

# Экспериментальные методы квантовой электроники

Основной круг проблем, рассматриваемых в курсе

Основные задачи квантовой электроники – понять законы, принципы и эффекты при взаимодействии (распространении, излучении, управлении) света (лазерного излучения) с веществом (в т.ч. с наноструктурами)

## Объекты, методы и эффекты:

- наноструктуры и нанотехнологии
- эффекты размерного квантования, квантовые точки, квантовые ямы
- нанофотоника
- фотонные кристаллы и метаматериалы
- наноплазмоника
- микроскопия ближнего оптического поля
- фотонные устройства для сверхскоростной телекоммуникации
- биоматериалы для нанофотоники

# Структура курса

## 1 часть оптические методы

- источники излучения  
(тепловые, газосветные, лазерные)
- приемники излучения  
(ФЭУ, фотодиоды, лавинные фотодиоды, CCD-матрицы)
- спектральные приборы
- детектирующая электроника  
(счетчик фотонов, бокскар, синхронный детектор, GPIB, Labview)
- оптические элементы  
(оптическое волокно, линзы, объективы, поляризационная оптика, модуляторы)
- современные оптические методики  
(модуляционные методики, SNOM, FROG, сверхразрешающая микроскопия)

## 2 часть ростовые методы

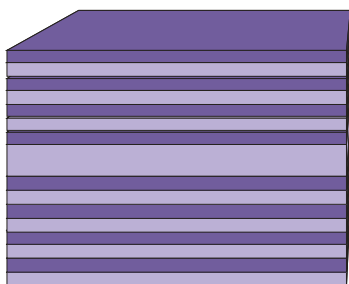
- методы тонкопленочной эпитаксии  
(MBE, плазмохимия, CVD, ионная имплантация, лазерная абляция)
- фотолитографические методы  
(фотолитография, лазерная интерференционная литография)
- литография высокого разрешения  
(электронно-лучевая литография - EBL, ионно-лучевая литография – FIB, рентгеновская литография)
- методы диагностики наноструктур  
(РЭМ (SEM), ПЭМ (TEM), AFM, MFM)

## Характерные величины квантовой электроники

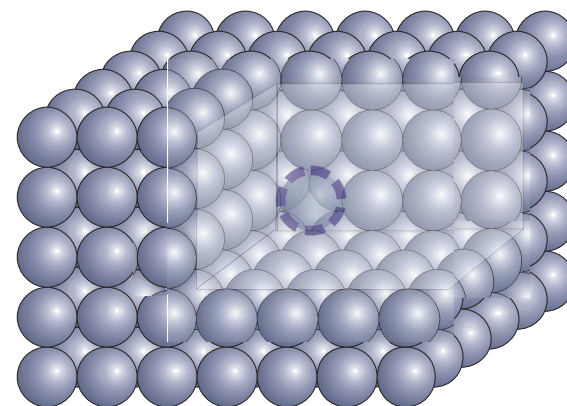
- длина волны света видимого диапазона – 500 – 700 нм
- размер квантовой ямы, квантовой точки – 1-10 нм
- длина свободного пробега электрона – 0.1 – 10 нм
- характерный размер ячейки оптической памяти при плотности 1 Tbyte/inch<sup>2</sup> – 20 нм
- радиус кривизны 90°-поворота оптического волокна – 10 см
- энергия фотона видимого диапазона – 1 – 2 эВ

# Понятие о фотонных кристаллах

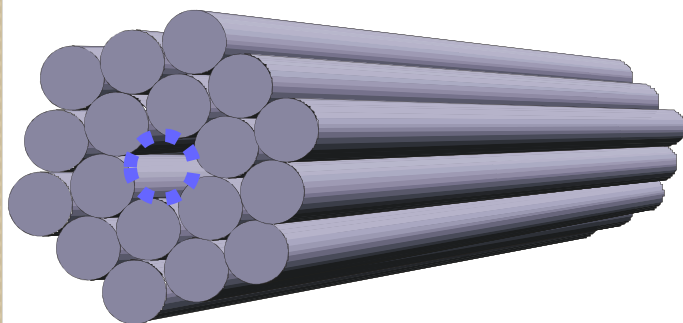
одномерные ФК



трехмерные ФК



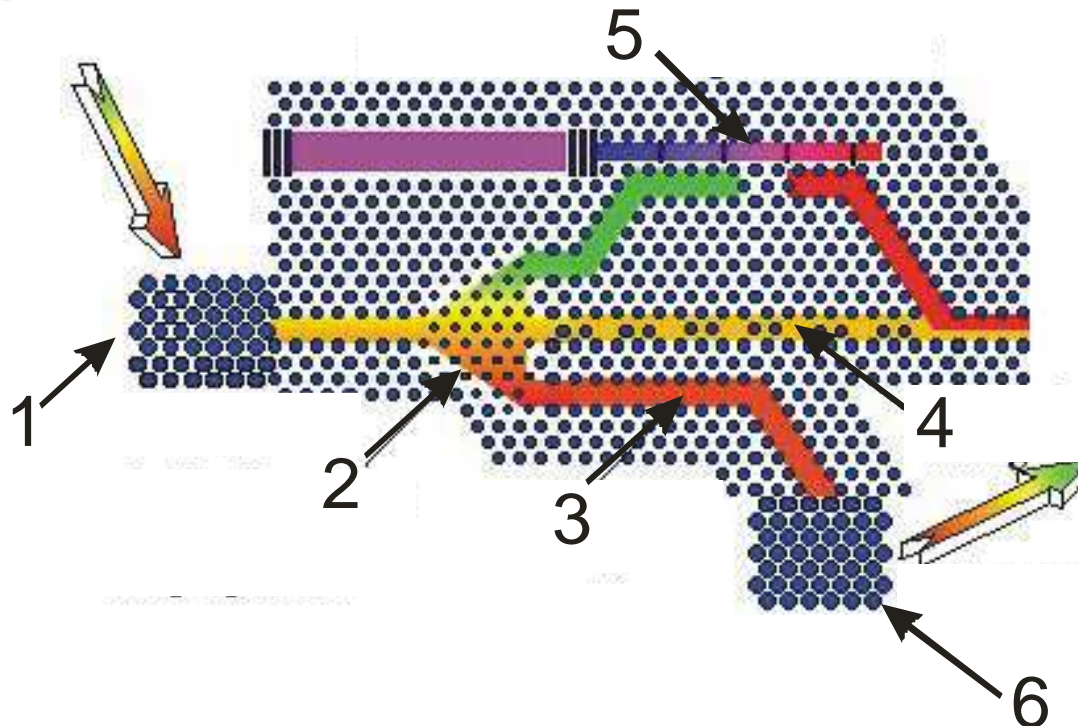
двумерные ФК



Зачем нужны фотонные кристаллы?

