

О ПРИРОДЕ ОПТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ И СПОСОБАХ БОРЬБЫ С НИМИ В ПОЛЫХ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ

А.С. Бирюков, А.Д. Прямиков, А.Ф. Косолапов

M. Kharadly, J. Lewis. Properties of dielectric –tube waveguides. *Proc. IEE*, **116**, 214 (1969).

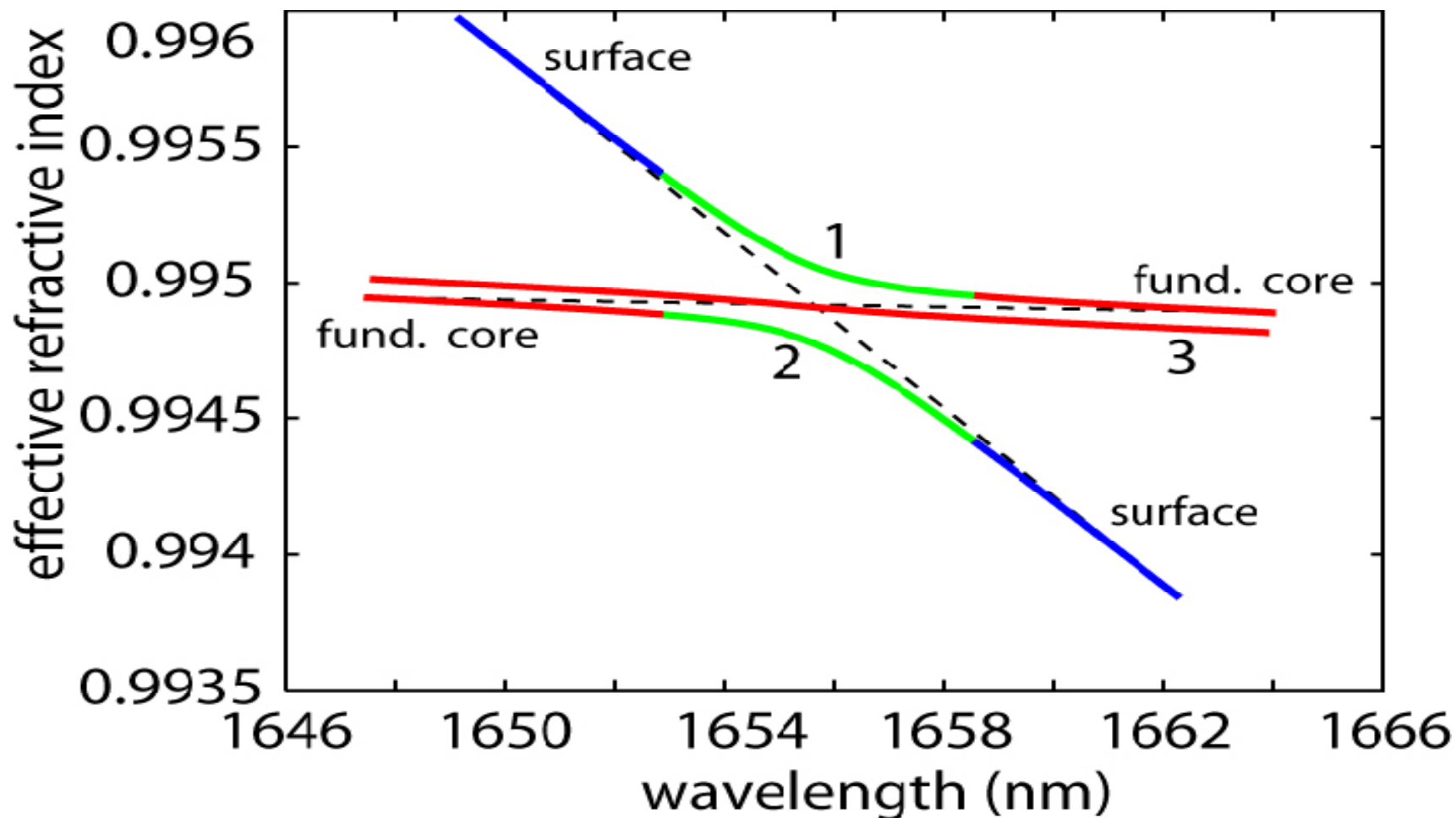
L. Vincetti, V. Setti. Waveguiding mechanism in tube lattice fibers. *Optics Express*, **18**, №22, 23133 (2010).

S. Fevrier, B. Beaudou and Pierre Viale, “Understanding origin of loss in large pitch hollow–core photonic-crystal fibers and their design simplification” *Opt. Express* **18**, №5, 5142 – 5150 (2010).

