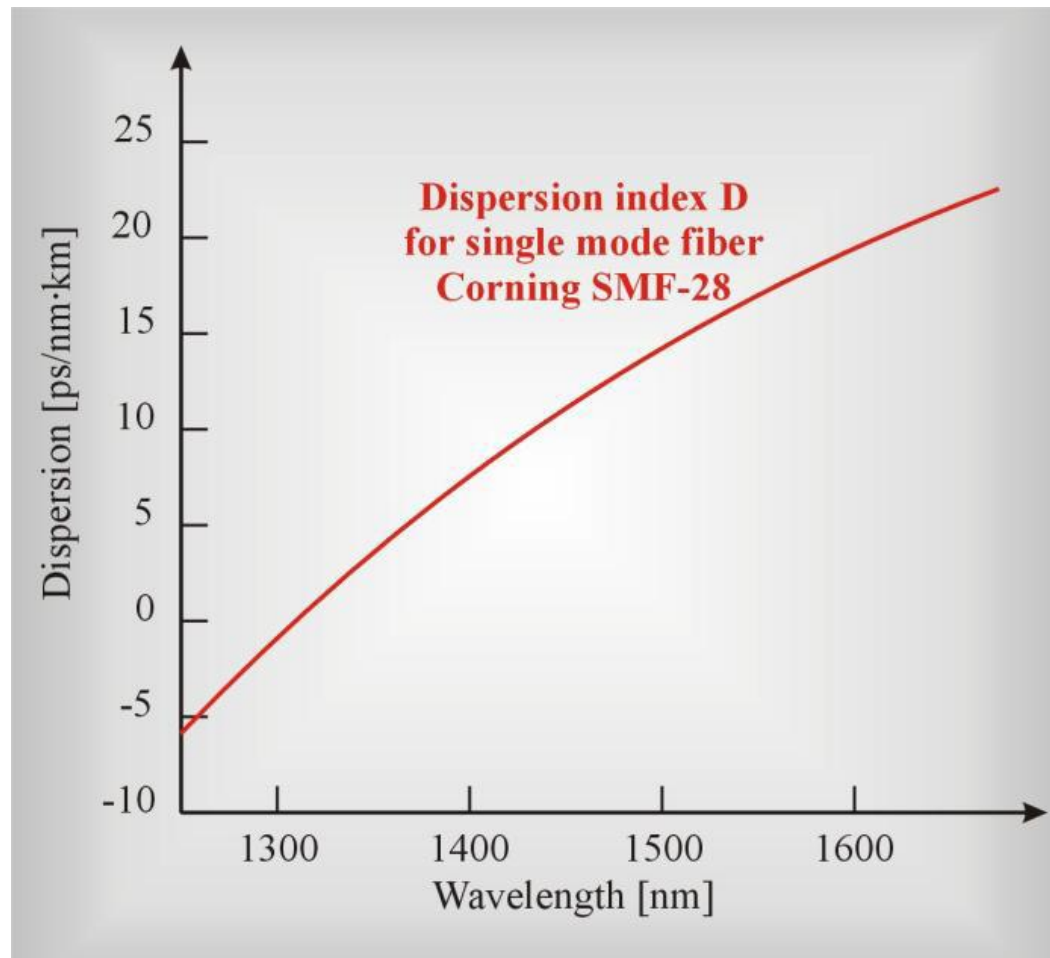
Хроматическая дисперсия в оптическом волокне, выполненном на основе кварцевого стекла



Хроматическая дисперсия в одномодовом световоде



Хроматическая дисперсия в одномодовом световоде

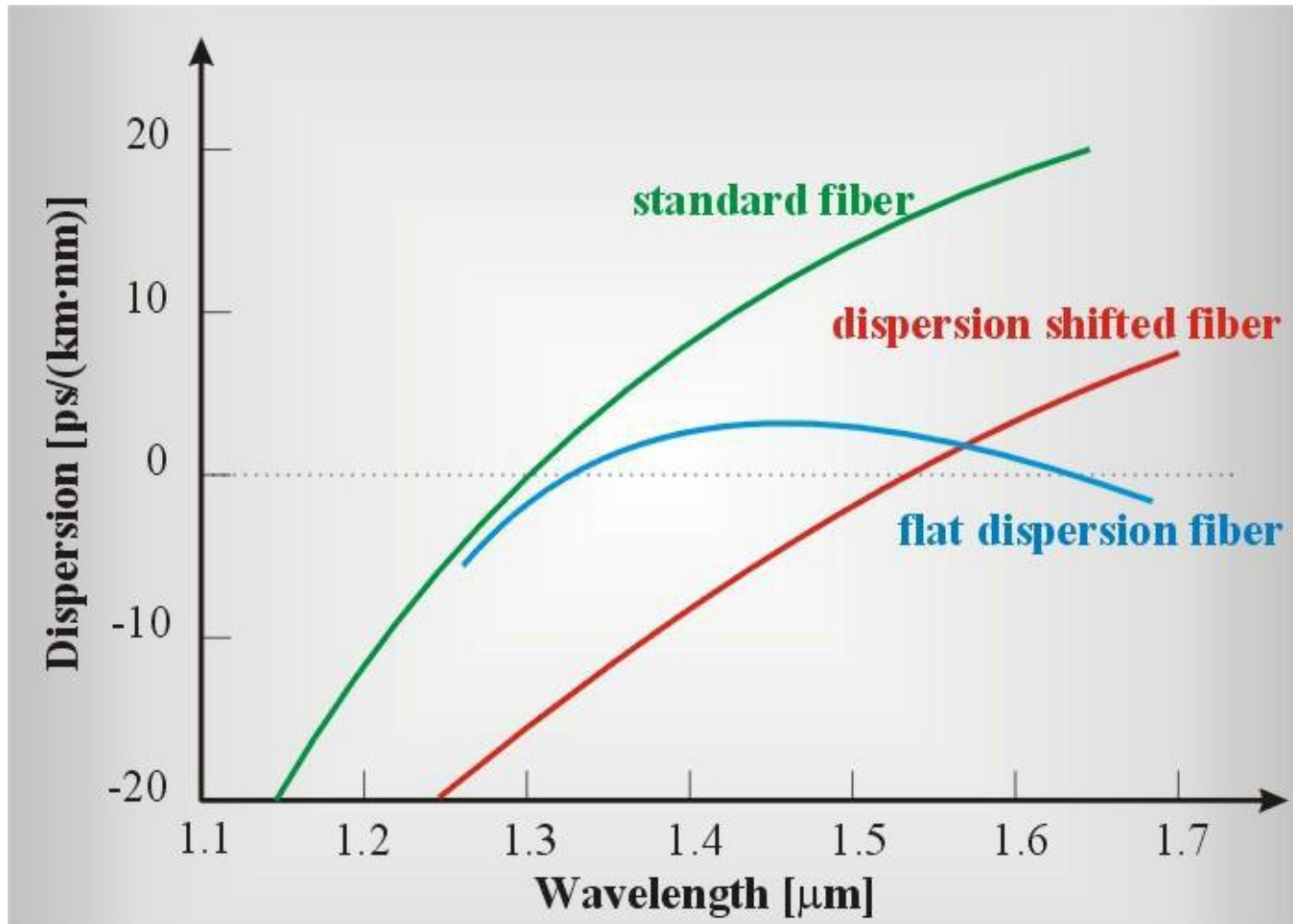


Управление хроматической дисперсией в оптическом волокне

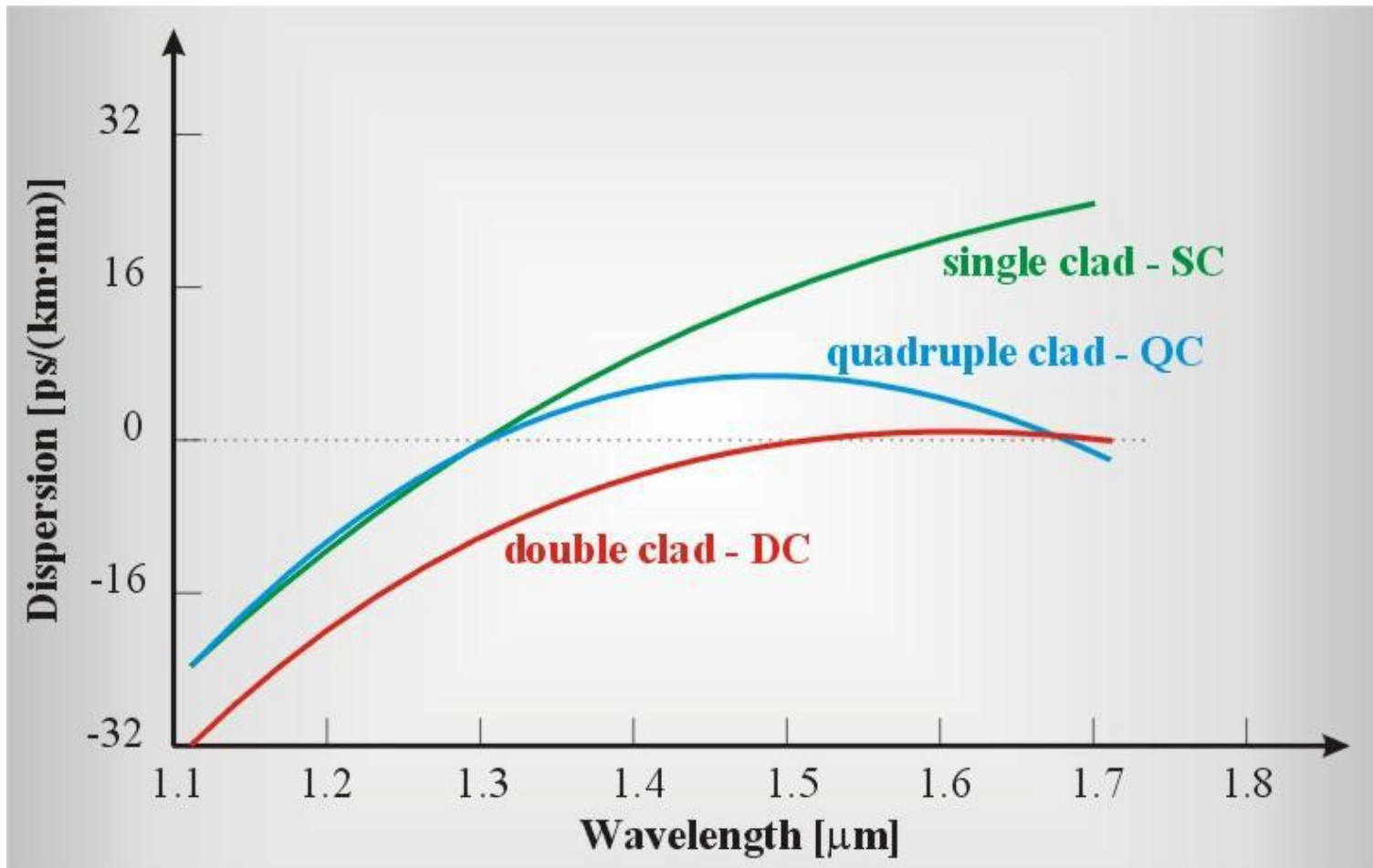
Изменить положение длины волны нулевой дисперсии λ_0 можно за счет:

1. легирования кварцевого стекла различными оксидами (например, GeO_2 или P_2O_5)
2. создания специального профиля показателя преломления
3. создания нескольких слоев оболочек