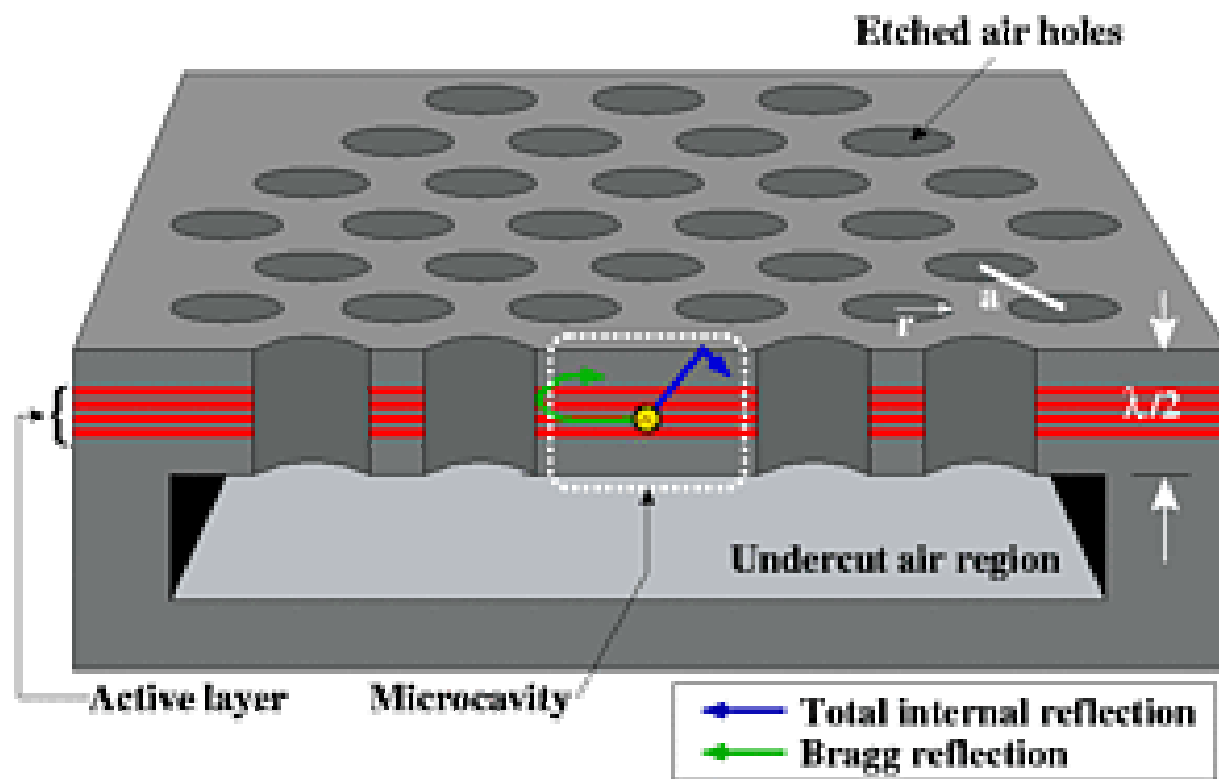
- фотоннокристаллические волокна (photonic crystal fibers)
- лазеры с предельно низким порогом генерации
- всенаправленное отражение (omni-directional reflection)
- локализация света
- эффект суперпризмы
- фотокристаллические волноводы, разветвители, мультиплексоры

# Нанопотоника и нанотехнологии. Фотонный чип



- 1 и 6 - входная и выходная апертуры волноводной структуры
- 2 - **фотонный мультиплексор и фотонный переключатель**
- 3 - **волноводный канал** для определенной длины волны (произвольной конфигурации, в том числе, Г и Т-типа)
- 4 - **связанные микрорезонаторы** (другая конструкция волноводного канала)
- 5 - миниатюрный преобразователь частоты, совмещающий в себе свойства **фотонного транзистора**, управляющего распространением света заданной длины волны и **фотонного гетеродина**, функционирующего на принципе генератора суммарной и разностной частоты.