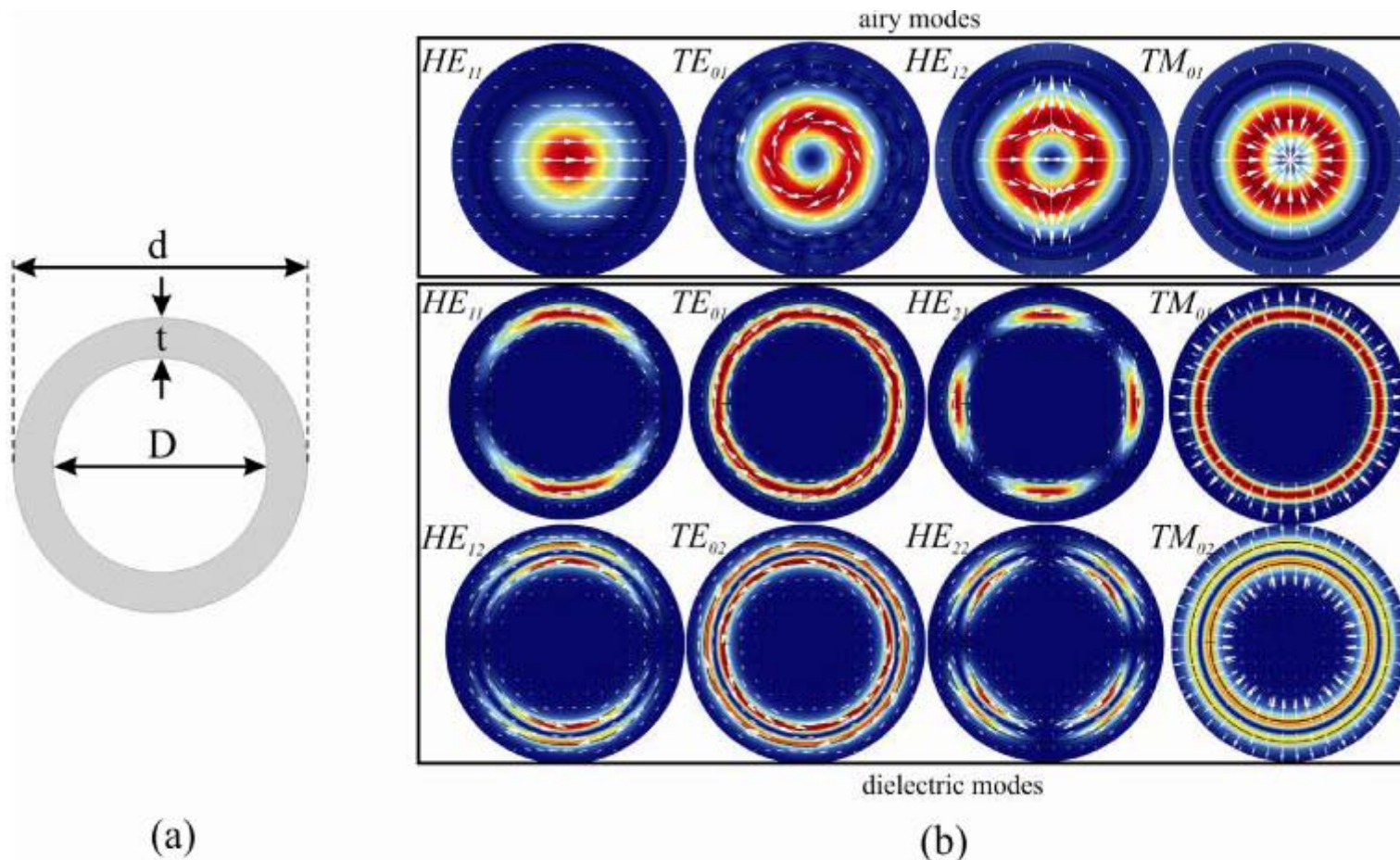
F. Gerome, R. Jamier, J–L. Auguste, G. Humbert, and J–M. Blondy, “Simplified hollow–core photonic crystal fiber,” *Opt. Lett.* **35**, 1157 – 1159 (2010).

Y. Wang, F. Couny, P. J. Roberts, and F. Benabid, “Low loss broadband transmission in optimized core–shaped Kagome Hollow-Core PCF,” in *CLEO/QELS*. (Optical Society of America, 2010), paper CPDB4.

A.D. Pryamikov, A.S. Biriukov, A.F. Kosolapov, V.G. Plotnichenko, S.L. Semjonov, E.M. Dianov. Demonstration of waveguide regime for a silica hollow-core microstructured optical fiber with a negative curvature of the core boundary in the spectral region $>3,5 \mu\text{m}$. *Optics Express*, **19**, №2, 1441 (2011)



Схема, поясняющая явление взаимодействия мод сердцевины и поверхностных мод. (Синяя линия – эффективный показатель преломления одной из поверхностных мод, красная – основной моды сердцевины)

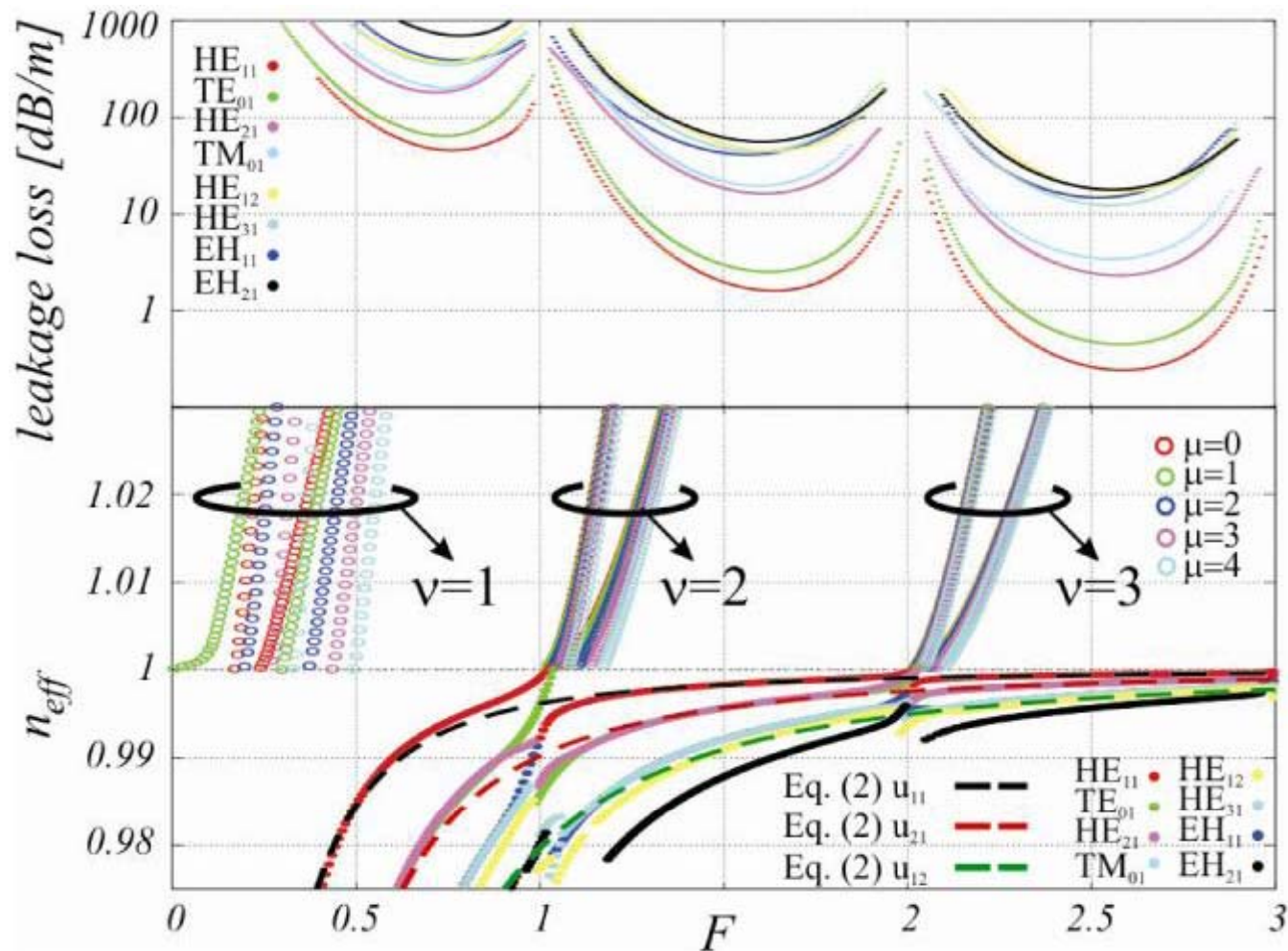


(a)