Управление хроматической дисперсией в оптическом волокне

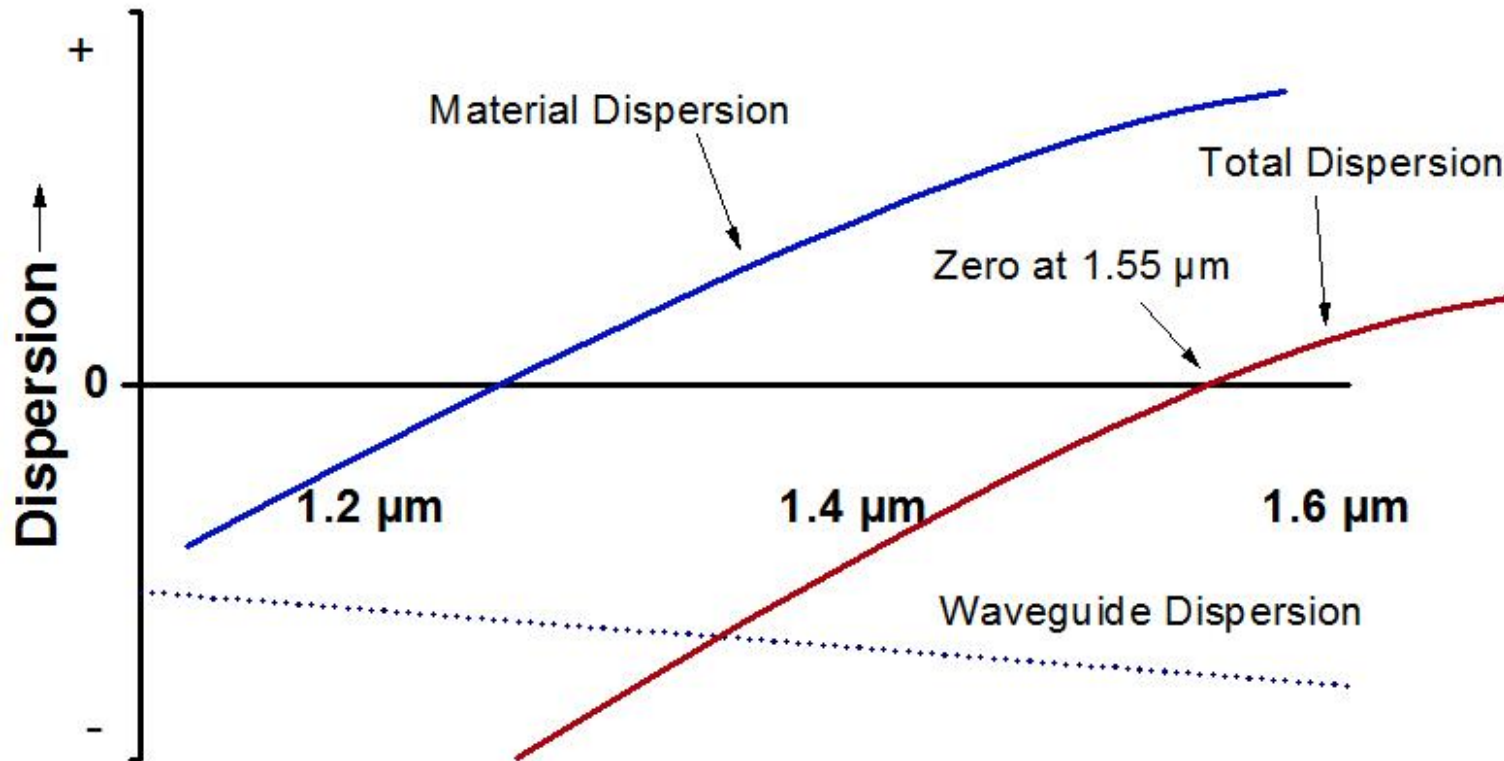


Управление хроматической дисперсией в оптическом волокне

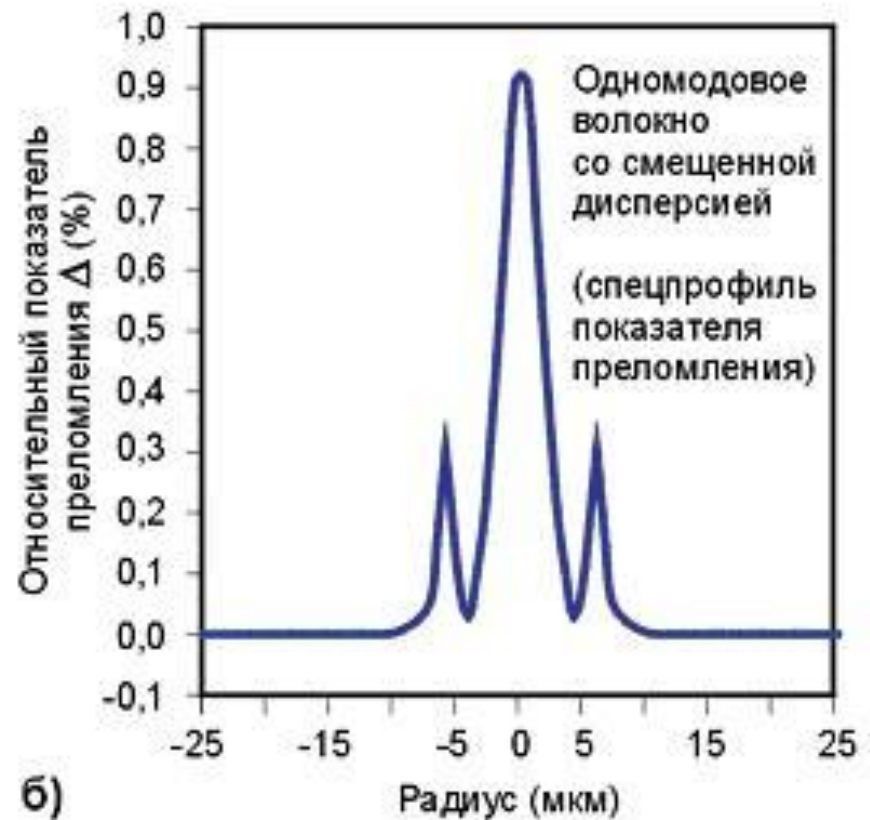
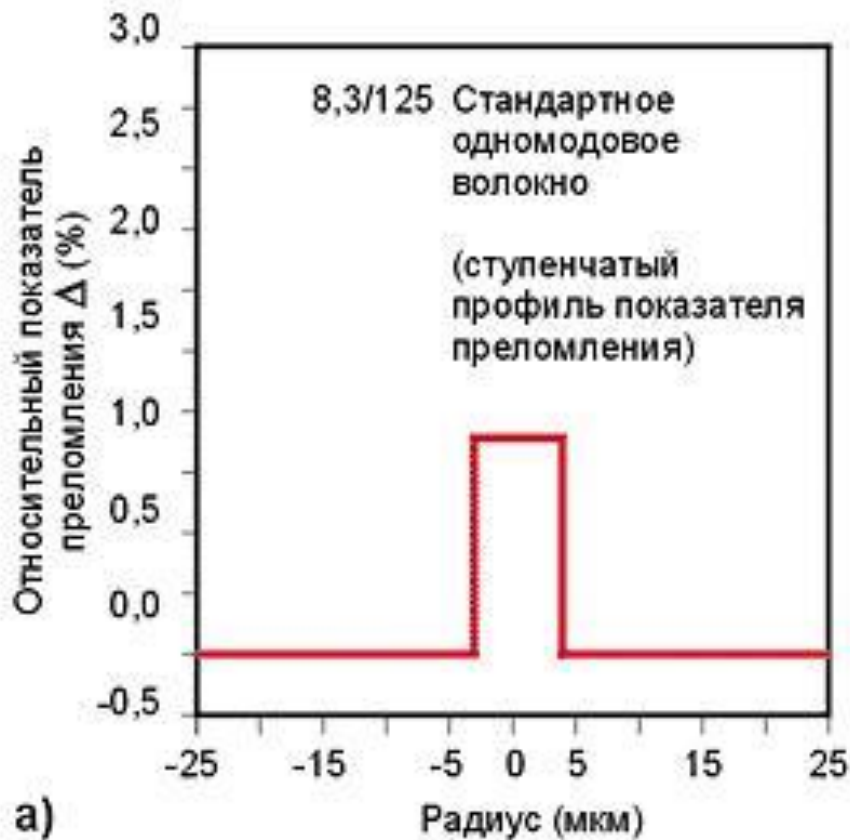


Одномодовое оптическое волокно со смещенной дисперсией

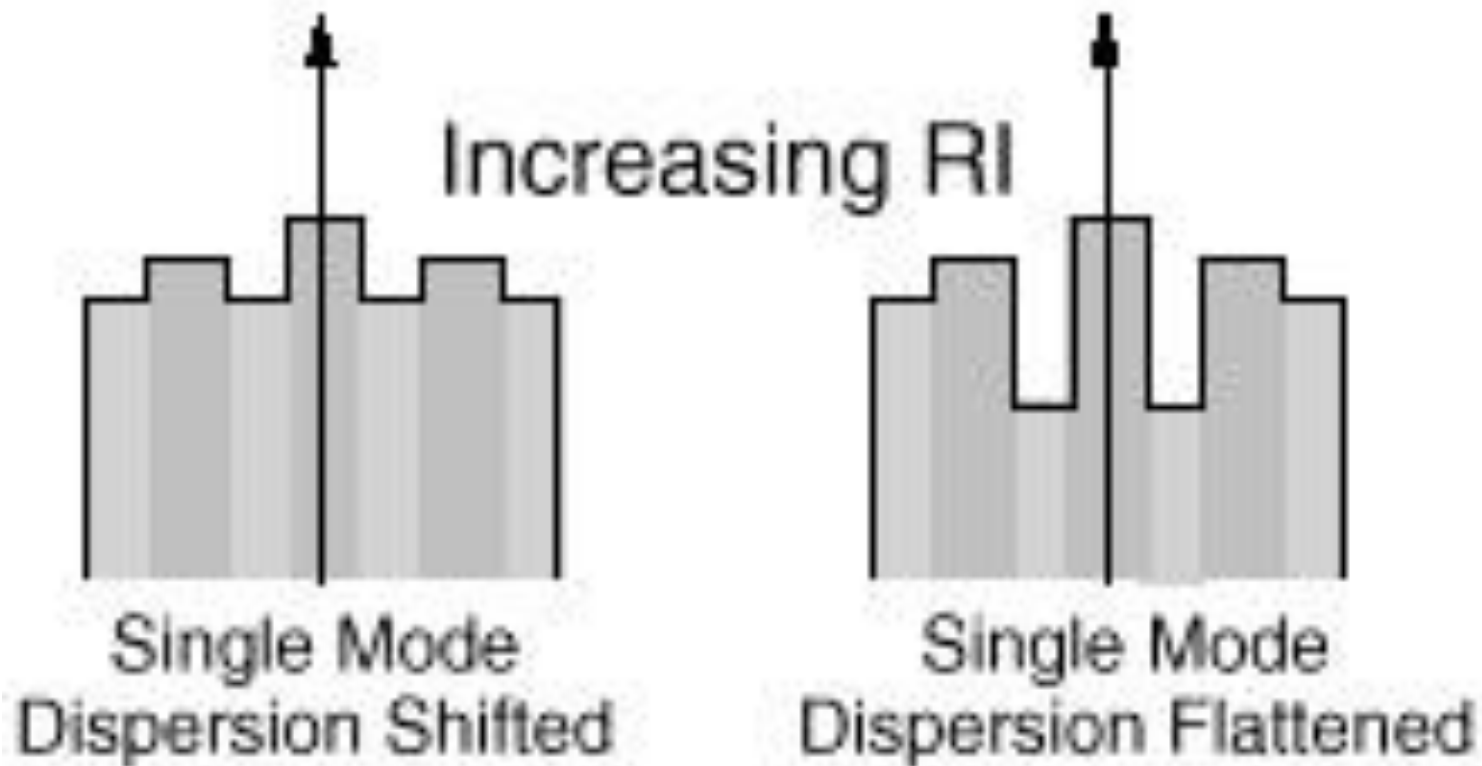
1.55 μm Zero Dispersion-Shifted Fiber



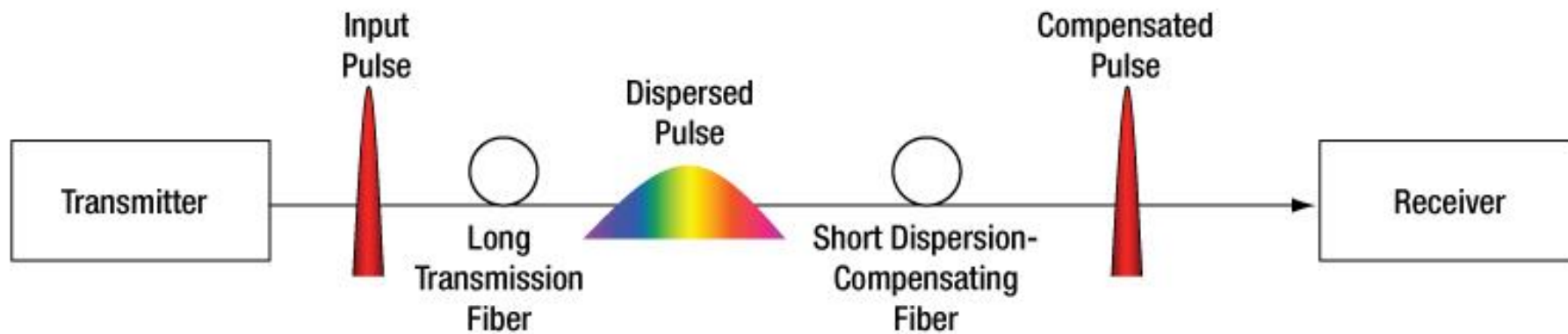
Одномодовое оптическое волокно со смещенной дисперсией



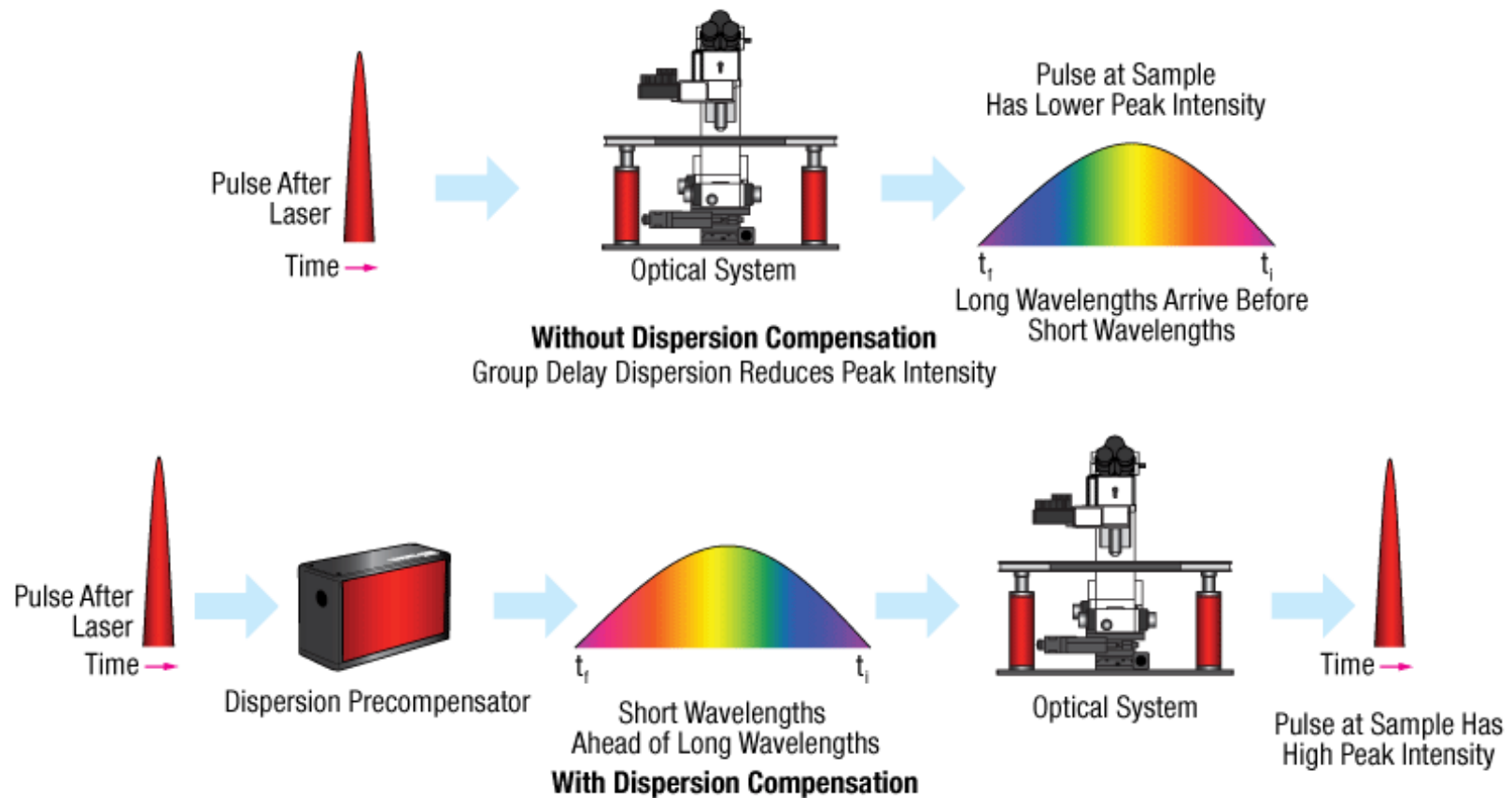
Одномодовое оптическое волокно с ненулевой смещенной дисперсией



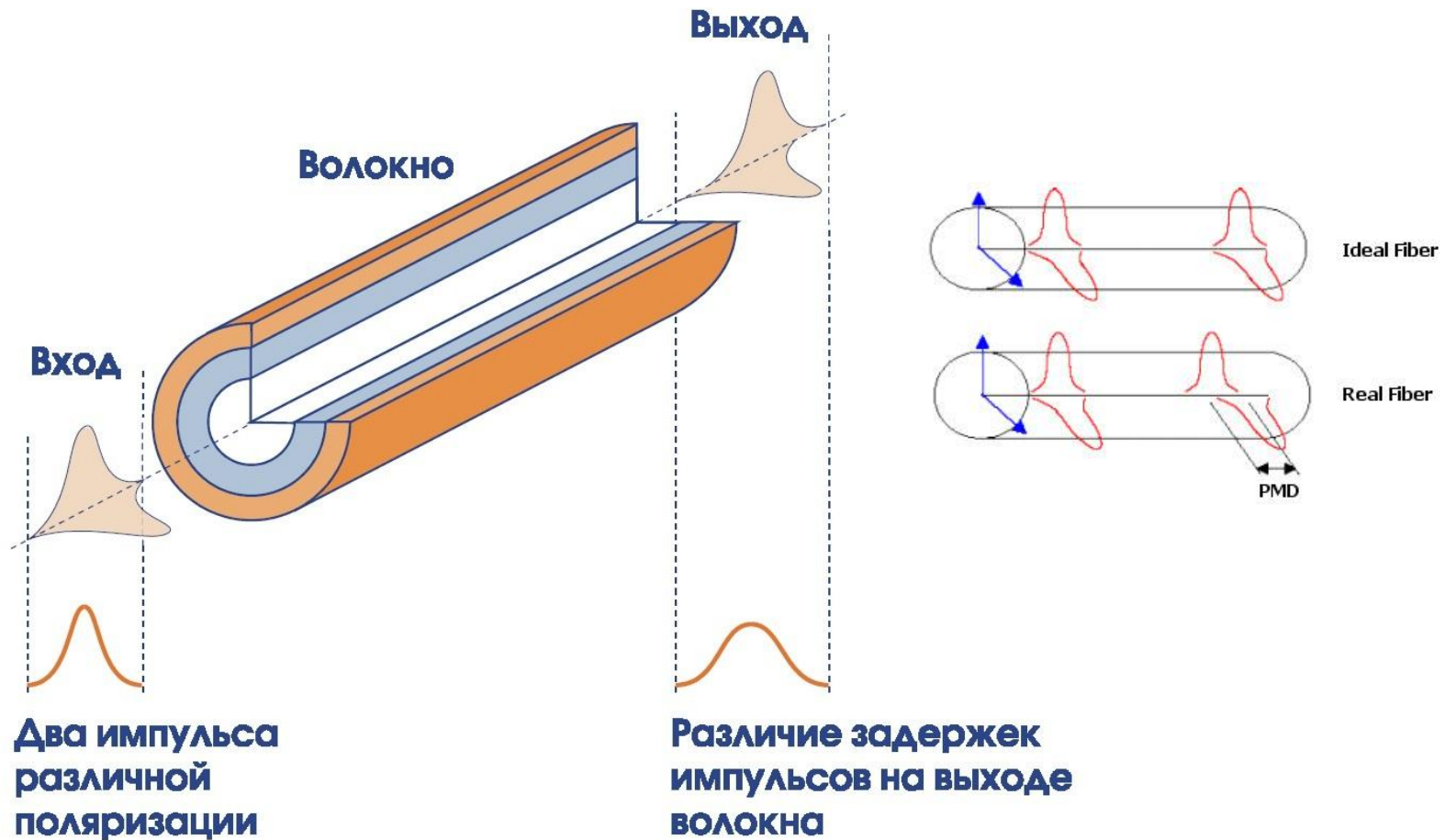
Компенсация дисперсии за счет применения специальных оптических волокон