## Двумерные фотонные кристаллы

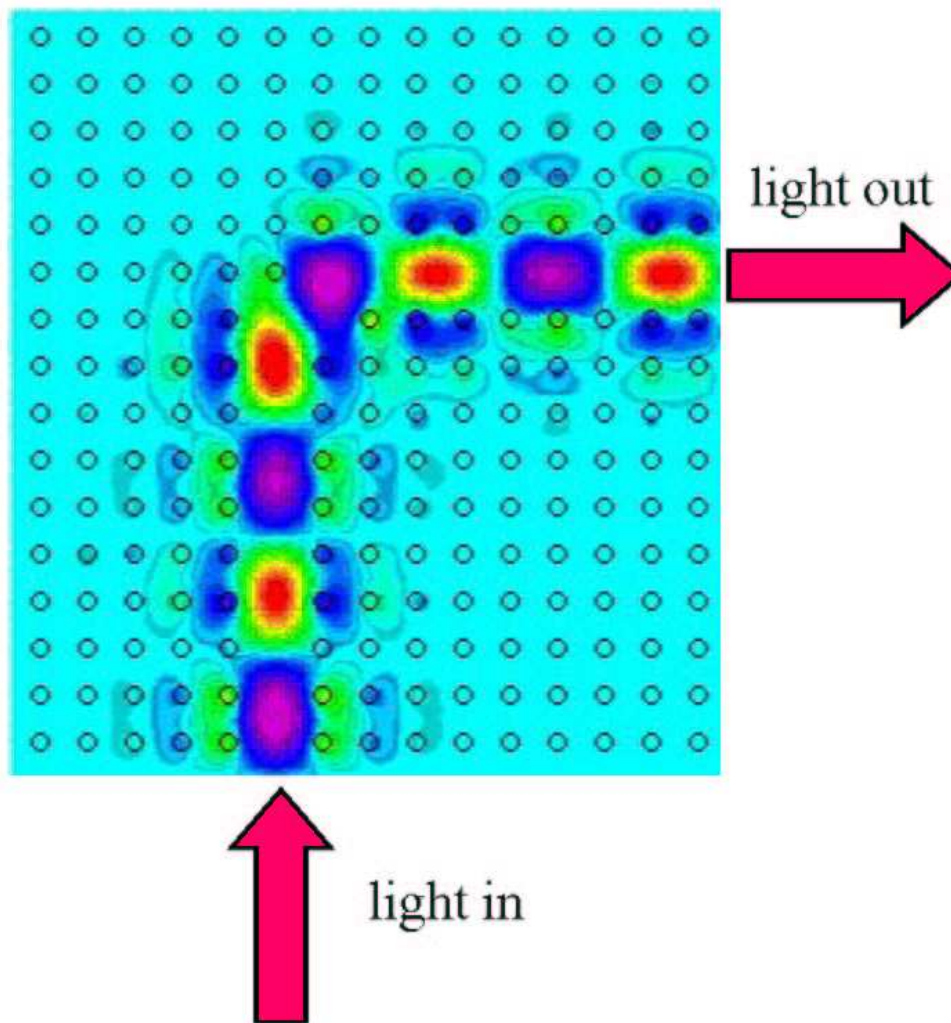


- Планарный волновод с двумерной (2D) периодической структурой
- Дефект (пропущенная дырка) локализует свет

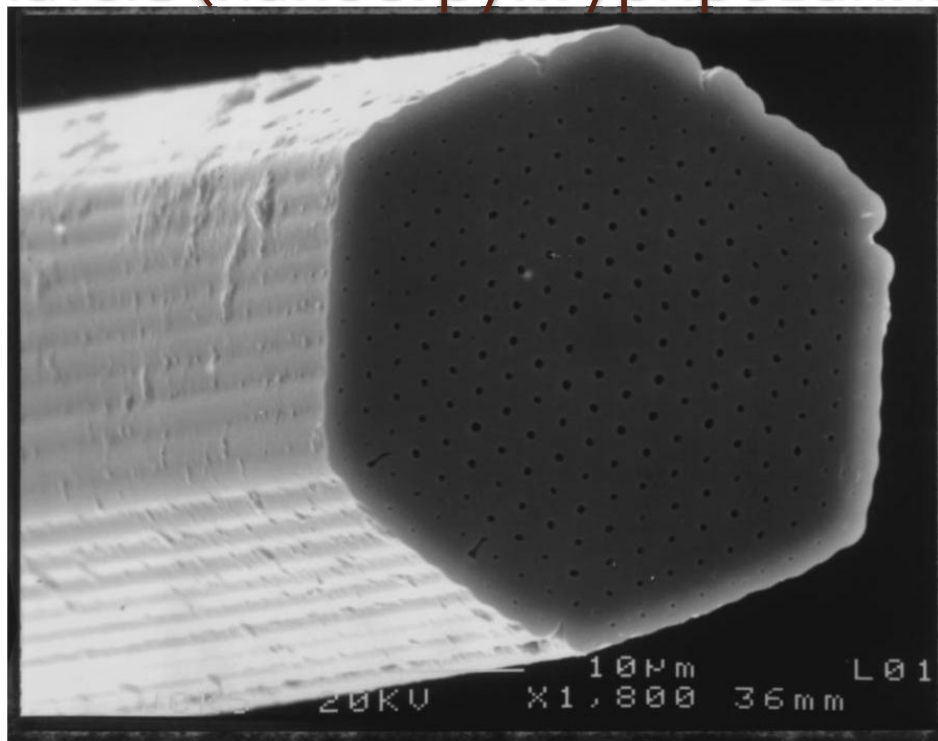


## Волновод на основе двумерных фотонных кристаллов

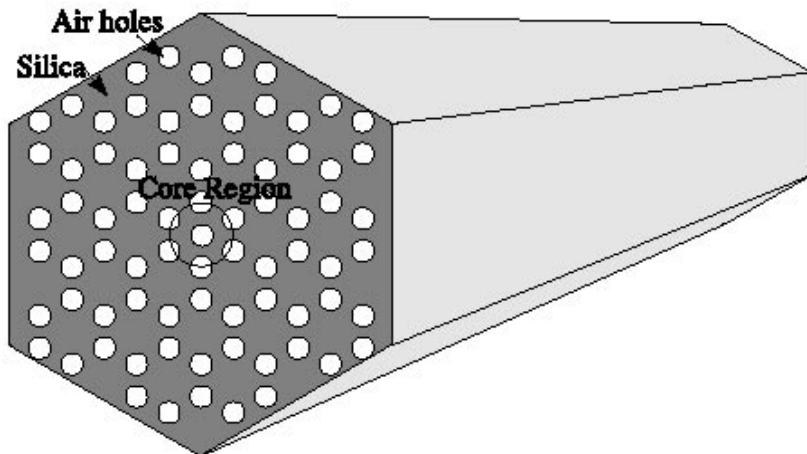
after Mekis et al., Phys. Rev. Lett. 77, 3787 (1996)