(b)

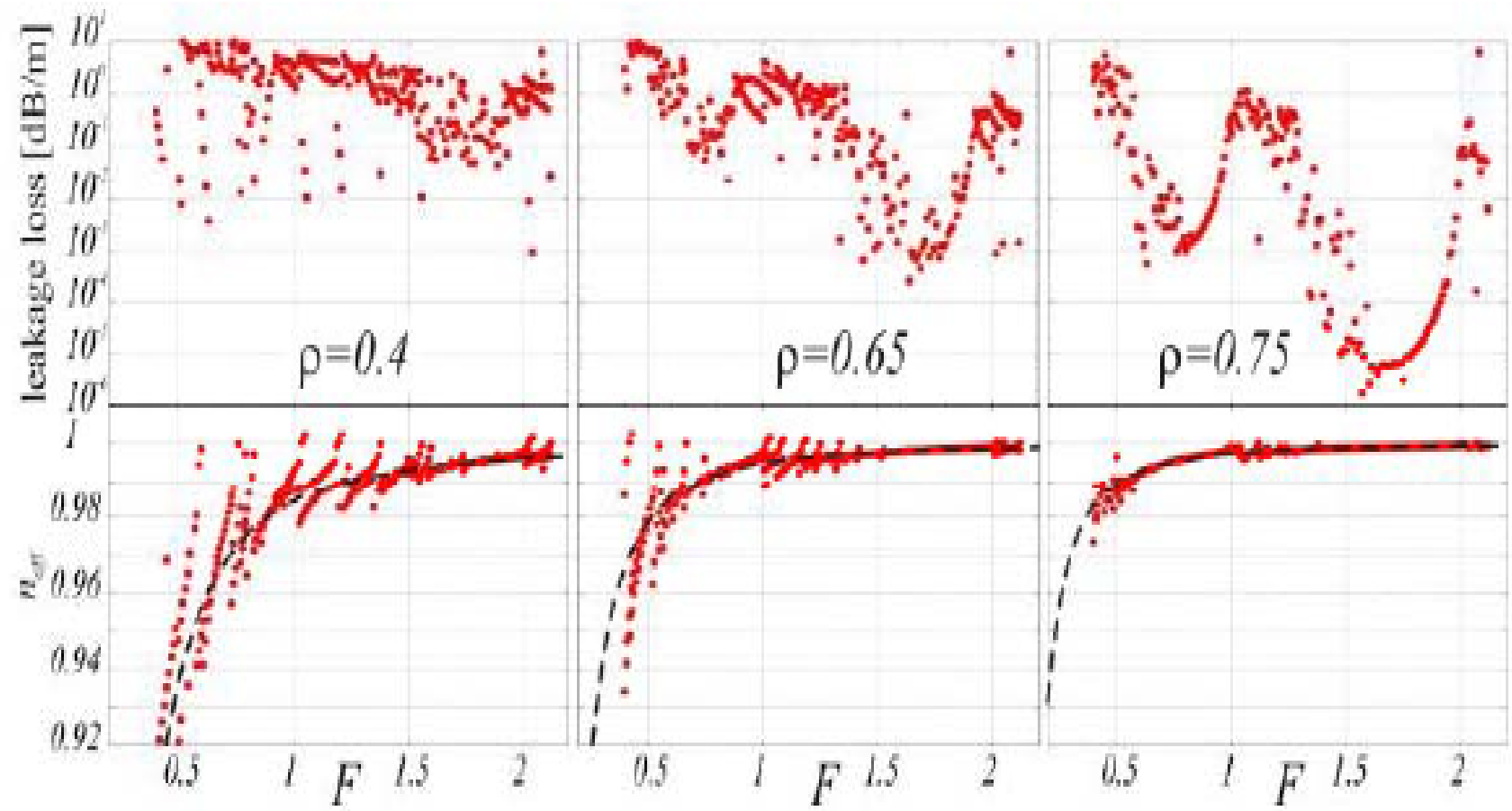
а) Поперечное сечение полого диэлектрического капилляра с наружным и внутренним диаметрами D и d .

б) Распределения полей наиболее низких мод полого капилляра; верхний ряд – моды Эйри, нижний – моды стеклянной оболочки.

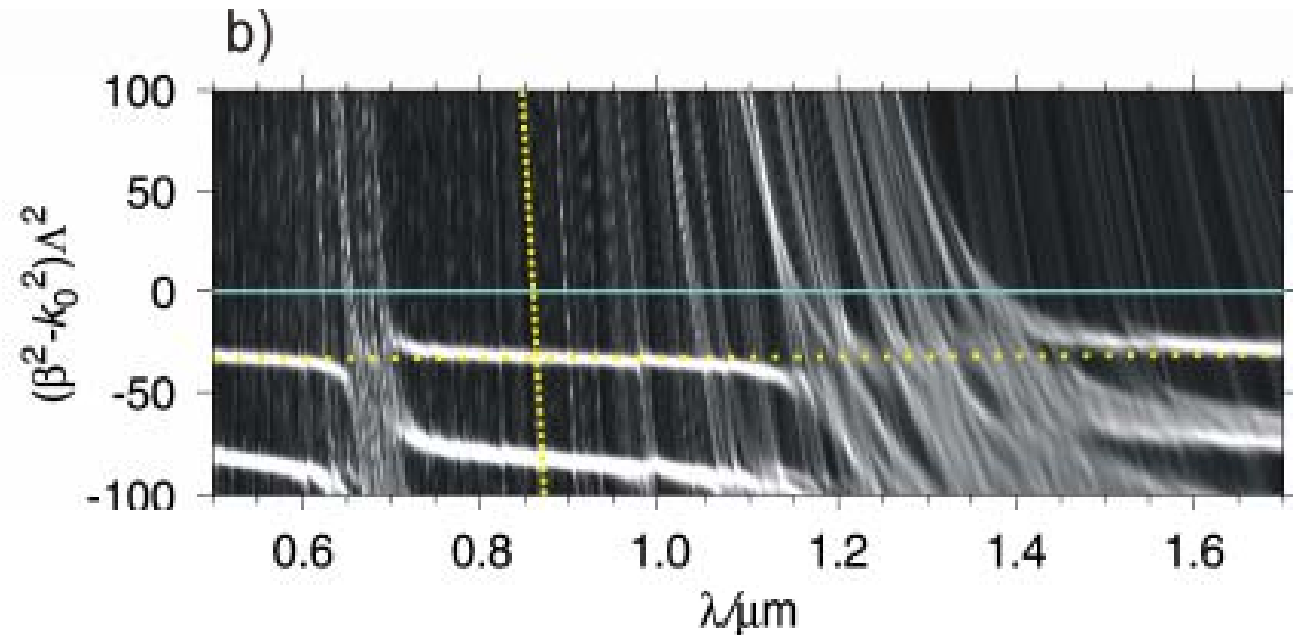
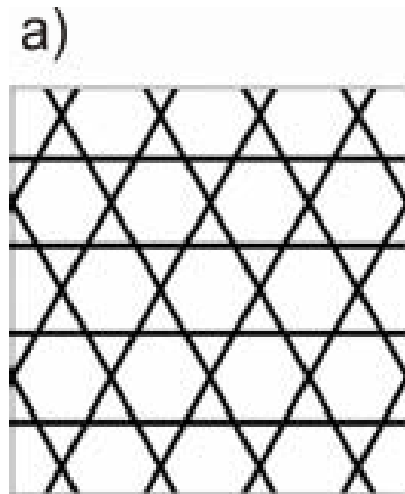


