

## *Лекция 16*

# **ПЕРСПЕКТИВЫ НЕЛИНЕЙНОЙ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ**

### **Вопросы:**

- 1. Основные области применения и научно-технические проблемы нелинейной волоконной оптики.**
- 2. Развитие волоконно-оптической связи. Технология WDM.**
- 3. Фотонно-кристаллические волоконные световоды.**

# *Области применения нелинейных волоконных световодов*

## *Волоконно-оптическая связь*

**Использование нелинейных взаимодействий оптических сигналов и механизмов распространения света для создания широкополосных линий связи повышенной информационной емкости и скорости передачи**

## *Волоконные лазеры*

**Применение легированных нелинейных волокон и новой элементной базы для создания волоконных лазеров с расширенной областью генерации и оптимальными параметрами выходного излучения**

## *Волоконные сенсорные системы*

**Использование различных механизмов оптической нелинейности для создания волоконных датчиков повышенной точности и инфраструктуры контроля за состоянием объектов**

# *Важнейшие научно-технические проблемы нелинейной волоконной оптики*

**1. Совершенствование высокоскоростных волоконно-оптических систем связи и передачи информации.**

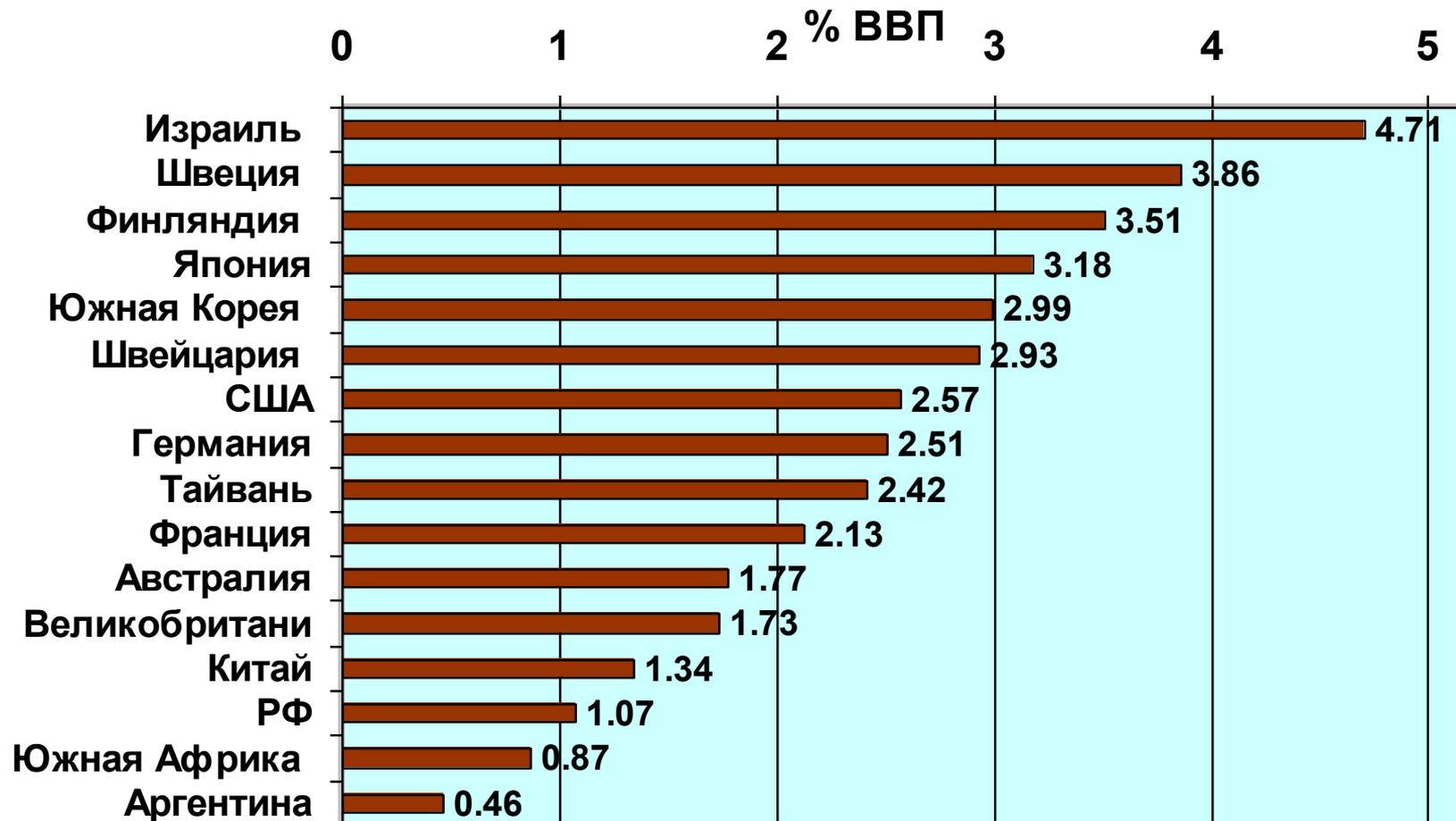
**2. Создание в РФ промышленного производства специальных волоконных световодов и эффективных источников излучения – лазерных диодов.**

**3. Решение проблемы широкополосного оптического усиления для волоконных световодов с низкими потерями и высокой пропускной способностью.**

**4. Совершенствование конструкции волоконных световодов и механизмов передачи света в них с целью уменьшения ограничений на мощность излучения, вводимого в световод.**

**5. Уменьшение энергопотребления для волоконно-оптических систем и снижение их стоимости.**

# *Затраты разных стран на исследования и разработки в области волоконной оптики*

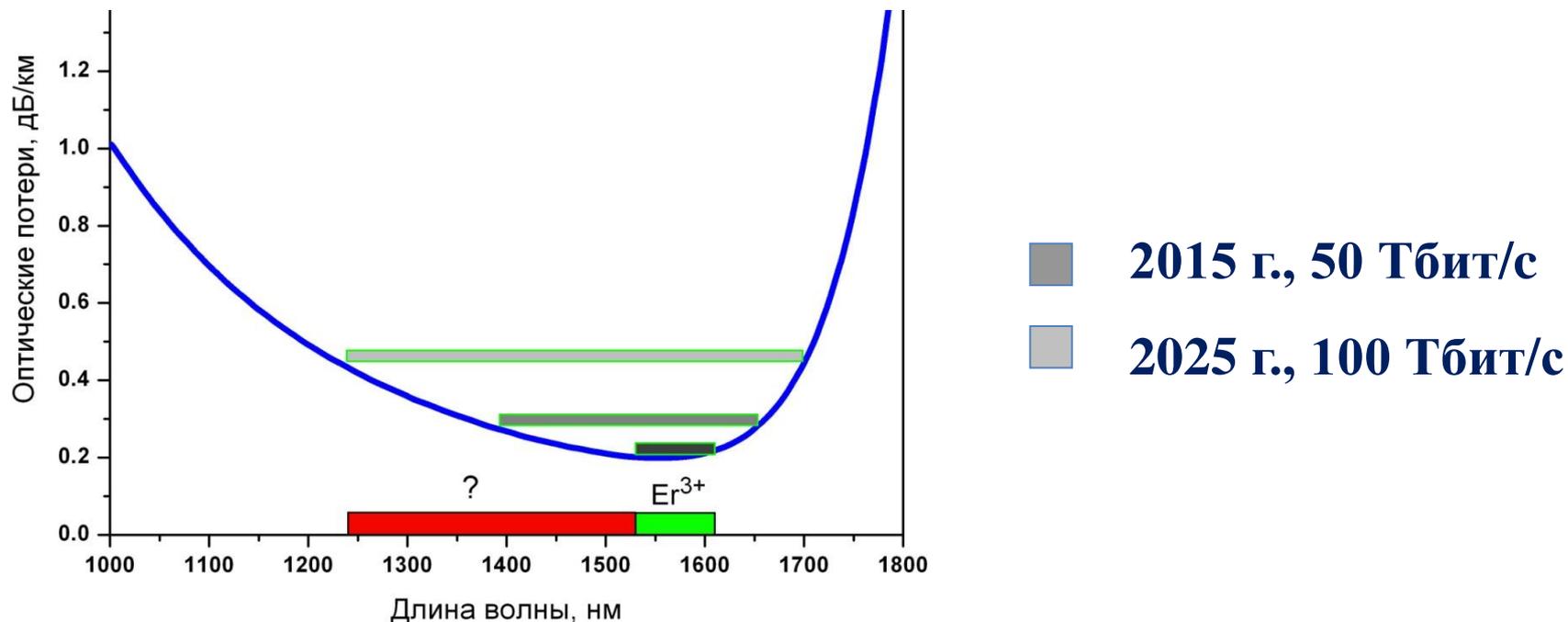


# *Состояние дел в мире в области волоконно-оптической связи*

- **Скорость передачи информации (по одному волоконному световоду):**
  - коммерческие системы 1-2 Тбит/с;
  - экспериментальные системы до 70 Тбит/с.
- **Волоконный световод приходит в каждый дом, обеспечивая населению широкополосный доступ (10Гбит/с) к Интернету.**

