

Оптика наносистем



Тимошенко Виктор Юрьевич

*Московский Государственный Университет
им. М. В. Ломоносова, Физический факультет
Научно-Образовательный Центр по нанотехнологиям*

Содержание курса

Лекция 1. Основные понятия оптики конденсированных фаз вещества.

Лекция 2. Взаимодействие света с металлами и диэлектриками.

Лекция 3. Поглощение света в полупроводниках.

Лекция 4. Экситонное и примесное поглощение света.

Лекция 5. Эмиссия излучения из твердых тел.

Лекция 6. Оптические явления в неоднородных твердотельных системах.

Лекция 7. Оптические свойства твердотельных нанокомпозитов.

Лекция 8. Фотонные кристаллы и микрорезонаторы.

Лекция 9. Рассеяние света в твердых телах.

Лекции 10,11. Влияние размеров тел на их оптические свойства.

Лекции 12-14. Экситоны в полупроводниковых наноструктурах.

Лекция 15. Оптические свойства и применения полупроводниковых наноструктур.

Лекция 16. Элементы спиновой оптики и спинтроники.

Лекция 17. Нелинейные оптические явления в твердотельных системах.

Лекция 18. Элементы нелинейной оптики наноструктур и нанокомпозитов.

Лекция 8. Фотонные кристаллы и микрорезонаторы.

Распространение света в одномерном фотонном кристалле. Понятие о фотонной запрещенной зоне. Методы расчета оптических свойств фотонных кристаллов. Двумерные и трехмерные фотонные кристаллы.

Фотонно-кристаллические среды и волноводы. Дисперсия света в фотонно-кристаллических структурах. Использование фотонных кристаллов как брэгговских зеркал.

Микрорезонаторы. Замедление света в фотонных кристаллах. Метаматериалы.

Базовые принципы фотонных кристаллов. Аналогия с электронными свойствами кристаллов.

Уравнение Шредингера:

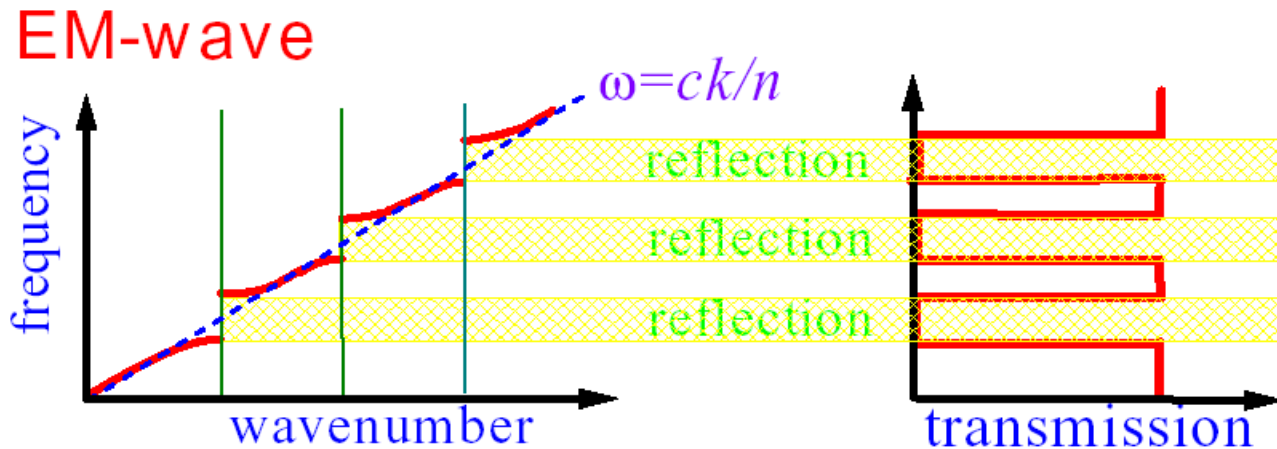
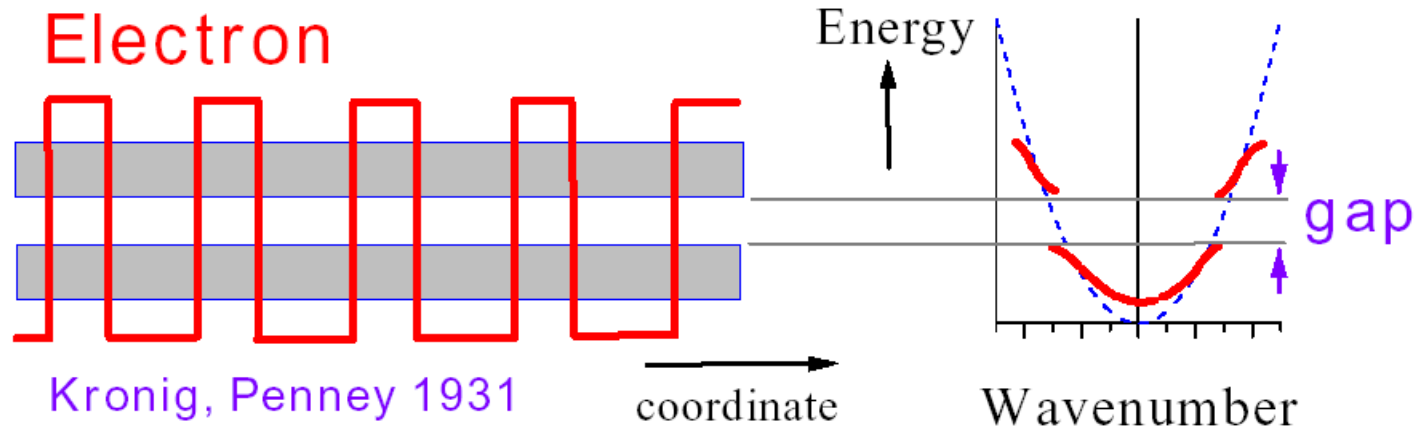
$$\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(x) + [E - U(x)] \Psi(x) = 0$$