$$F = \frac{k_0 t}{\pi} \sqrt{n^2 - 1}$$
 - приведенная частота; $k_0 = 2\pi/\lambda$ - волновое число; λ - длина волны в пустоте.

Первый индекс в обозначении моды μ - количество периодов поля вдоль азимутальной координаты, второй индекс ν - количество максимумов и минимумов в радиальном направлении.

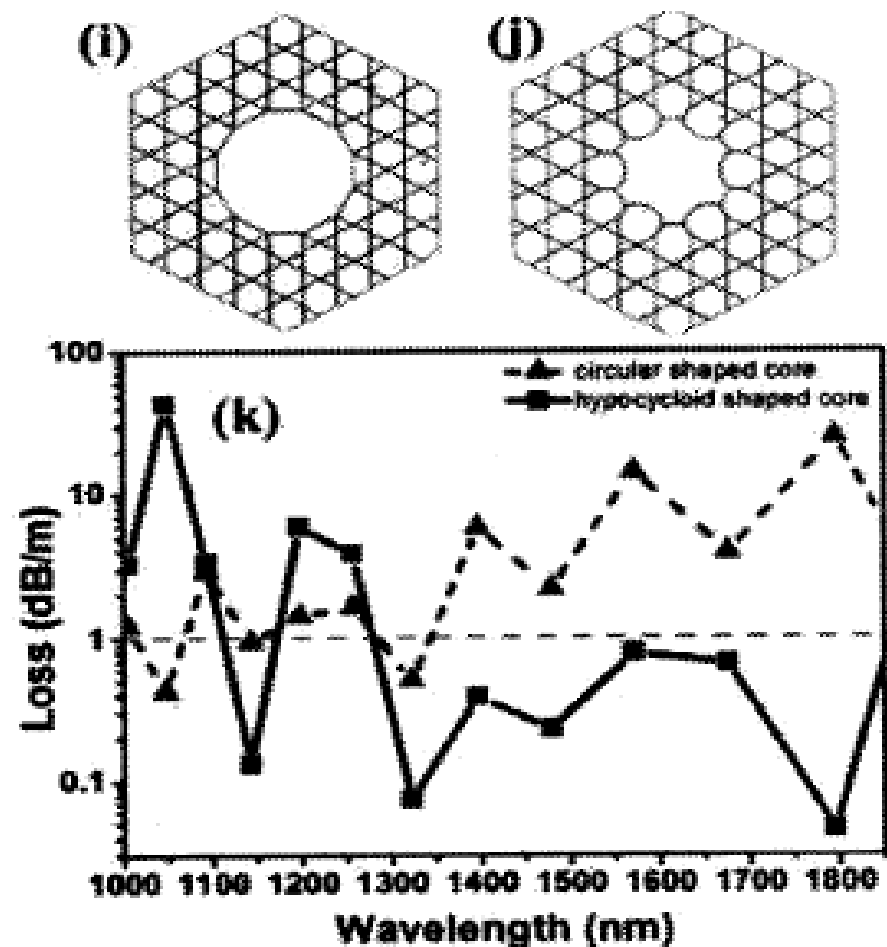


$$\rho = D/d$$



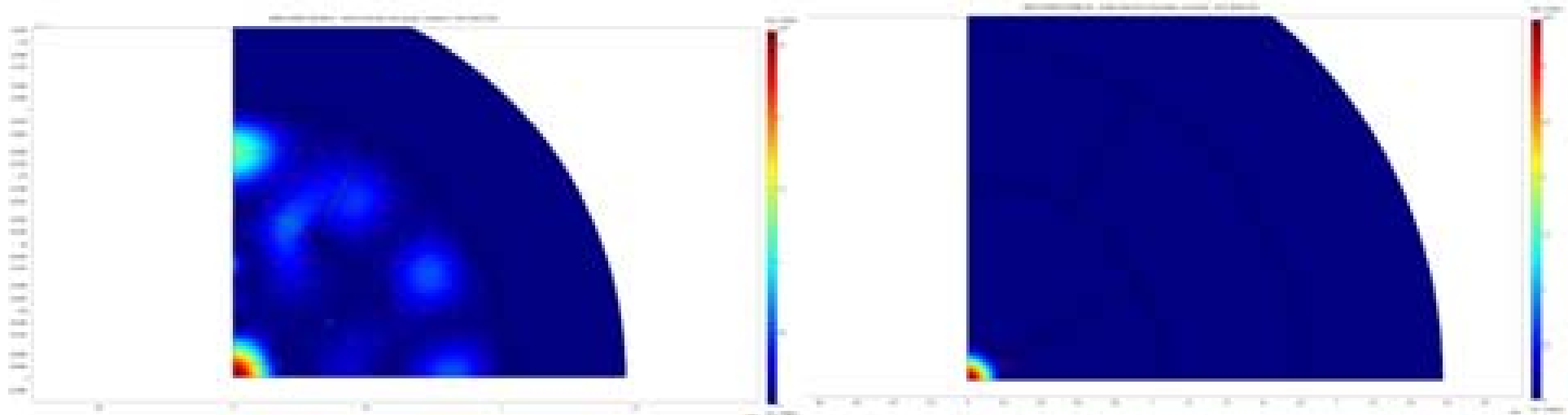
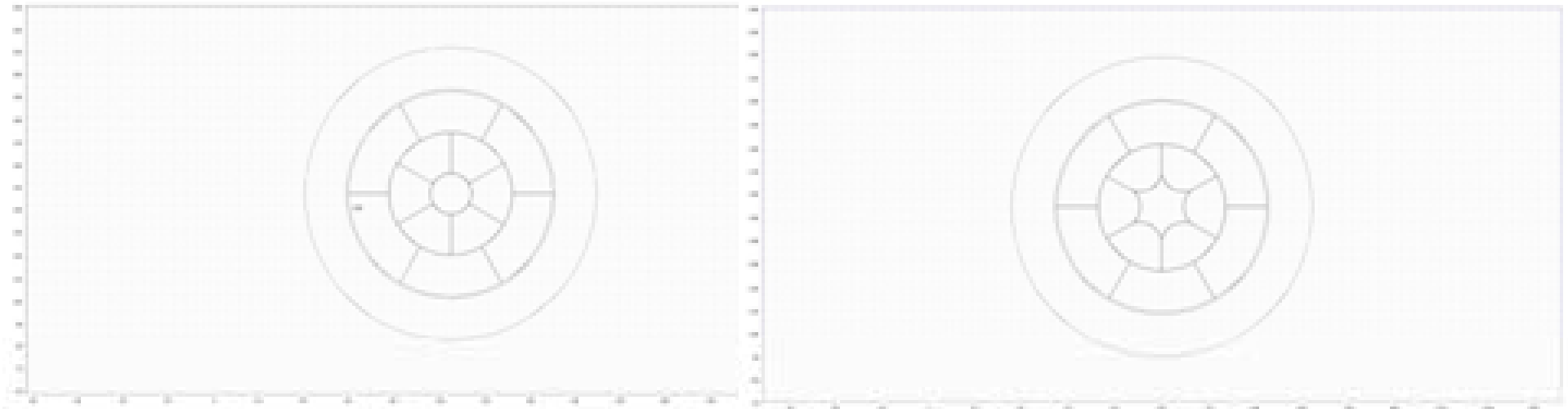
a) поперечное сечение периодической структуры типа “кагомэ”. Черный цвет – стеклянные перегородки, белый – воздух.