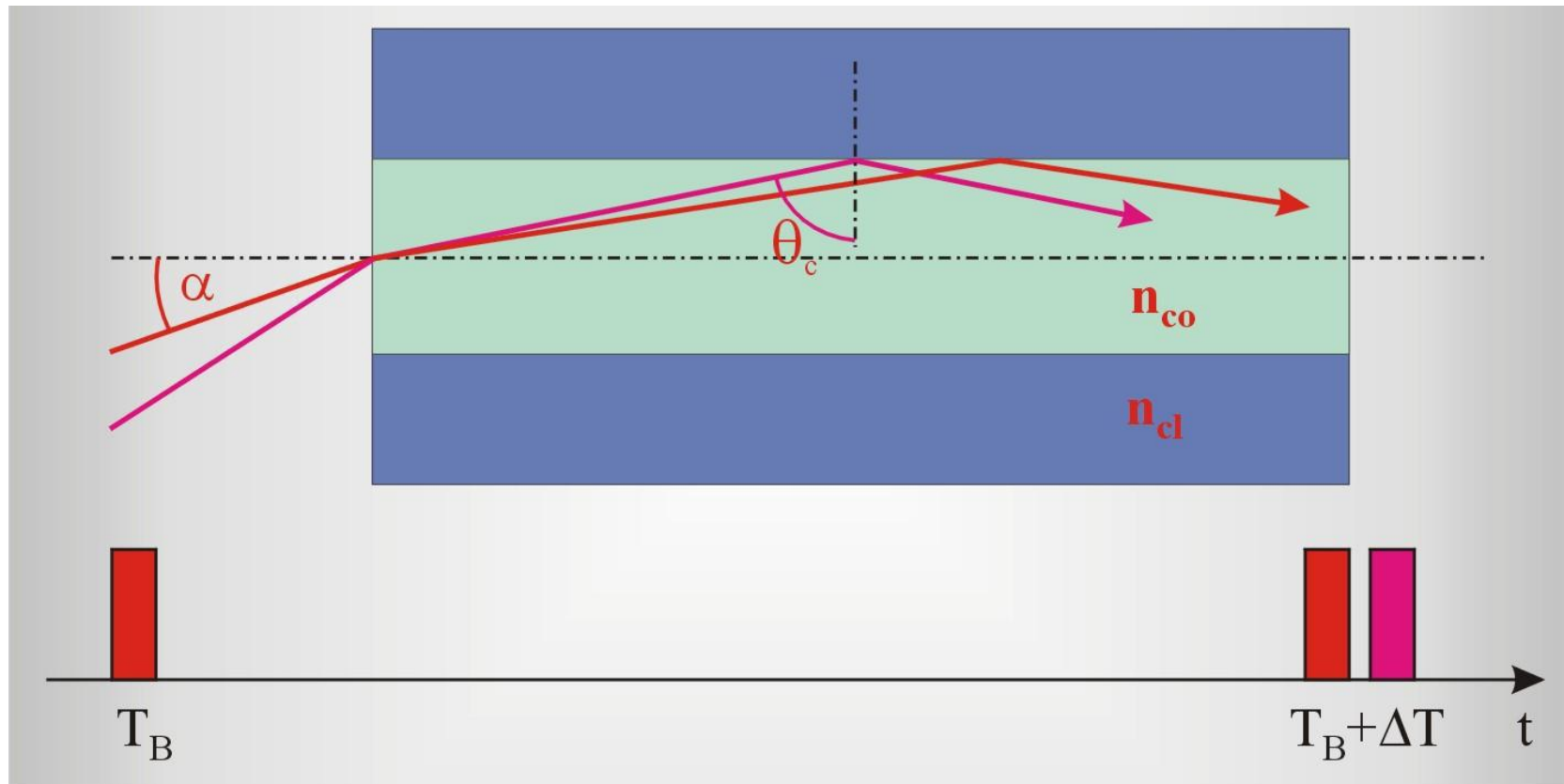
Компенсация дисперсии за счет применения специальных оптических волокон



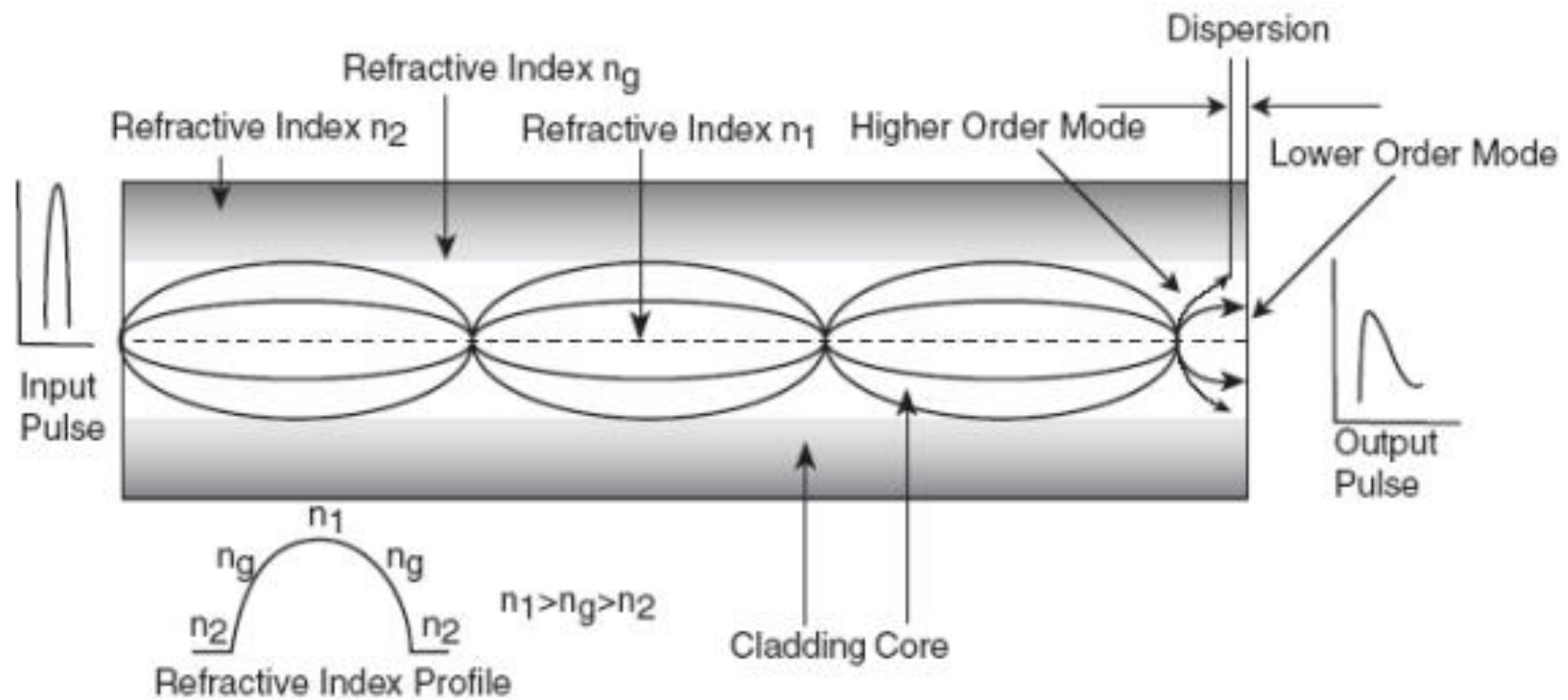
Поляризационная модовая дисперсия в одномодовом оптическом волокне

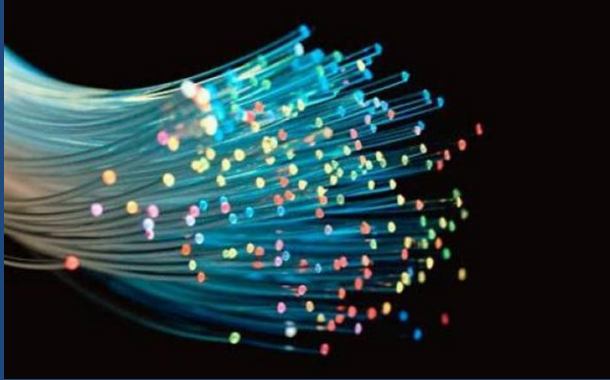


Межмодовая дисперсия в многомодовом оптическом волокне

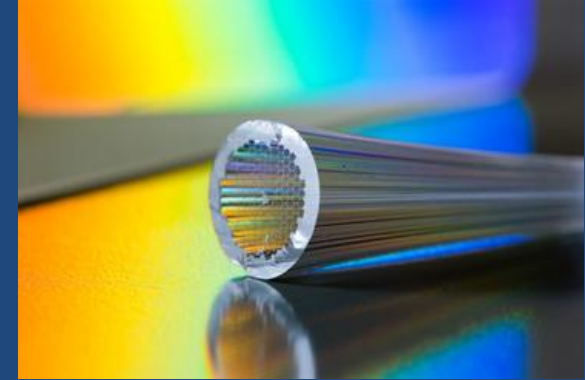


Межмодовая дисперсия в многомодовом ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ





Специальные оптические волокна и их применение



Демидов Владимир Витальевич

научный сотрудник

Научно-исследовательский и технологический институт
оптического материаловедения ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова»

Программа курса «Специальные оптические волокна и их применение»

Неделя	Название	Тип занятия
1	Общие сведения об оптических волокнах	3 лек.
2	Общие сведения об оптических волокнах	2 прак.
3	Ознакомление с процессами изготовления кварцевых оптических волокон	2 лаб.
4	Расчет параметров оптических волокон связного и специального применения	1 прак. 1 лаб.
6	Специальные оптические волокна для сетей и систем связи	1 прак. 1 лек.
7	Оптические волокна, легированные редкоземельными элементами	1 прак. 1 лек.
8	Оптические волокна с сохранением поляризации; светочувствительные волокна	1 лаб. 1 лек.
9	Микроструктурированные и фотонно-кристаллические оптические волокна	1 прак. 1 лек.

Отчетность по курсу «Специальные оптические волокна и их применение»

Экзамен !!!

(два вопроса по курсу + задача)

Допуск к экзамену – посещение $\frac{3}{4}$ лекционных занятий + посещение $\frac{3}{4}$ практических занятий + зачтение $\frac{3}{4}$ лаб. работ + сданные тесты

Экзамен «автоматом» – посещение $\frac{3}{4}$ лекционных занятий + посещение $\frac{3}{4}$ практических занятий + все зачтенные лаб. работы + положительный балл за тест + активность на практических занятиях

Литература по курсу «Специальные оптические волокна и их применение»

1. Мидвинтер Дж.Э. Волоконные световоды для передачи информации: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1983. – 336 с.
2. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.
3. Мендес А., Морзе Т.Ф. Справочник по специализированным оптическим волокнам: Пер. с англ. – М.: Техносфера, 2012. – 728 с.
4. Никоноров Н.В., Сидоров А.И. Материалы и технологии волоконной оптики: специальные оптические волокна: учеб. пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 130 с.
5. Шумкова Д.В., Левченко А.Е. Специальные волоконные световоды: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 178 с.
6. Шандаров В.М. Волоконно-оптические устройства технологического назначения: учеб. пособие. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 198 с.

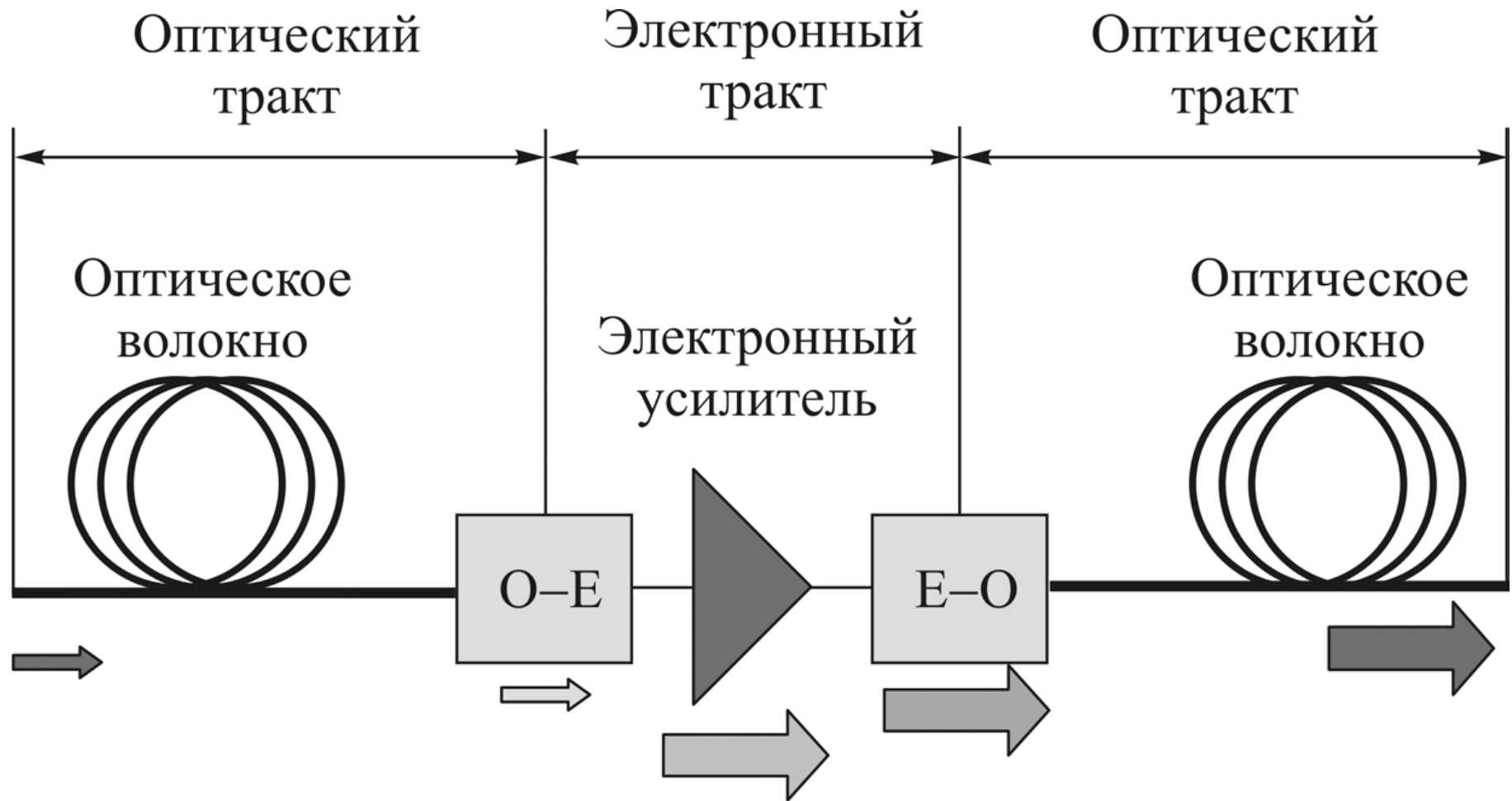
Волокна для оптических усилителей

Волокна для оптических усилителей

Через каждые 50-100 км волоконно-оптической линии происходит ослабление оптического сигнала на 10-20 дБ, что требует его восстановления.

До начала 1990-х годов в действующих линиях связи единственным способом компенсации потерь в линии было использование регенераторов.

Волокна для оптических усилителей



Волокна для оптических усилителей

Регенератор включает в себя:

- оптический приемник
- электронный усилитель
- оптический передатчик

Недостатки регенераторов:

- работают с единственной длиной волны
- экономически не выгодны

Волокна для оптических усилителей

Пропускная способность линии связи с регенераторами ограничена возможностями электроники.

