

Волоконные световоды на основе запрещенной фотонной зоны

М.Е.Лихачев

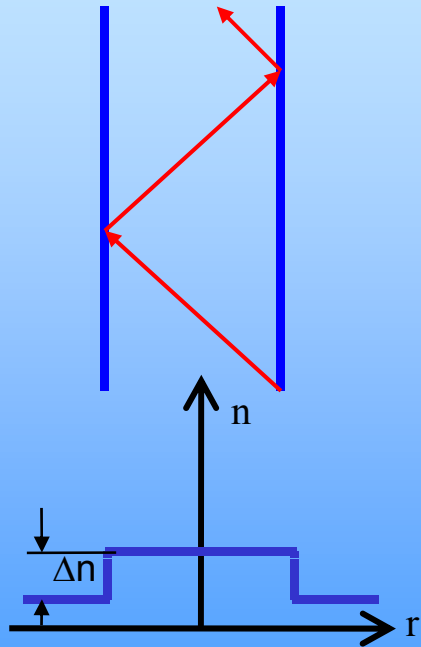
Научный центр волоконной оптики РАН

Содержание

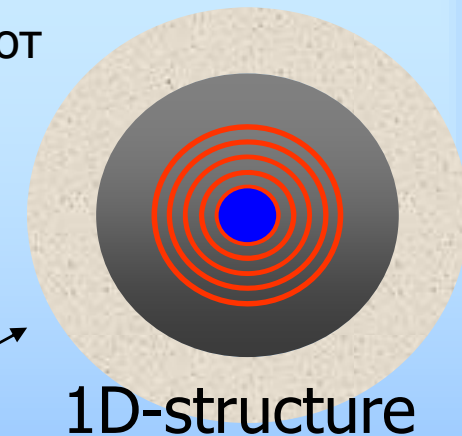
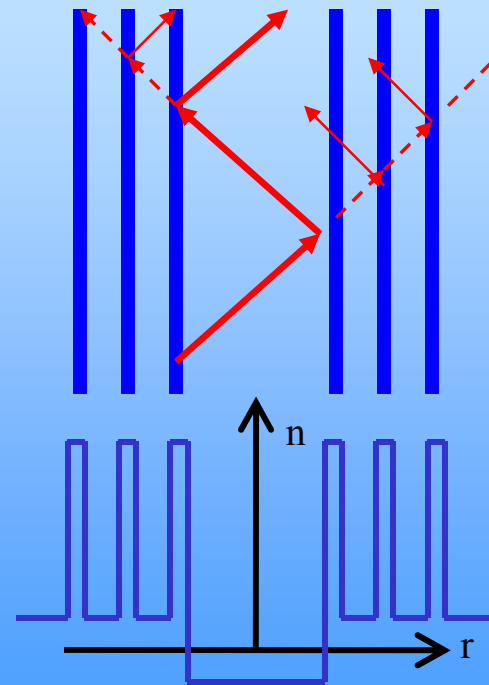
- Принцип работы световода на основе запрещенной фотонной зоны
- Световоды с воздушной сердцевиной
- Целиком кварцевые световоды с двухмерной отражающей оболочкой
- Целиком кварцевые световоды с одномерной отражающей оболочкой (брэгговские световоды)
- Выводы

Механизмы распространения света

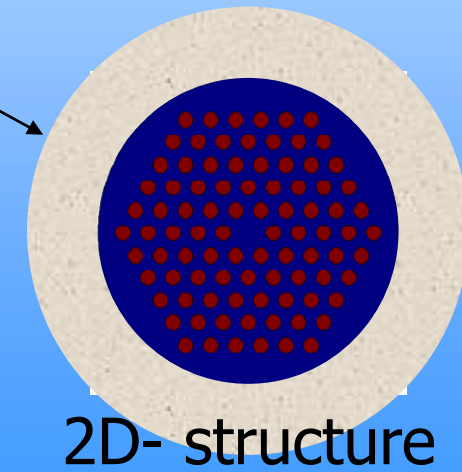
Стандартные световоды:
**Полное внутренне
отражение**



Световоды на основе ЗФЗ:
**Френелевское отражение от
периодической структуры**



1D-structure



2D-structure

Резонансы в спектре пропускания

$$I \text{ (отражения)} = 1 - I \text{ (пропускания)}$$

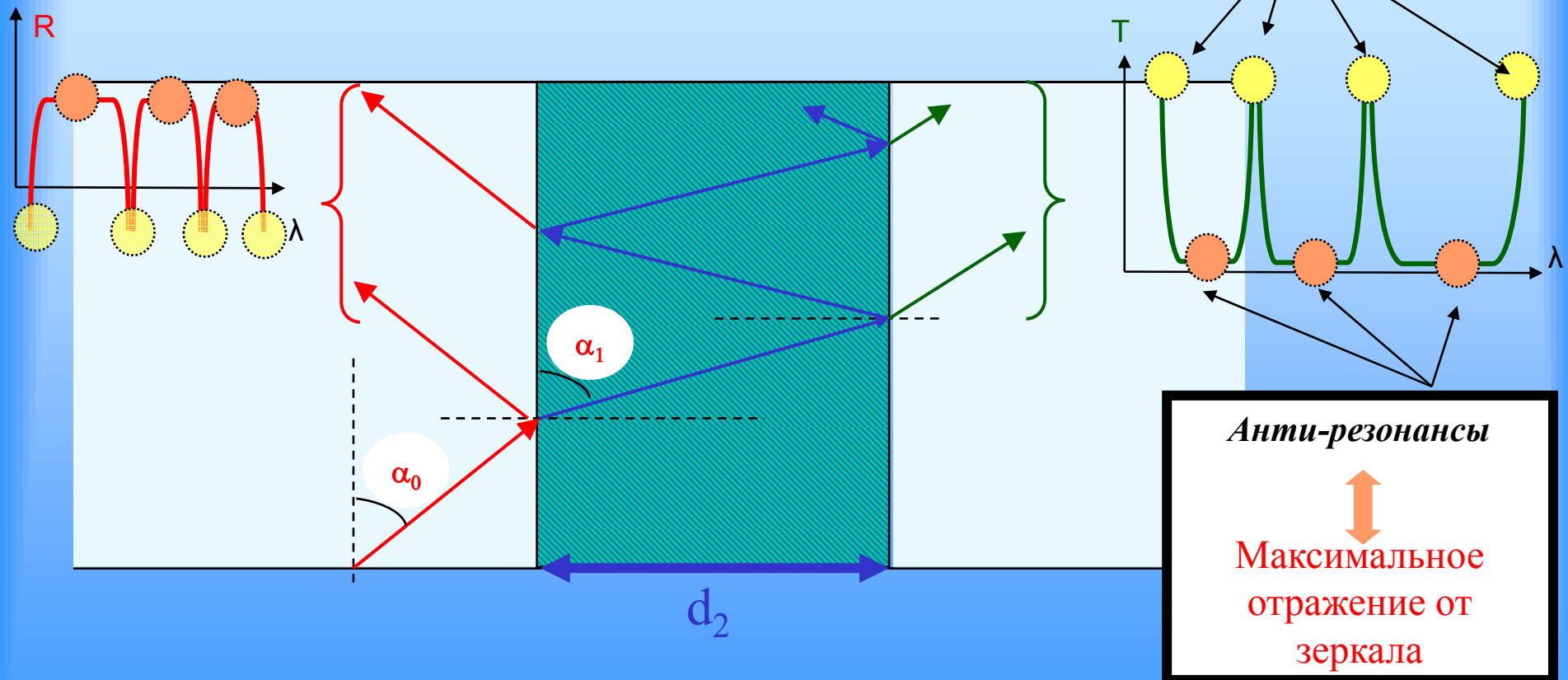
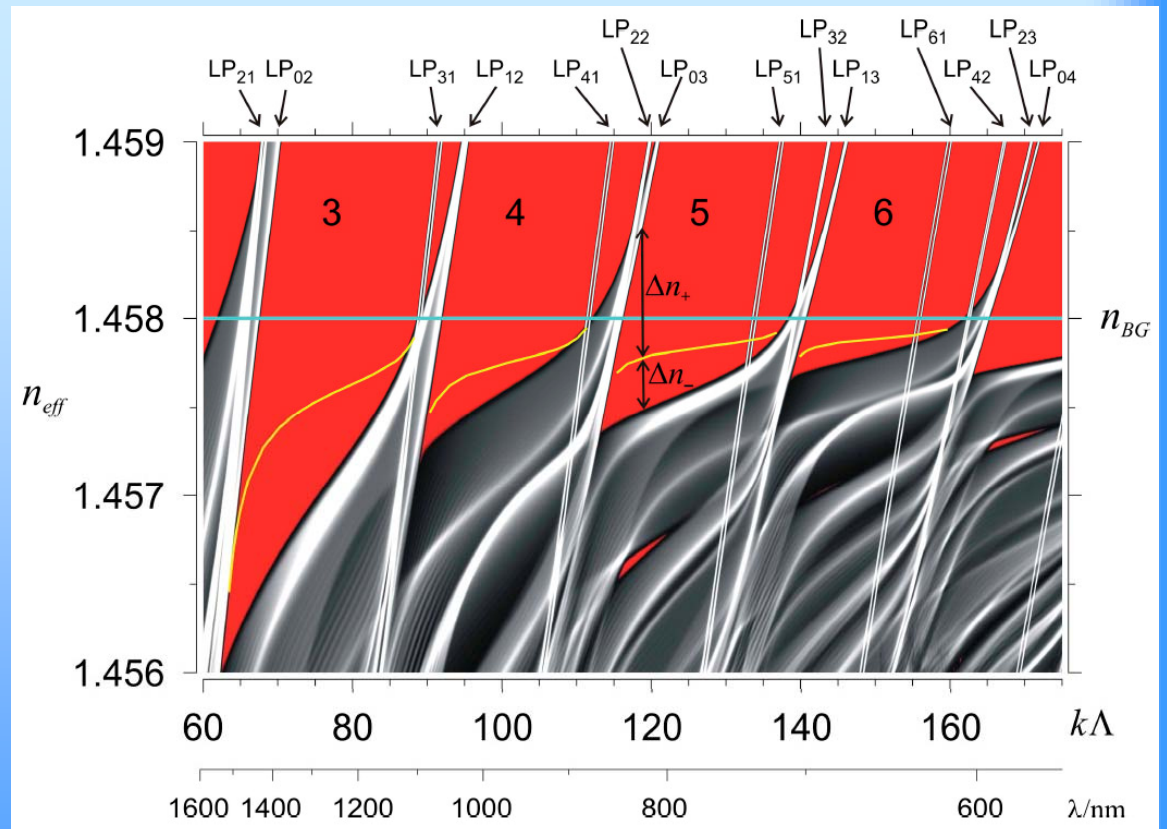
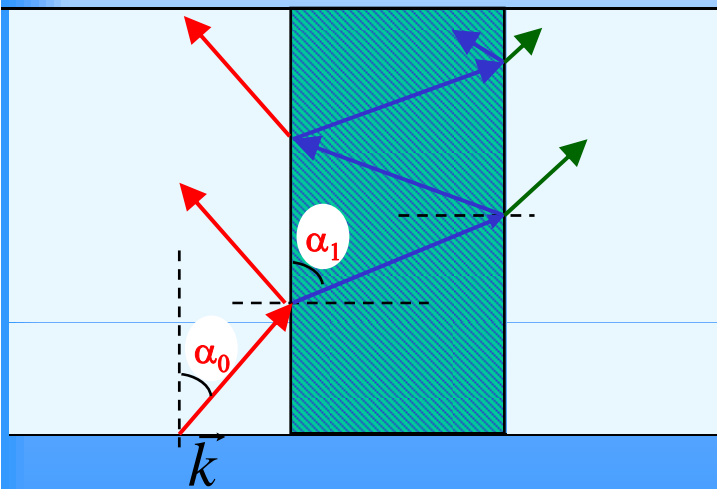
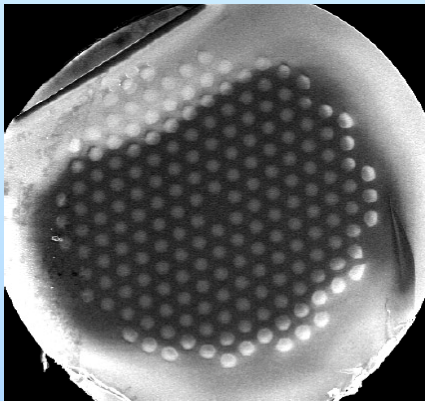