## Дырчатые (наноструктурированные) волокна



J Broeng *et al*

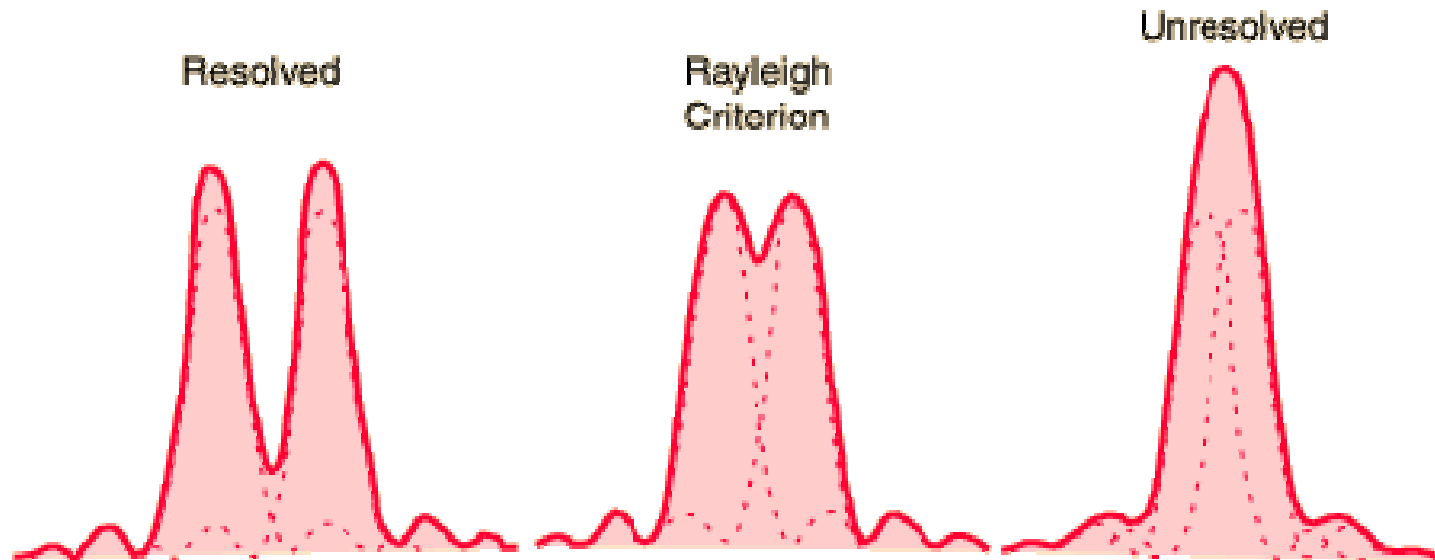


- 2D фотонный кристалл в поперечном сечении
- разрешение распространения света вдоль оси волокна
- дополнительная степень свободы при дизайне волокна

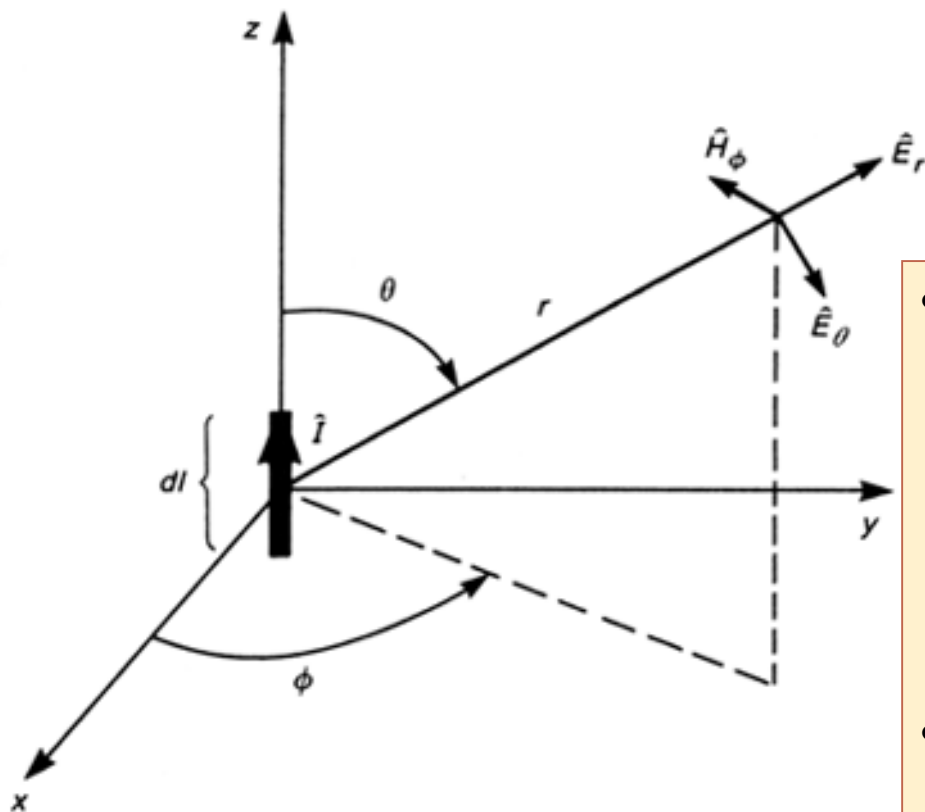


# Оптическая микроскопия

- Критерий Рэля
  - разрешение двух линий с равной интенсивностью
  - пространственное разрешение  $\sim 0.61 \lambda / NA$  ( $NA$  – числовая апертура)
  - практическое ограничение  $\sim 0.5 \mu m$  @ видимом диапазоне



## Понятие о ближнем и дальнем поле



- Дальнее поле:
  - сферическая или плоская волна
  - распространяющаяся волна
  - напряженность поля  $\sim 1/r$
- Ближнее поле:
  - напряженность поля  $\sim 1/r^2, 1/r^3$
  - локализованное электромагнитное поле