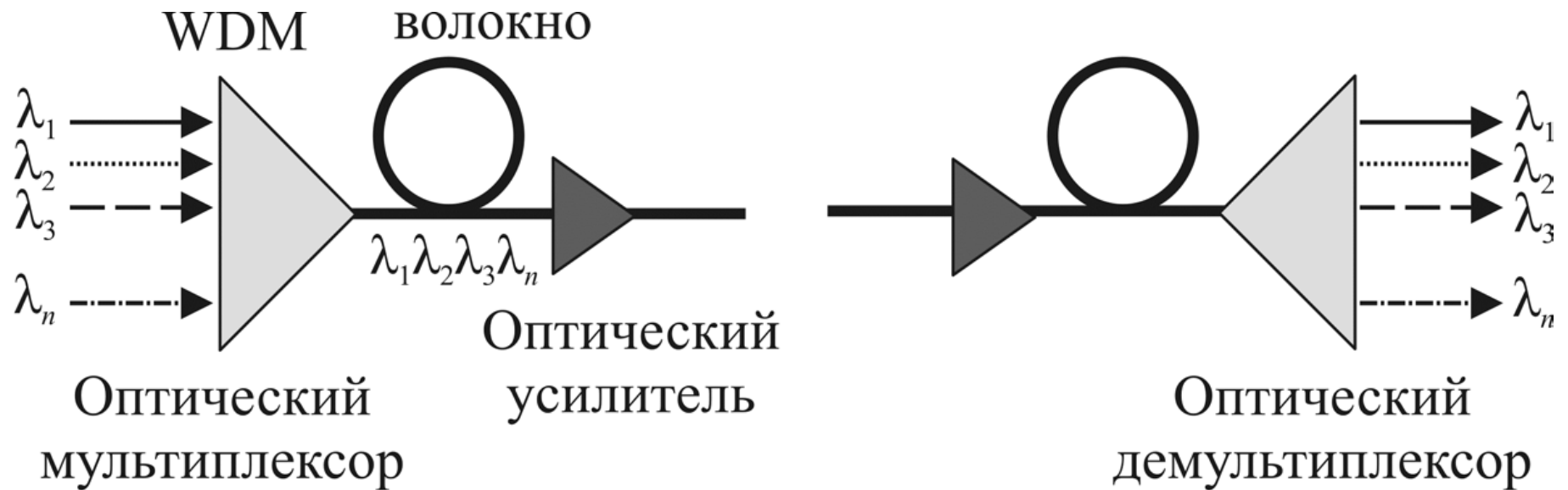
В настоящее время предельная скорость обработки сигналов для электроники составляет порядка 40 Гбит/с (в 1986 году скорость не превышала 1 Гбит/с).

Волокна для оптических усилителей

Интенсивные исследования 1985-1990-х годов привели к появлению принципиально новых технических устройств – оптических усилителей.

Наиболее распространенный вид оптических усилителей – волоконные на основе эрбия, или EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier).

Волокна для оптических усилителей



Волокна для оптических усилителей

Ключевые элементы сети с волоконно-оптическим усилителем EDFA:

- мультиплексор, демультиплексор (объединение и разделение нескольких, до 40, спектральных каналов)
- оптическое волокно (с потерями 0.2 дБ/км)
- оптический усилитель (рабочий спектральный диапазон 1530-1580 нм, коэффициент усиления 10 дБ/мВт)

Волокна для оптических усилителей

К настоящему времени для волоконно-оптических систем связи разработано три типа оптических усилителей:

- полупроводниковые
- волоконные на основе ионов редкоземельных металлов, в том числе эрбия
- рамановские волоконные усилители (ВКР-усилители)

Волокна для оптических усилителей

Преимущества полупроводниковых усилителей (например, InGaAsP):

- относительно высокое усиление (20 дБ)
- предел выходной мощности (5-10 дБ/м)
- работают в областях 0.8, 0.9, 1.0, 1.3 и 1.5 мкм

Недостатки:

- температурная зависимость длины волны
- высокий шум-фактор
- большие перекрестные помехи между каналами

Волокна для оптических усилителей

Условия для усиления оптического сигнала в рамановском волоконном усилителе:

- сигнал распространяется в оптическом волокне вместе с интенсивной волной накачки
- длина волны сигнала находится в полосе частот комбинационного рассеяния света в оптическом волокне

Волокна для оптических усилителей

Преимущества рамановских волоконных усилителей:

- усиление на любой длине волны
- волокно является активной средой усилителя
- спектр усиления зависит от спектра (длины волны) накачки, поэтому подбором источника накачки можно сформировать широкую (более 100 нм) полосу усиления
- низкий уровень шумов

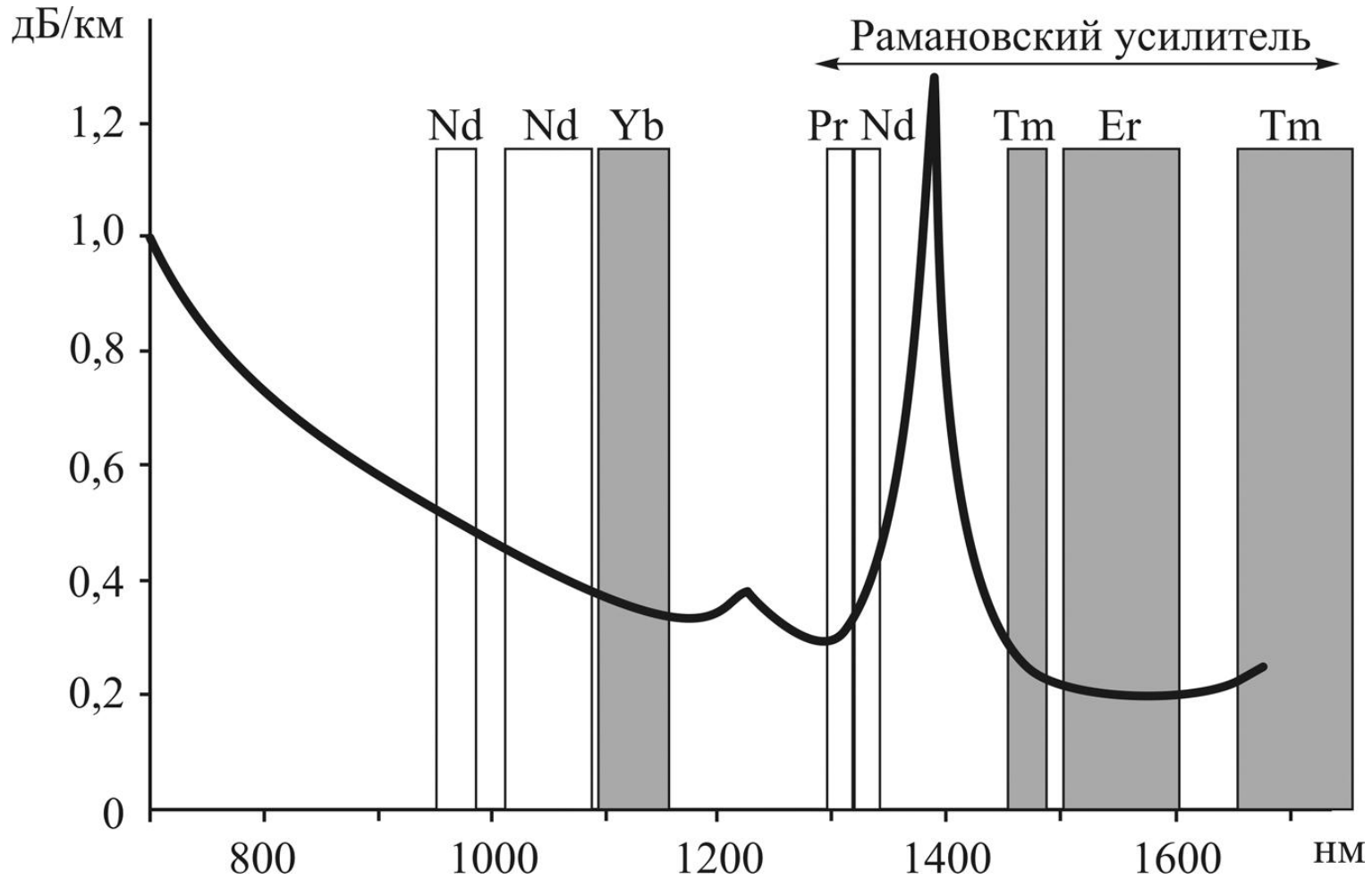
Недостатки:

- невысокая эффективность, требующая использования мощного непрерывного излучения накачки (порядка 1 Вт)

Волокна для оптических усилителей

Наиболее широкое применение находят оптические усилители на основе кварцевых волокон, сердцевина которых легирована ионами редкоземельных металлов, имеющих спектр люминесценции в окнах прозрачности волокна (1.32 мкм, 1.54 мкм) и пики поглощения в области генерации полупроводниковых лазеров (0.8 мкм, 0.98 мкм, 1.48 мкм), с помощью которых осуществляется накачка активированного оптического волокна.

Волокна для оптических усилителей



Волокна для оптических усилителей

Самый распространенный вид волоконно-оптических усилителей – эрбиевые.

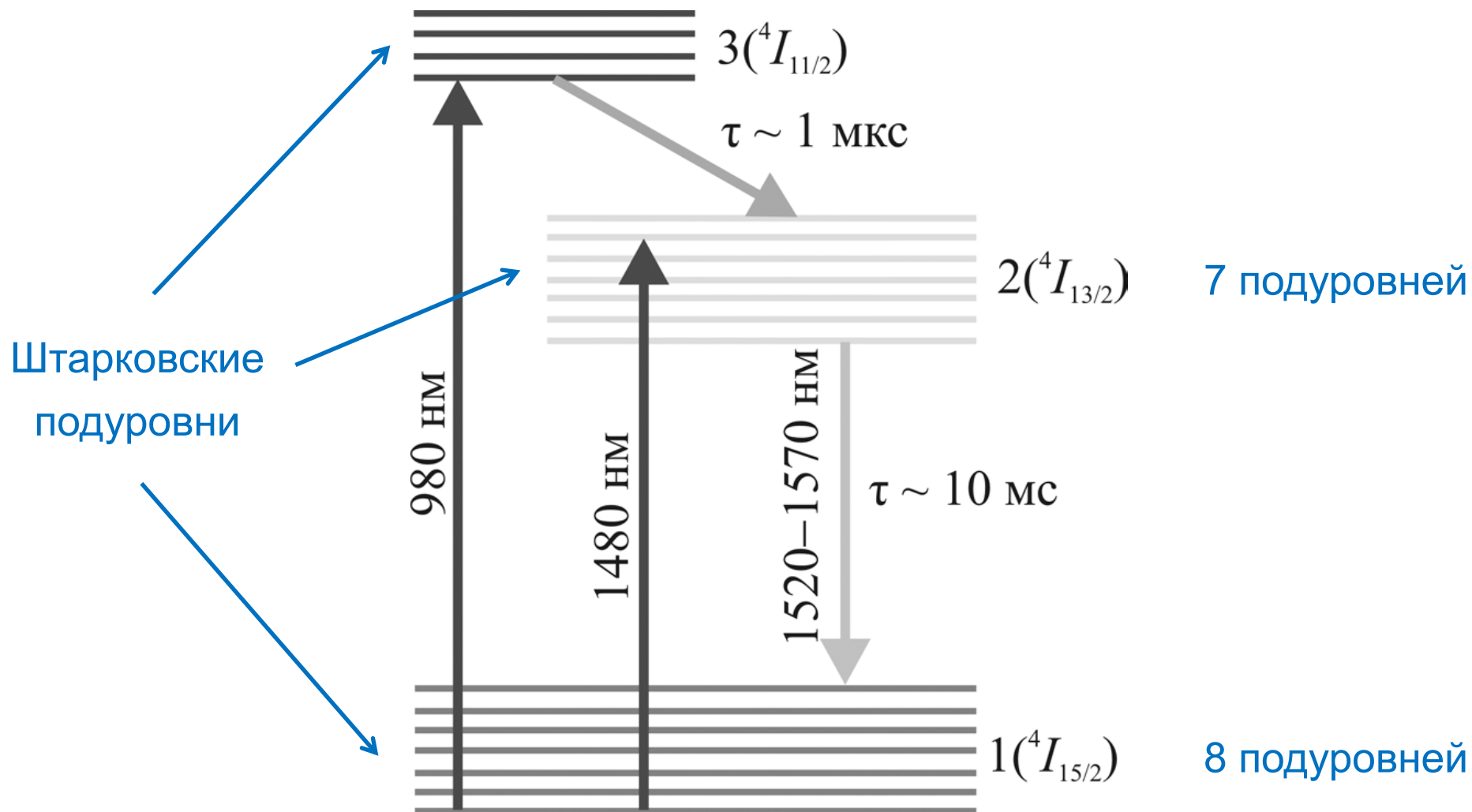
Почему ?

Волокна для оптических усилителей

Принцип работы усилителей EDFA основан на явлении усиления света при вынужденном излучения (LASER).

Возможность усиления излучения в оптических волокнах, легированных ионами эрбия, обуславливается схемой уровней энергии данного редкоземельного металла.

Волокна для оптических усилителей



Волокна для оптических усилителей

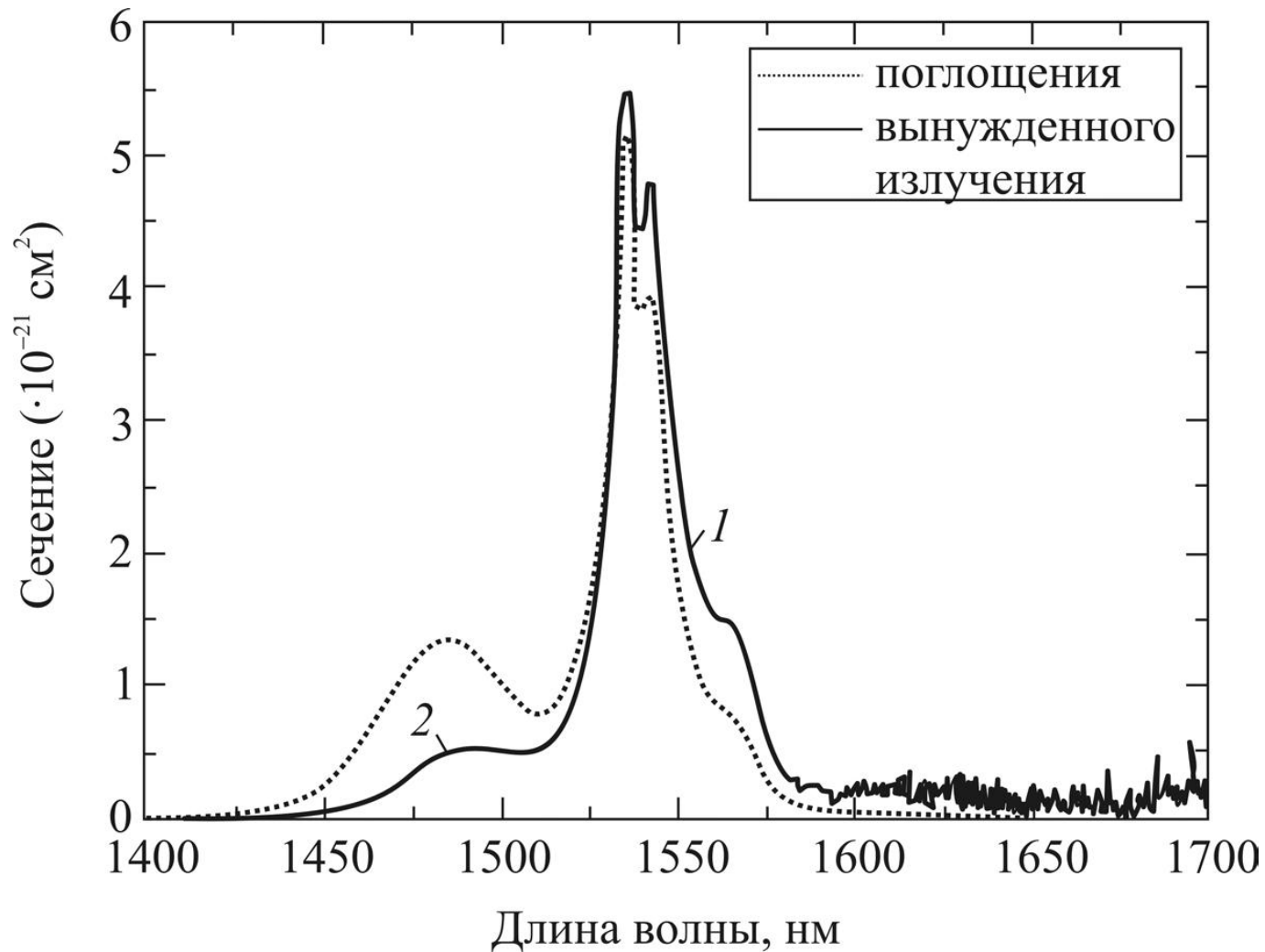
1. Под действием накачки за счет поглощения фотонов накачки ионы эрбия переходят из основного состояния (уровень 1) в верхнее возбужденное состояние (уровень 3), которое является короткоживущим.
2. За счет процессов релаксации ионы эрбия переходят в нижнее возбужденное состояние (метастабильный уровень 2), которое является долгоживущим, поэтому число ионов, находящихся на уровне 2, может превышать число ионов на уровне 1.
3. При попадании в среду с инверсией населенности излучения с энергией фотона, совпадающей с энергией перехода из метастабильного состояния в основное, с большой вероятностью происходит переход иона эрбия из метастабильного уровня 2 на основной уровень 1 с одновременным рождением одного фотона.