b) плотность состояний (DOS) для приведенной структуры (спектральный диапазон отвечает приведенным частотам в пределах 44-148). Более светлые области соответствуют более высоким значениям DOS (но нигде DOS не равна нулю). Желтая, пунктирная, почти вертикальная линия – пример одной из мод стеклянной перегородки, а такая же горизонтальная – пример моды отверстий в структуре.

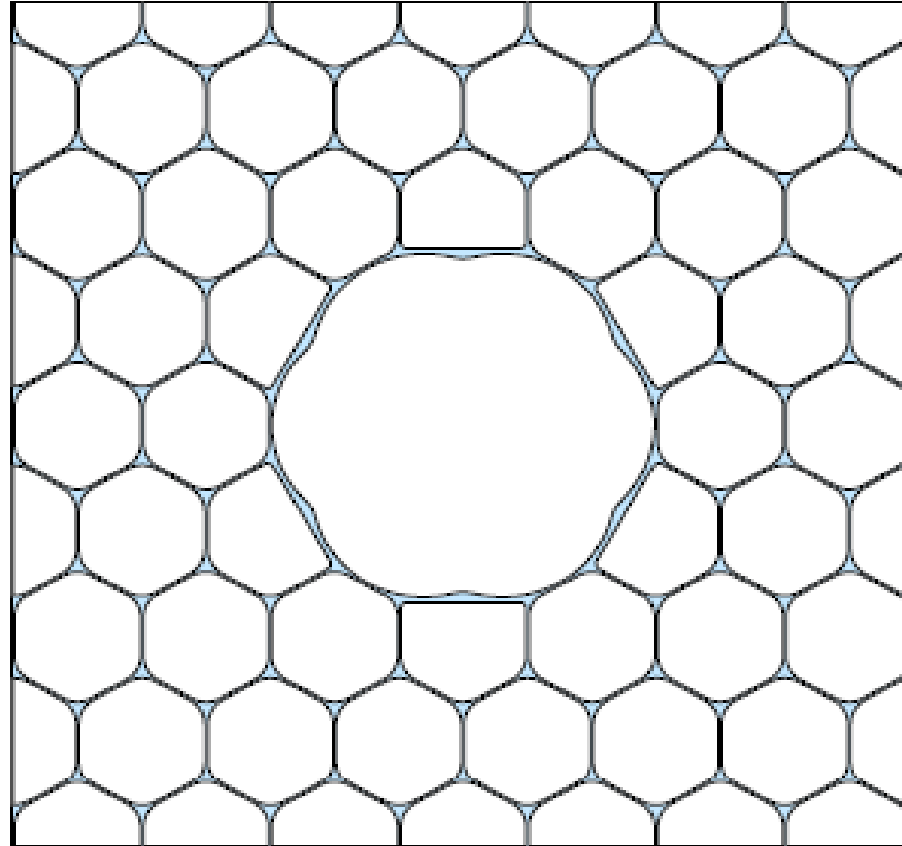


Расчет. Экспериментально получено в среднем четырехкратное по спектру снижение потерь.

Y. Wang, F. Couny, P. J. Roberts, and F. Benabid, “Low loss broadband transmission in optimized core-shaped Kagome Hollow-Core PCF,” in *CLEO/QELS*. (Optical Society of America, 2010), paper CPDB4.