**В 2015 г. 5 миллиардов людей будут постоянно связаны через телекоммуникационные сети.**
- **Земной шар (океаны и континенты) покрыт сетью волоконных световодов с общей длиной 1000 млн. км. 2015 г. – эта цифра удвоится.**

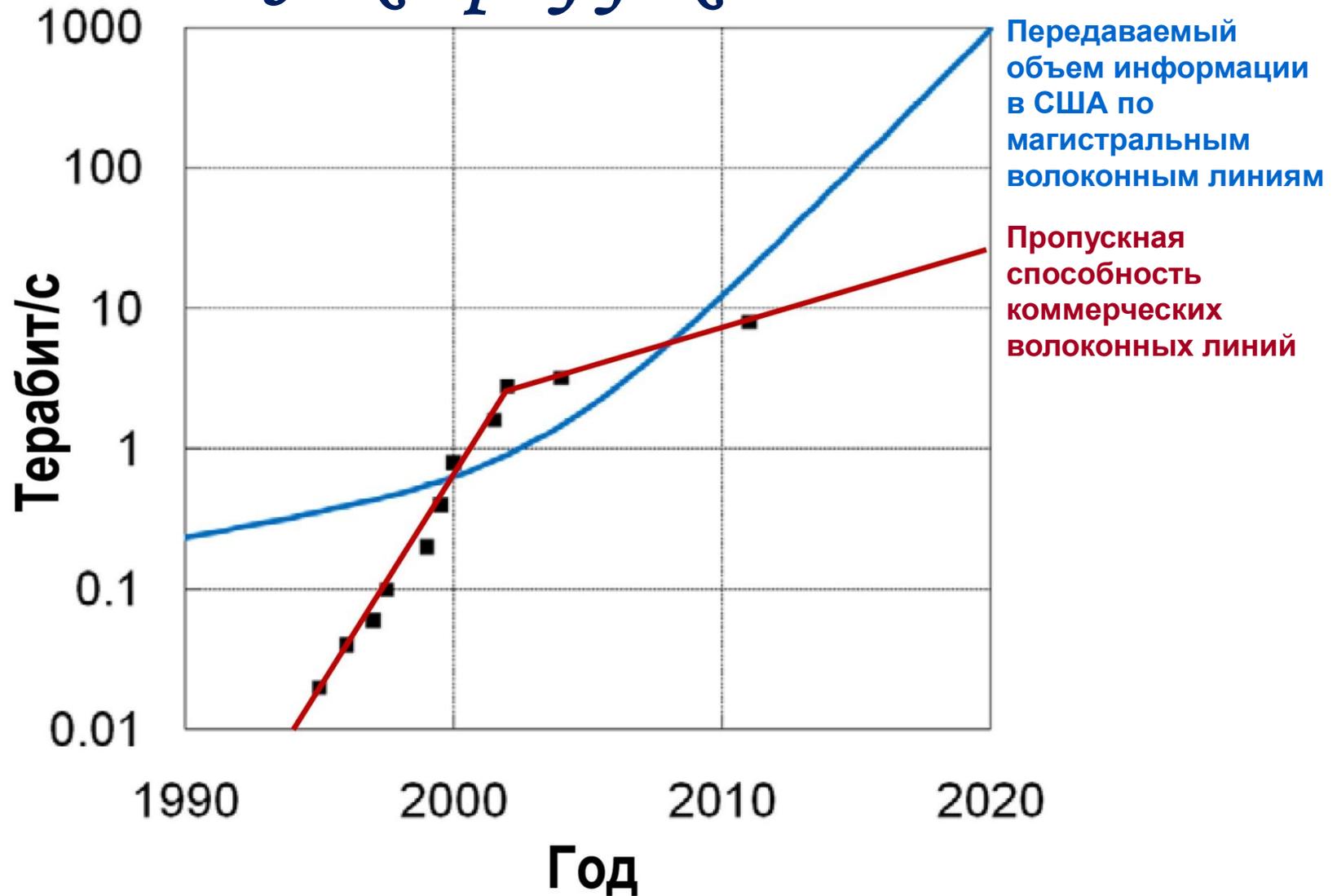
# Прогноз развития волоконно-оптической связи до 2025 г.



## Необходимы:

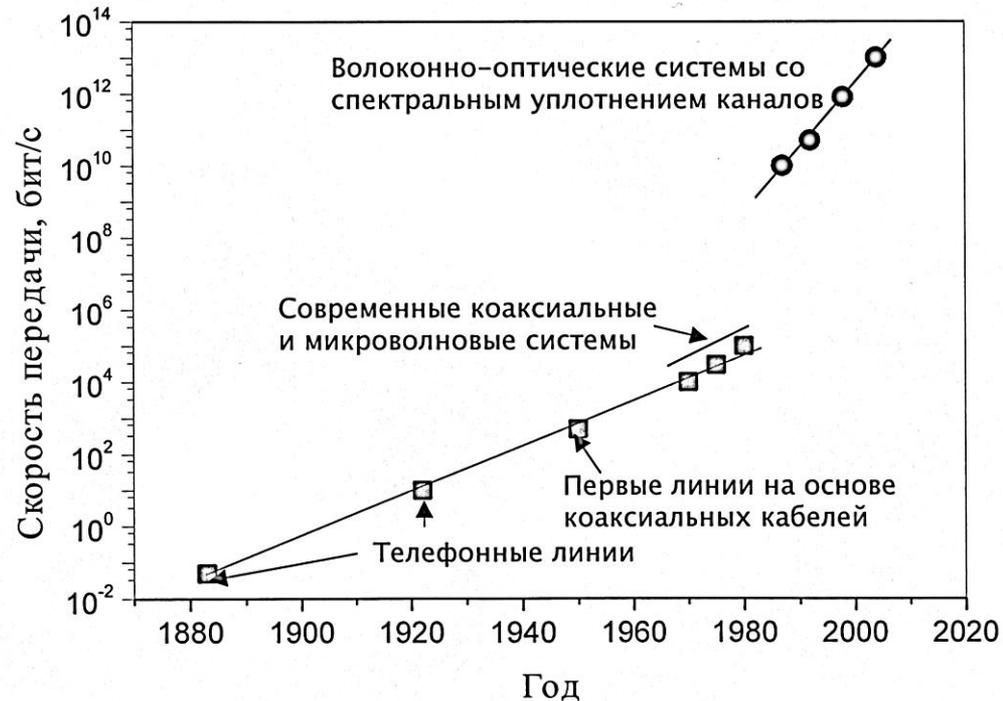
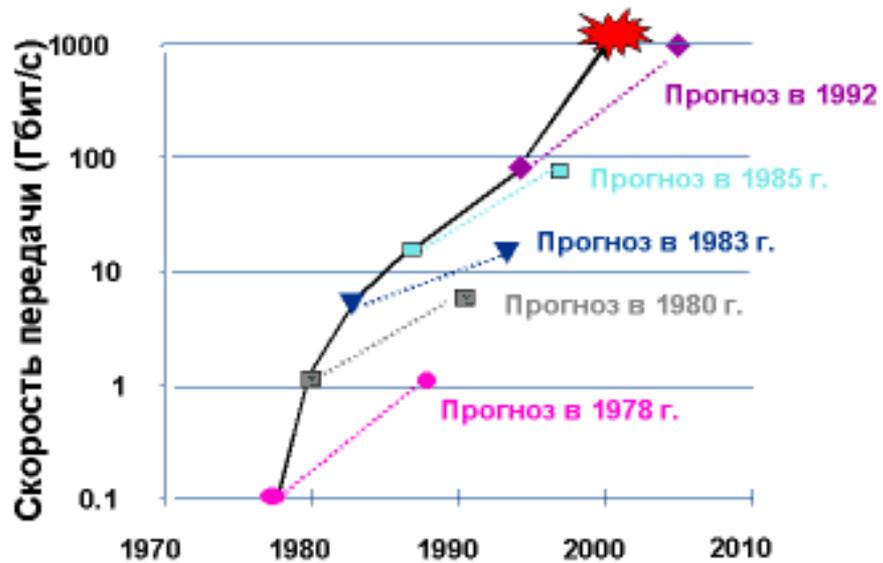
- волоконные лазеры и усилители для спектральной области 1300-1500 нм;
- волоконные световоды с низкой нелинейностью, большим диаметром сердцевины, полые.