Диаграмма фотонных состояний

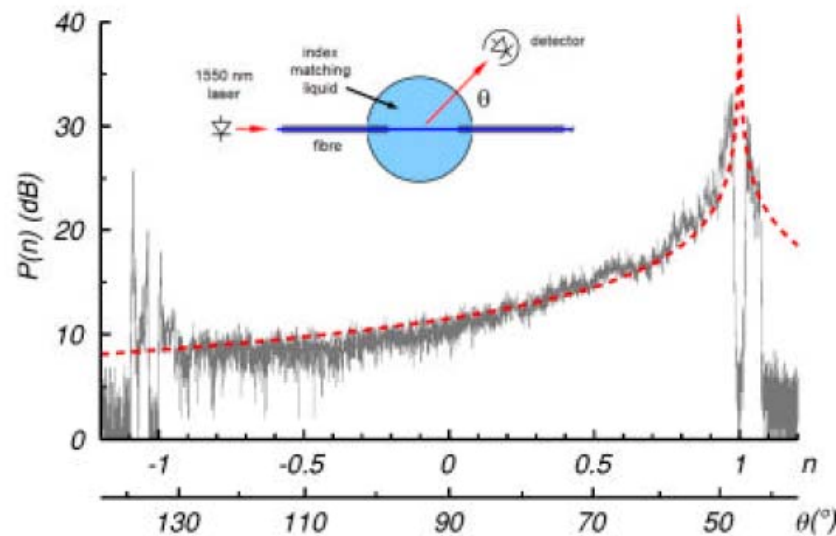
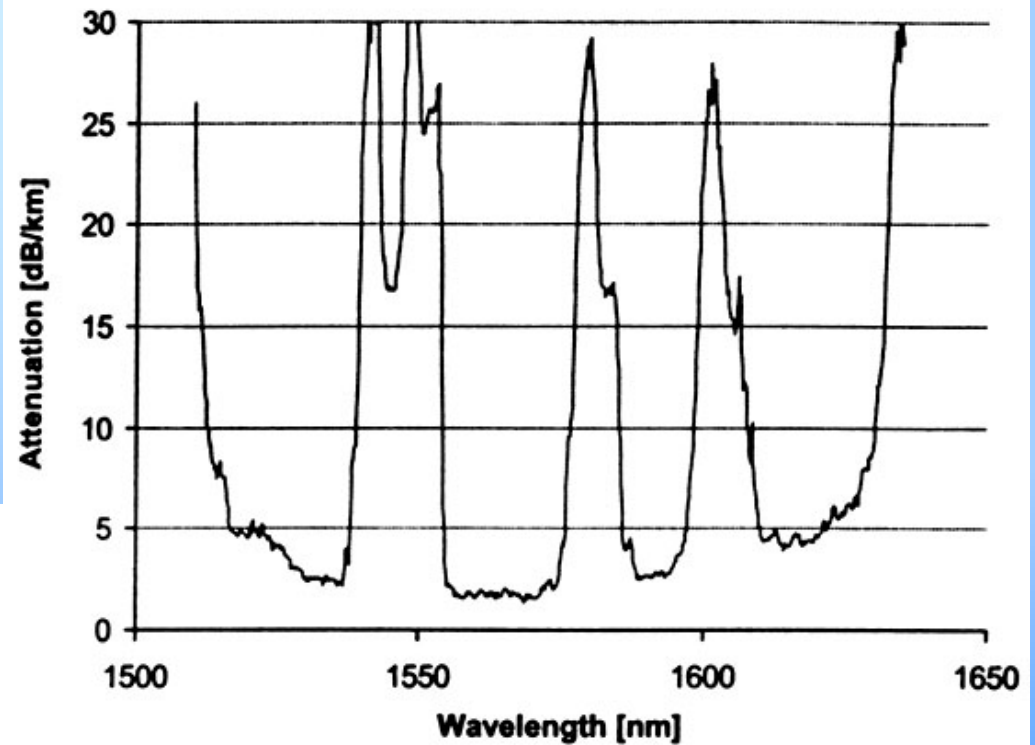
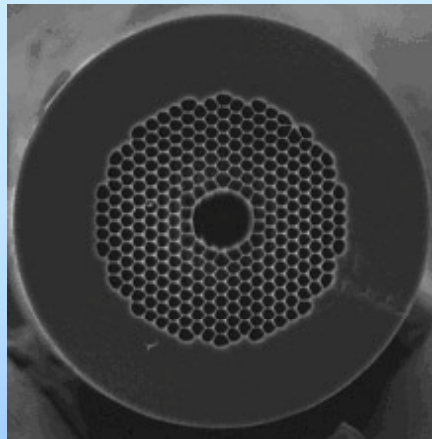


$$n_{eff} = \frac{\beta}{|\vec{k}|}$$

Световоды с воздушной сердцевиной

(минимальные оптические потери)

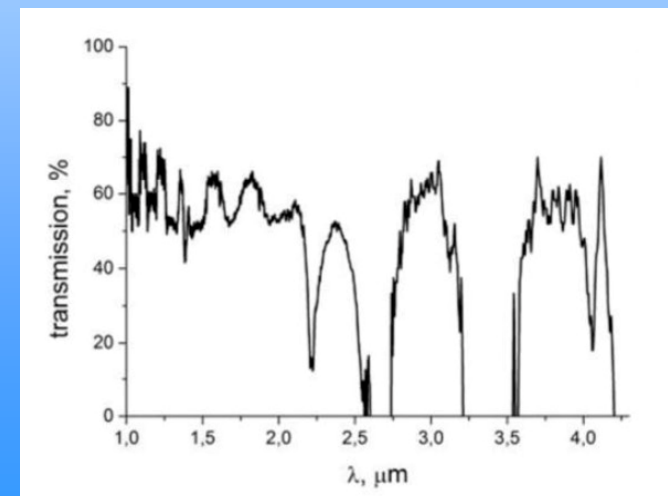
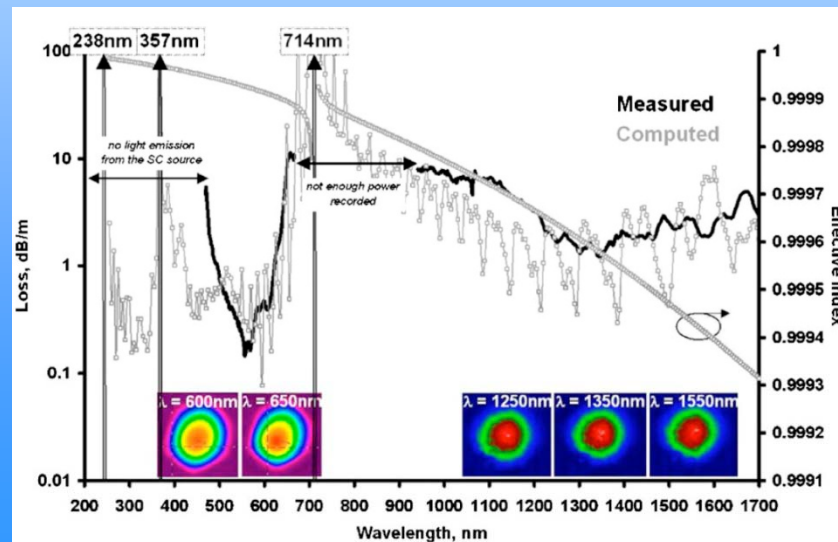
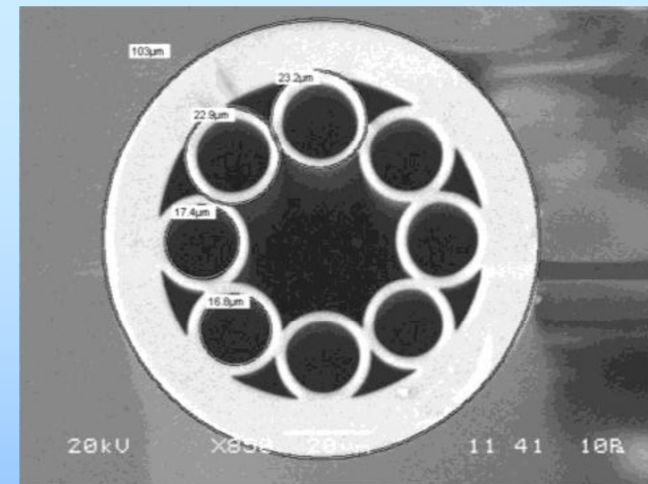
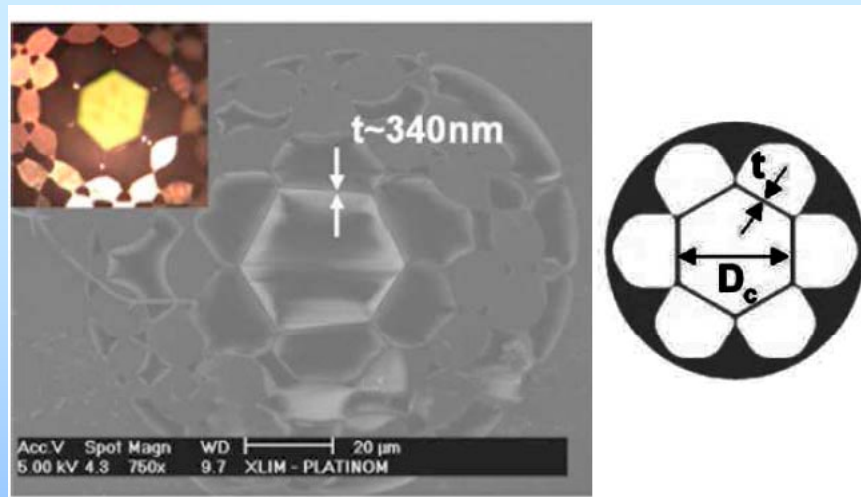
[Russell P.St.J., et al, *Opt. Express*, 13, 236-244 (2005),
B. J. Mangan et al, *OFC'2004*, paper PDP24.]