Уравнение Гельмгольца
(волновое уравнение):

$$\nabla^2 E(x) + \epsilon(x) \frac{\omega^2}{c^2} E(x) = 0$$



1D периодические структуры

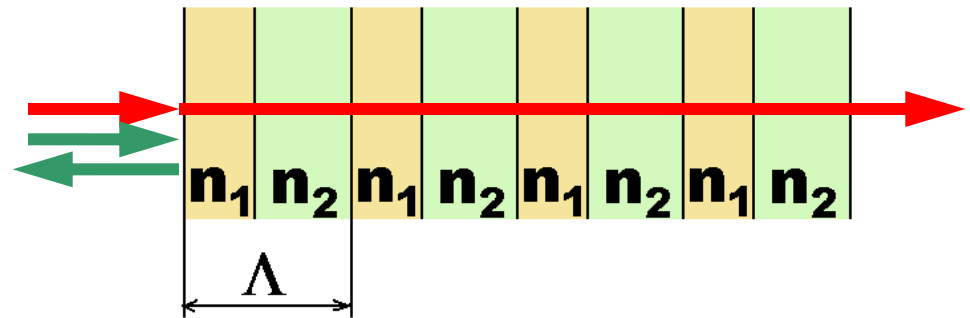


Фотонные кристаллы

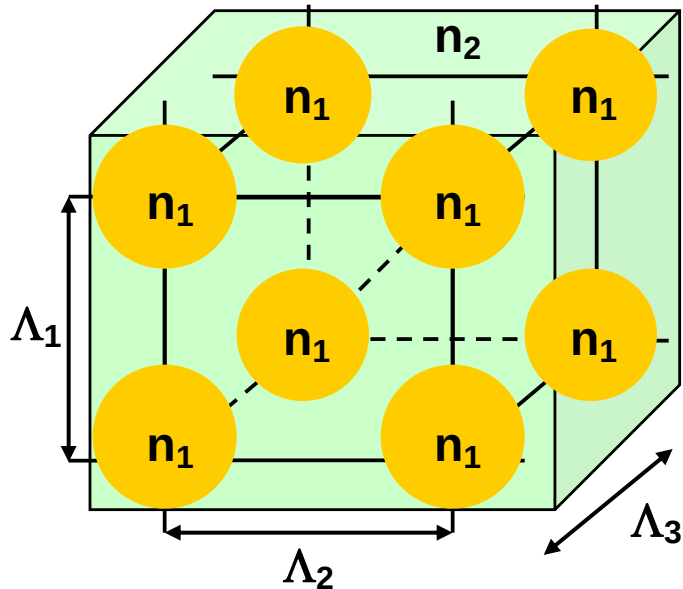
Фотонный кристалл - это материал, структура которого характеризуется периодическим изменением показателя преломления в пространственных направлениях .

Основное свойство фотонного кристалла – существование **фотонной запрещенной зоны** – области частот фотонов, которые не могут распространяться внутри фотонного кристалла.

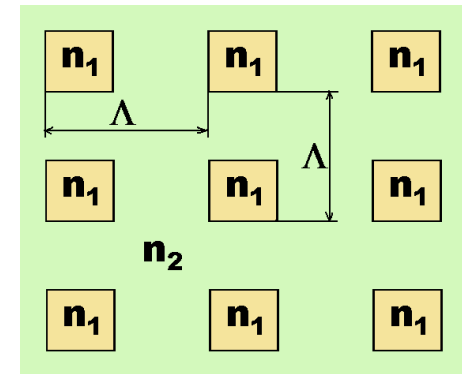
Одномерный фотонный кристалл



Трёхмерный фотонный кристалл



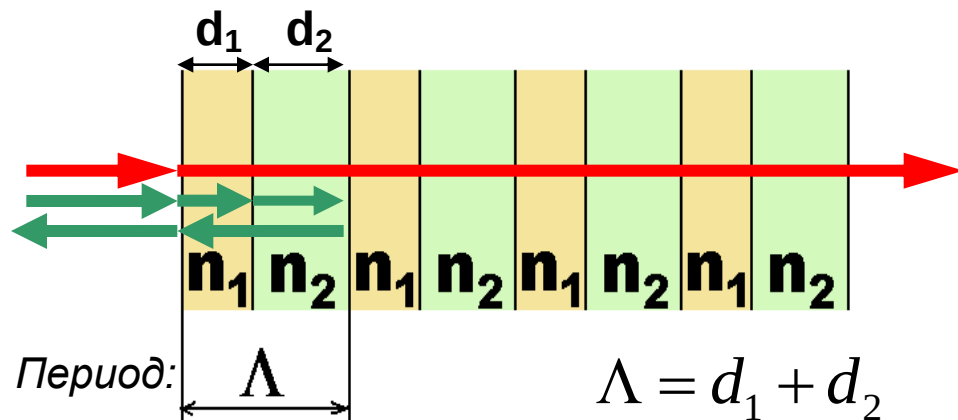
Двумерный фотонный кристалл



Как образуется фотонная запрещенная зона

Фотонная запрещенная зона образуется в результате интерференции световых волн, отраженных от областей с различными показателями преломления.