Волокна для оптических усилителей

Длина волны и спектр усиления определяются типом активных ионов.

Не все ионы эрбия находятся в метастабильном состоянии и обеспечивают усиление !

Волокна для оптических усилителей

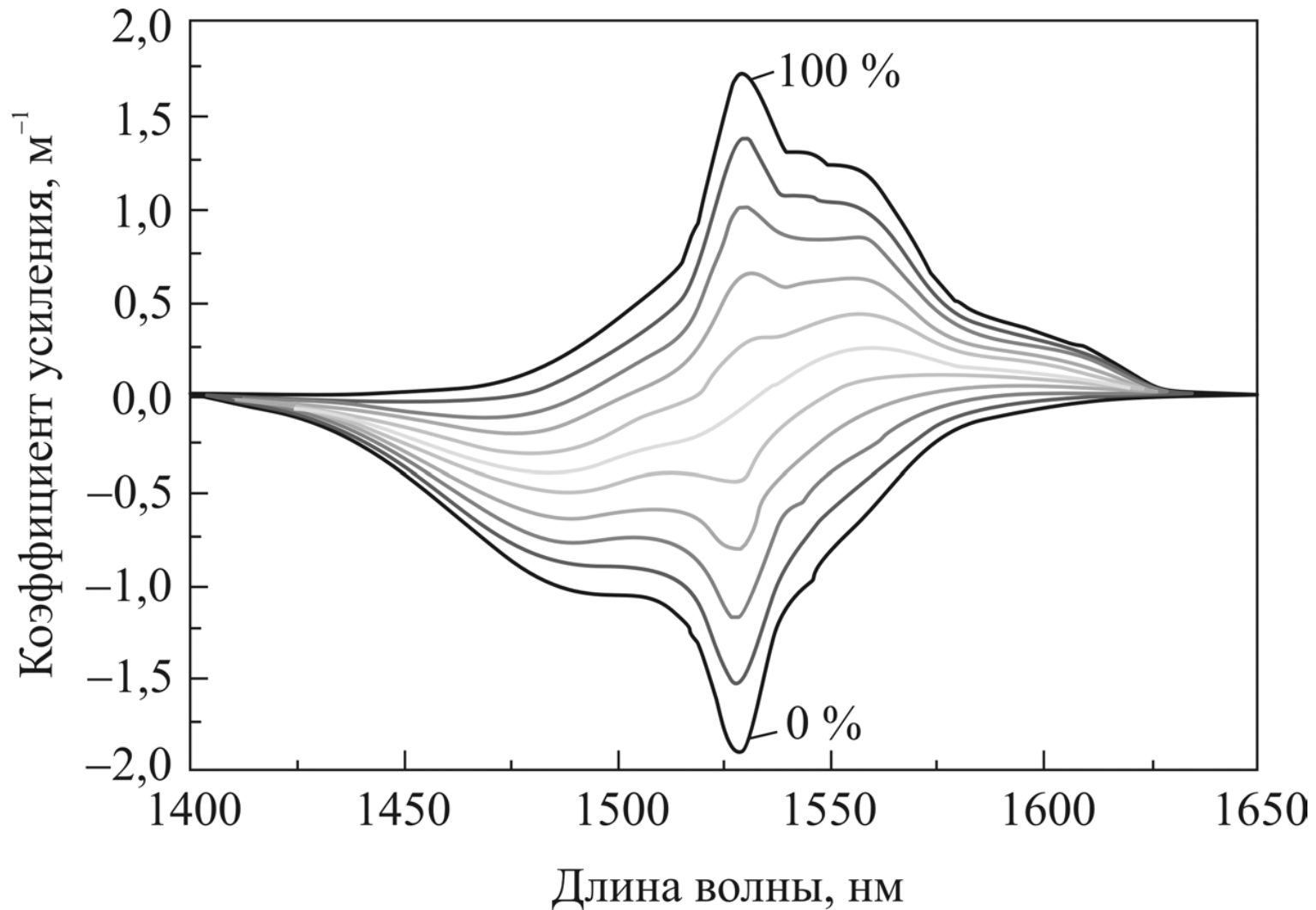


Волокна для оптических усилителей

Необходимое условие усиления оптического сигнала – создание инверсии населенностей между двумя рабочими уровнями энергии 1 и 2.

Мощность накачки, при которой населенности уровней 1 и 2 равны, называется пороговой мощностью.

Волокна для оптических усилителей



Волокна для оптических усилителей

Основные элементы EDFA:

1. Полупроводниковый источник накачки (0.98 мкм, 1.48 мкм)
2. Соединитель канала накачки на длине волны 0.98/1.48 мкм и полезного сигнала (1.54 мкм), который необходимо усиливать
3. Оптическое волокно, легированное эрбием
4. Оптический изолятор, пропускающий оптические сигналы только в одном направлении
5. Брэгговская решетка, выравнивающая спектр усиления в рабочем диапазоне длин волн

Волокна для оптических усилителей

Преимущества EDFA:

- высокая передача энергии от накачки к сигналу ($> 50 \%$)
- одновременное усиление в широком диапазоне длин волн с выходной мощностью 37 дБ/м и относительно плоским спектром усиления > 20 дБ
- время усиления достаточно велико (> 100 мс) для преодоления помех модуляции
- низкий шум-фактор
- поляризационно независим
- возможность работы в S- и L- диапазонах

Волокна для оптических усилителей

Недостатки EDFA:

- достаточно большие размеры ($220 \times 220 \times 10$ мм³), которые определяются радиусом изгиба активированного ионами эрбия оптического волокна (> 10 см)
- невозможность интеграции с полупроводниковыми устройствами
- спонтанный шум (ASE – amplified spontaneous emission)
- перекрестны помехи
- предел усиления

Волокна для волоконных лазеров

Волокна для волоконных лазеров

Основные области применения лазеров средней и высокой мощности:

- обработка материалов (резка, сварка, маркировка, гравировка)
- медицина
- термообработка

Волокна для волоконных лазеров

Исторически развитие мощных непрерывных лазеров осуществлялось по двум направлениям:

- газовые лазеры (CO_2 , длина волны 10.6 мкм, КПД 10 %, макс. мощность 100 кВт)
- твердотельные лазеры (Nd:YAG, длина волны 1.06 мкм, КПД до 6 %, макс. мощность 15 кВт)

Волокна для волоконных лазеров

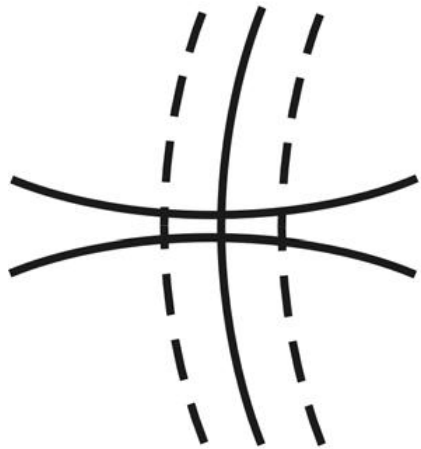
Преимущества волоконных лазеров:

- долговечность и прочность конструкции
- эффективный теплоотвод
- высокое, вплоть до дифракционно-ограниченного, и стабильное качество выходного излучения
- высокая эффективность преобразования излучения накачки в излучение генерации (до 85 %)
- работа в диапазоне прозрачности кварцевого стекла (1-2 мкм)
- компактность и малый вес
- отсутствие эффекта искажения волнового фронта

Волокна для волоконных лазеров

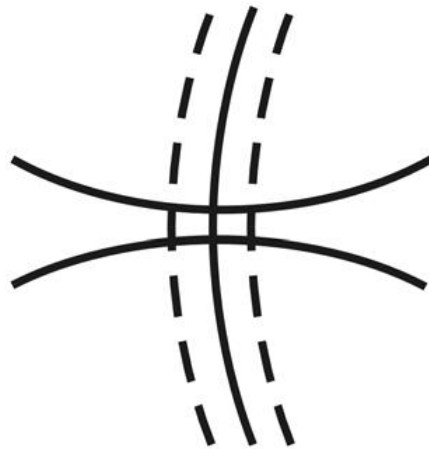
Волоконный
лазер

250–400 мкм



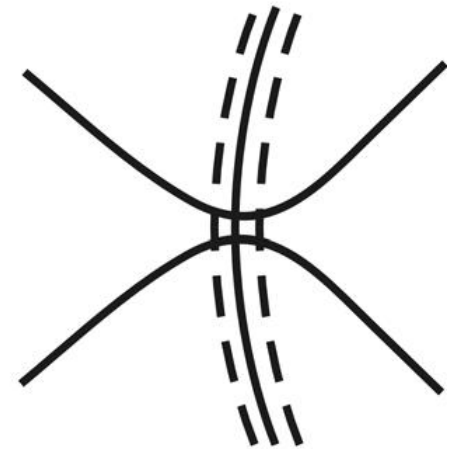
Nd:YAG
лазер

100–150 мкм



Лазерный
диод

30–40 мкм



Волокна для волоконных лазеров

Недостатки волоконных лазеров:

- высокая стоимость систем накачки

Волокна для волоконных лазеров

Основные элементы конструкции волоконного лазера:

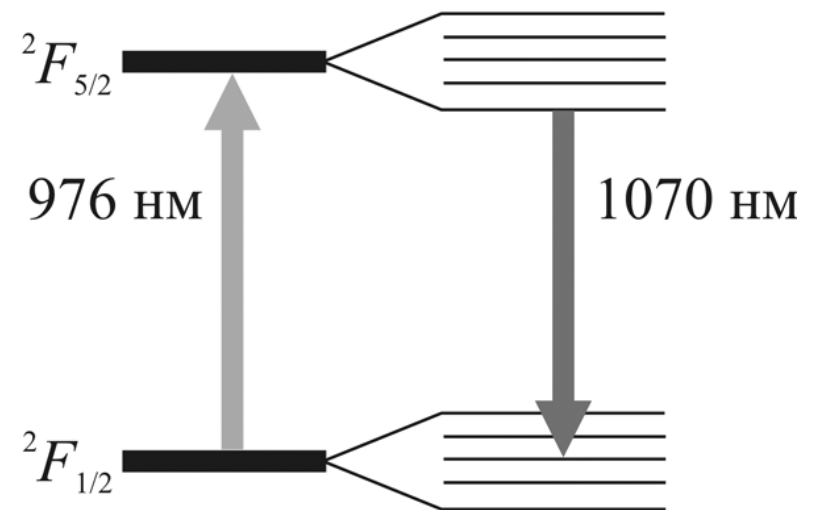
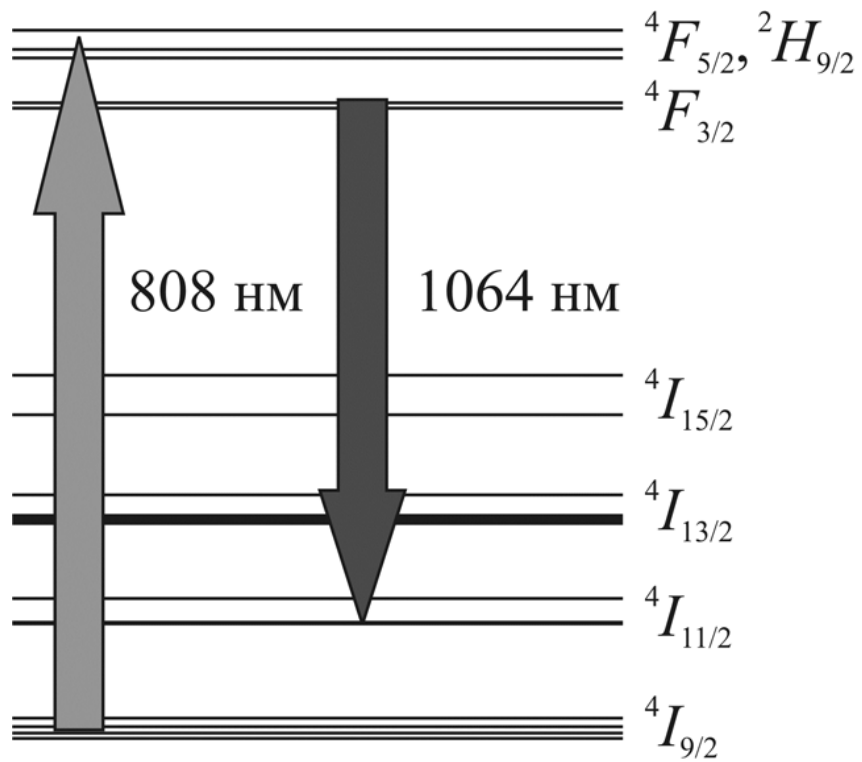
- **активная среда**, в которой происходит усиление излучения
- **резонатор**, обеспечивающий устойчивую обратную связь для генерируемого излучения
- **источник накачки**, с помощью которого в активной среде создается инверсная населенность

Волокна для волоконных лазеров

Трехуровневая схема накачки (Er^{3+}) – требуется высокая мощность излучения накачки, чтобы перевести более половины ионов в возбужденное состояние.

Четырехуровневая схема накачки (Nd^{3+} , Yb^{3+}) – требования к мощности снижаются, поскольку для достижения инверсии населенностей между уровнями 1 и 2 достаточно небольшой мощности (уровень 1 практически не заселен).

Волокна для волоконных лазеров



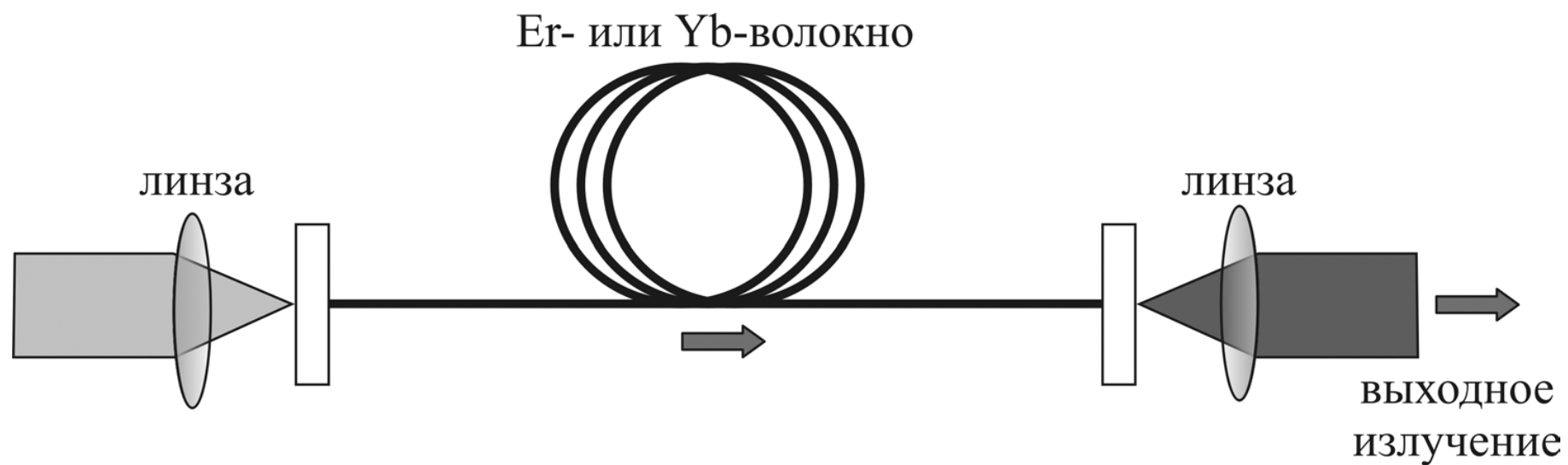
Волокна для волоконных лазеров

В отсутствие положительной обратной связи лазер будет работать как усилитель проходящих оптических сигналов.