Световоды с воздушной сердцевиной

(упрощенный дизайн отражающей оболочки)

[Gerome F., et al, *Opt. Lett.*, 35, 1157-1159 (2010),
Pryamikov A.D., et al, *Opt. Express* 19, 1441-1448 (2011)]

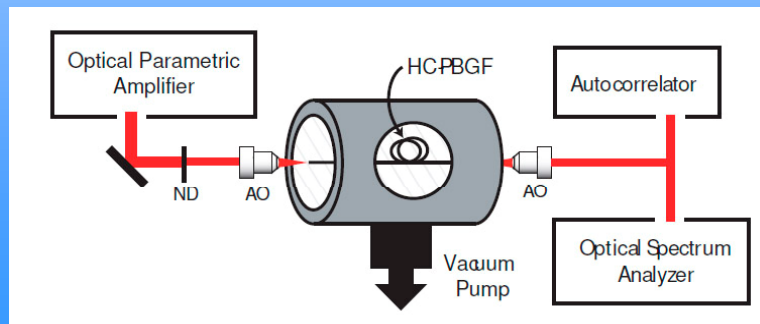
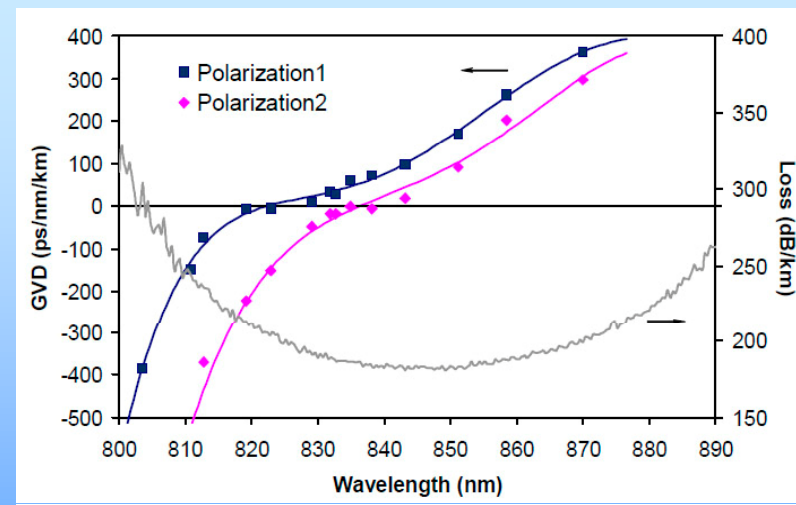


Световоды с воздушной сердцевиной (применение)

[A.R.Bhagwat and A.L.Gaeta, *Optics Express*, v.16, p.5035 (2008),
Shephard J., et al, *Opt. Express* 12, 717-723 (2004),
Bouwman G., et al, *Opt. Express* 11, 1613-1620 (2003),
Benabid F., et al, *Phys. Rev. Lett.* 93(12), 123903 (2004)]

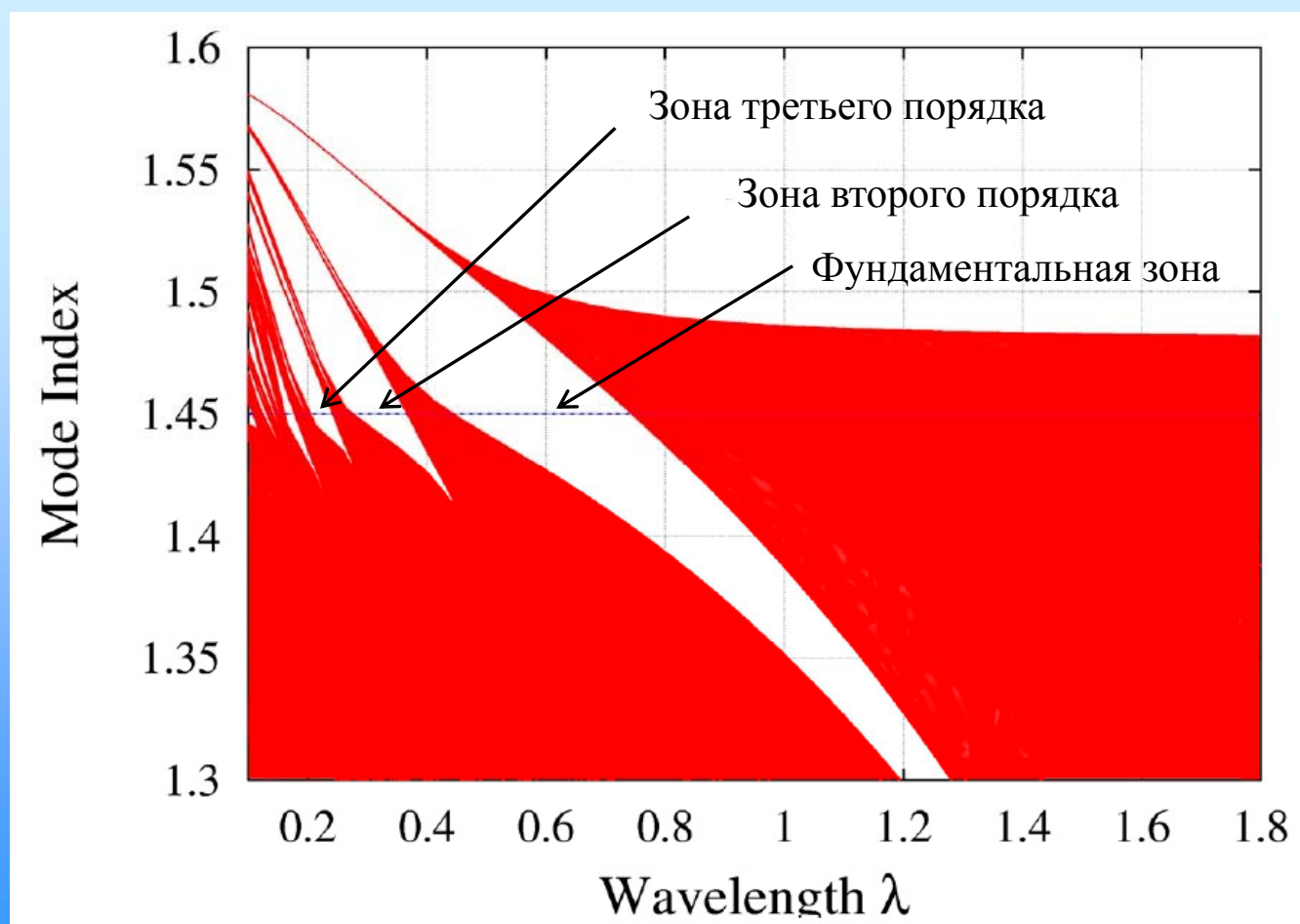
1. Доставка импульсов высокой пиковой мощности – улучшение в 1000 раз по сравнению с целиком кварцевыми световодами

2. Контроль дисперсии – высокая аномальная дисперсия в видимой и ближней ИК областях



3. Световоды заполненные газом – рамановское преобразование, спектральное уширение и пр.

Целиком кварцевые 2D световоды запрещенные зоны

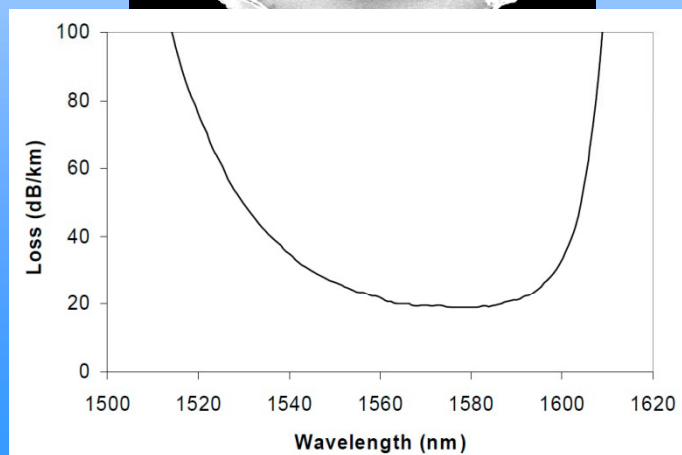
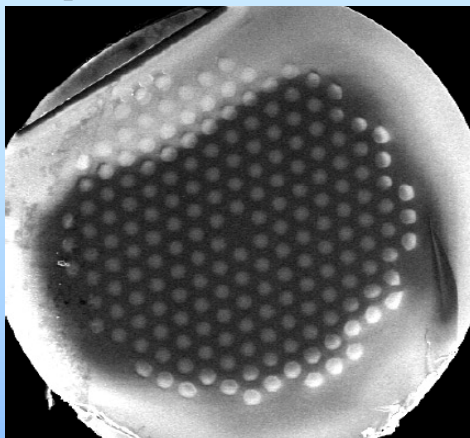