Одномерный фотонный кристалл :



Максимумы в спектре коэффициента отражения **R** и минимумы в пропускании **T** для длин волн, соответствующих серединам **фотонных запрещенных зон**:

$$\lambda_m = 2(n_1 d_1 + n_2 d_2) / m$$

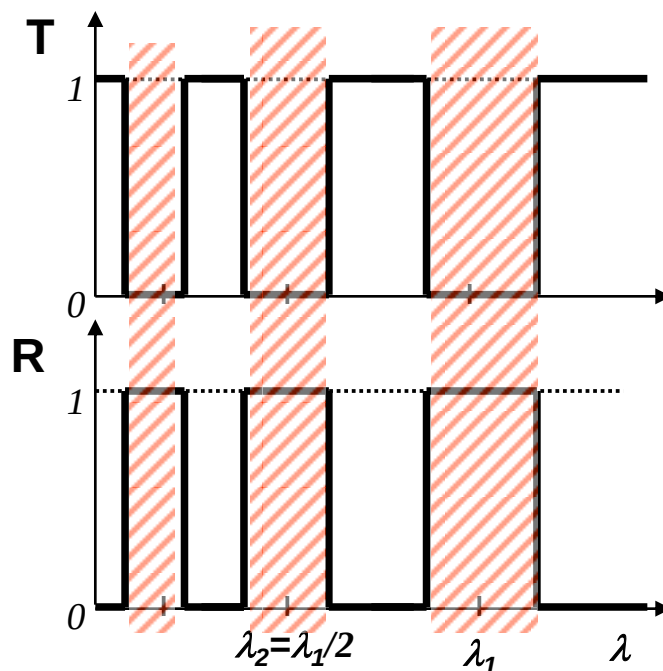
Практически важный частный случай для основной фотонной запрещенной зоны ($m = 1$) :

$$n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda_1 / 4$$

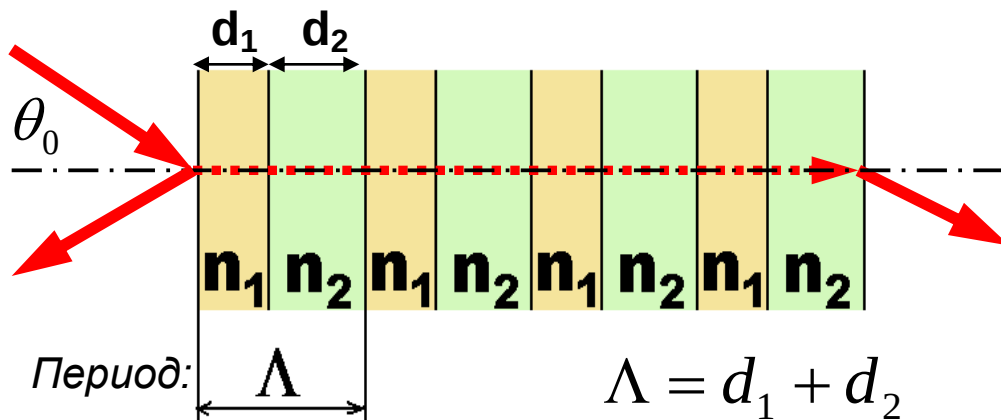
Интерференция волн, отраженных от пары слоев, будет конструктивной при выполнении условия Брэгга:

$$2(n_1 d_1 + n_2 d_2) = m \lambda_m$$

$$m = 1, 2, 3, \dots$$



Расчет оптических свойств 1D-периодических структур методом характеристических матриц



$$p_j = n_j \cos \theta_j, \quad j = 1, 2$$

Характеристическая матрица
многослойной структуры

$$M(N\Lambda) = \underbrace{M(\Lambda)M(\Lambda).....M(\Lambda)}_N = [M(\Lambda)]^N$$

Характеристическая матрица
пары слоев:

$$M(\Lambda) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}$$

Коэффициент отражения пары
слоев:

$$R = |r(m_{ij}, \theta_j)|^2$$

Коэффициент отражения
многослойной структуры:

$$R_N = |r(M_{ij}, N, p_j)|^2$$

Коэффициент пропускания
многослойной структуры:

$$T_N = \frac{p_0}{p_1} |t(M_{ij}, N, p_j)|^2$$

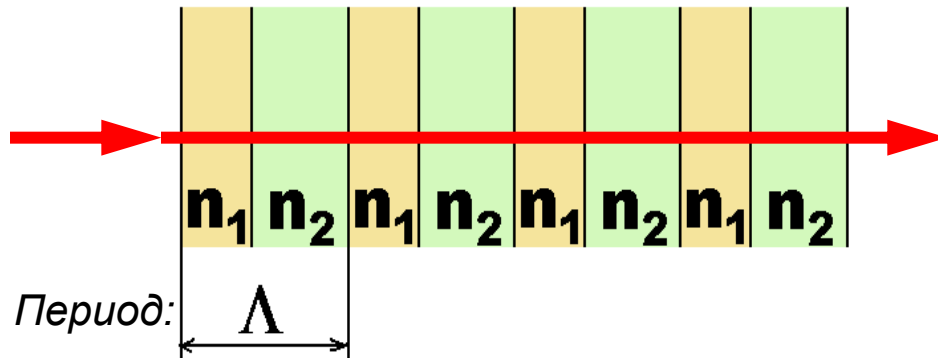
Характеристические матрицы и коэффициент отражения 1D-фотонных кристаллов

Пусть: $\theta_j = 0$
 $p_j = n_j, j = 1, 2$

$$n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda / 4$$

Характеристическая матрица пары слоев $\lambda/4$:

$$M(\Lambda) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{n_1}{n_2} & 0 \\ 0 & \frac{n_2}{n_1} \end{bmatrix}$$