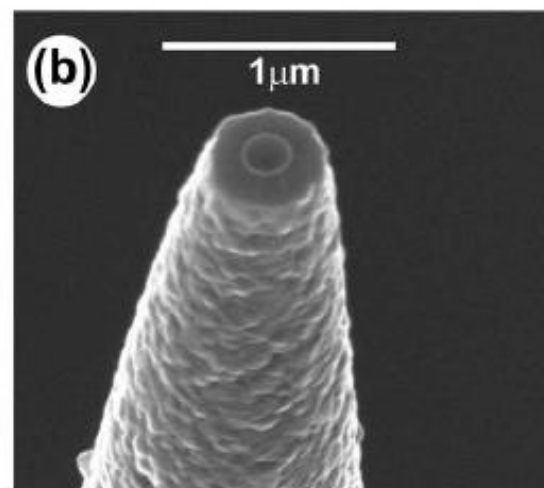
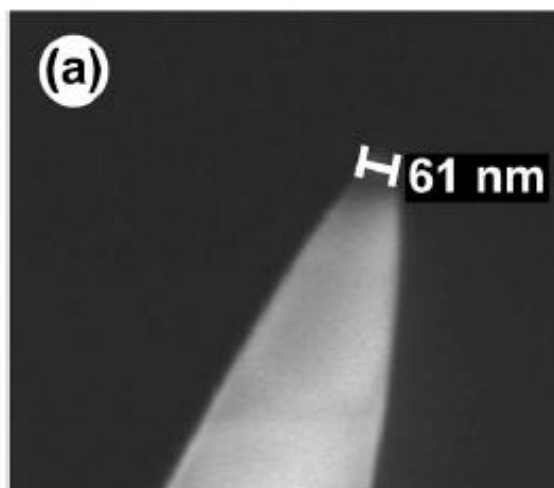
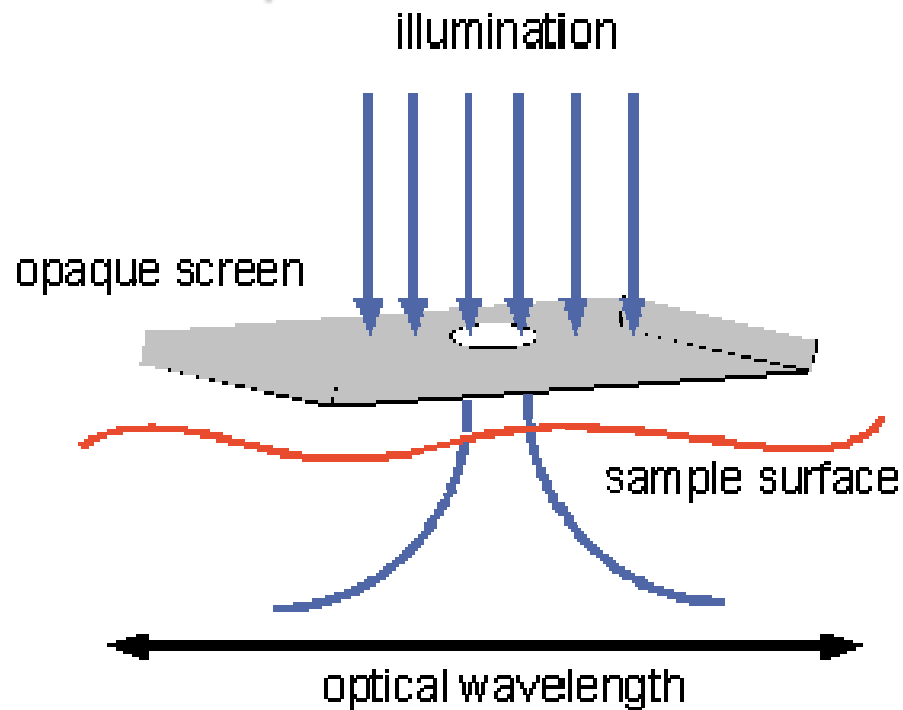
$$E_r = 60\beta^2 I dz \left[ \frac{1}{(\beta r)^2} - \frac{j}{(\beta r)^3} \right] \cos \theta e^{-j\beta r}$$

$$E_\theta = j30\beta^2 I dz \left[ \frac{1}{\beta r} - \frac{j}{(\beta r)^2} - \frac{1}{(\beta r)^3} \right] \sin \theta e^{-j\beta r}$$