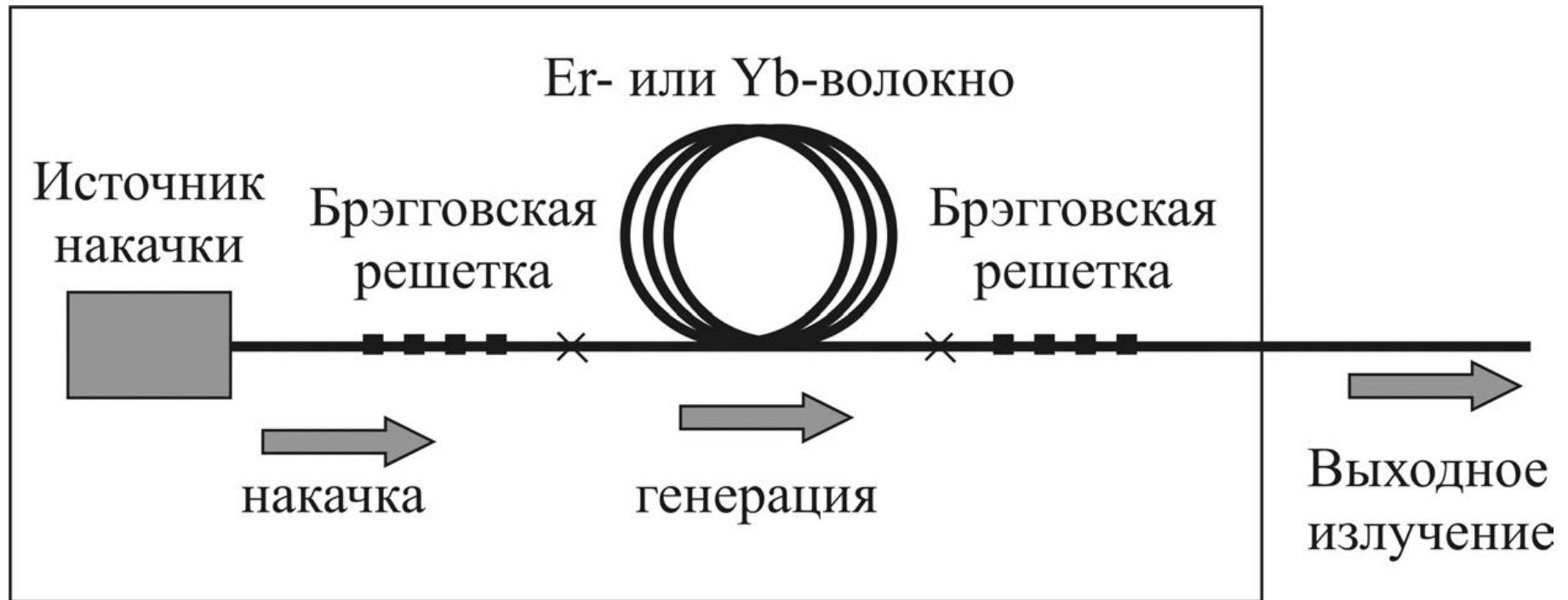
Для создания положительной обратной связи могут использоваться:

- зеркала (металлические, диэлектрические)
- дифракционные решетки
- волоконные брэгговские решетки показателя преломления
- мультиплексоры

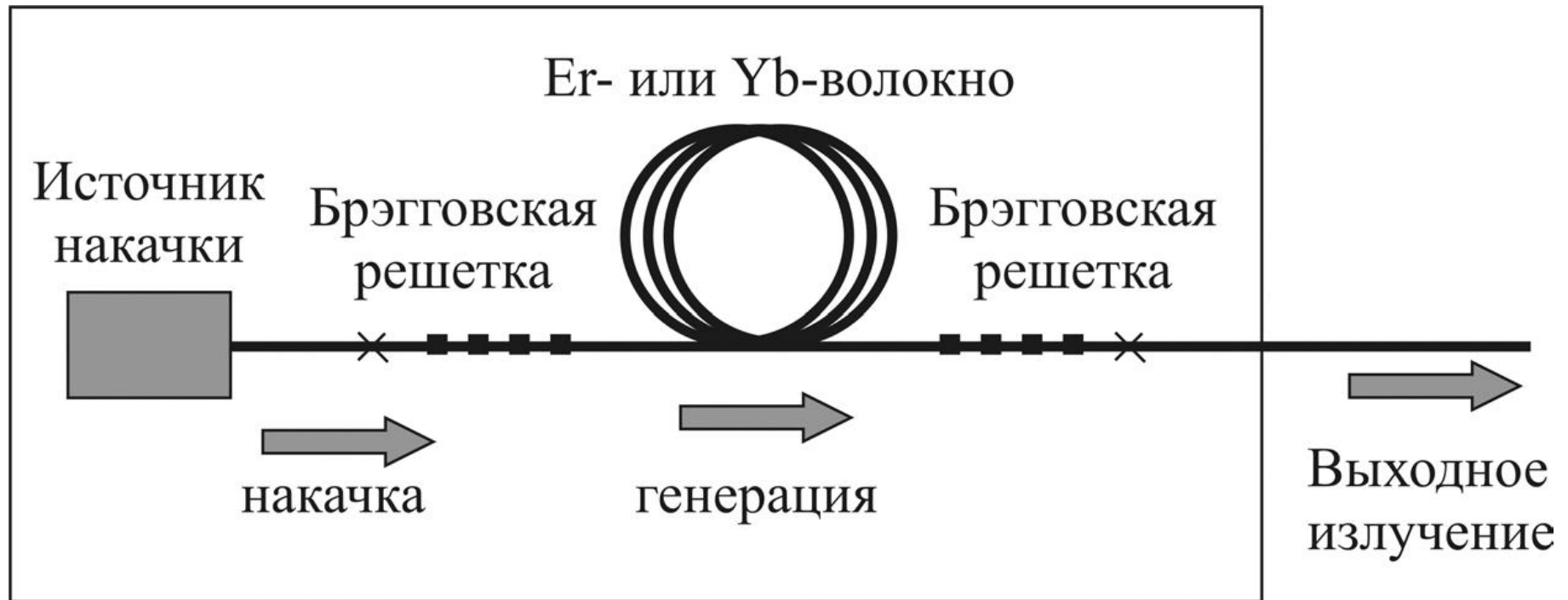
Волокна для волоконных лазеров



Волокна для волоконных лазеров



Волокна для волоконных лазеров

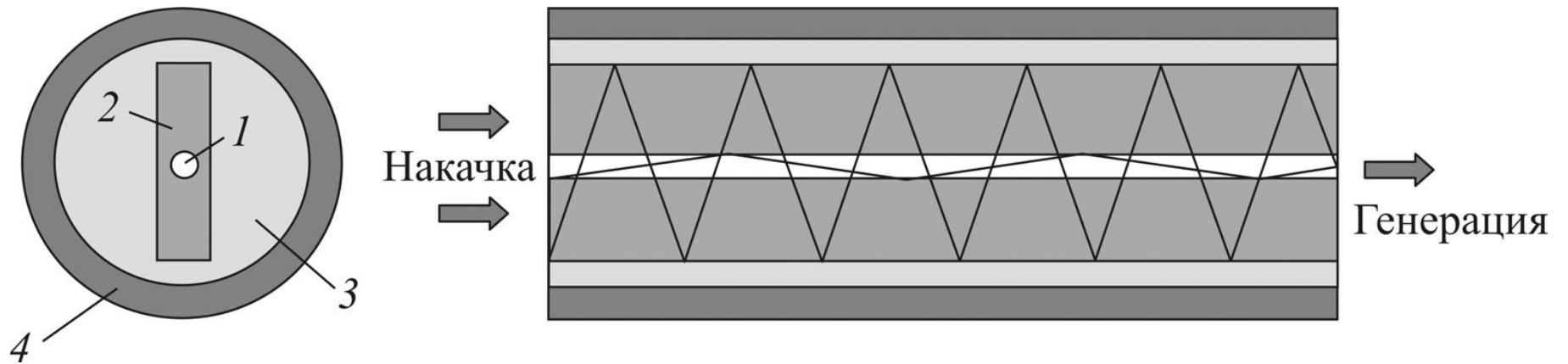


Волокна для волоконных лазеров

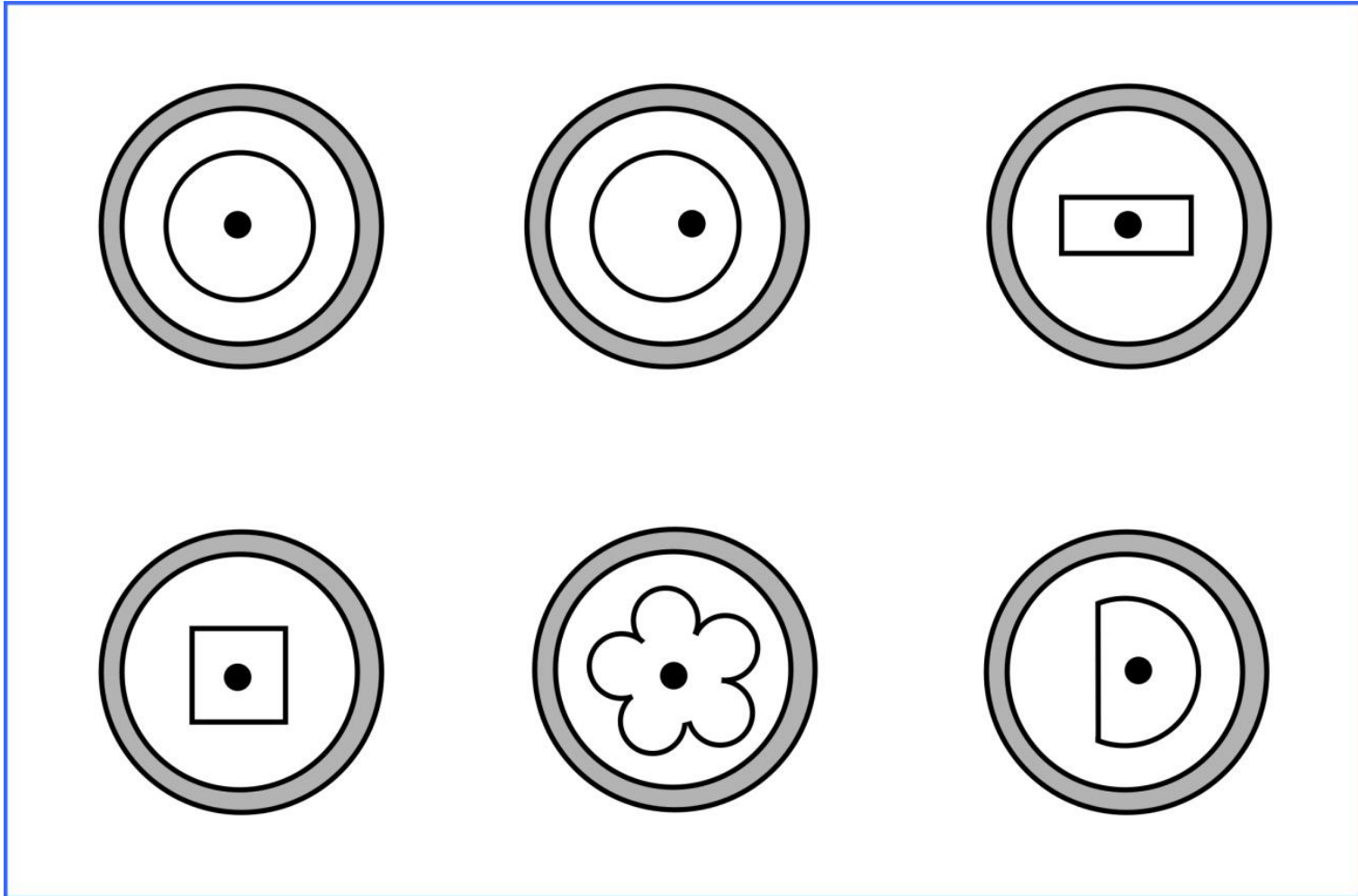
Оптическая накачка может осуществляться через боковую поверхность оптического волокна либо через торец.

Для увеличения эффективности поглощения излучения накачки была предложена конструкция оптических волокон с двойной оболочкой.

Волокна для волоконных лазеров



Волокна для волоконных лазеров



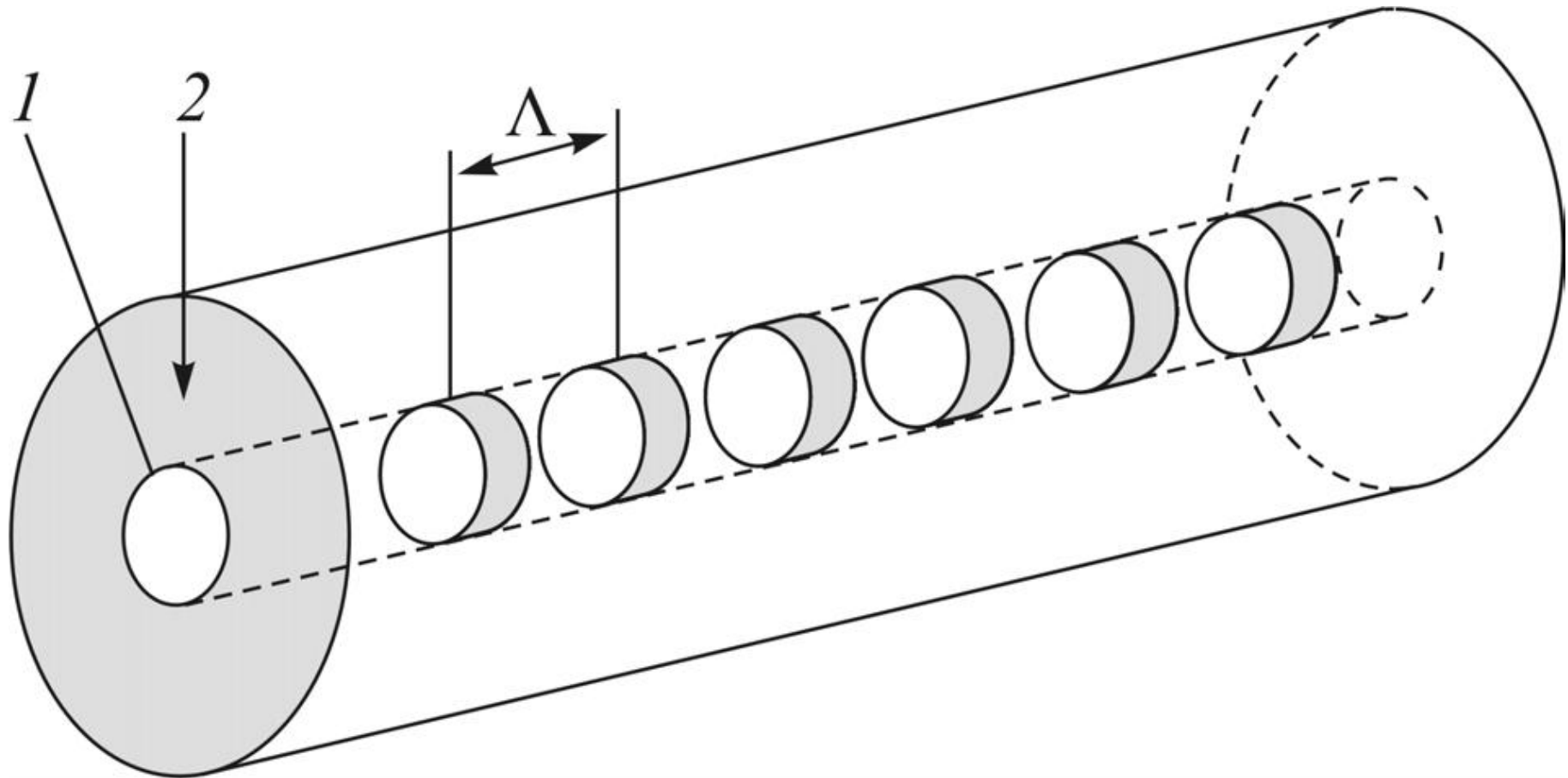
Волокна с брэгговскими решетками

Волокна с брэгговскими решетками

Фоточувствительность легированного кварцевого стекла – способность изменять показатель преломления (ПП) под действием излучения.

Брэгговская волоконная решетка ПП (fiber Bragg grating) – участок оптического волокна (обычно – одномодового), в сердцевине которого наведена периодическая структура ПП с периодом Λ , имеющая заданное пространственное распределение.