# Фактор эффективности



**Несмотря на непрерывный рост трафика ВОЛС, наблюдается снижение пропускной способности из-за недозагрузки каналов (возможности ВОЛС опережают потребности клиентов).**

# Рост скорости передачи информации в волоконно-оптических линиях



**Потребности в совершенствовании ВОЛС определяются, прежде всего, постоянно растущими требованиями на скорость передачи информации.**

$$V(\text{бит/с}) = N \cdot b(\text{бит/с}),$$

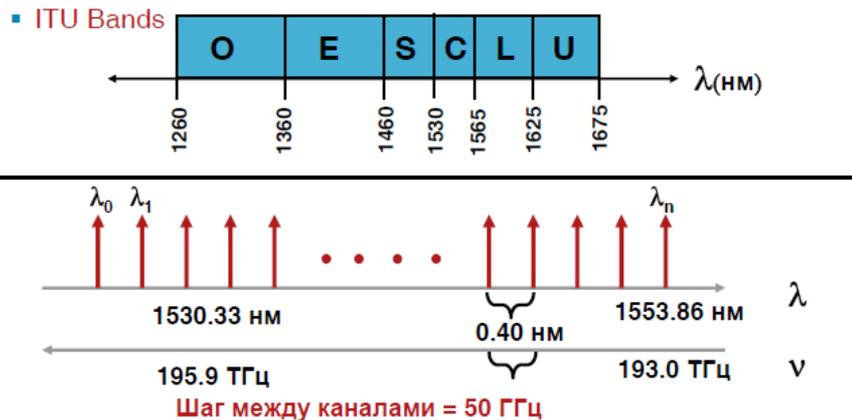
где  $N$  — число спектральных каналов, вводимых в один световод,  
 $b$  — скорость передачи информации в одном канале.

# Анализ возможности увеличения $N$

*Увеличение числа каналов в одном световоде*

**Расширение  
спектральной области  
передачи информации**

**Рост мощности  
сигналов в сердцевине  
световода**

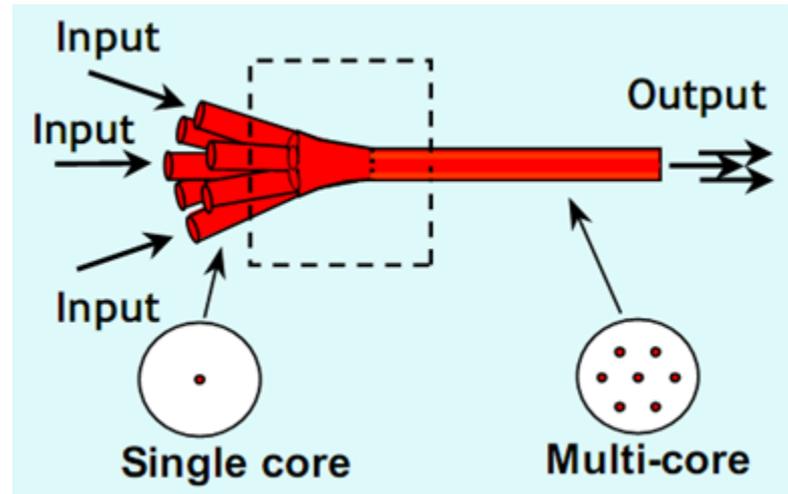
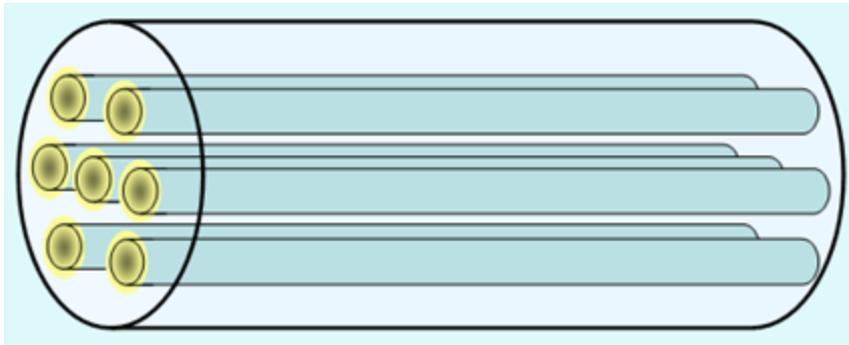


Необходимость разработки эффективных волоконных лазеров и широкополосных волоконных усилителей.

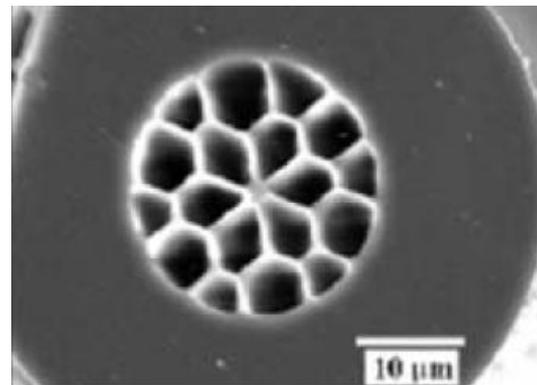
Необходимость исключения перекрестных помех из-за нелинейного взаимодействия оптических сигналов, что создает ограничения в возможности мультиплексирования каналов.

# Анализ возможности увеличения $b$

## Применение многосердцевинных волоконных световодов (*MCF – Multi-core fiber*)

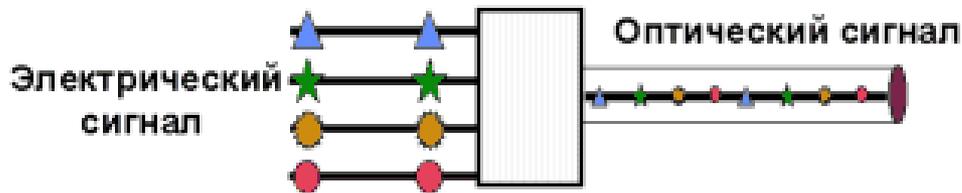


## Применение фотонно-кристаллических (микроструктурированных) волоконных световодов



# Технологии уплотнения сигнала в волоконно-оптических линиях связи

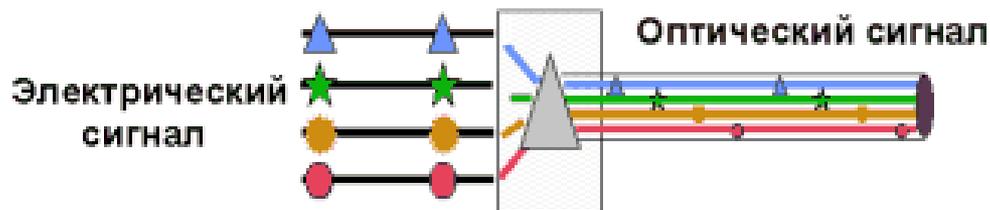
## Временное уплотнение (TDM)



Несколько электрических сигналов передаются в волокно последовательно, один за другим из каждого канала.