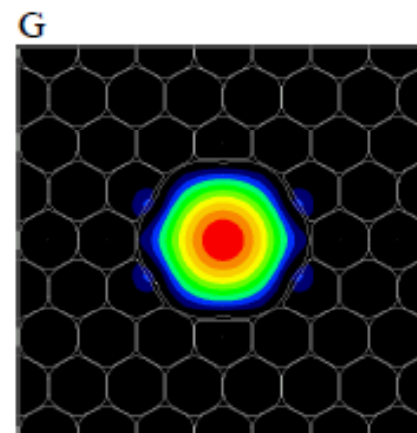
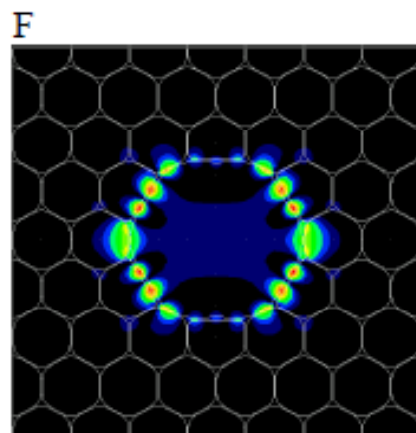
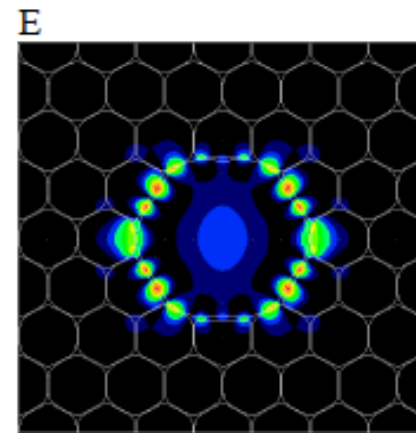
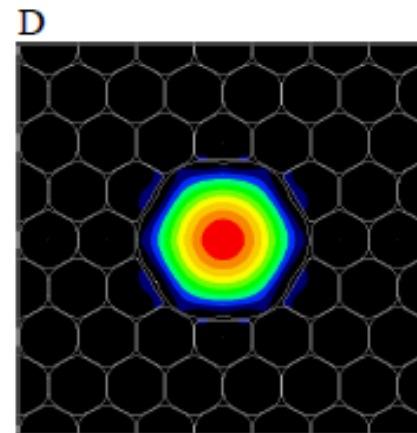
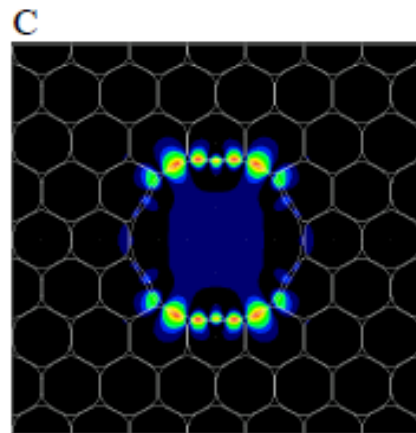
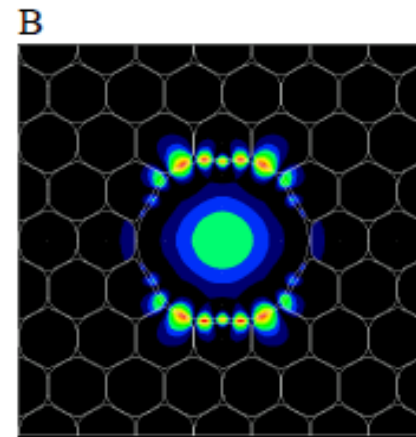
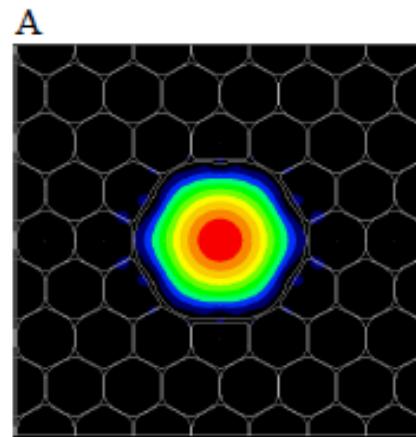


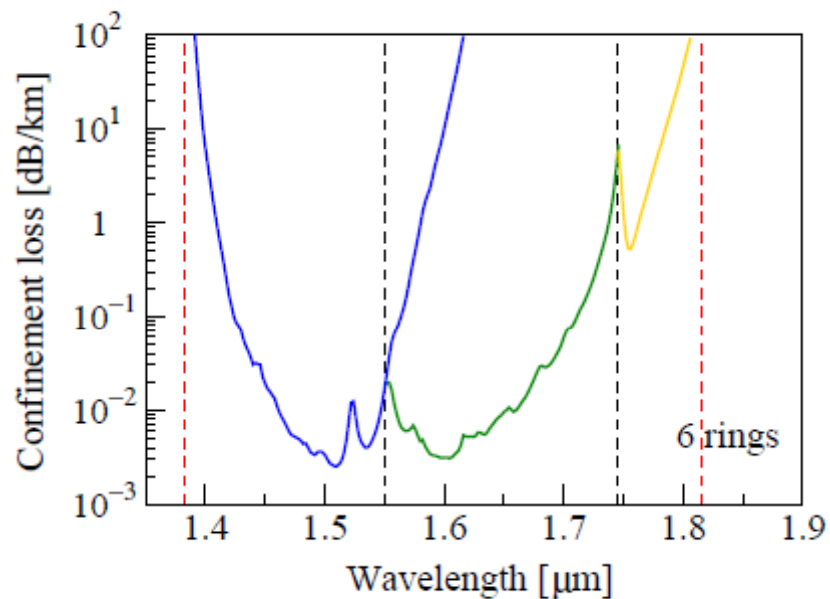
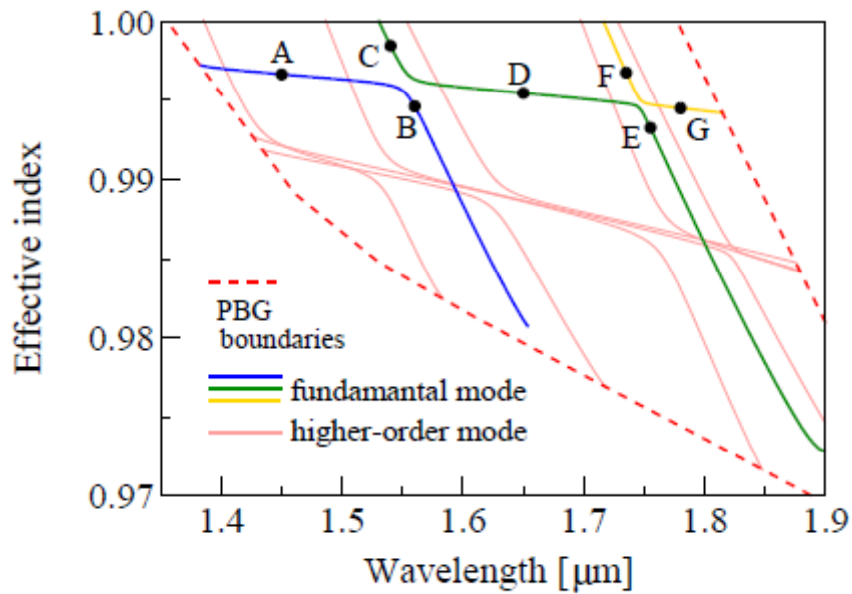
$t \approx 300 \text{ nm}$, $D \approx 40 \mu\text{m}$, $n = 1,444$



K. Saitoh, N.A. Mortensen, M. Koshiba. Air-core photonic bandgap fibers: the Impact of surface modes. *Optics Express*, **12**, №3,394 (2004).