Волокна с брэгговскими решетками

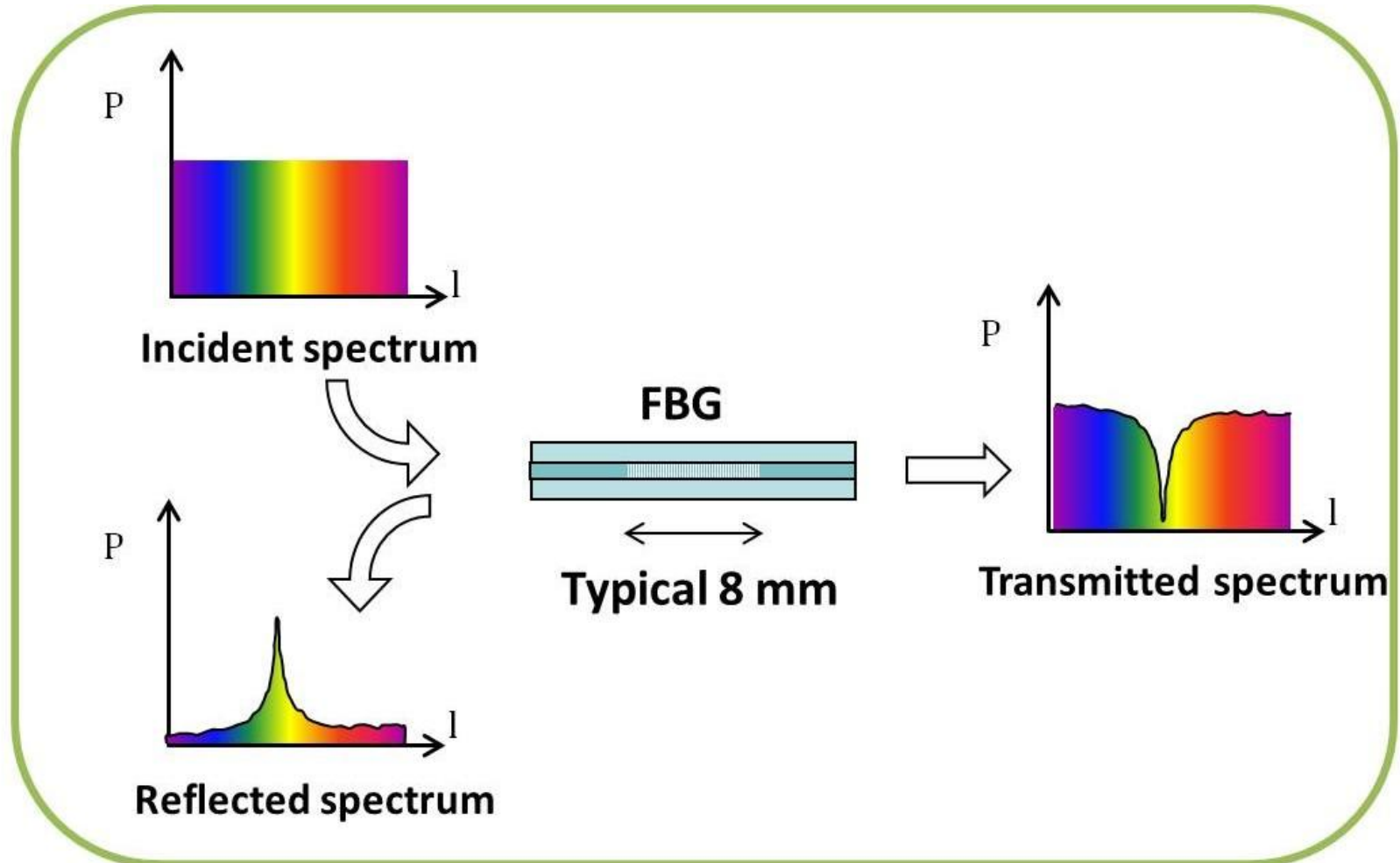


Волокна с брэгговскими решетками

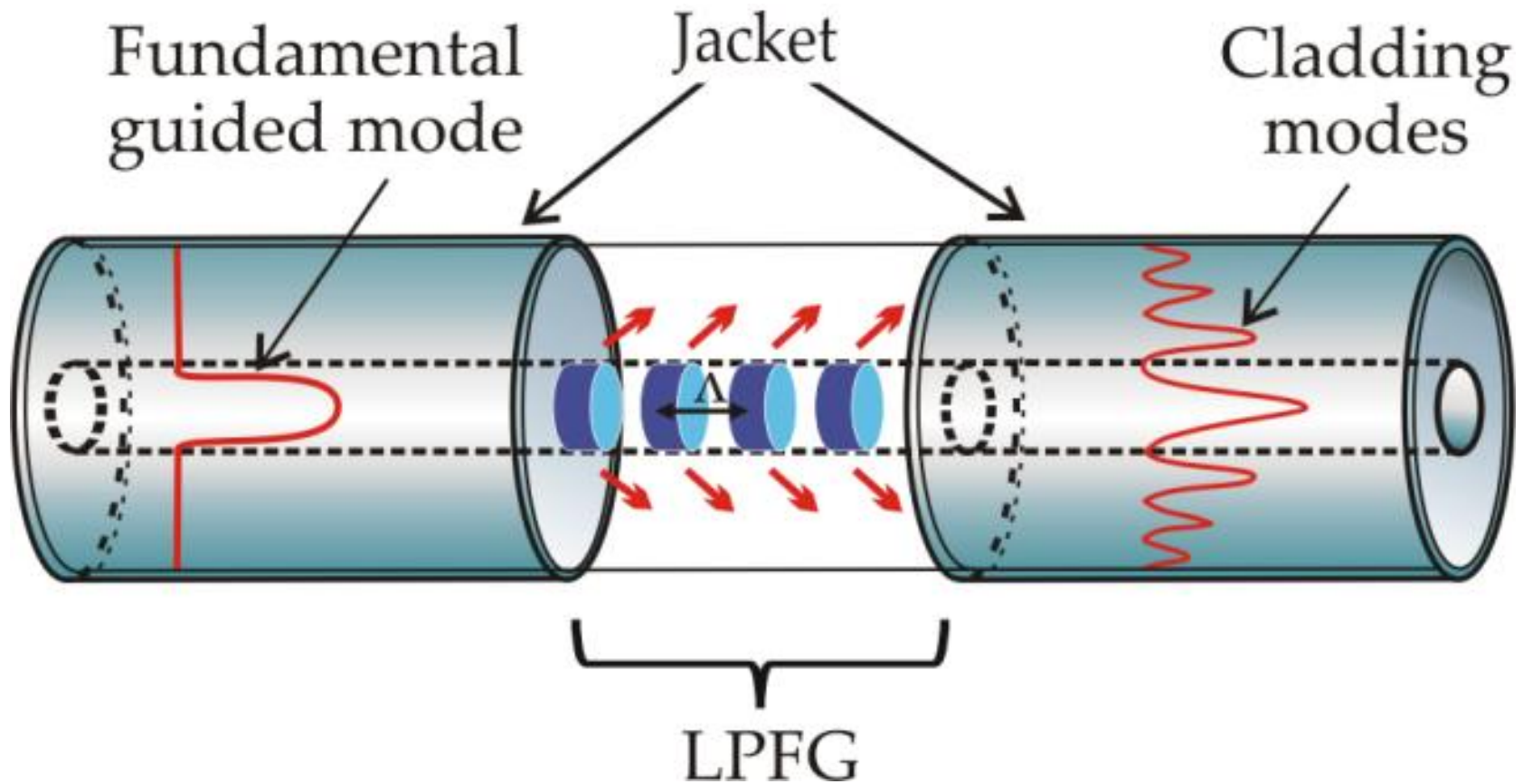
Преимущества волоконных решеток Брэгга (по сравнению с интерференционными зеркалами и объемными дифракционными решетками):

- узкополосное отражение оптического излучения (относительная спектральная ширина 10^{-6})
- разнообразие спектральных и дисперсионных характеристик
- полностью волоконное исполнение
- низкие оптические потери
- относительная простота изготовления

Волокна с брэгговскими решетками



Волокна с брэгговскими решетками



Волокна с брэгговскими решетками

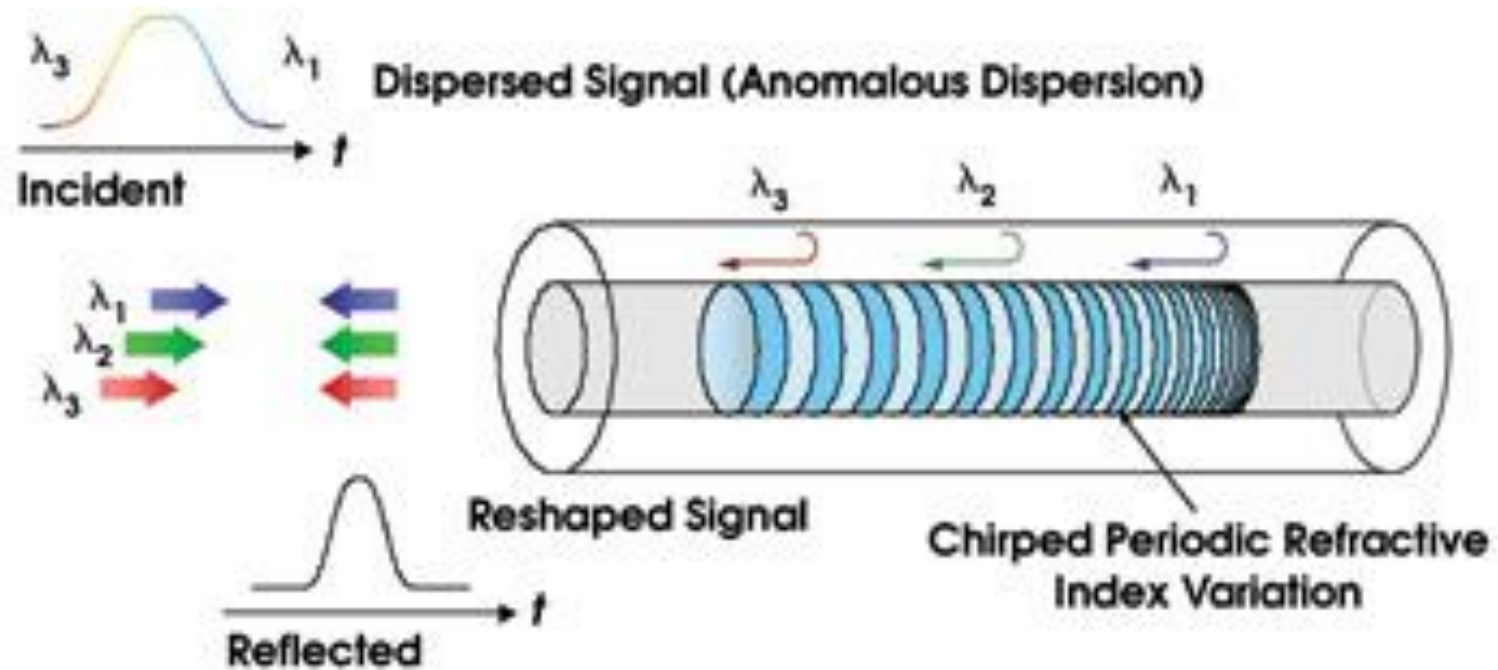
Одна и та же волоконная решетка Брэгга на различных длинах волн может связывать основную моду оптического волокна с модами различных типов и направлений распространения.

При больших периодах на решетке ПП возникает связь с модами, распространяющимися в том же направлении, а при малых – с модами, имеющими противоположное направление распространения.

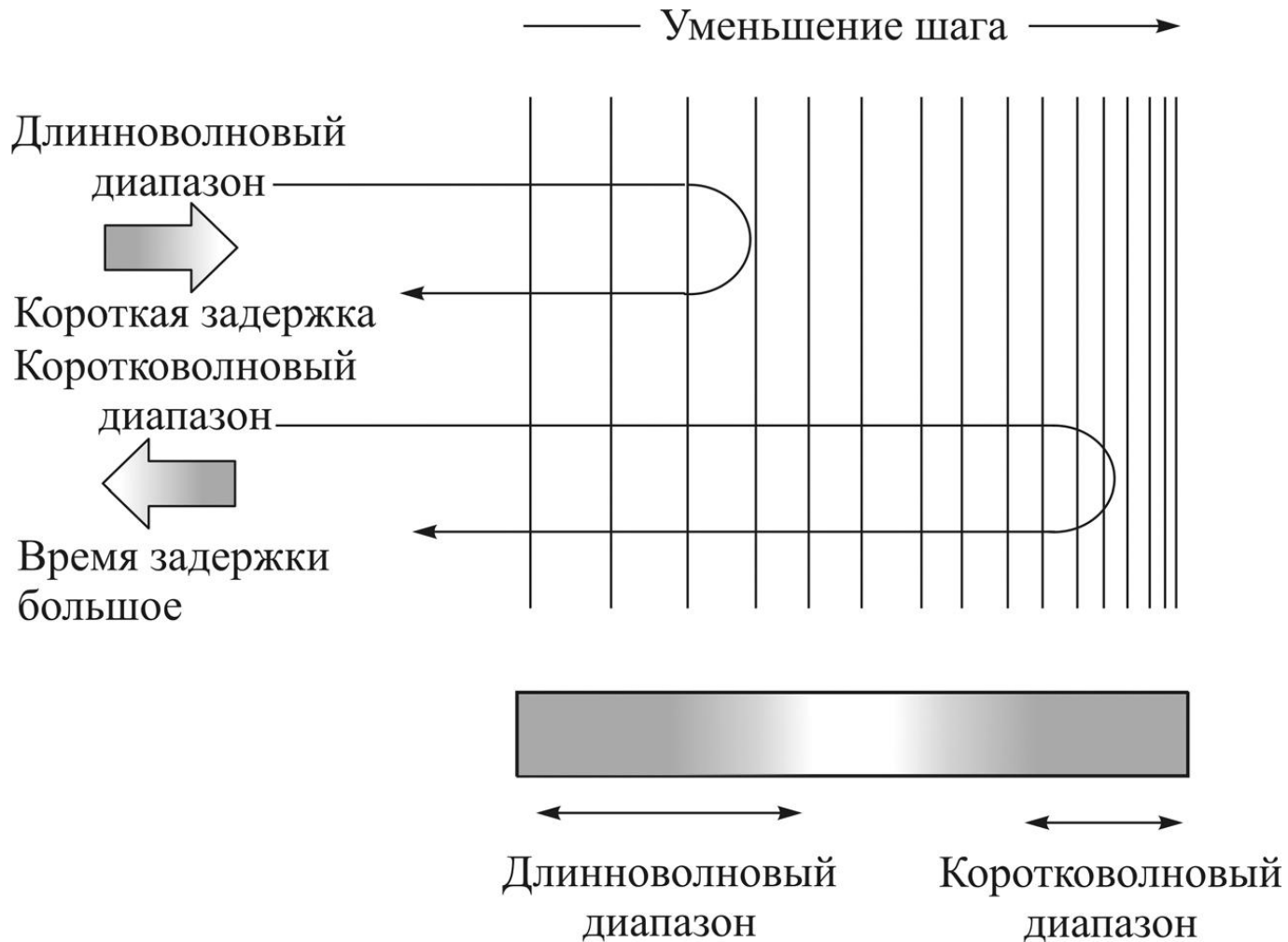
Волокна с брэгговскими решетками

Для компенсации дисперсии в оптическом волокне могут применяться волоконные решетки Брэгга с переменным периодом (изменяющимся линейно по длине). Такие решетки получили название чирпированных (chirped fiber Bragg grating).

Волокна с брэгговскими решетками



Волокна с брэгговскими решетками



Волокна с брэгговскими решетками

Фоточувствительные стекла для записи решеток:

- германосиликатные оптические волокна с содержанием GeO_2 на уровне 20 мол.% и более
- германосиликатные оптические волокна, сердцевина которых дополнительно легирована бором, оловом, азотом, фосфором, сурьмой

Волокна с брэгговскими решетками

Методы увеличения фоточувствительности оптических волокон:

- насыщение сетки стекла H_2 при высокой температуре (рост концентрации OH , снижение механической прочности)
- насыщение сетки стекла молекулярным H_2 при относительно низкой температуре, порядка $100\text{ }^\circ\text{C}$ (необходимость хранения при низкой температуре, низкая температурная стойкость самих решеток)
- механическое растяжение волокна при записи в нем решеток (изменение резонансной длины волны решетки)

Волокна с брэгговскими решетками

В процесс изменения ПП стекла сердцевины вносят вклад одновременно несколько механизмов.