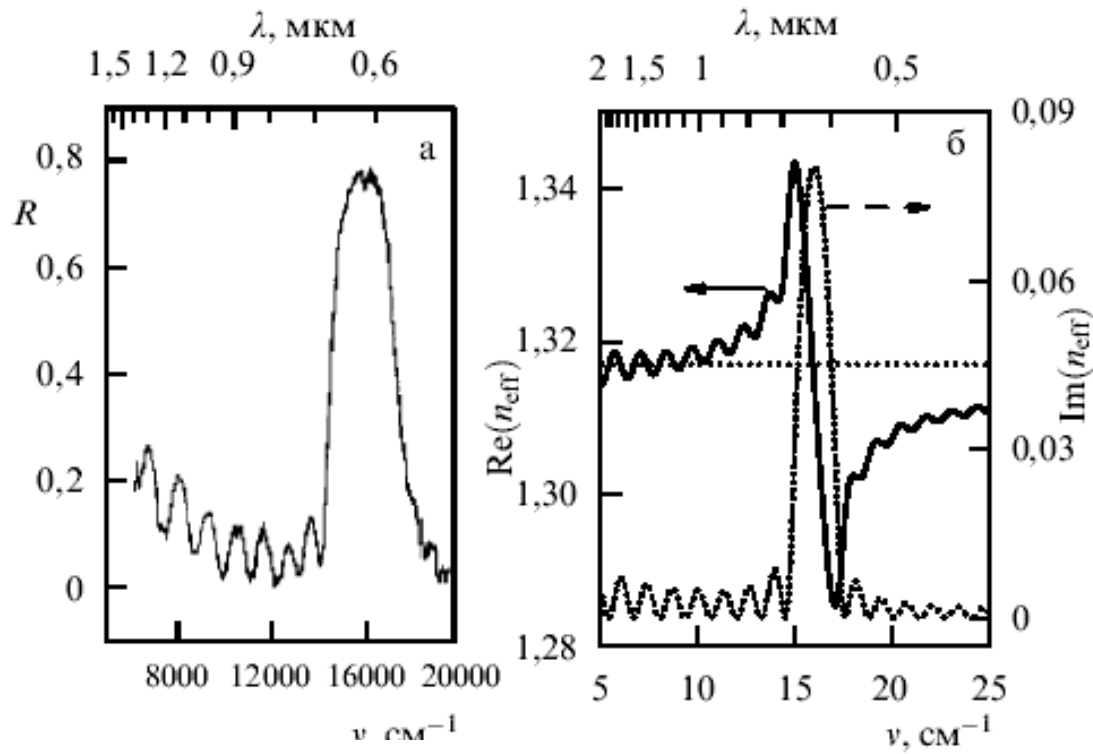
Коэффициент отражения многослойной структуры стремится к 1 при увеличении N и контраста показателей преломления n_1/n_2 :

$$R_N = \left\{ \frac{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^N}{1 + \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^N} \right\}^2$$

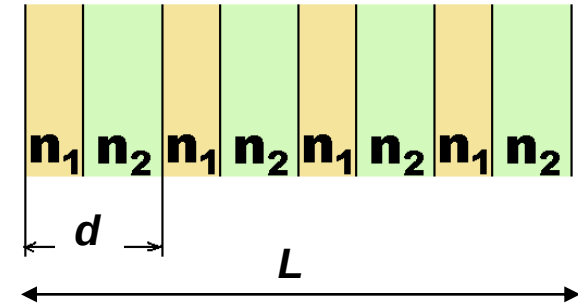
$$R = \left\{ \frac{1 - \frac{n_1}{n_2}}{1 + \frac{n_1}{n_2}} \right\}^2$$

При $N = 1$ получим известную формулу для коэффициента отражения при нормальном падении:

Дисперсия света в фотонных кристаллах



Л.А.Головань и др. УФН, 177 (2007)



$$n_1=1.42, d_1=110 \text{ nm}$$

$$n_2=1.22, d_2=127 \text{ nm}$$

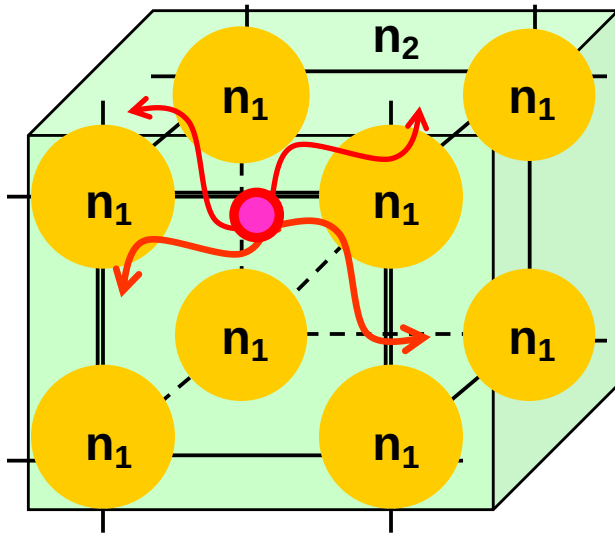
$$\text{Re } n_{\text{eff}} = \frac{\Delta\phi\lambda}{2\pi L},$$

$$\text{Im } n_{\text{eff}} = -\frac{\lambda}{2\pi L} \ln |t|.$$

где $\Delta\phi$ — разность фаз падающей на структуру и прошедшей через нее волн. Отсюда удастся найти действительную и мнимую части эффективного показателя преломления

Изменение эффективного показателя преломления на границах ФЗЗ приводит к 1) эффекту замедления скорости света (рост n_{eff}) и 2) области аномальной дисперсии $\partial n_{\text{eff}} / \partial \omega < 0$ (можно использовать для фазового согласования в нелинейной оптике)

Перспективы фотонных устройств

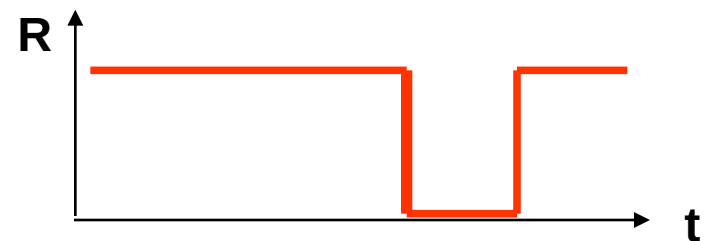
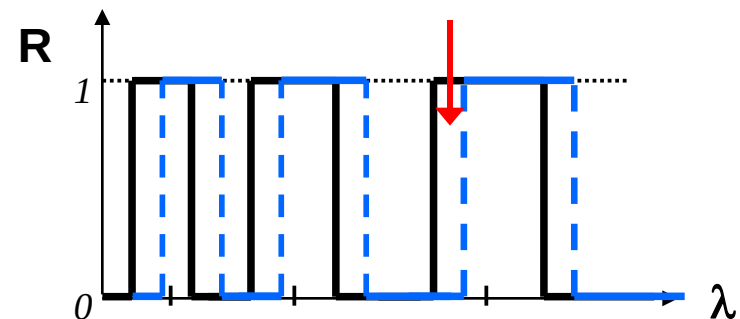