Целиком кварцевые 2D световоды

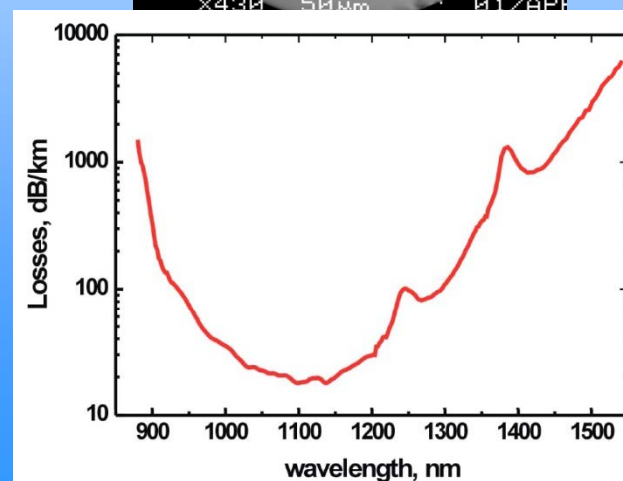
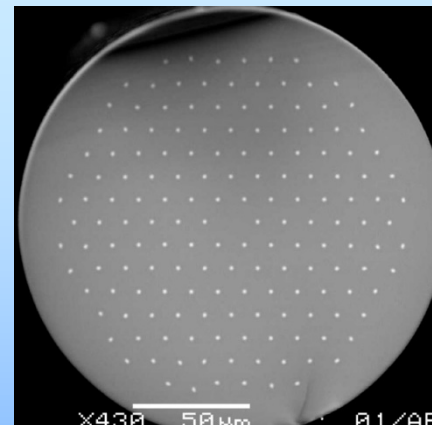
минимальные потери

[Bouwman G., et al, *Opt. Express*, 13, 8452-8459 (2005),
Egorova O.N., et al, *Opt. Express*, 16, 11735-11740 (2008)]

Запрещенная зона высокого (3-го) порядка
Сердцевина ~20мкм, внешний диаметр 300мкм
7.5 слоев отражающей оболочки



Фундаментальная запрещенная зона
Сердцевина ~23мкм, внешний диаметр 182мкм
7 слоев отражающей оболочки



Целиком кварцевые 2D световоды

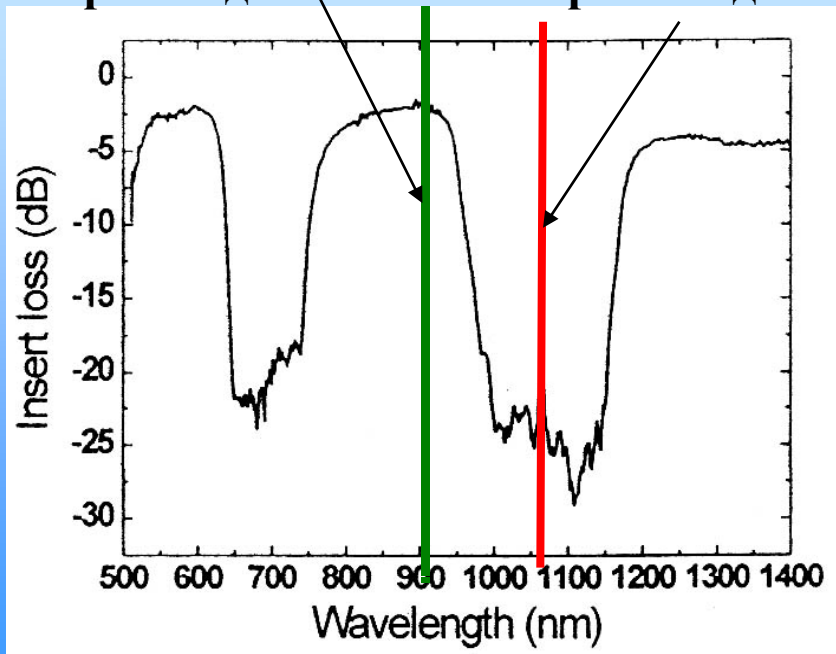
применение

[Wang A., et al, *Opt. Lett.*, 31, 1388-1390 (2006)]

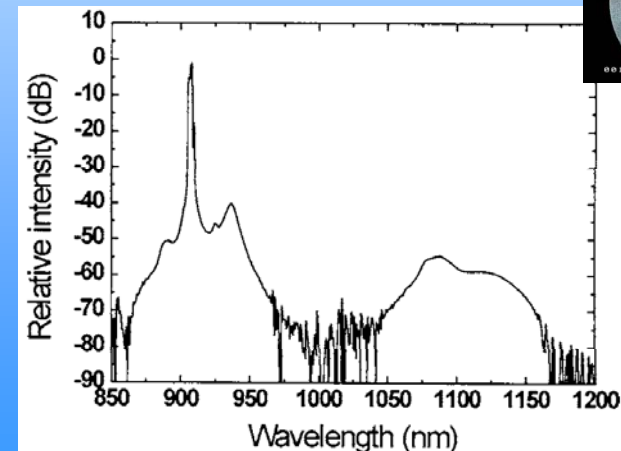
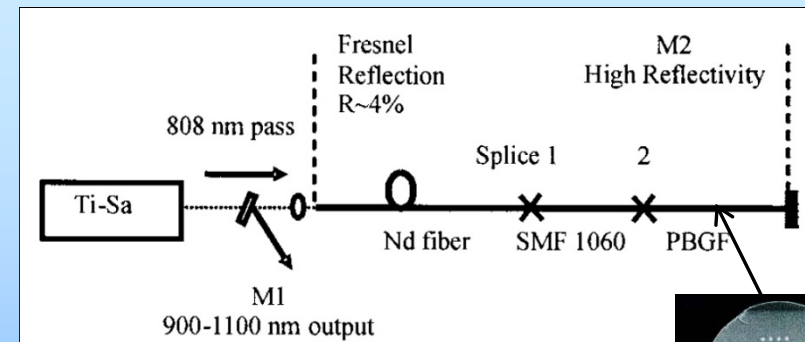
Внесение спектрально-селективных потерь (зона высокого порядка):
лазерная генерация на нестандартных длинах волн (907нм для Nd, 980нм для Yb),
подавления ВКР, модуляция сигнала за счет использования жидких кристаллов и т.п.

907 нм: вносимые
потери < 3 дБ

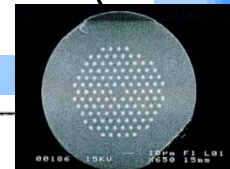
1.064 нм: вносимые
потери > 25 дБ



Спектр потерь вносимых ЗФЗ световодом



Спектр лазерной генерации

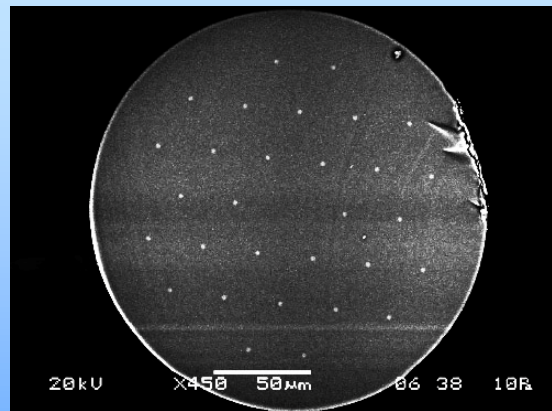


Целиком кварцевые 2D световоды применение

[Semjonov S.L., et al, Proc. SPIE 7580, 758018 (2010),
Egorova O.N., et al, CLEO'2008, paper CTuMM3.pdf (2008)]

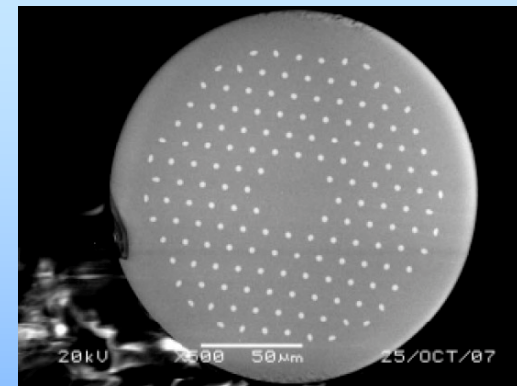
Создание световодов с большим диаметром поля моды (MFD~35μм):
мощные волоконные лазеры

Один пропущенный стержень

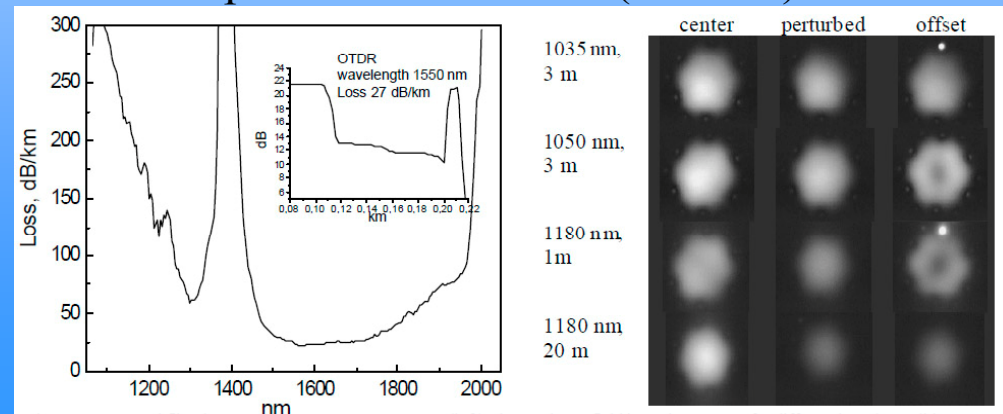


Отсутствуют моды высших порядков
Внешний диаметр ~ 200μм
Потери основной моды ~ 6 дБ/м