(Из сборки удалены 7 капилляров).

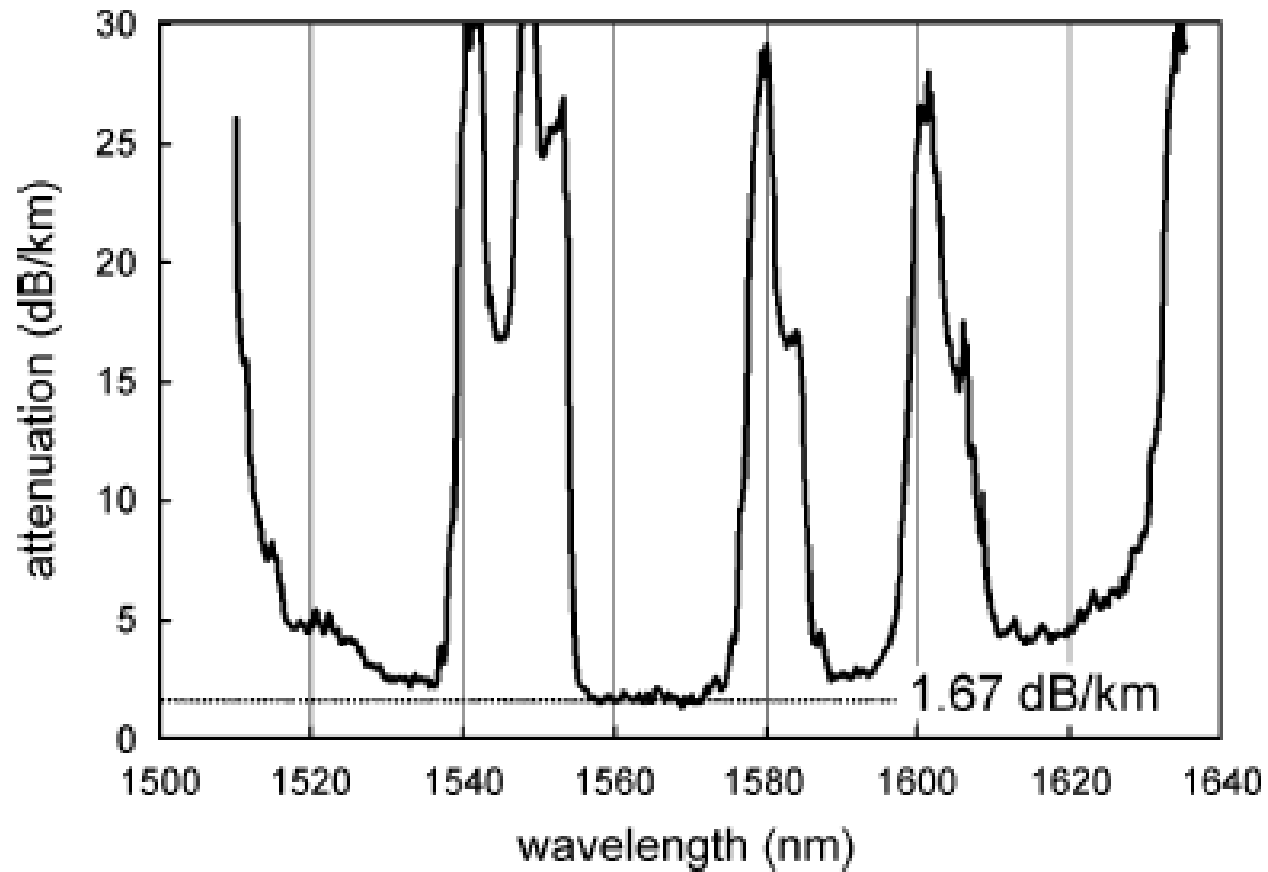




Эффективный модовый показатель преломления и оптические потери в зависимости от длины волны.

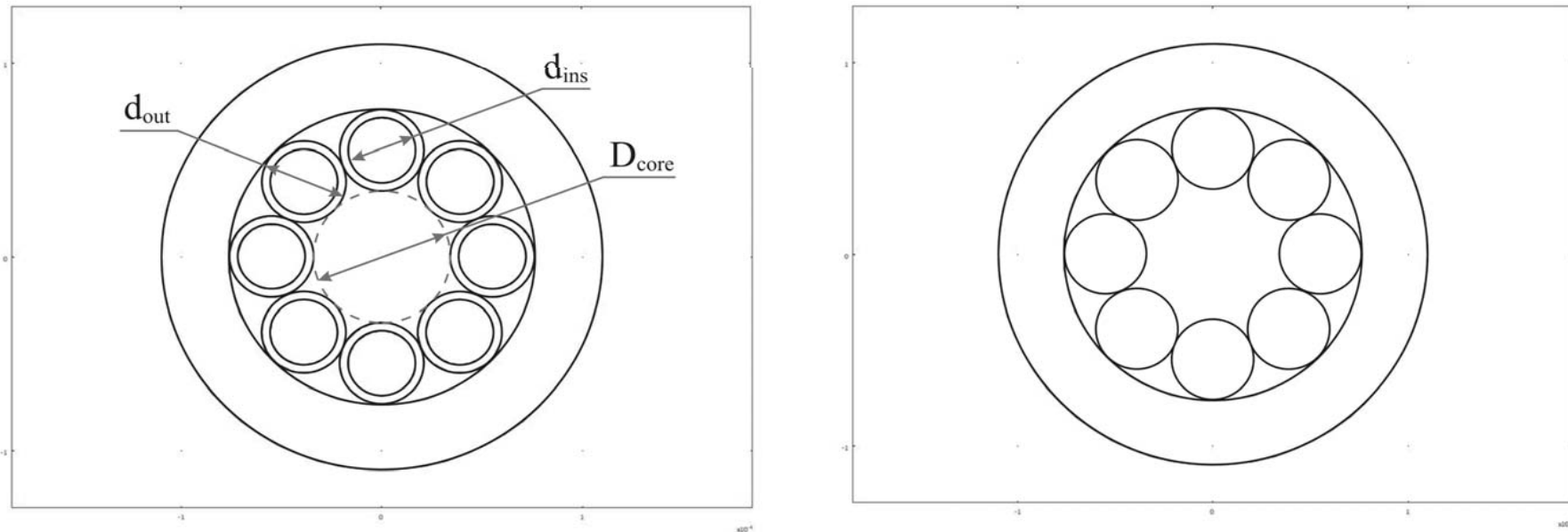
Вверху: иллюстрация явления анти-пересечений мод сердцевины (кривые с меньшим наклоном) и поверхностных мод (кривые с большим наклоном)

Буквам (длинам волн) на дисперсионных кривых соответствуют рассчитанные распределения поля на предыдущем слайде.