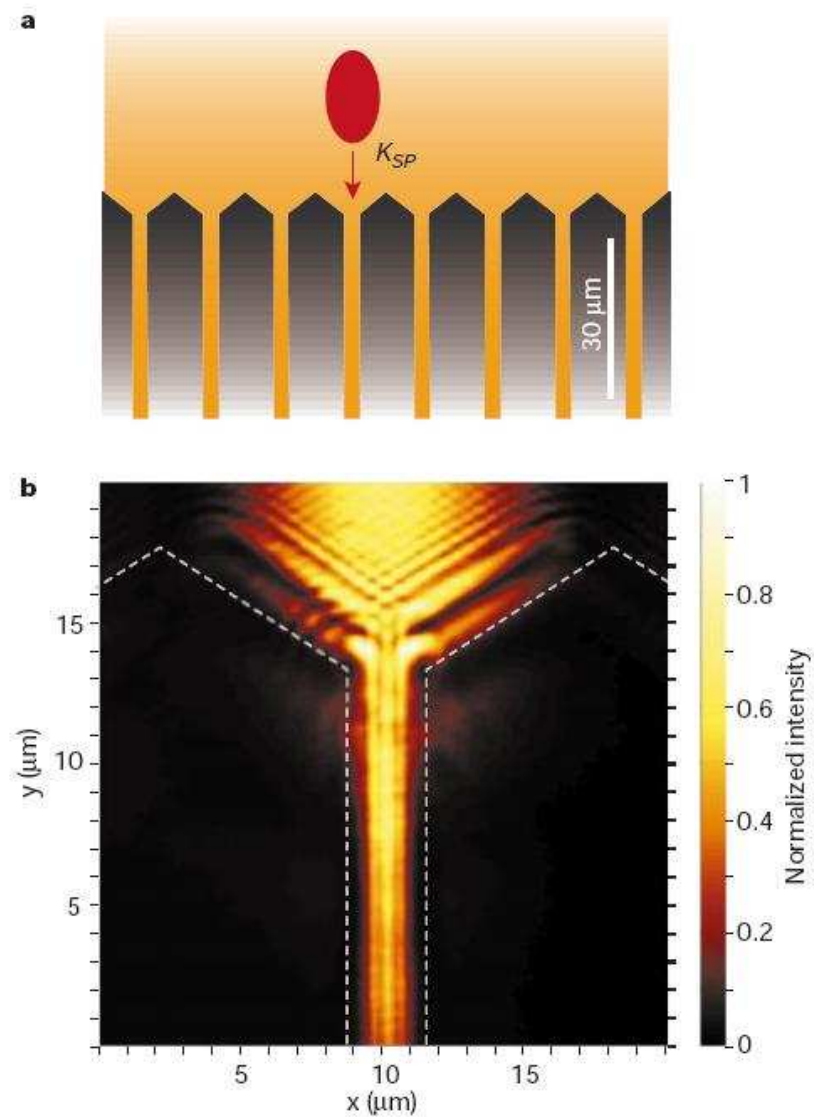
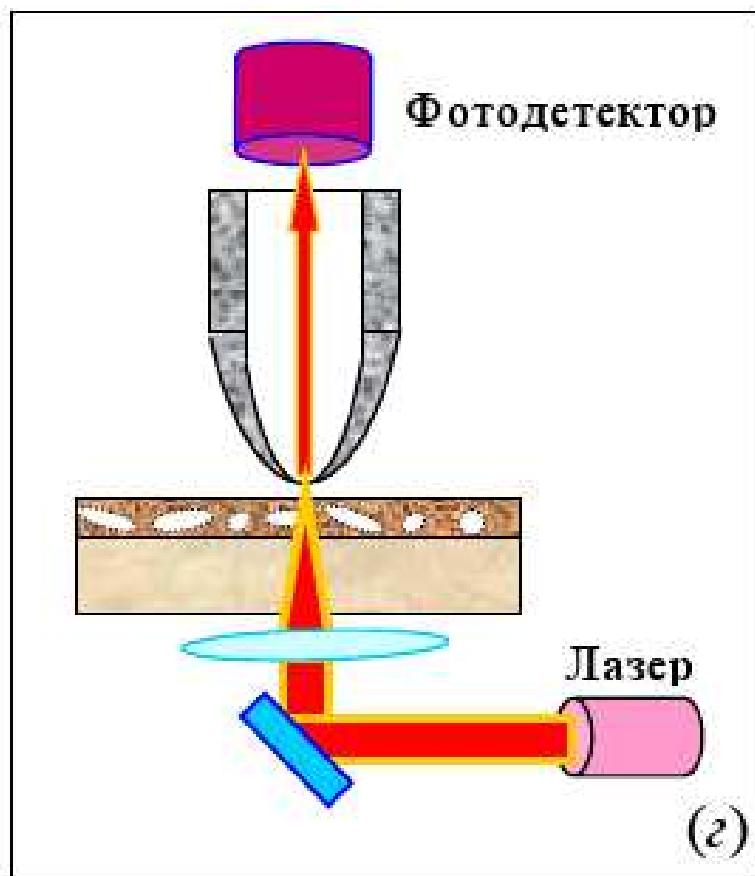
$$H_\phi = j \frac{\beta^2}{4\pi} I dz \left[ \frac{1}{\beta r} - \frac{j}{(\beta r)^2} \right] \sin \theta e^{-j\beta r}$$

$$E_\phi = H_r = H_\theta = 0$$

## Оптическая микроскопия ближнего поля (1)

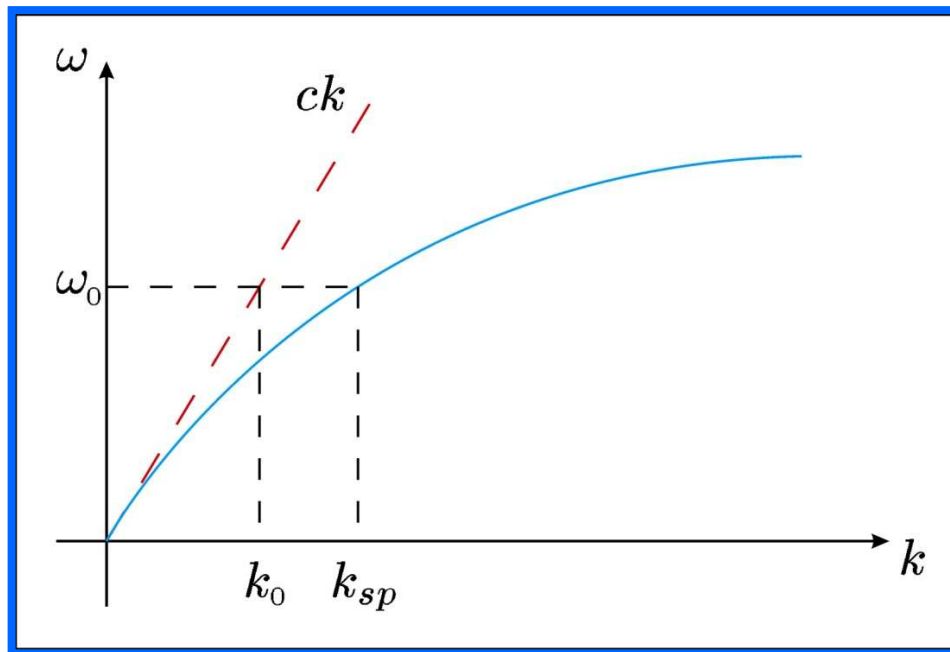


## Оптическая микроскопия ближнего поля (2)

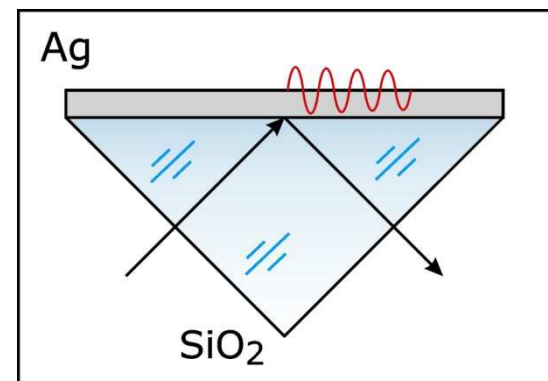


# Наноплазмоника

закон дисперсии поверхностных  
плазмон-поляритонов (ППП)