Семь пропущенных стержней

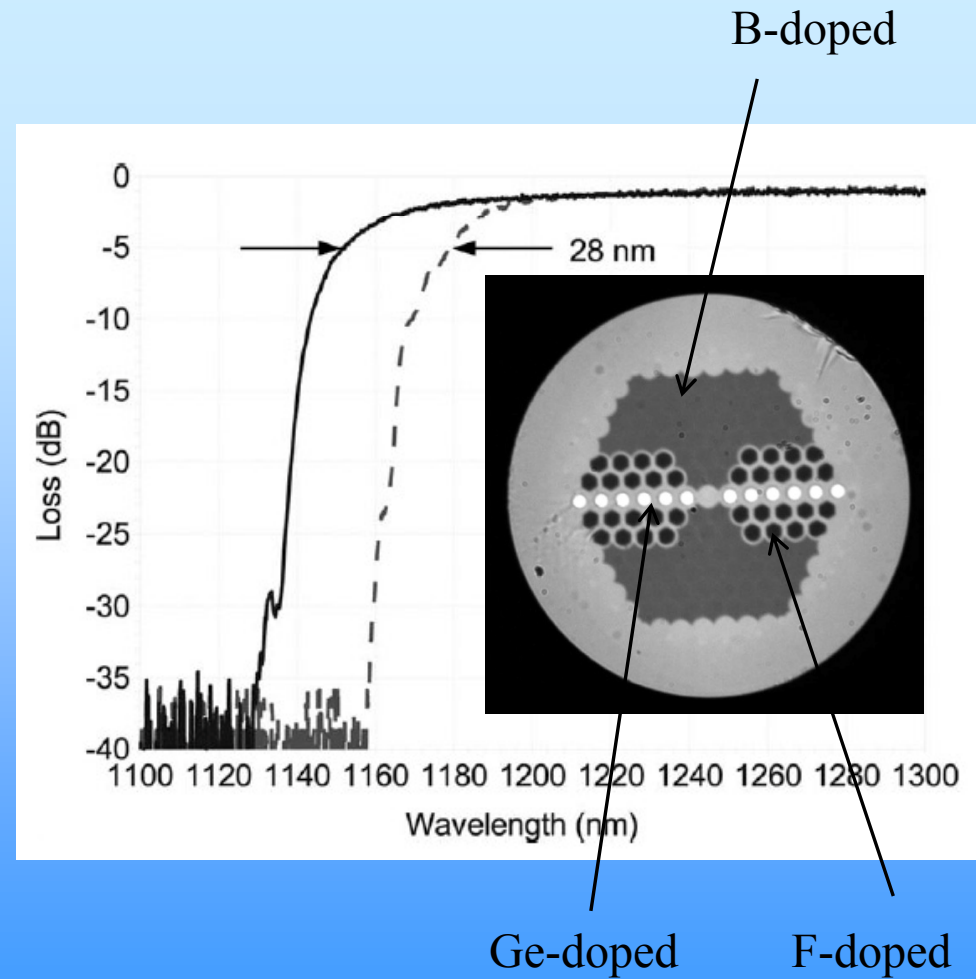
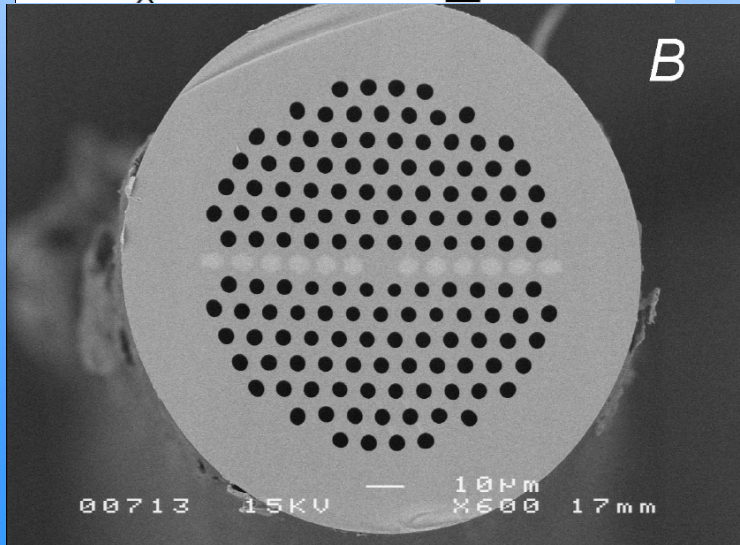
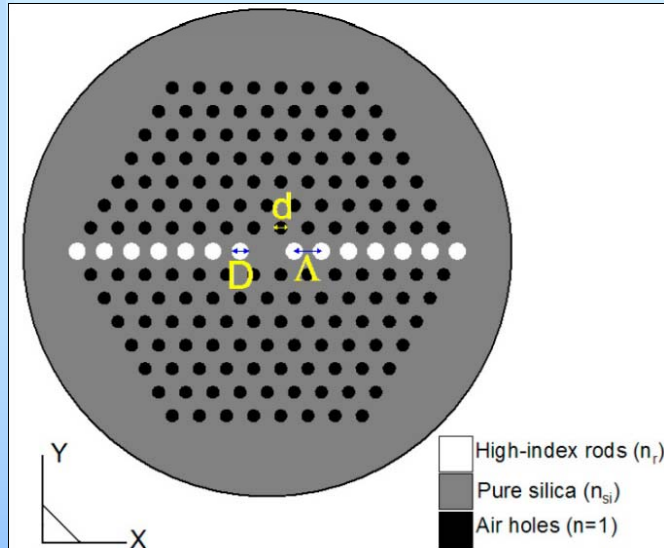


Потери основной моды (1035nm) ~ 4 дБ/м



Гибридные 2D световоды

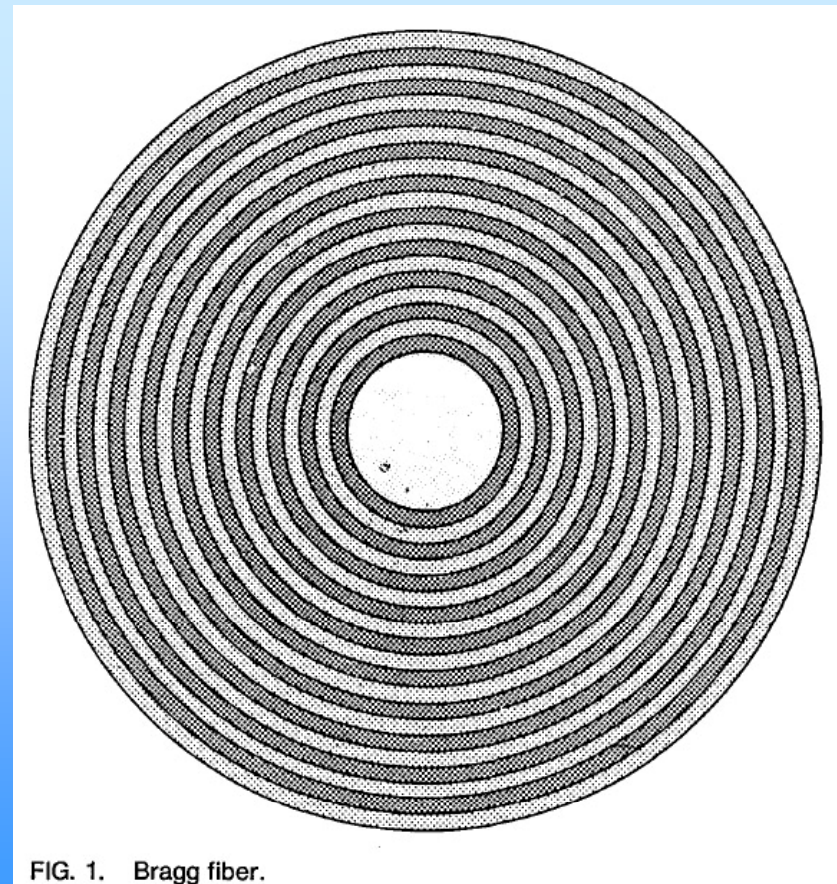
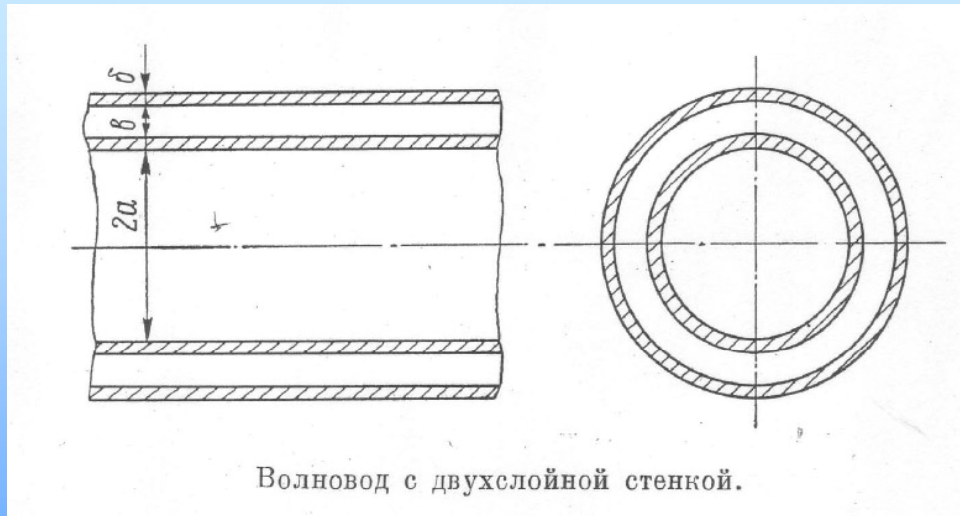
[Cerqueira A.S.Jr., et al, *Opt. Express.*, **14**, 926-931 (2006),
Goto R., et al, *Opt. Lett.*, **34**, 3119-3121 (2009)]



Брэгговские (1D) световоды

теоретическое обоснование – 1968 и 1978

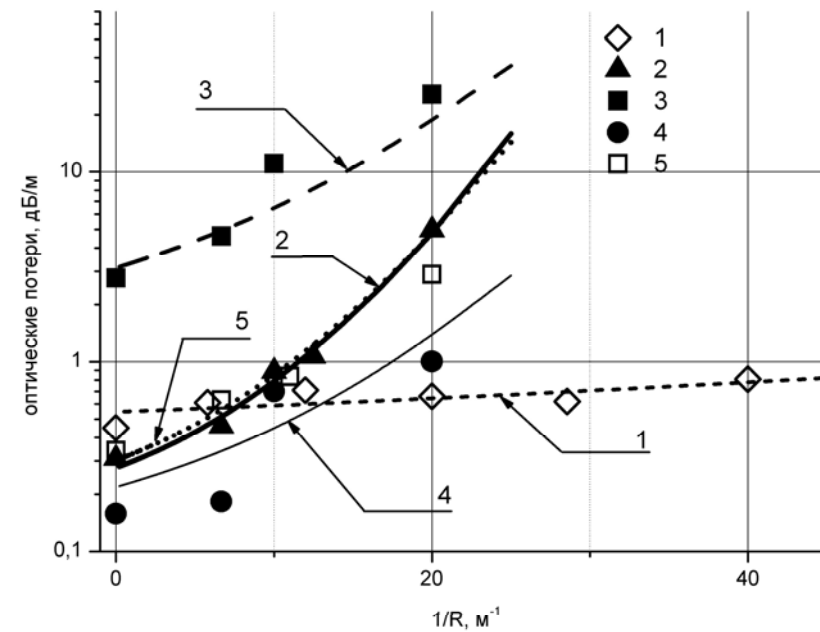
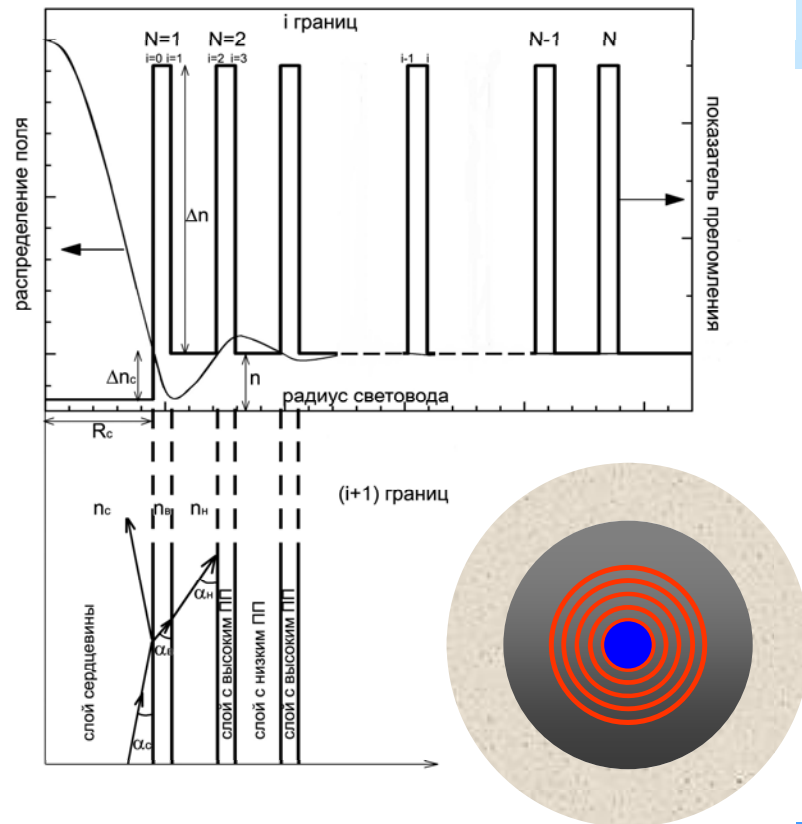
[Melekin V.N., and Manenkov A.B., *Soviet Physics - Technical Physics* 13, 1698 (1968),
Yeh P., et al, *Journal of the Optical Society of America* 68, 1196 (1978).]