**Недостаток:** скорость передачи информации принципиально ограничена величиной 40 Гбит/с.

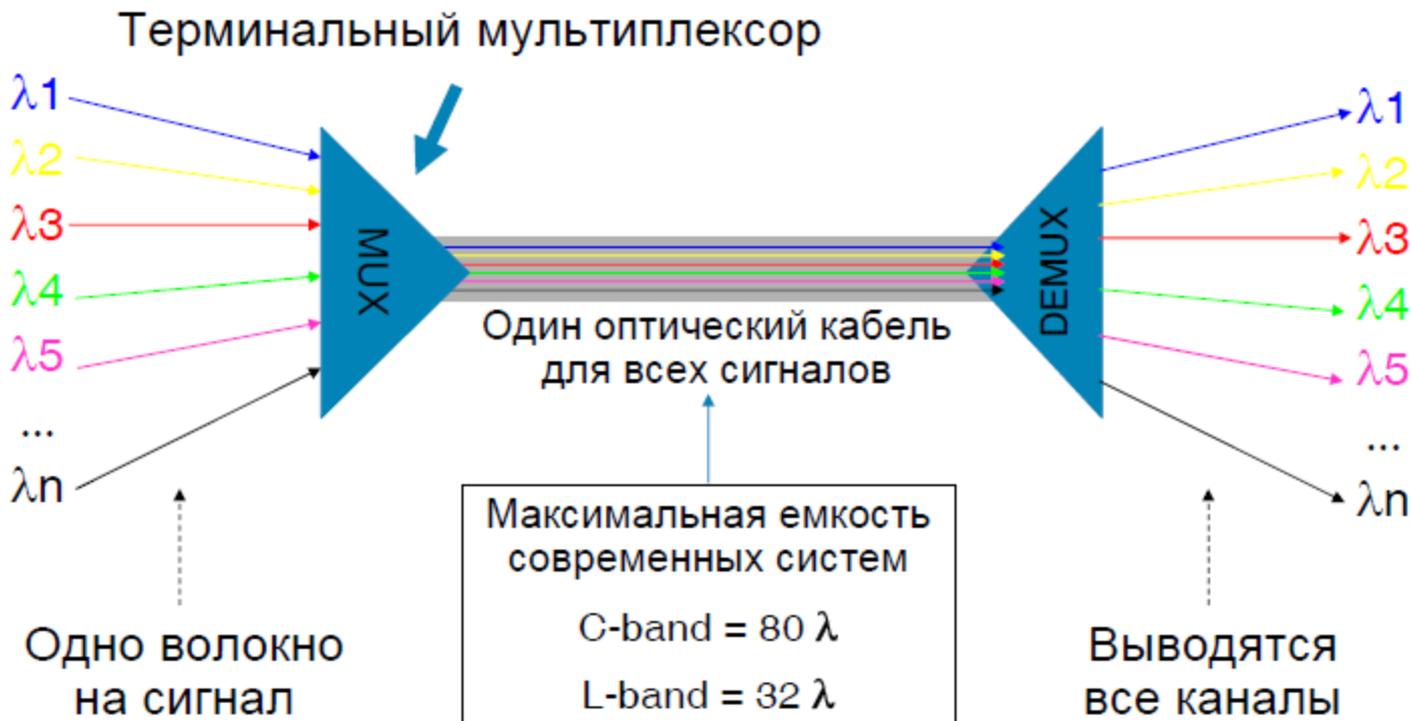
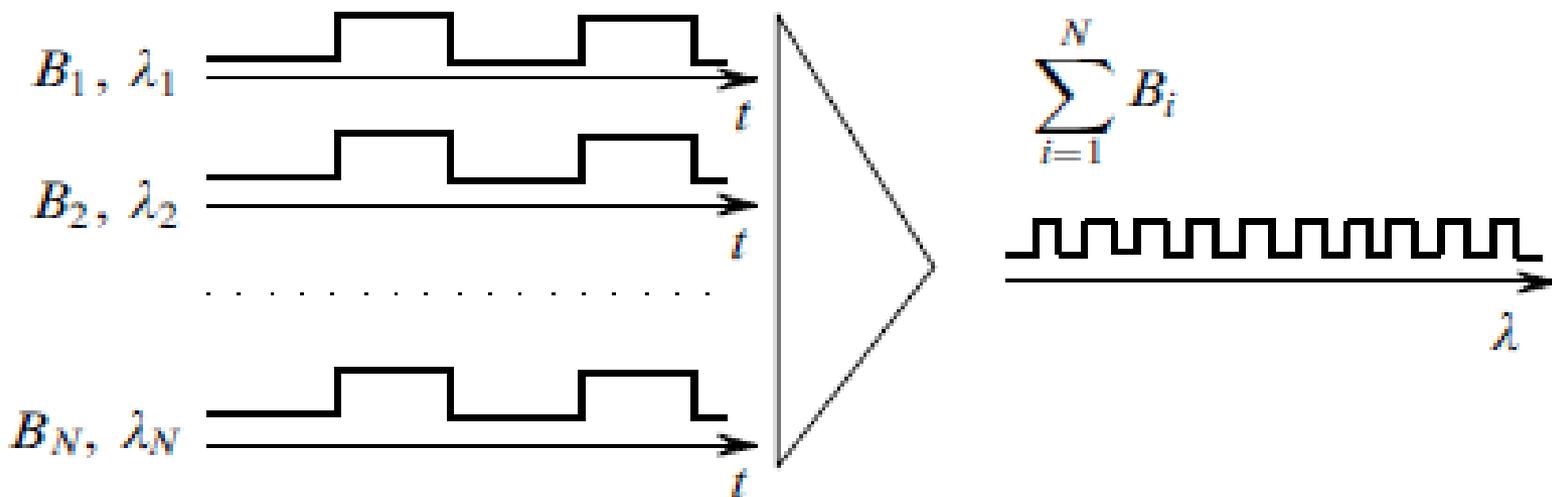
## Спектральное уплотнение (WDM – Wave Division Multiplexing)



В волокно вводятся несколько сигналов разной несущей длины волны (частоты).

Для реализации этой технологии *необходимо*, чтобы передаваемые сигналы не искажались и чтобы сигналы с разными частотами (длинами волн) не взаимодействовали между собой.