призменная схема возбуждения  
ППП (схема Кретчмана)



$$E_z^{(1)}(x, z) = E_0 \exp(-\alpha_1 z) \exp(ik_p x)$$

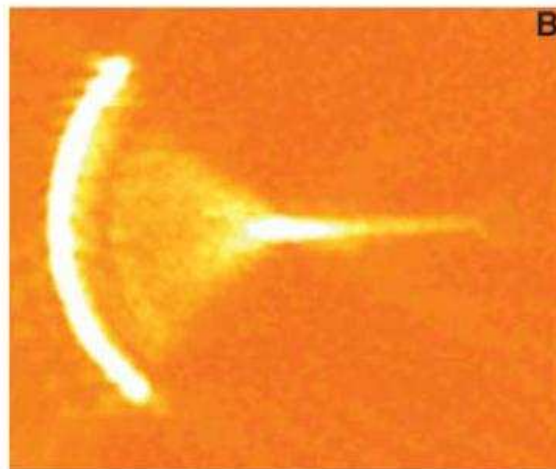
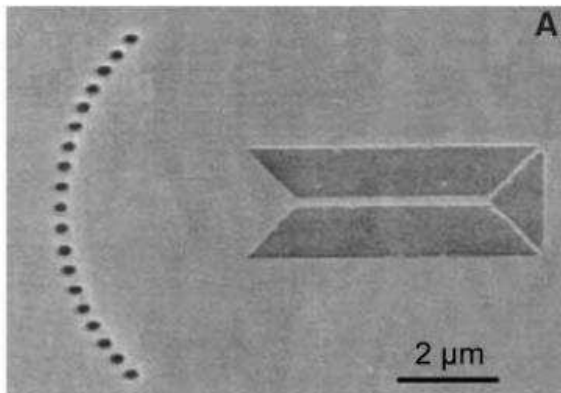
$$E_z^{(2)}(x, z) = E_0 \exp(\alpha_2 z) \exp(ik_p x)$$

$$k_p = \left( \frac{\omega}{c} \right) \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}} \quad \alpha_{1,2} = \left( \frac{\omega}{c} \right) \sqrt{-\frac{\epsilon_{1,2}^2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}}$$

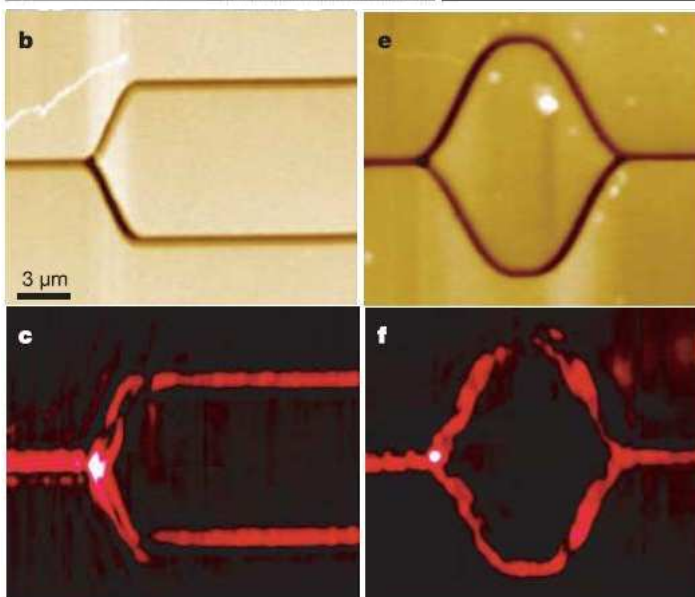
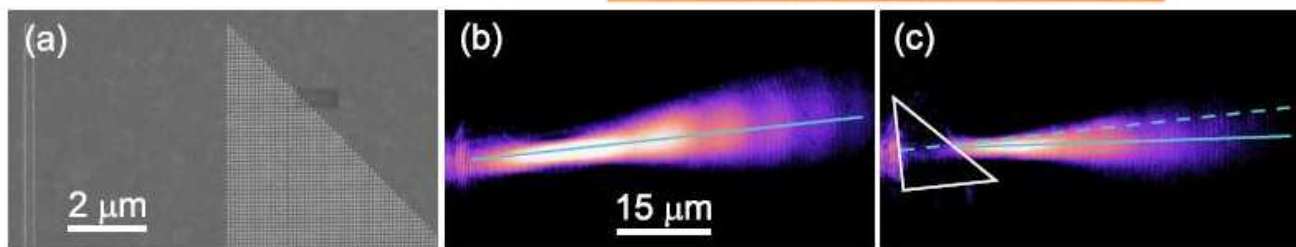
$$\epsilon_1 > 0, \quad \epsilon_2 < 0, \quad |\epsilon_2| > \epsilon_1$$



## Устройства наноплазмоники



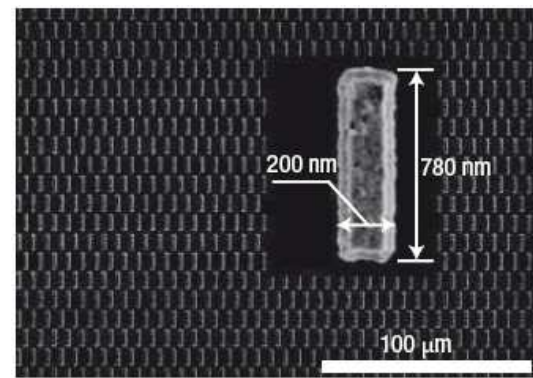
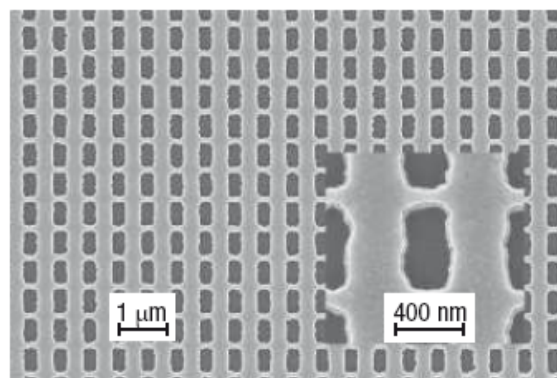
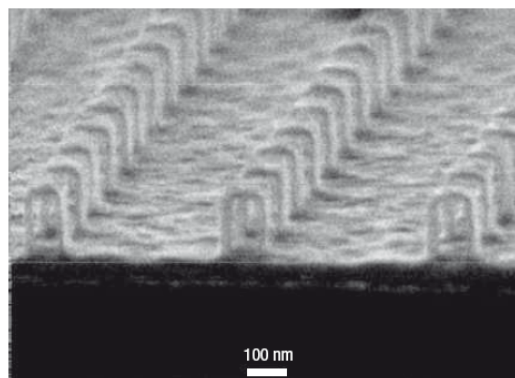
фокусирующий  
элемент