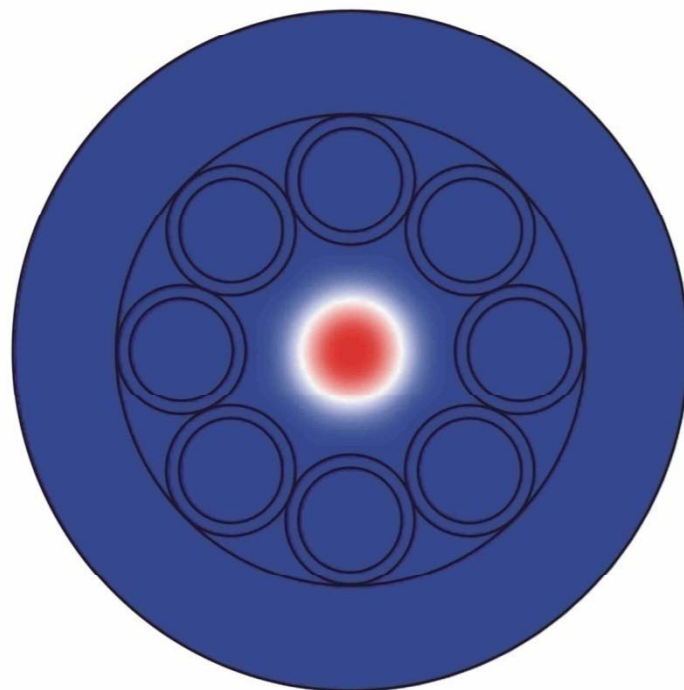
Оптические потери в одном из лучших вариантов световода с поллой сердцевиной (полученного изъятием 19 капилляров из сборки)

P.J. Roberts, F. Couny, H. Sabert et al. Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibres. *Optics Express*, **13**, N1, 236-244 (2005).

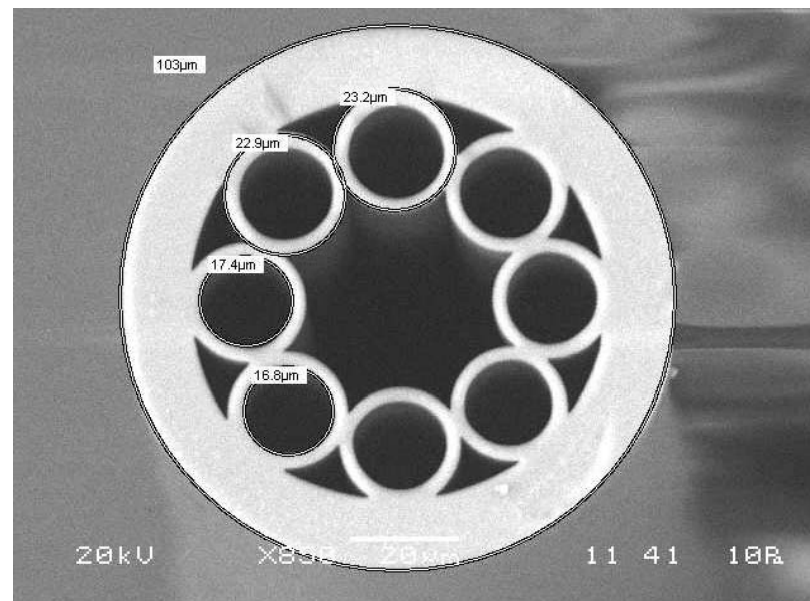


Поперечные сечения микроструктурированных световодов (МС) с поллой сердцевиной, оболочка которых содержит всего один слой капилляров (слева) или сплошных стеклянных стержней (справа).

A.D. Pryamikov, A.S. Biriukov, A.F. Kosolapov, V.G. Plotnichenko, S.L. Semjonov, E.M. Dianov. Demonstration of waveguide regime for a silica hollow-core microstructured optical fiber with a negative curvature of the core boundary in the spectral region $>3,5 \mu\text{m}$. *Optics Express*, **19**, №2, 1441 (2011)



Радиальное распределение фундаментальной моды световода с поллой сердцевиной, представленного на предыдущем рисунке (расчет).



Вид преформы (слева) и поперечного сечения МС с полый сердцевиной, оболочка которого представляет собой восемь капилляров и определяет эффективный диаметр сердцевины $D=36$ мкм.

ОСНОВНЫЕ ПРИЧИНЫ НАЛИЧИЯ ВЫСОКИХ ОПТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОЛЫХ СВЕТОВОДАХ (МПС)

1. Во всех типах МПС моды сердцевины являются вытекающими.

2. Отсутствие ЗФЗ (капилляр, структура типа “kagome”)

Здесь направленность излучения достигается за счет низких значений DOS и, соответственно, сравнительно малого числа антипересечений мод сердцевины и оболочки. В любом случае, потери в подобных световодах высоки (единицы дБ/м), даже если граница сердцевина-оболочка представляет собой антирезонансный слой диэлектрика. Более того, исследования [Fevrier et. al] свидетельствуют, что многослойная структура типа “kagome” не выполняет положительной роли в снижении потерь. Показано, что достаточно использовать упрощенную конструкцию оболочки (один слой элементов). Отмечается существенная роль формы границы сердцевина-оболочка.

3. Введение в качестве границы сердцевина-оболочка антирезонансного слоя эквивалентно изменению потерь в $\sim \lambda/R$ раз по сравнению с безструктурной (сплошной) оболочкой. Иными словами, потери оказываются пропорциональны не λ^2/R^3 , а λ^3/R^4 .

4. Вследствие своей интерференционной природы для всех типов МПС высока чувствительность спектров пропускания к изменению толщины стеклянного слоя, непосредственно примыкающего к сердцевине.

5. Исследования [University of Bath] продемонстрировали наличие еще одного важного источника потерь – рассеяние на шероховатостях границы сердцевина-оболочка, обусловленных замораживанием в процессе вытяжки световода возникающих на этой границе капиллярных волн.