# Физический механизм WDM-технологии



# *История создания и виды WDM-связи*

**1995 г.** – начало практического использования ВОЛС со спектральным уплотнением;

**1998-2000 г.г.** – создание систем плотного (DWDM) и сверхплотного (HDWDM) спектрального уплотнения;

**1999-2000 г.г.** – создание оптических (неэлектронных) переключателей спектральных каналов;

**2000 г.** – первое использование систем «грубого» спектрального уплотнения (CWDM);

**2000-2002 г.г.** – разработаны DWDM-системы с пропускной способностью до 1,6 Тбит/с.

## Для диапазона C-band

*CWDM*:  $\Delta\lambda = 8 \text{ нм}$

*DWDM*:  $\Delta\lambda = 0,4 \text{ нм}$

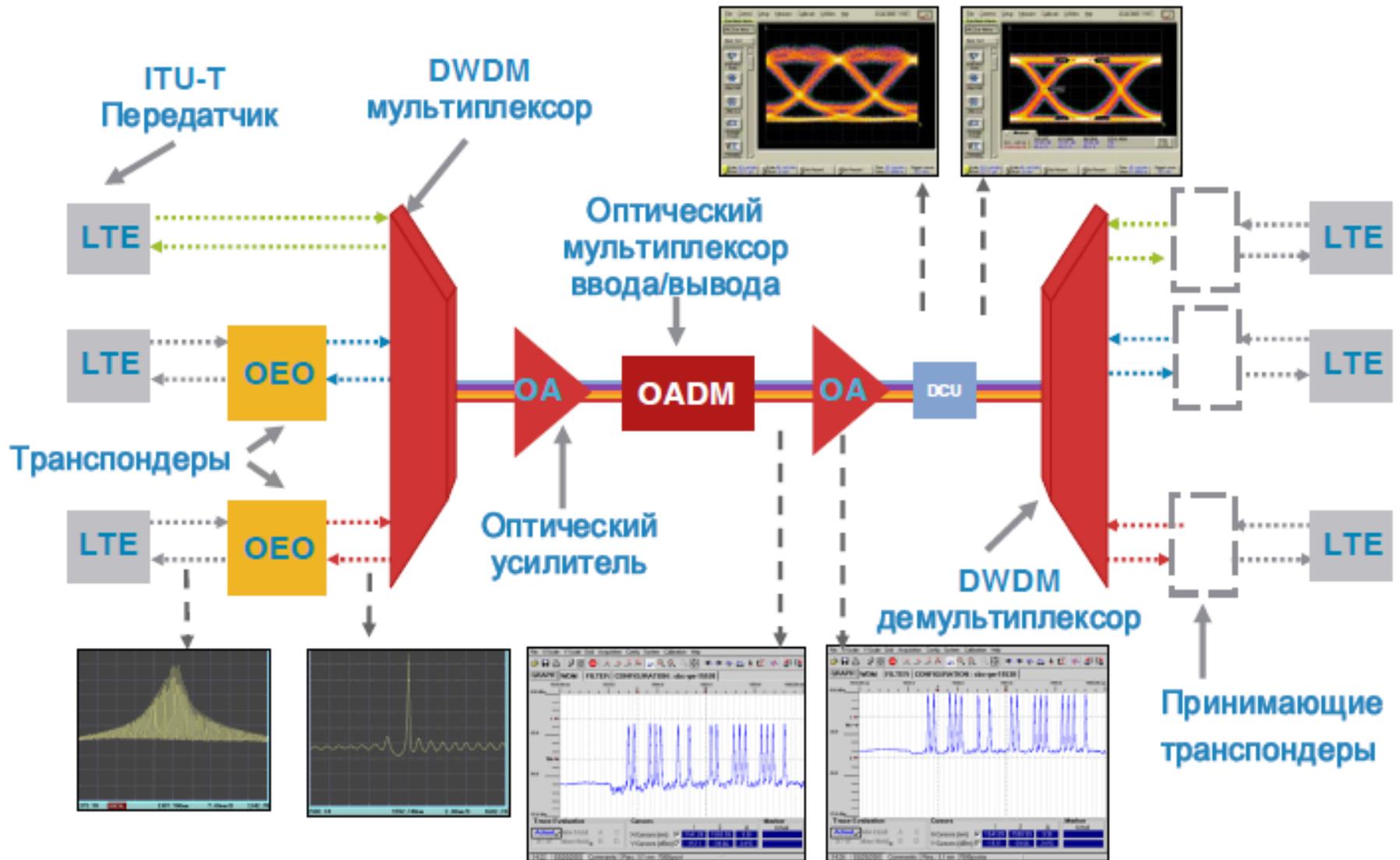
*HDWDM*:  $\Delta\lambda < 0,4 \text{ нм}$

## Диапазоны передачи данных

- Оптическая передача данных осуществляется в областях длин волн, называемых “диапазонами”.
- Коммерческие DWDM системы обычно передают в C-диапазоне  
Главным образом из-за оптоволоконных усилителей с присадкой эрбия (EDFA).
- Коммерческие CWDM системы обычно работают в диапазонах S, C и L.

<i>Диапазон (Band)</i>	<i>Длина волны (нм)</i>
<i>O</i>	1260 – 1360
<i>E</i>	1360 – 1460
<i>S</i>	1460 – 1530
<i>C</i>	1530 – 1565
<i>L</i>	1565 – 1625
<i>U</i>	1625 – 1675

# Общая архитектура WDM-системы



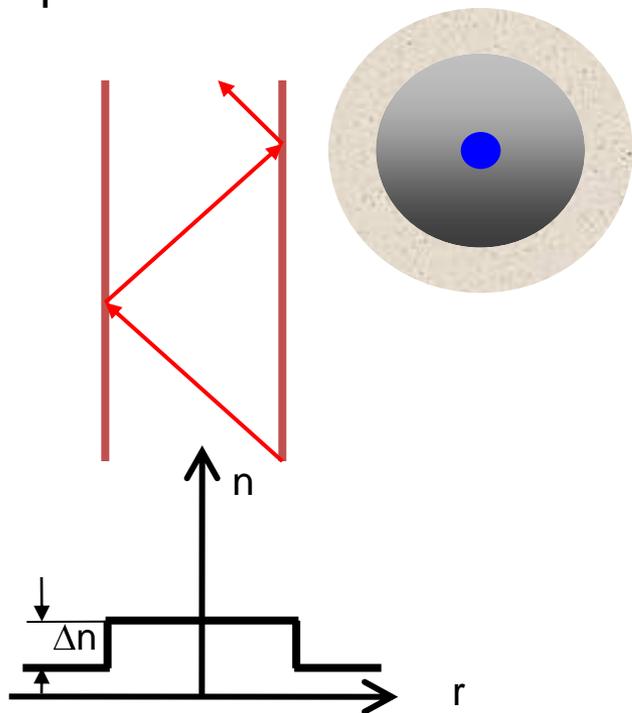
# *Достоинства и недостатки WDM-технологии*

- 1. Позволяет существенно увеличить скорость передачи информации по волоконно-оптической линии без прокладки дополнительных волоконно-оптических кабелей.**
- 2. Позволяет организовать двустороннюю многоканальную передачу трафика по одному волокну.**
- 3. Реализует возможность выбирать для отдельного канала значение скорости (уровень иерархии), не зависящее от скорости других каналов.**

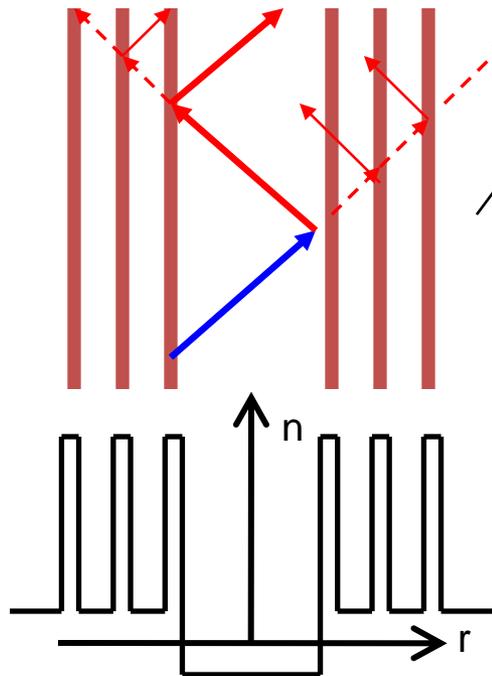
- 1. Высокая стоимость аппаратуры (мультиплексоры, узкополосные полупроводниковые лазеры с высокой стабильностью длины волны, широкополосные оптические усилители, фильтры и т.д.).**
- 2. Значительные потери мощности сигналов в мультиплексорах/демультиплексорах.**
- 3. Несовпадение, во многих случаях, рабочих длин волн WDM-оборудования.**

# Механизмы распространения света

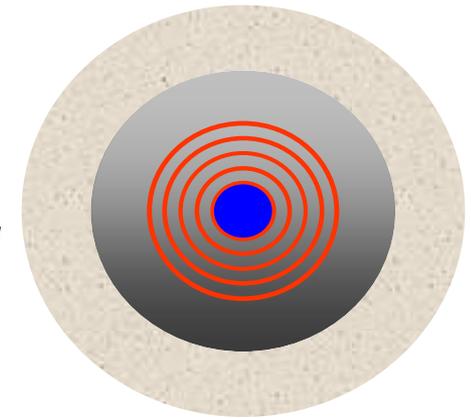
**Стандартные световоды:**  
Полное внутреннее отражение



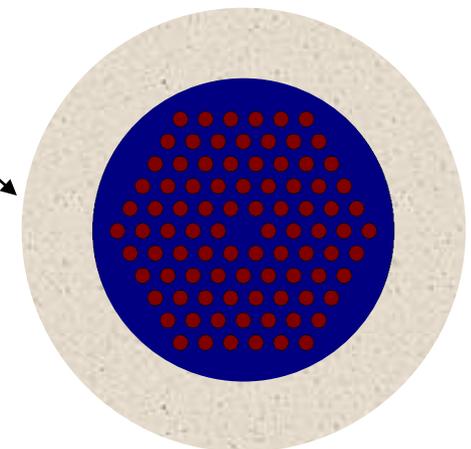
**Световоды на основе запрещенной зоны:**