Замедление времени
жизни фотона τ_{rad}

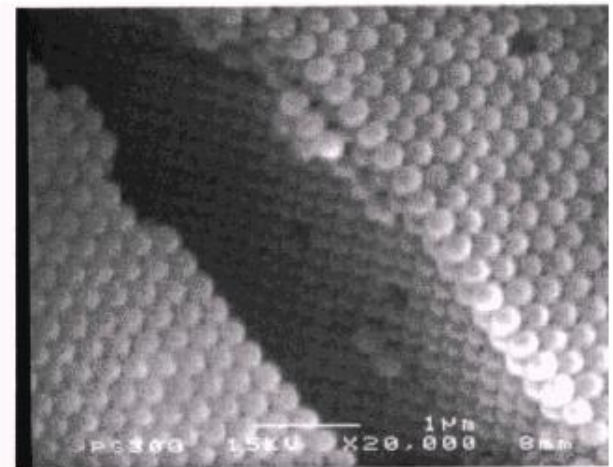
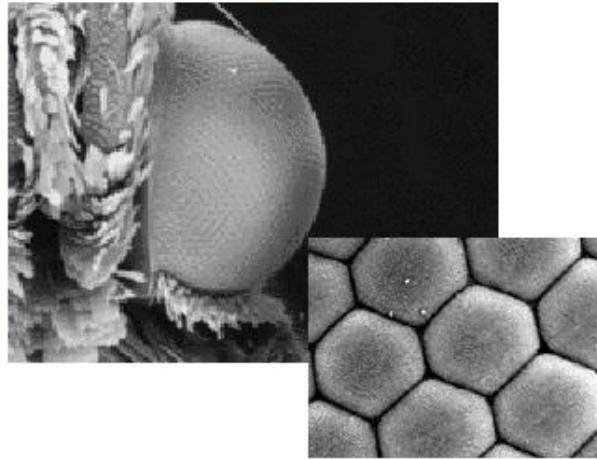
Еще одно применение фотонных кристаллов связано с использованием **контролируемых законов дисперсии** для света вблизи края фотонной зоны, что дает возможность реализовать условия для эффективных волновых **нелинейно-оптических взаимодействий**.

В 3D фотонных кристаллах возможно пленение излучения с длиной волны, соответствующей фотонной запрещенной зоне. Это нужно для создания **лазеров со сверхнизкими порогами генерации**.

Управляемые светом или электрическим полем фотонные кристаллы могут быть использованы как элементы **оптических усилителей, переключателей и транзисторов**, что дает возможность построить оптические устройства обработки информации.



ФК в природе



1-D:

iridescent coating
of fly's wings

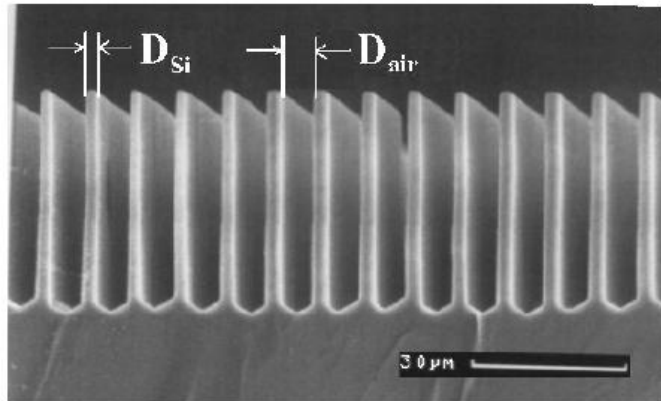
2-D:

surface of moth's eye,
human eye cornea

3-D:

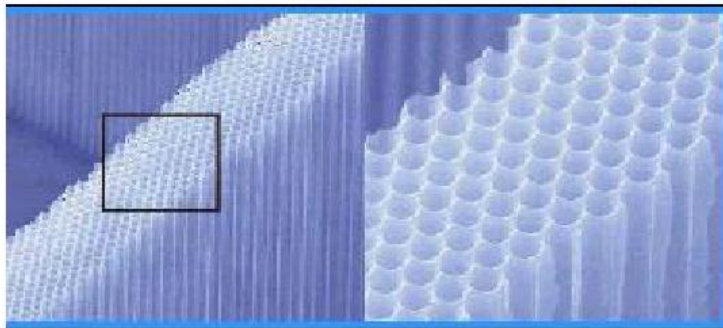
opals

Искусственные ФК из кремния



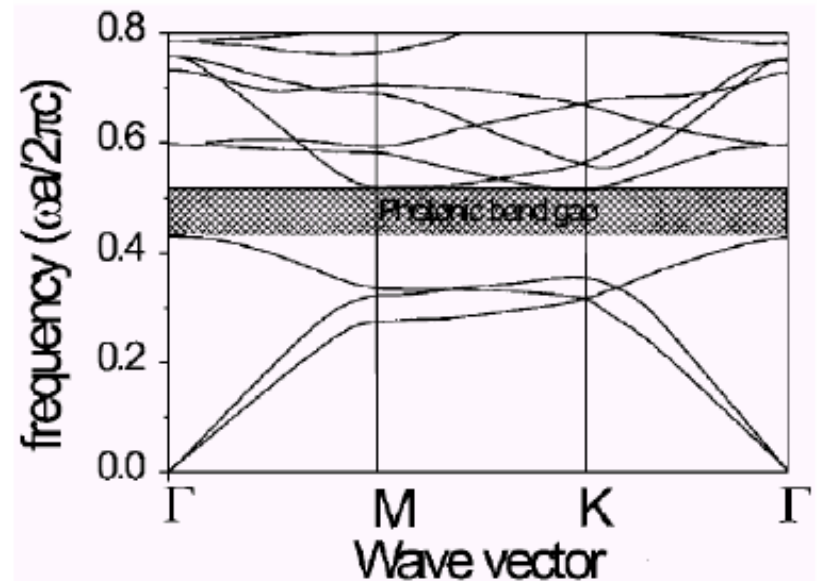
V. Tolmachev et al. Proceeding SPIE 2003