Брэгговские (1D) световоды

аналитические формулы для оценки оптических потерь

[Алешкина С.С. и др., Квантовая электроника, 40, 893-898 (2010)]

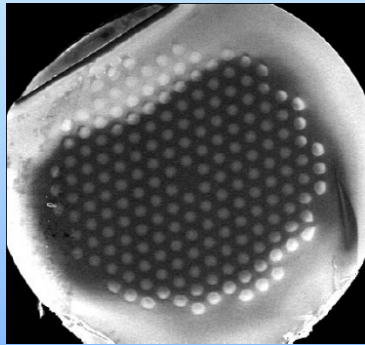


Брэгговские (1D) световоды

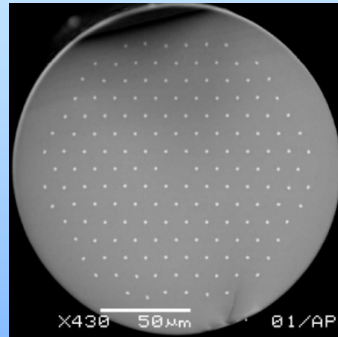
минимальные потери

[Fevrier S., et al, *Opt. Express*, 14, 562-569 (2006)]

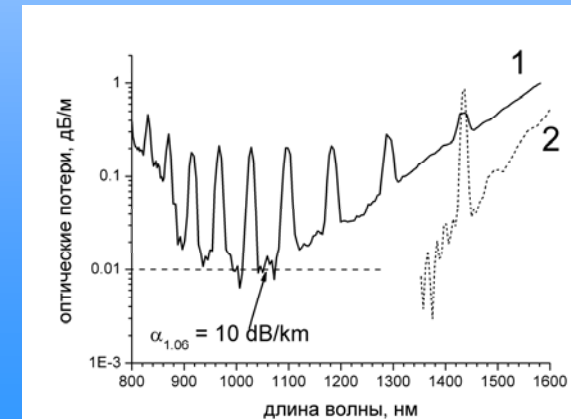
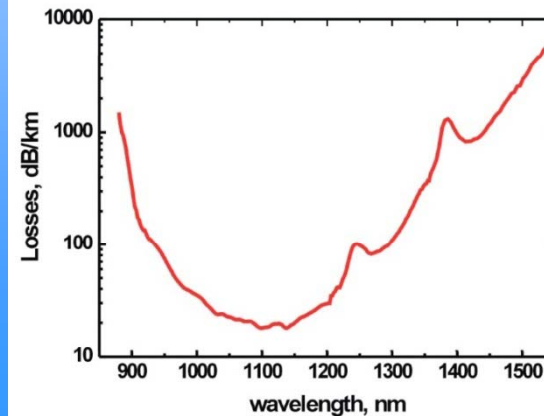
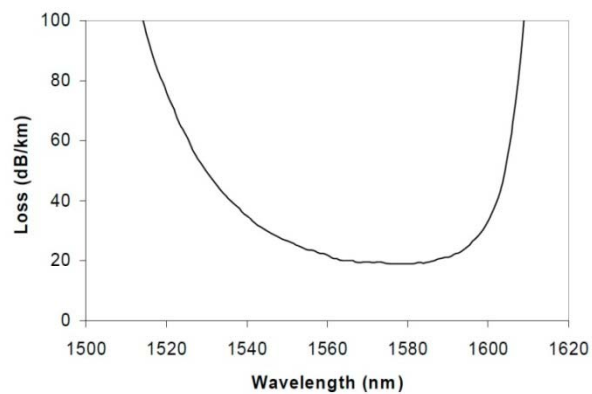
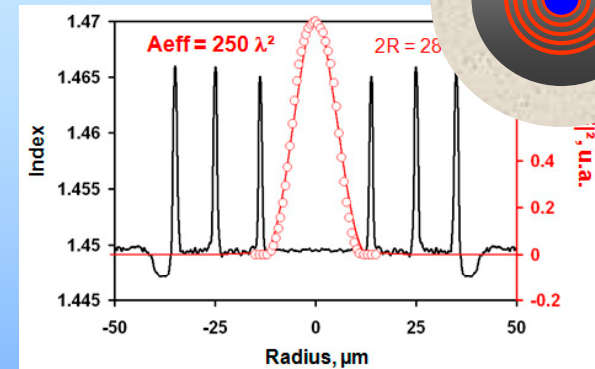
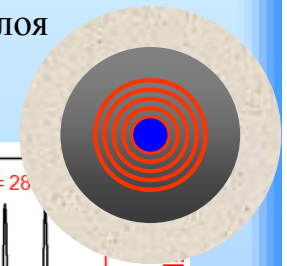
2D оболочка
запрещенная зона
высокого (3-го) порядка
Сердцевина ~20мкм,
внешний диаметр 300мкм
7.5 слоев отражающей
оболочки



2D оболочка
фундаментальная
запрещенная зона
Сердцевина ~23мкм,
внешний диаметр 182мкм
7 слоев отражающей
оболочки



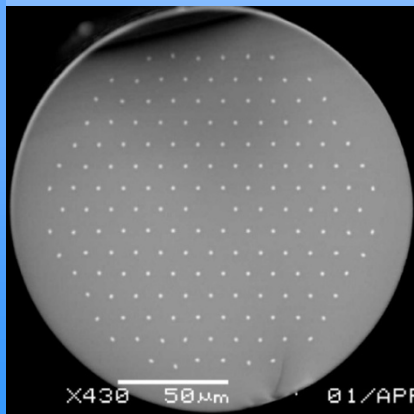
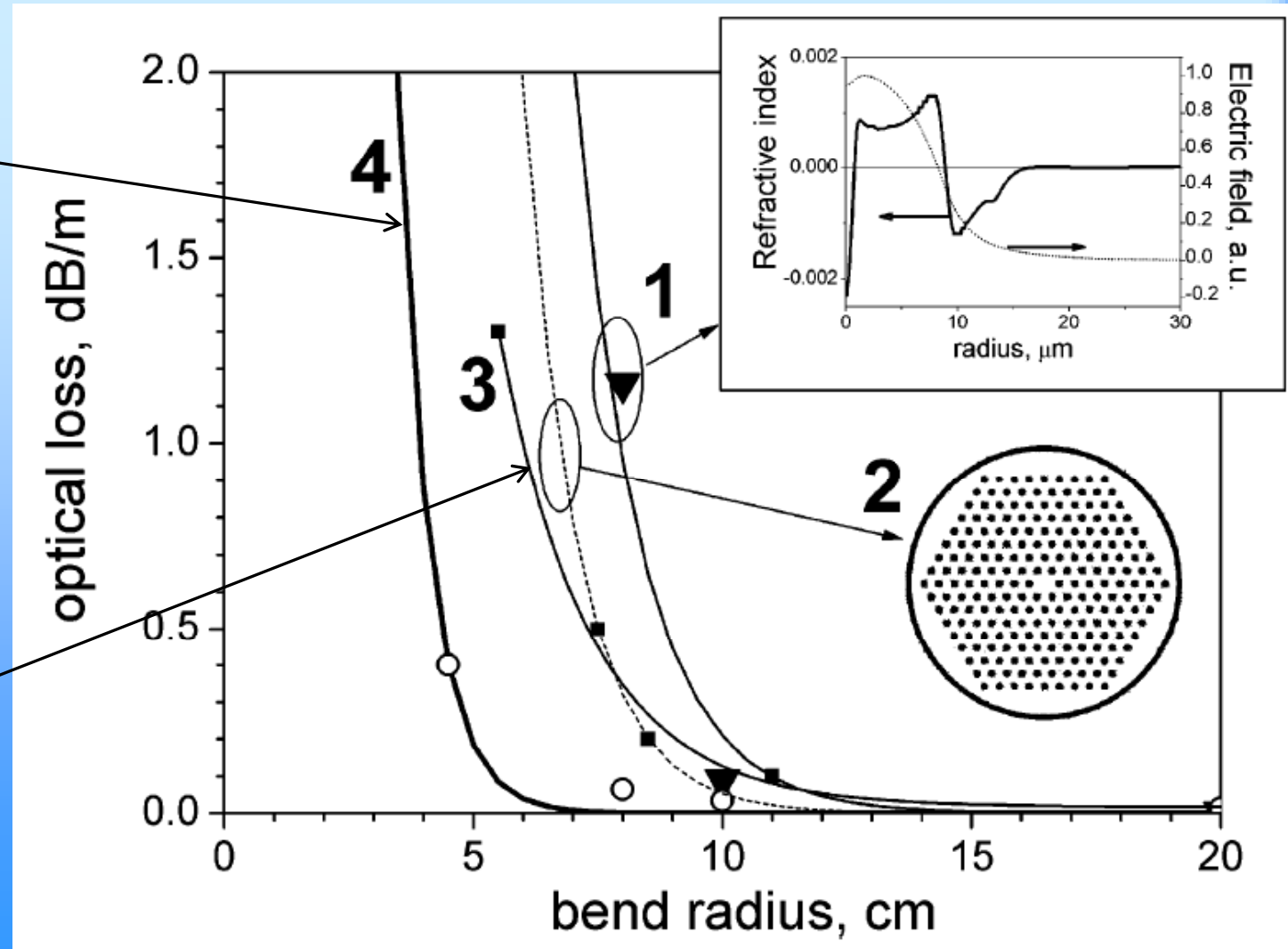
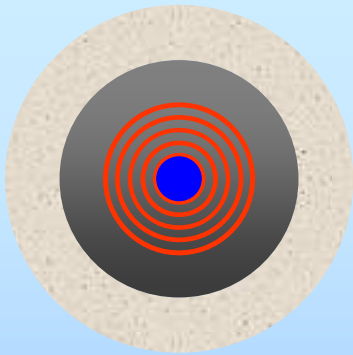
Брэгговский световод
Сердцевина ~24мкм,
диаметр структуры ~75мкм
3 отражающих слоя