**1D-структура**  
(Брэгговские световоды)



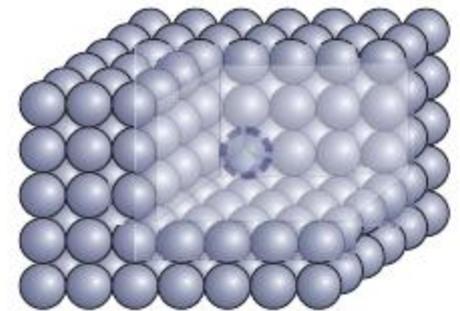
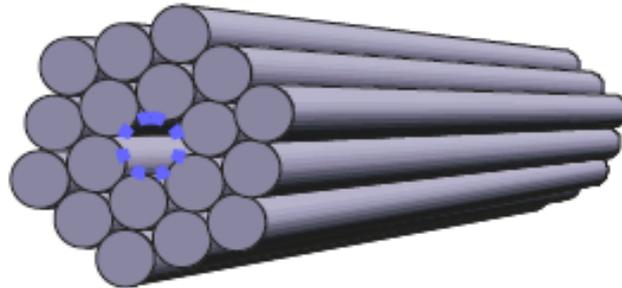
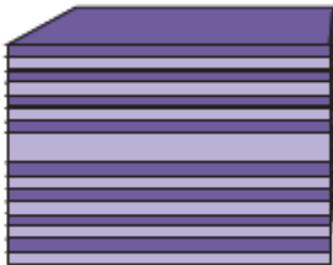
**2D-структура**



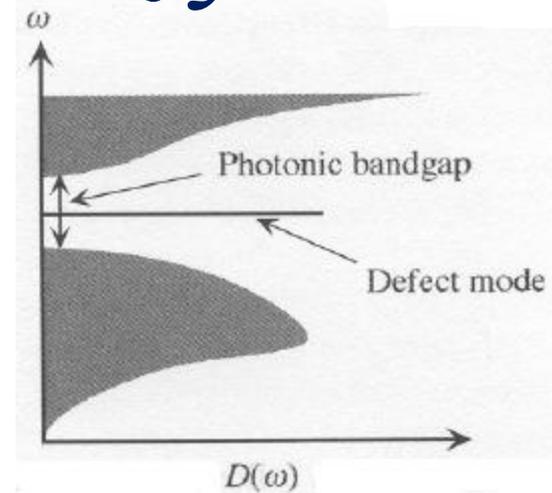
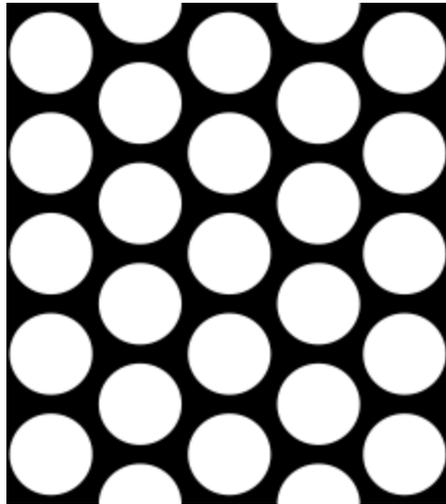
# *Понятие о фотонных кристаллах*

Идея создания фотонных кристаллов была высказана в 1986 г. американским ученым Э.Яблоновичем, который в 1991 г. впервые изготовил опытный образец.

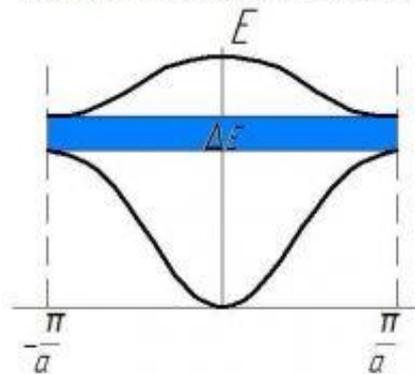
**Фотонный кристалл – это высокосимметричная диэлектрическая структура с периодической модуляцией показателя преломления, в которой световые волны не могут распространяться в некоторой полосе частот в одном, двух или трех пространственных измерениях.**



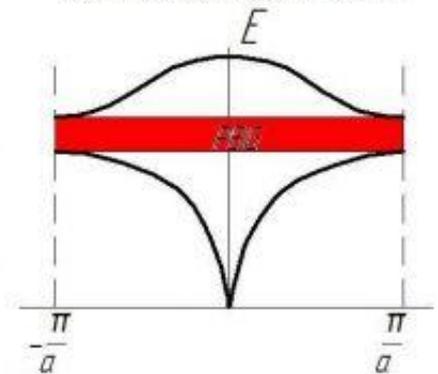
# Формирование запрещенных фотонных зон



Электронная запрещенная зона

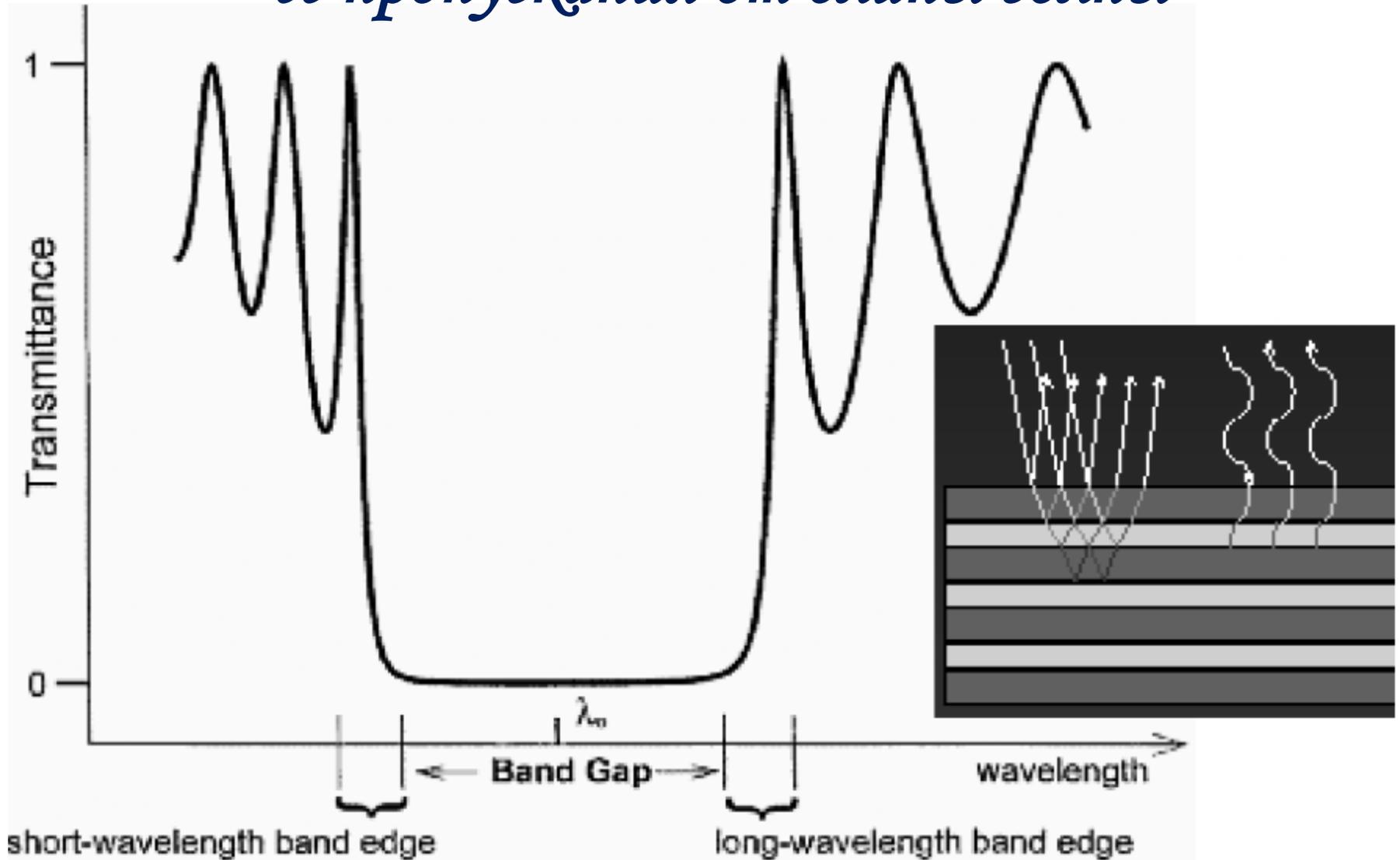


Фотонная запрещенная зона



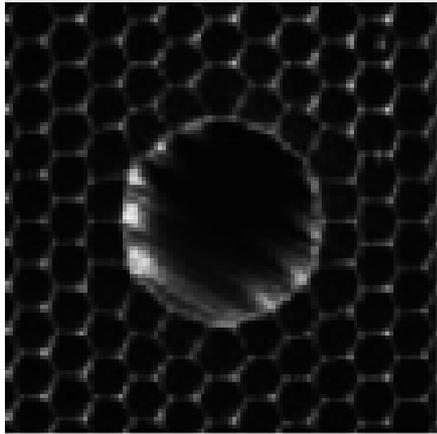
**Периодическое изменение показателя преломления создает дополнительное поле в кристалле, приводящее к образованию запрещенных фотонных зон (аналогично спектру электронов в реальном кристалле).**