Honey-comb structures on Si substrate



Van Driel et al. MRS Proc. V.722 (2002)

Calculated band structure

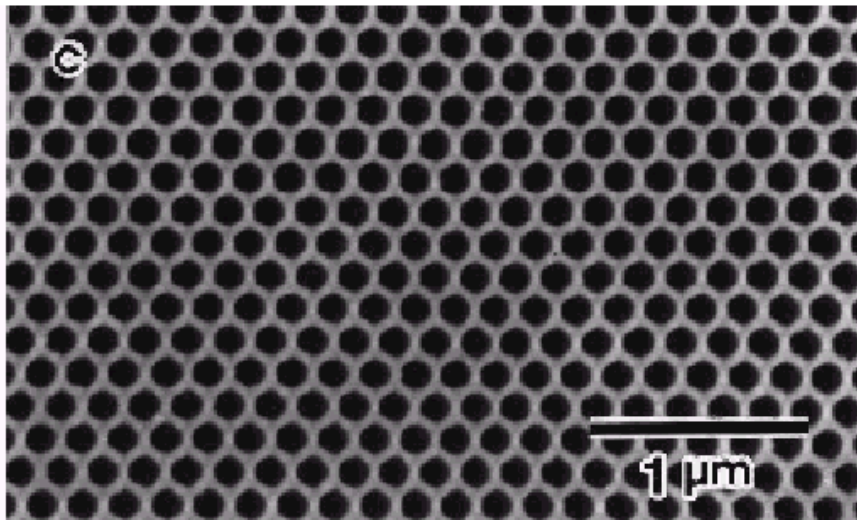


Meade et al, APL 1992

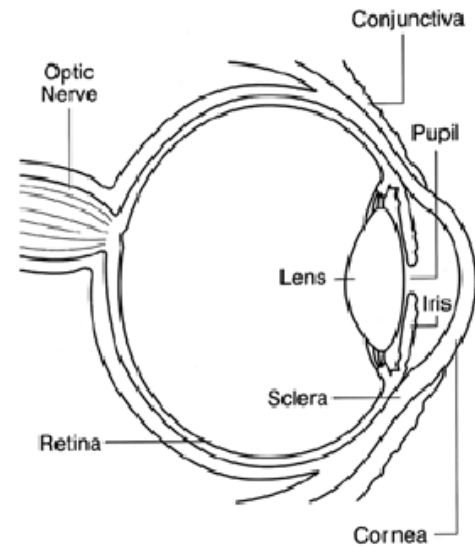
2D ФК из пористого оксида алюминия

Porous anodic alumina:

a 2D photonic crystal for the visible



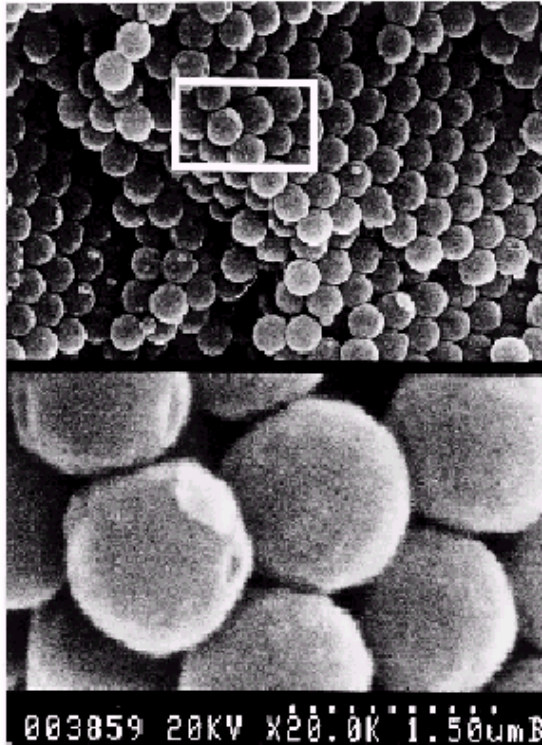
Masuda et al – Appl. Phys. Lett. **71**, 2770 (1997)



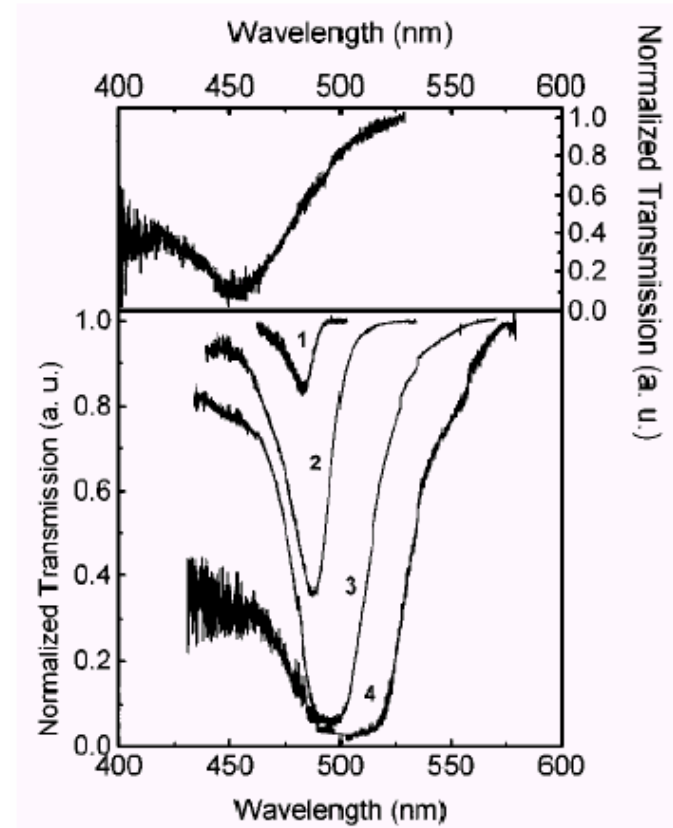
- High transmission along pore axis (98% in our measurements)
- High reflectance in the plane orthogonal to pore axis