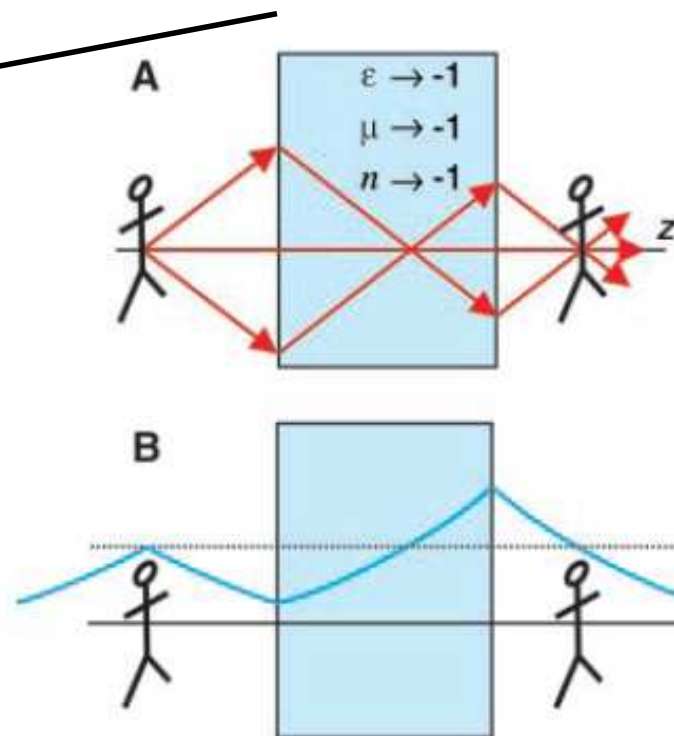
плазмонный  
преломляющий  
элемент

плазмонный  
разветвитель и  
интерферометр

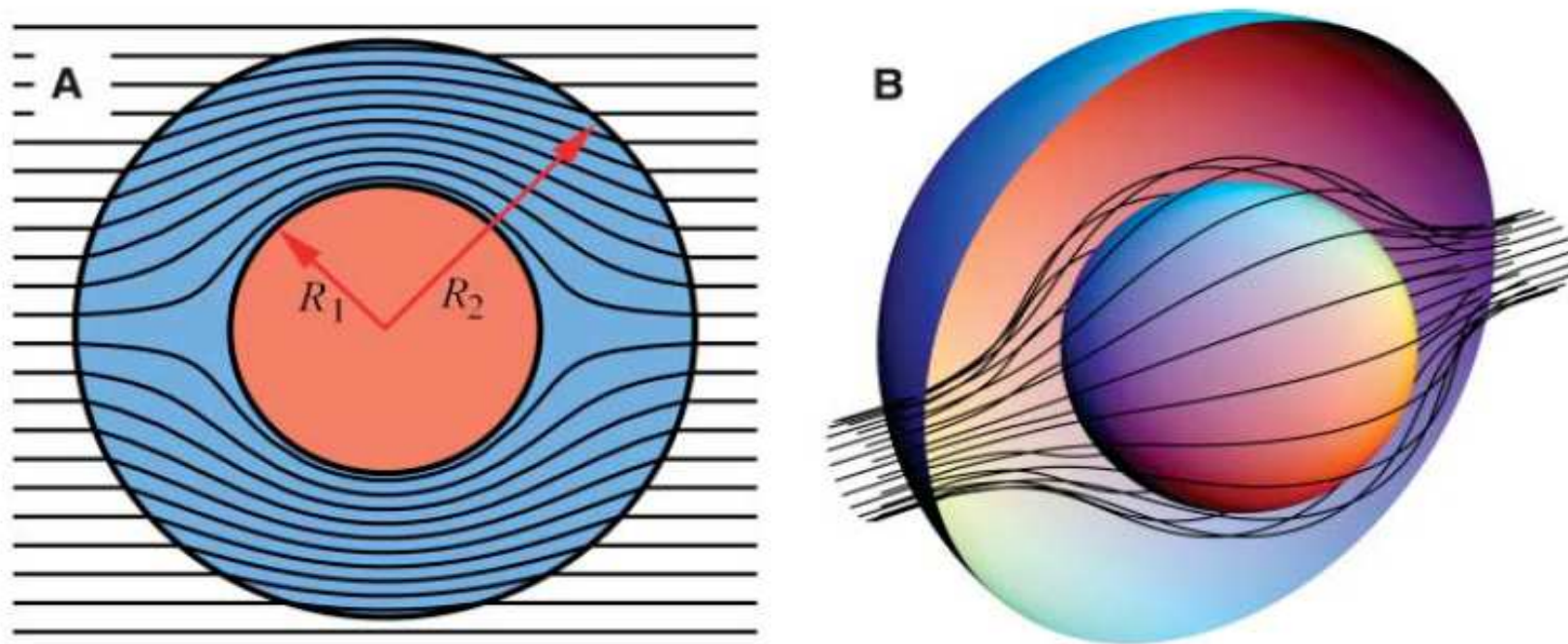
# Оптические метаматериалы как элементы трансформационной оптики



Отрицательный  
эффективный  
показатель  
преломления



# Оптические метаматериалы: перспективы реализации оптической невидимости (optical cloaking)



**Fig. 2.** A ray-tracing program has been used to calculate ray trajectories in the cloak, assuming that  $R_2 \gg \lambda$ . The rays essentially follow the Poynting vector. **(A)** A two-dimensional (2D) cross section of rays striking our system, diverted within the annulus of cloaking material contained within  $R_1 < r < R_2$  to emerge on the far side undeviated from their original course. **(B)** A 3D view of the same process.