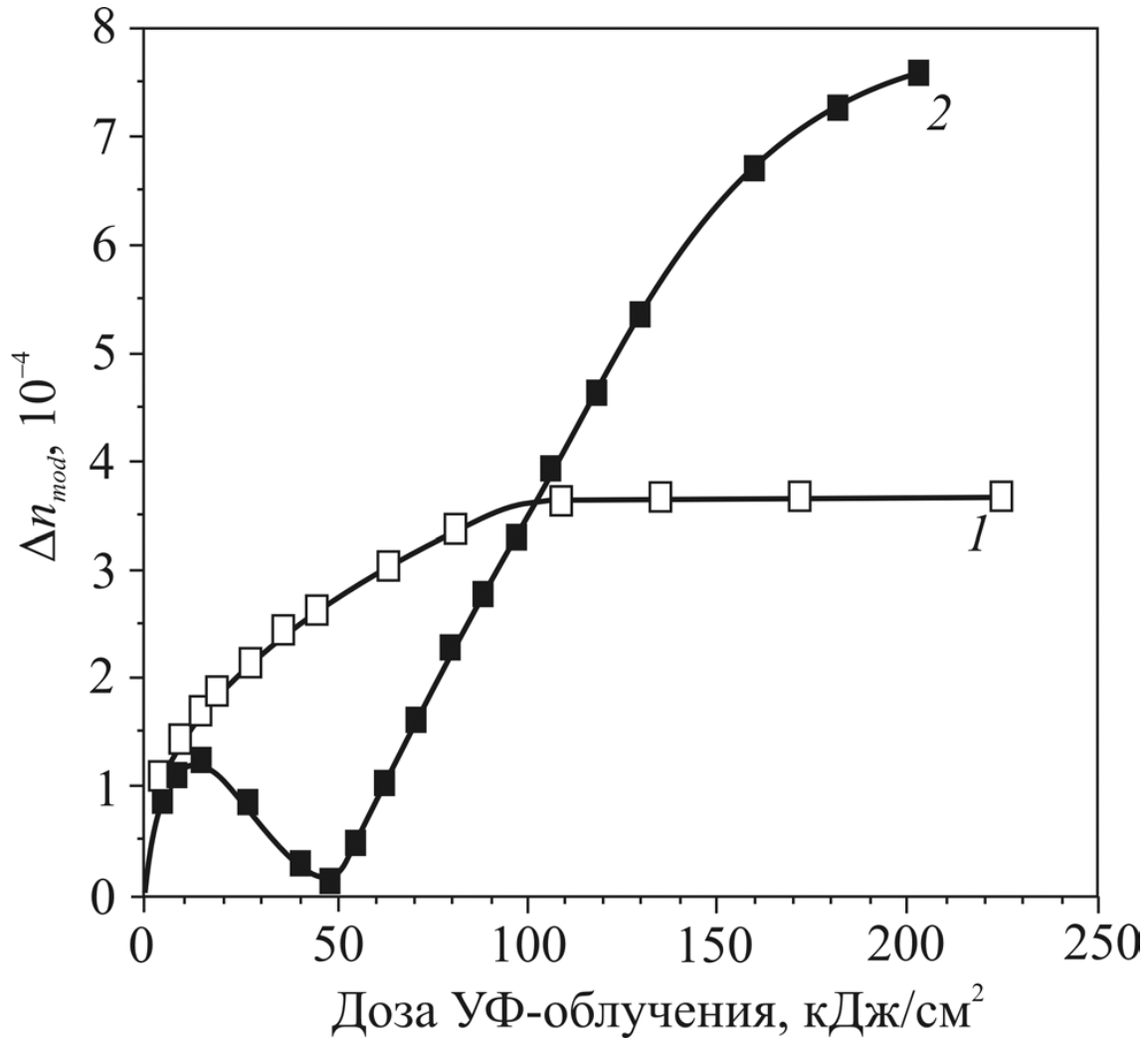
Значительный вклад вносит фотоиндуцированная (под воздействием УФ-излучения) трансформация ГКДЦ, которая приводит к образованию новых дефектных центров, а также к деформации сетки, проявляющейся в увеличении плотности стекла и изменению спектров его комбинационного рассеяния.

Волокна с брэгговскими решетками

Типы фоточувствительности в германосиликатных оптических волокнах:

- **типа I** (концентрация GeO_2 менее 20 мол.%, деградация при температурах 200-300 °С, трансформация дефектных центров и связанное с ней уплотнение сетки стекла)
- **типа IIa** (концентрация GeO_2 более 20 мол.%, деградация при температурах 500-600 °С, изменение упругих напряжений в сетке стекла)

Волокна с брэгговскими решетками



Волокна с брэгговскими решетками

Типы фоточувствительности в германосиликатных оптических волокнах:

- **типа II** (облучение одним импульсом эксимерного лазера с плотностью энергии в импульсе 1 Дж/см^2 , низкая механическая прочность)
- **типа Ia** (солегирование бором в присутствии молекулярного H_2 , смещение в длинноволновую область резонансной длины волны)

Анизотропные одномодовые волокна

Анизотропные одномодовые волокна

В одномодовом оптическом волокне с круглым сечением сердцевины и осесимметричным распределением ПП распространяются две ортогонально поляризованные (линейно) моды единственной пространственной моды LP_{01} .

При вводе в волокно от источника излучения моды, имеющей одно из двух таких состояний поляризации, при распространении по волокну это состояние изменяется под воздействием внешних факторов (температуры, давления, вибрации и т.д.). Линейно поляризованное излучение преобразуется в эллиптически поляризованное.

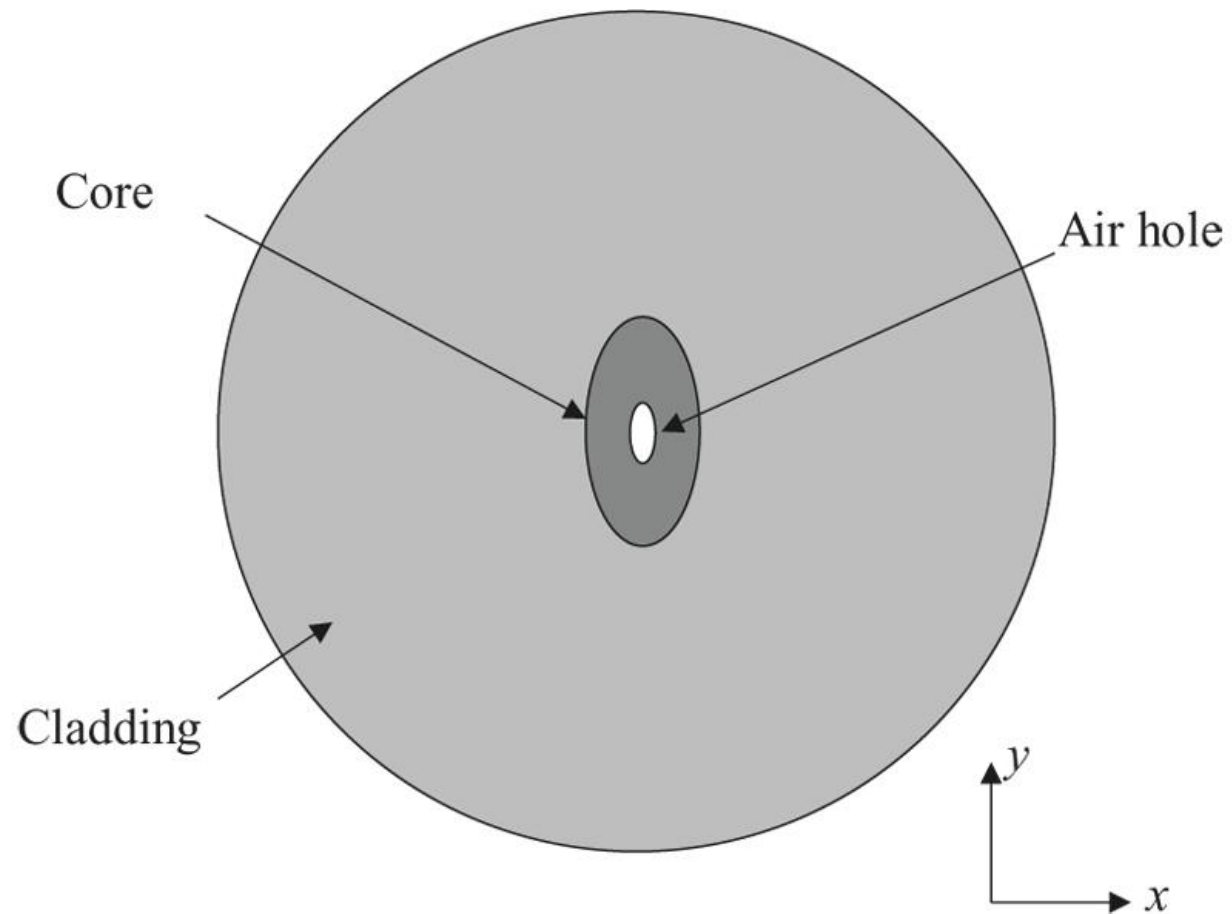
Анизотропные одномодовые волокна

Сохранения линейного состояния поляризации вводимого излучения можно добиться за счет нарушения формы или показателя преломления сердцевины волокна. Константы распространения двух ортогонально поляризованных мод будут сильно отличаться, препятствуя эффективной перекачке оптической мощности от одной моды к другой.

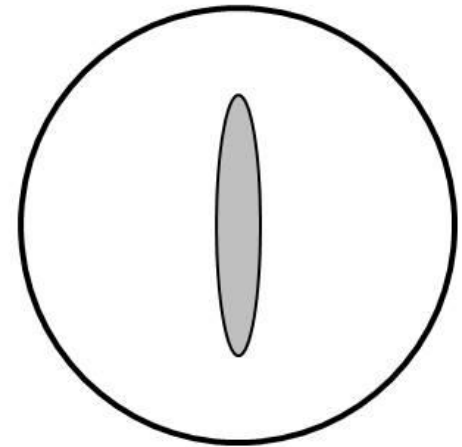
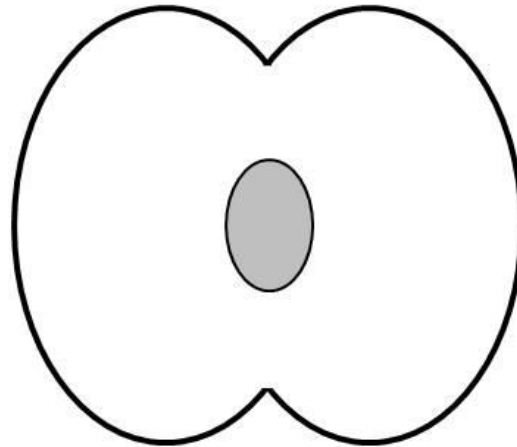
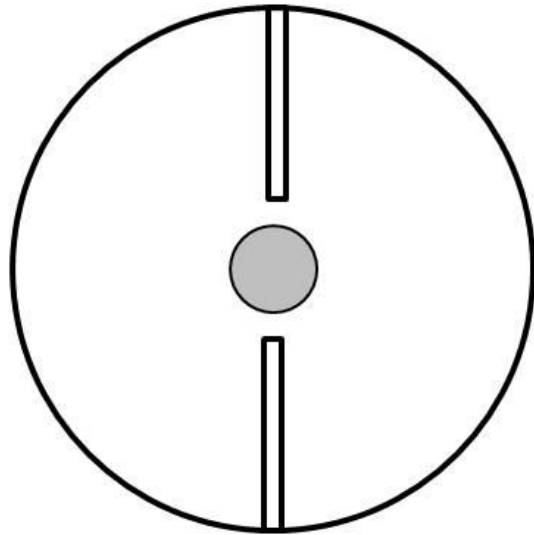
Подобные волокна называются анизотропными, а мерой анизотропии является модовое двулучепреломление.

Чем больше двулучепреломление, тем меньше связь между поляризационными модами.

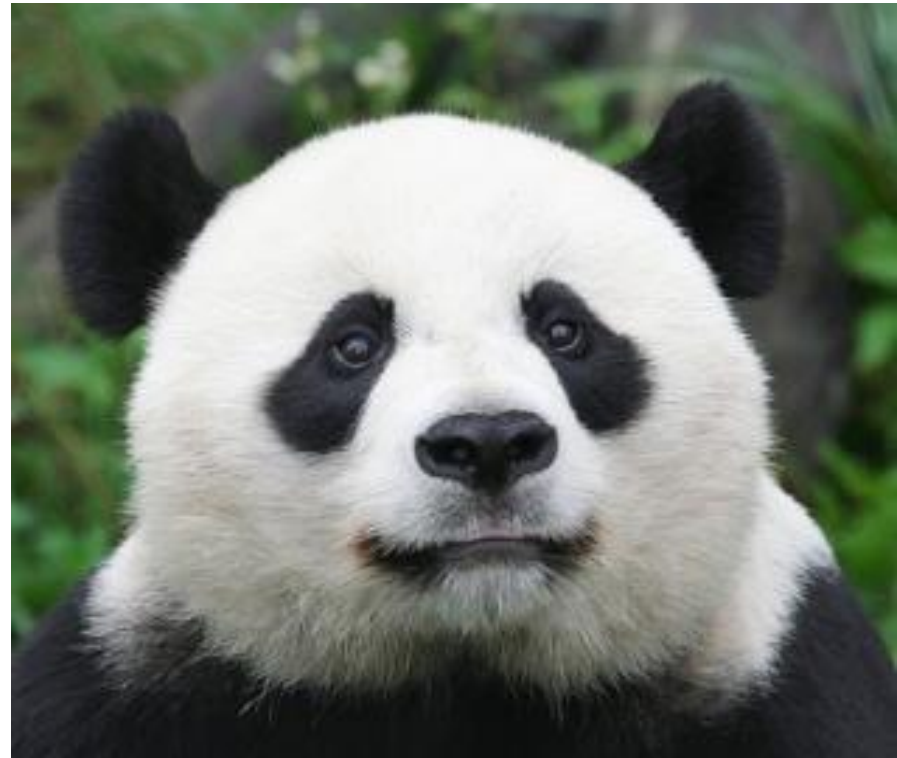
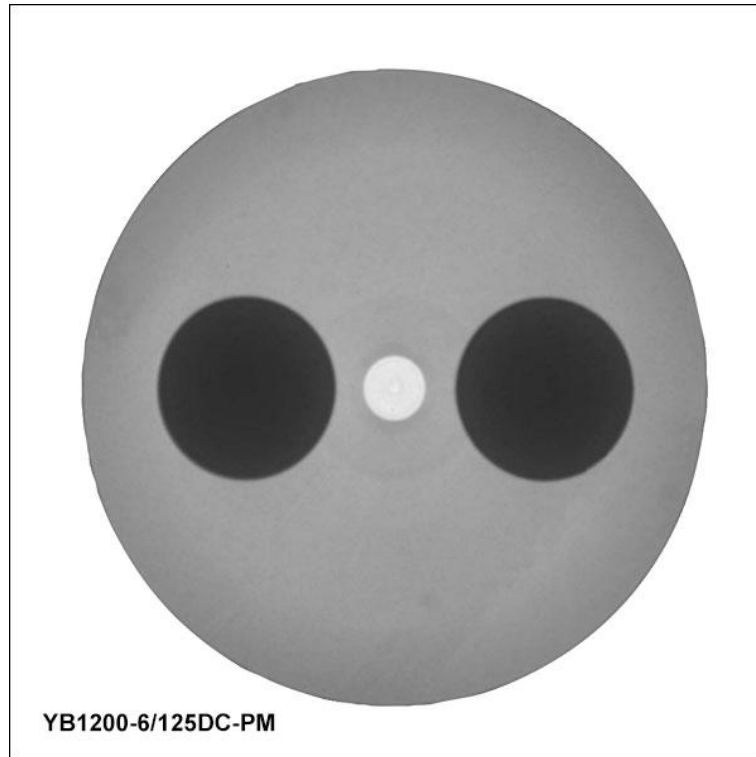
Анизотропные одномодовые волокна



Анизотропные одномодовые волокна



Анизотропные одномодовые волокна



Анизотропные одномодовые волокна



Анизотропные одномодовые волокна