3D ФК из оксида кремния

Opal-based structures



Petrov, Bogomolov, Gaponenko et al.
Phys. Rev. Lett. **81**, 77 (1998)

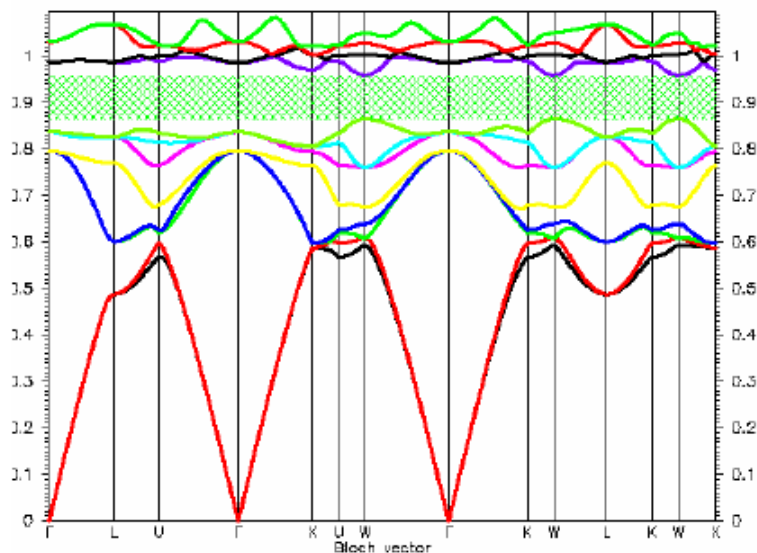


Bogomolov, Gaponenko et al.
Phys. Rev. E **81**, 7619 (1997)

3D ФК- инвертированные опалы

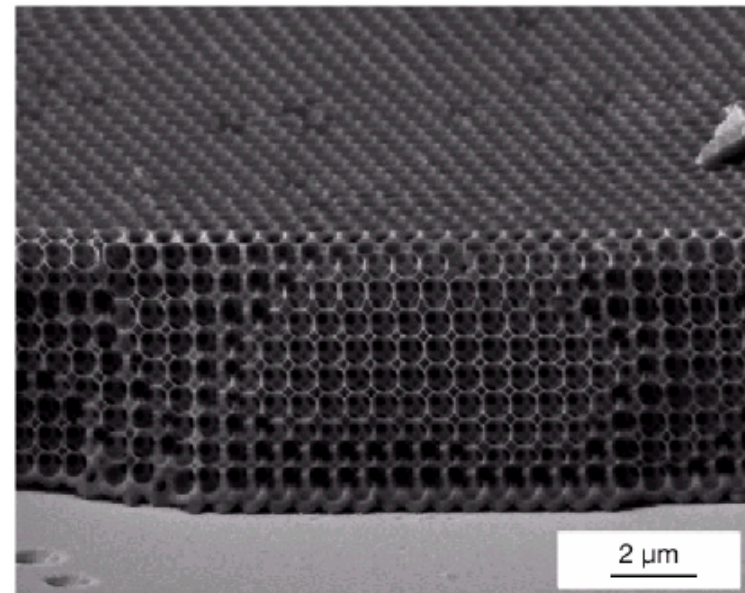
Band structure of inverse opal photonic crystal with $n=3.45$

John and Busch, Opt. Expr. 2002



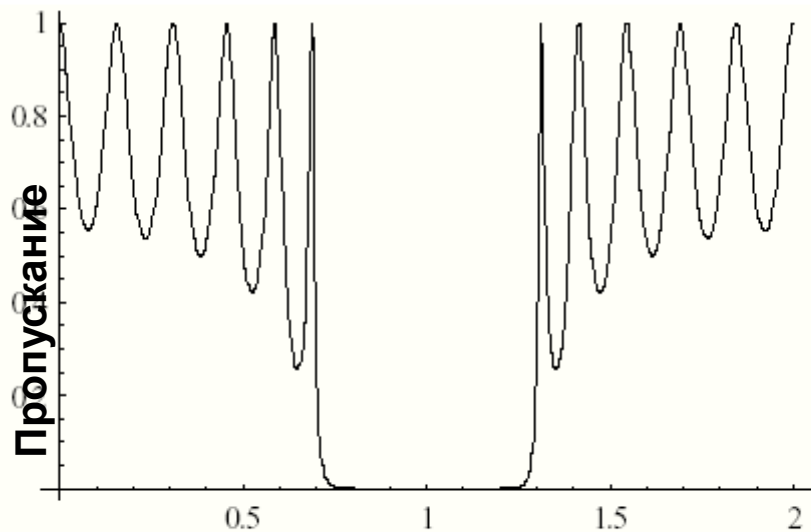
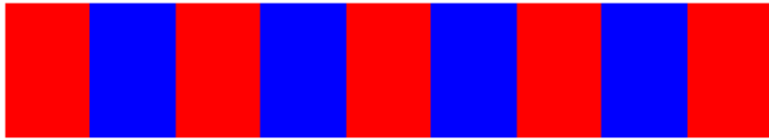
Inverse opal structure of poly-Si on Si substrate