# Одномерная фотонная структура и зависимость ее пропускания от длины волны

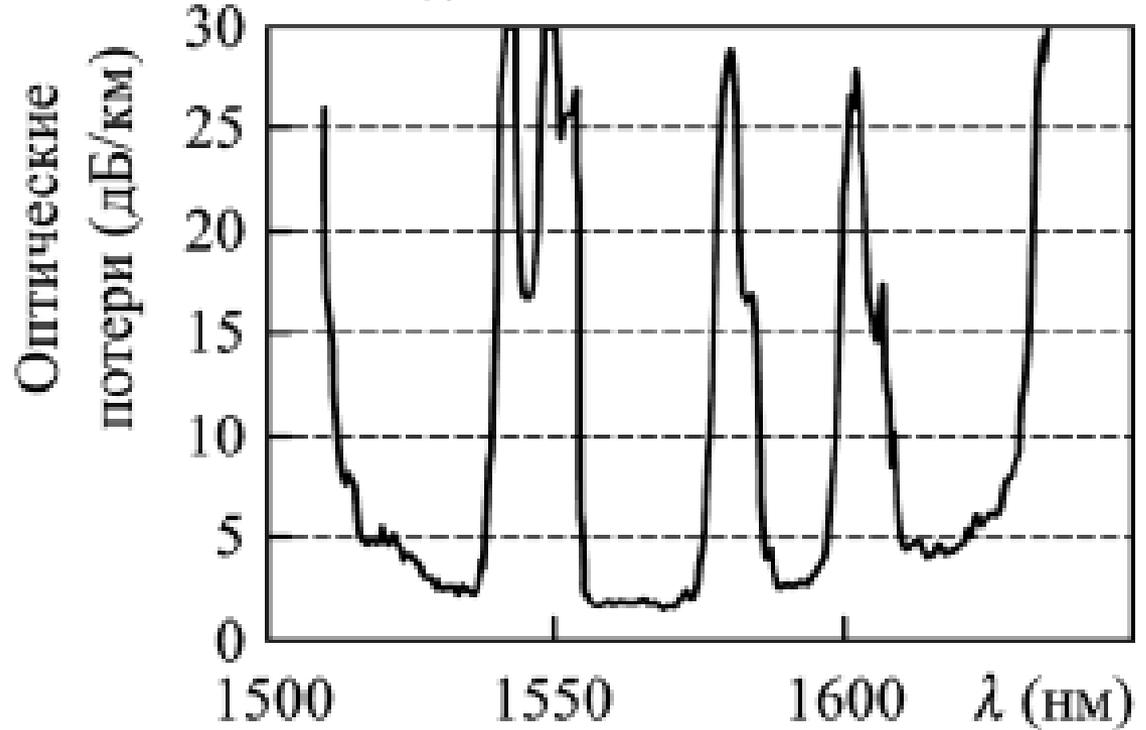


# Структура полого волокнообразного световода и его спектр оптических потерь

$$(\alpha_{\text{дБ}})_{\text{min}} = 1,7 \text{ дБ/км}$$



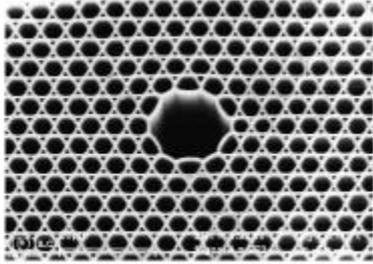
*a*



*b*

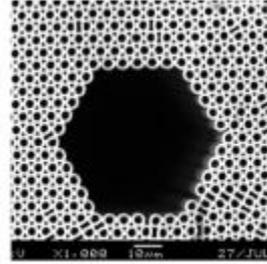
**Спектральные области низких оптических потерь соответствуют запрещенным фотонным зонам оболочки.**

# Виды фотонно-кристаллических волокон

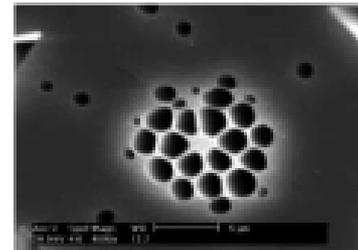


(a)

**Полое волокно с ФК оболочкой**

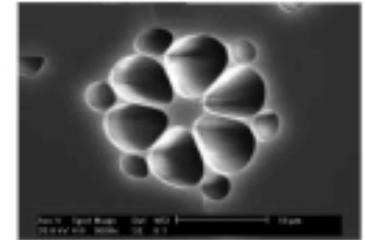


(b)

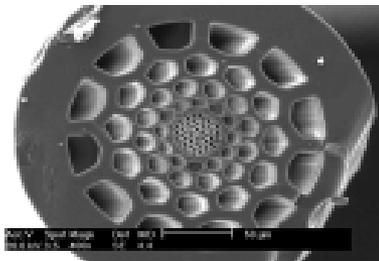


(a)

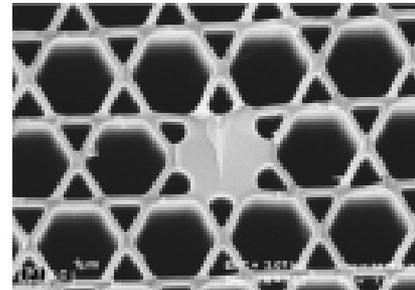
**Волокно с высокой оптической нелинейностью**



(b)

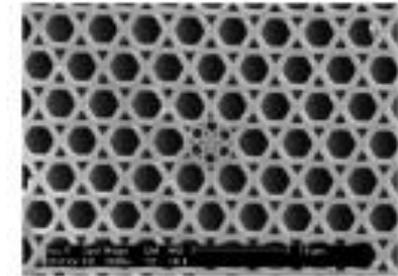


**Волокно с двойной МС оболочкой**

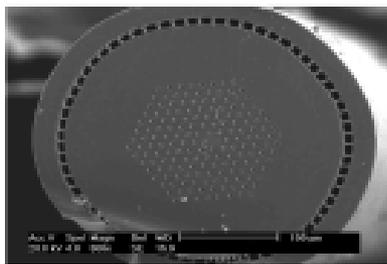


(a)

**Волокно из многокомпонентного стекла**

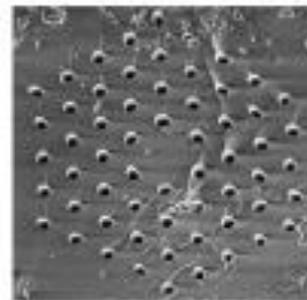


(b)



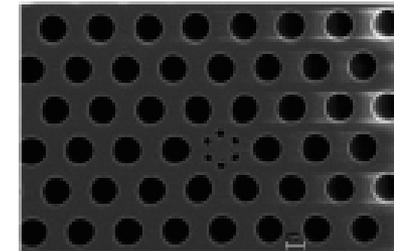
(a)