Брэгговские (1D) световоды

изгибные потери

[Fevrier S., et al, *Opt. Express*, **14**, 562-569 (2006),
Dianov E.M., et al, *IEEE Selected Topics in Quant. Electron.*, **15**, 20-29 (2009)]

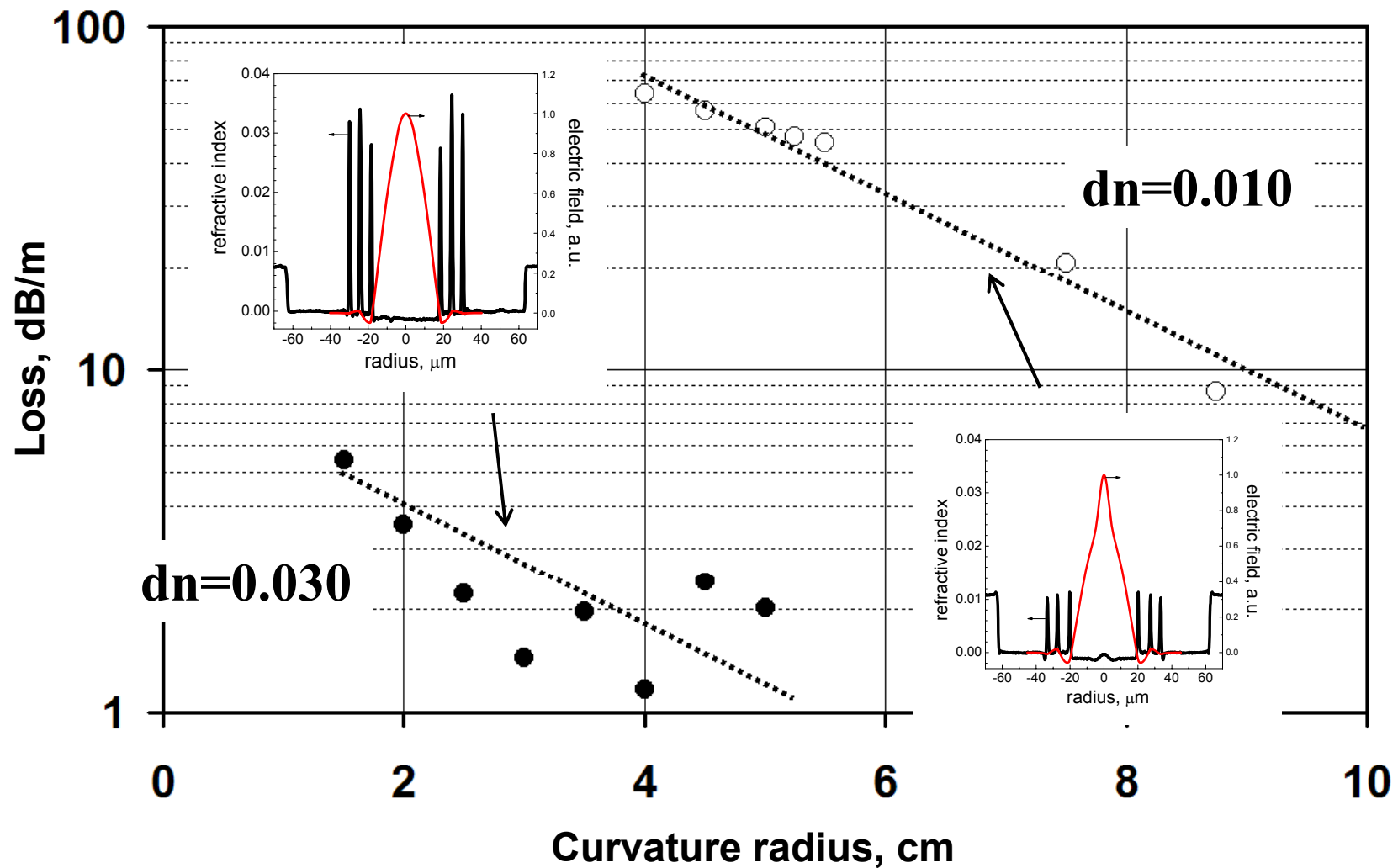


Брэгговские (1D) световоды

дальнейшее снижение изгибных потерь

[Fevrier S., et al, Proc. SPIE **6453**, 64531A (2007),

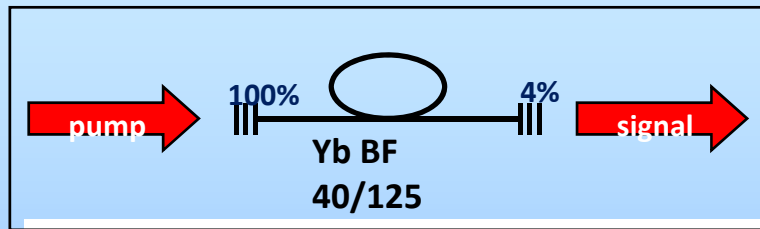
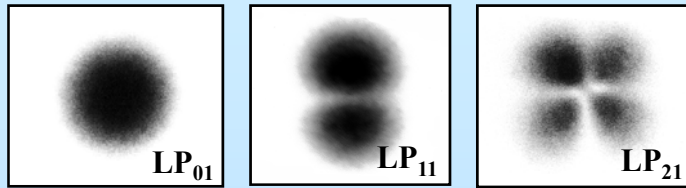
Dianov E.M., et al, *IEEE Selected Topics in Quant. Electron.*, **15**, 20-29 (2009)]



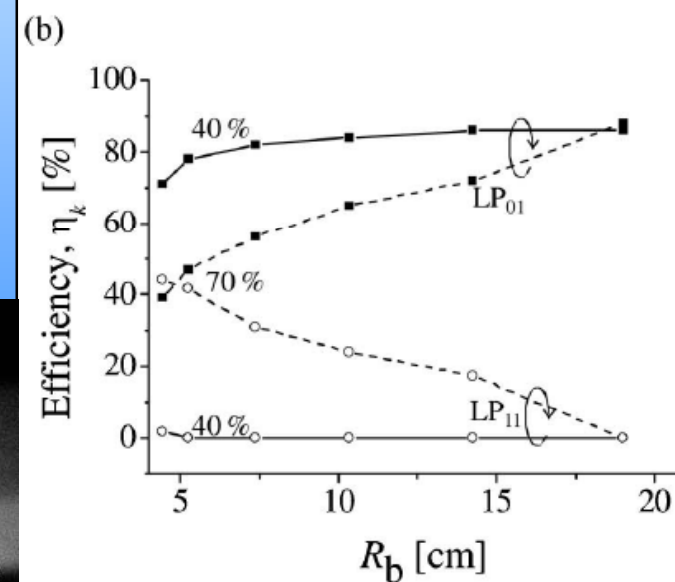
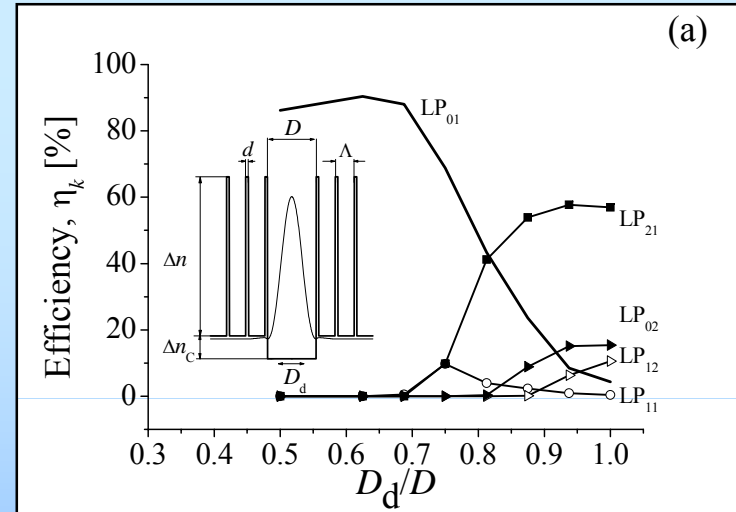
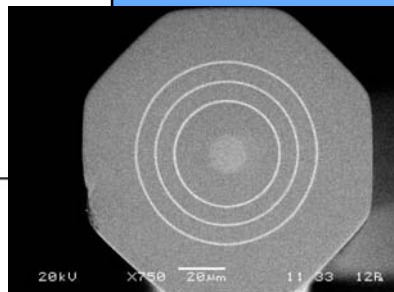
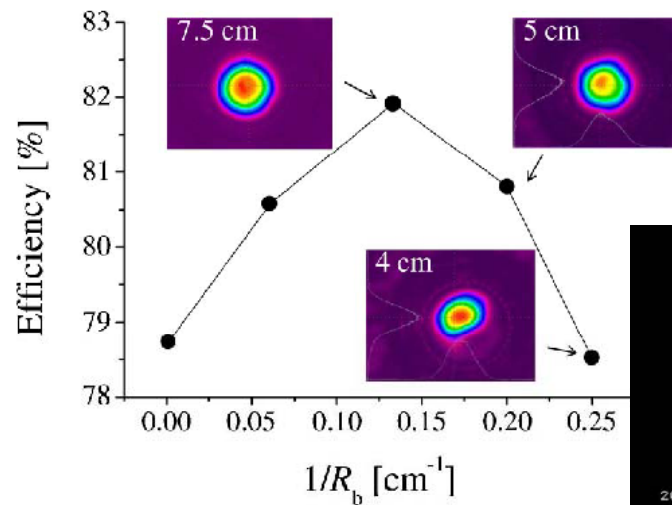
Брэгговские (1D) световоды