**Волокно с двойной оболочкой и легированной сердцевиной**



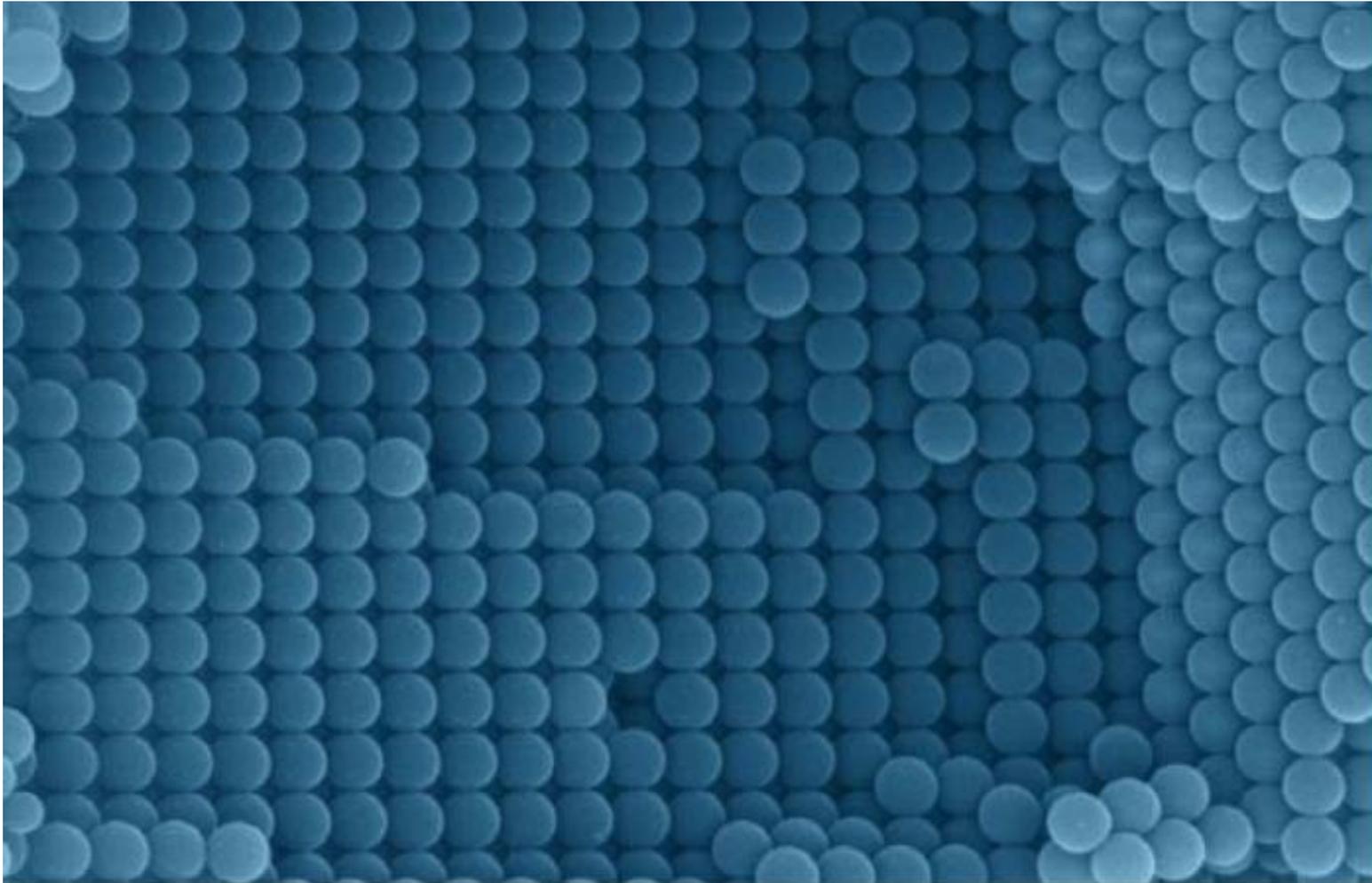
(a)

**Волокно с большой площадью моды**

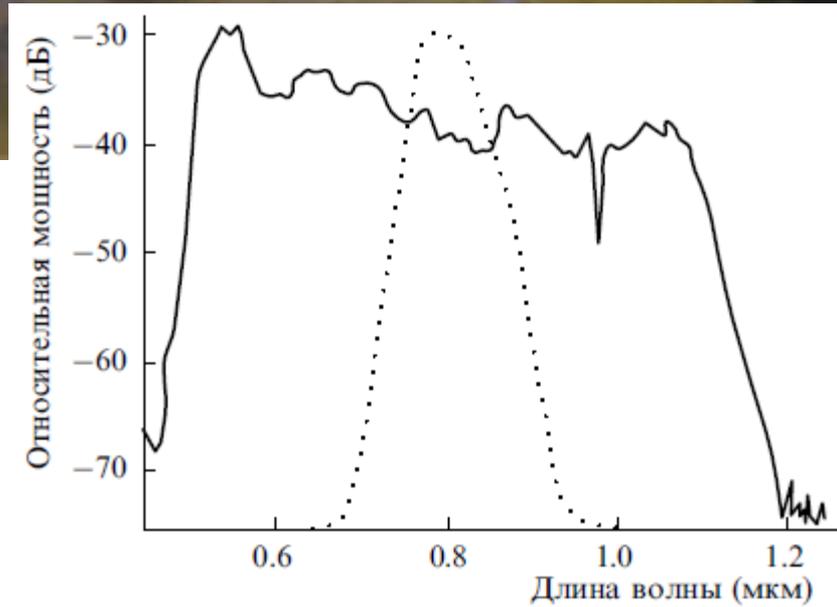
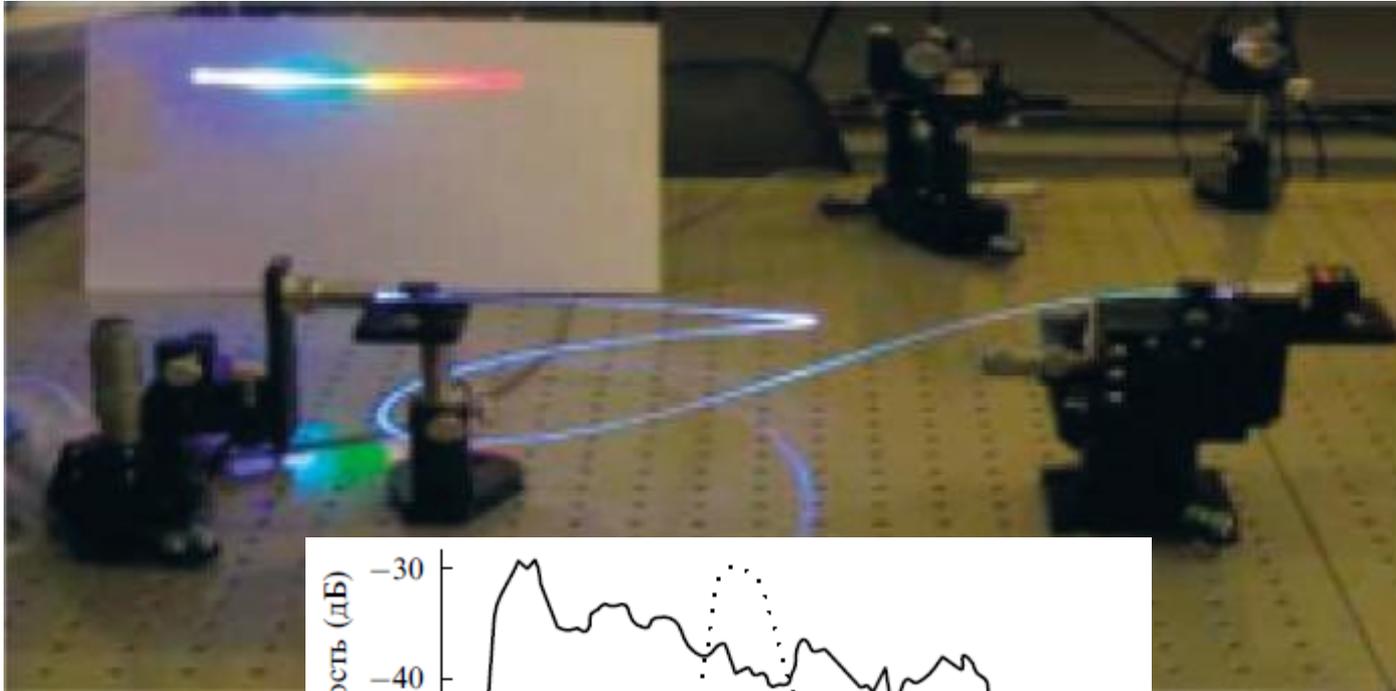


**Волокно, модифицированное наноразмерными отверстиями**

*Микрофотография фотонного кристалла на основе сферических микрочастиц полистирола*



# Генерация суперконтинуума с помощью ФК волокна



# *Применение фотонно-кристаллических волокон*

- 1. Новые оптические технологии в оптоинформатике и вычислительной технике на основе *фотонных интегральных схем* – альтернативы электронным БИС.**
- 2. Новый класс дисплеев, в которых манипуляция цветом пикселей осуществляется при помощи фотонных кристаллов.**
- 3. Лазеры на фотонных кристаллах (низкопороговые и беспороговые лазеры).**
- 4. Создание «суперлинз», позволяющих фокусировать свет в точку размерами меньше длины волны.**
- 5. Фотонные сверхпроводники.**