дифференциальное усиление мод

[Gaponov D.A., et al., Opt. Lett., **35**, 2233-2235 (2010)]



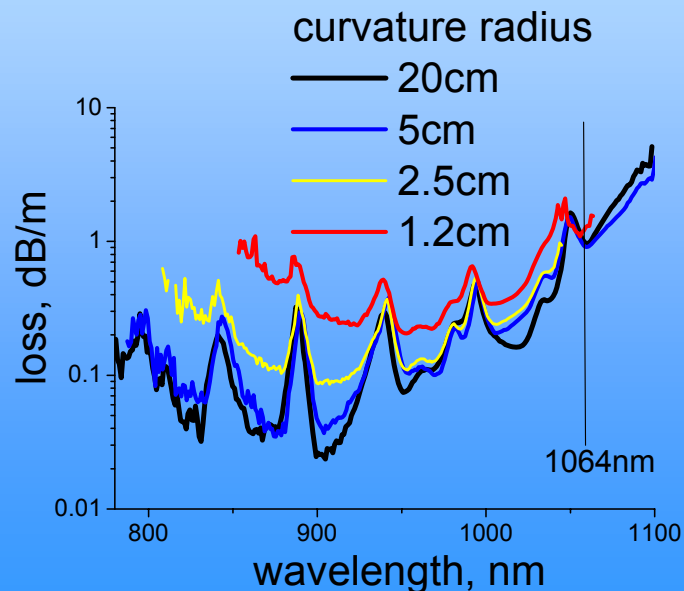
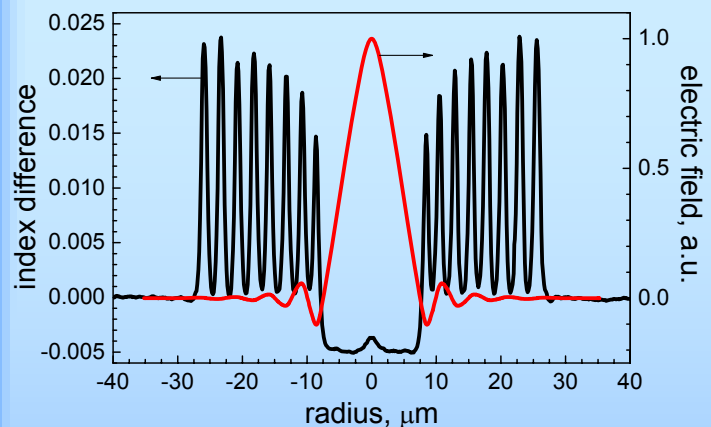
40% сердцевины легировано ионами Yb^{3+} (10 000 ppm), $M^2=1.12$, $MFD=26 \mu\text{m}$



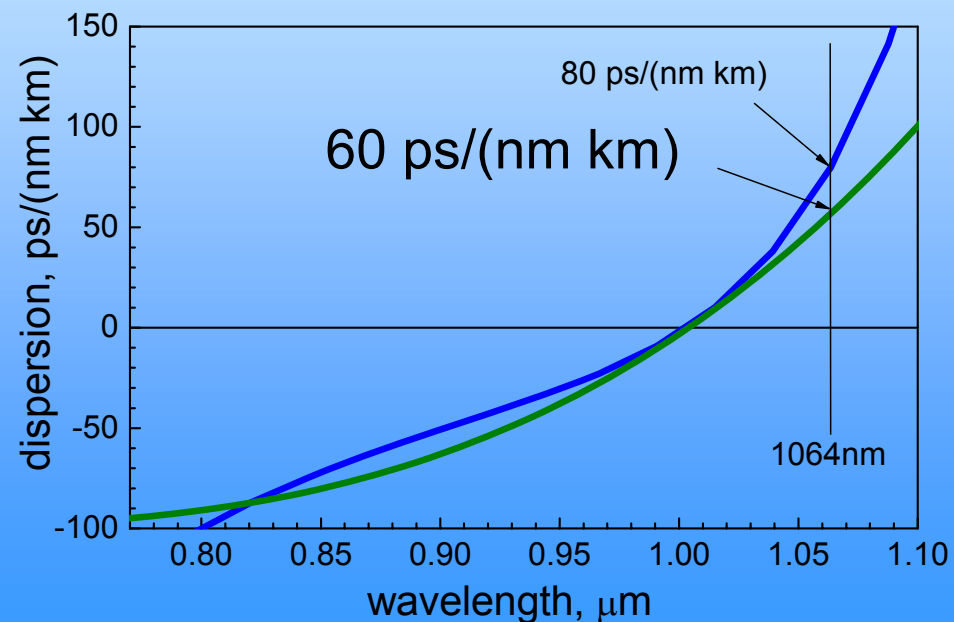
Брэгговские (1D) световоды

смещение нуля дисперсии в область 1 мкм

[Likhachev M.E., et al, ECOC'2007, We7.1.2



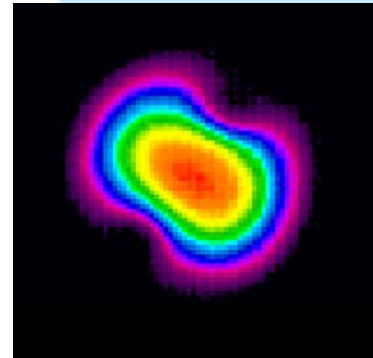
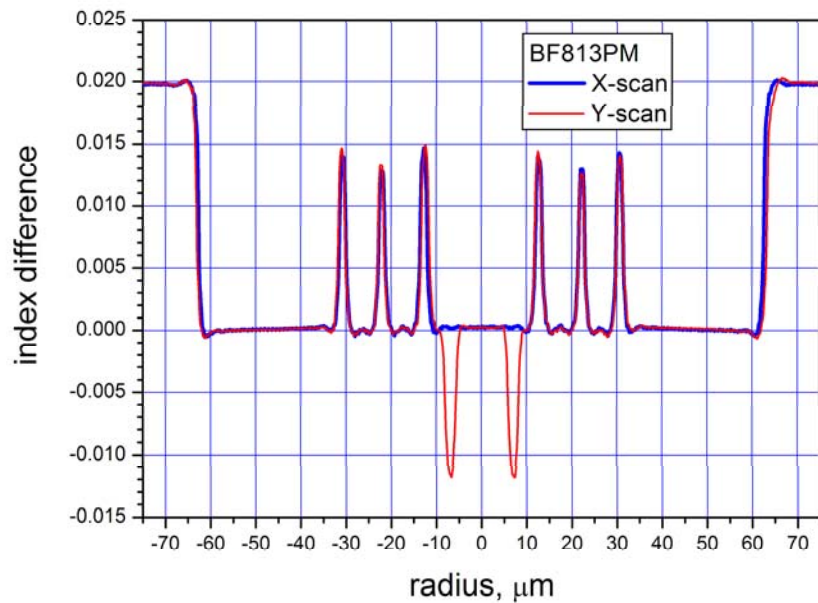
ZDW = $1\mu\text{m}$
0.03dB/m @ $0.9\mu\text{m}$
0.2dB/m @ $1\mu\text{m}$
1.1dB/m @ $1.064\mu\text{m}$
D > 60 ps/(nm km) @ $1.064\mu\text{m}$



Брэгговские световоды

анизотропный световод

[Likhachev M.E., et al, ECOC'2007, We7.1.2



Коэффициент экстинкции:

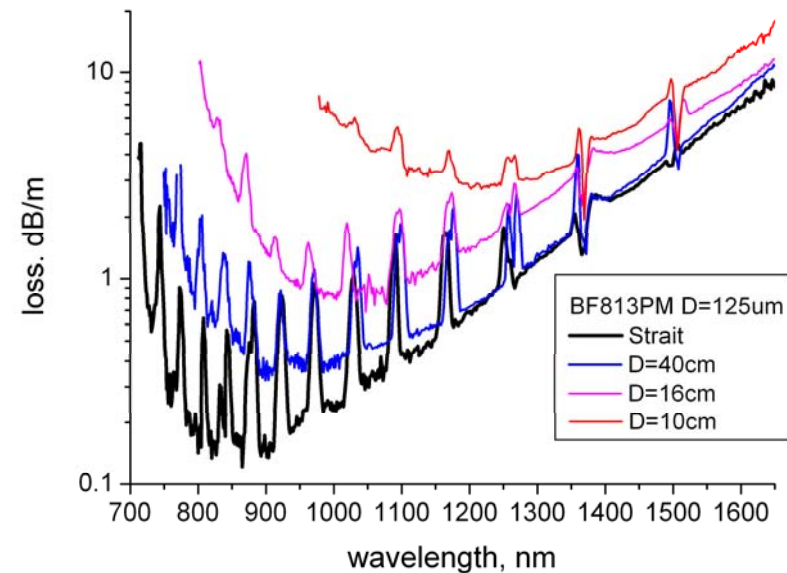
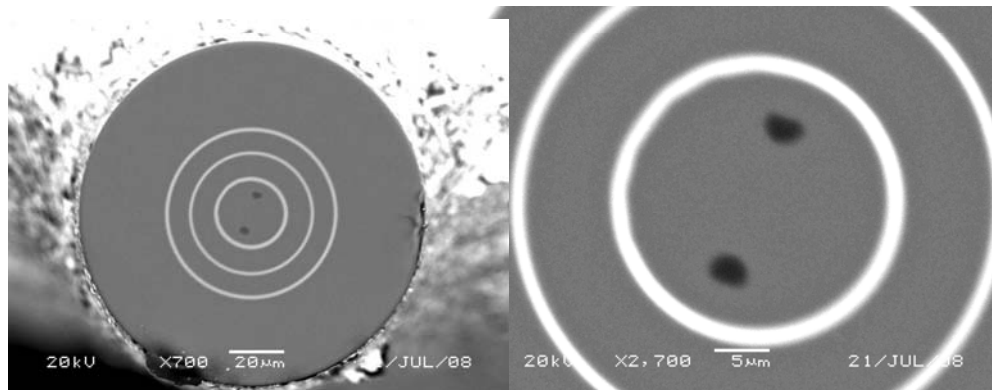
2м: > 22dB;

12м: > 17dB

Двулучепреломление $\sim 10^{-5}$

Способность сохранять поляризацию

$h = 1.6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$



Выводы

- Световоды на основе запрещенной фотонной зоны представляют собой совершенно новый объект волоконной оптики.
- Локализация света в таких световодах обусловлена когерентным френелевским отражением, что позволяет создавать структуры, обладающие свойствами недостижимыми для световодов на основе полного внутреннего отражения
- Разнообразие типов световодов на основе запрещенной фотонной зоны позволяет использовать их в самых различных задачах.