Vlasov et al. Nature **414** (2001) 289



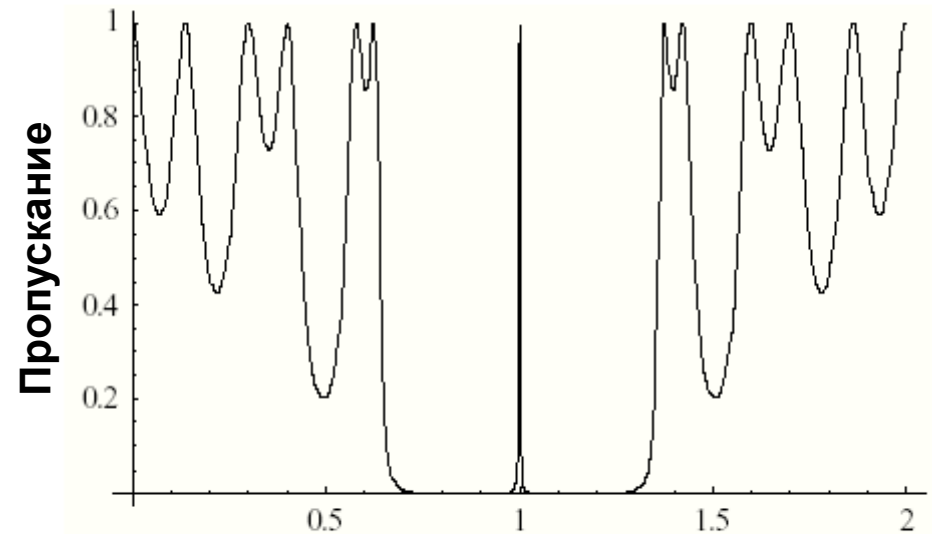
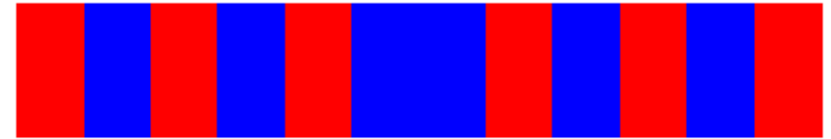
Фотонный кристалл с дефектом или микрорезонатор с брэгговскими зеркалами

$$n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda / 4$$



Частота (отн. ед.)

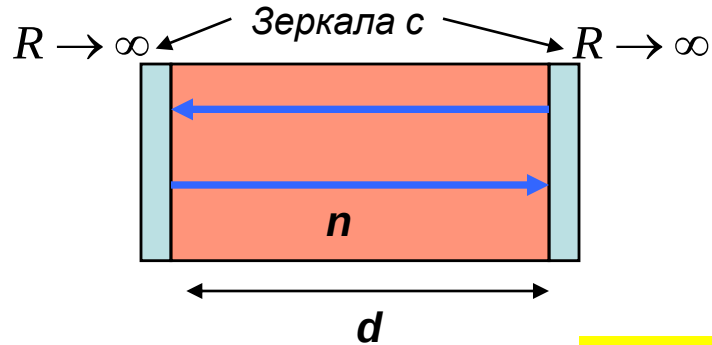
$$nd = \lambda / 2$$



Частота (отн. ед.)

Различные типы микрорезонаторов

1D-микрорезонатор (Фабри-Перо)

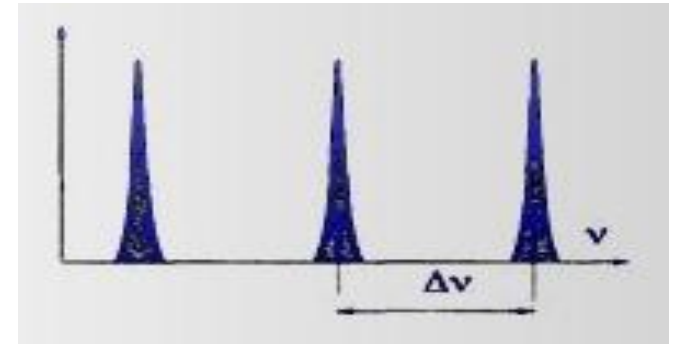


$$2nd = m\lambda$$

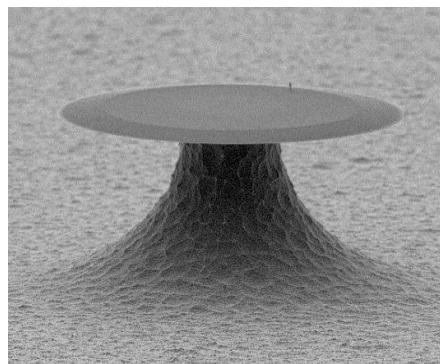
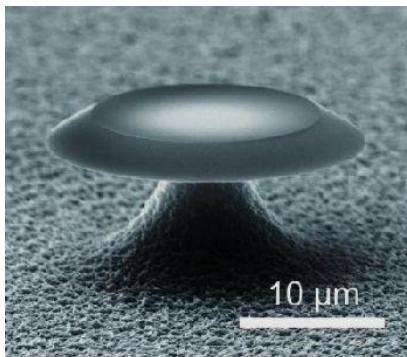
$$m = 1, 2, \dots$$

$$\Delta\nu = \nu_{m+1} - \nu_m = \lambda_{m+1}^{-1} - \lambda_m^{-1} = \frac{1}{2dn}$$

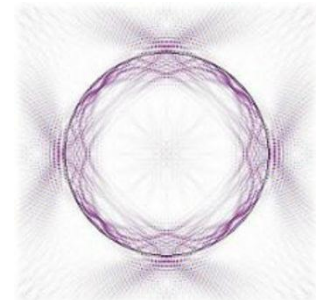
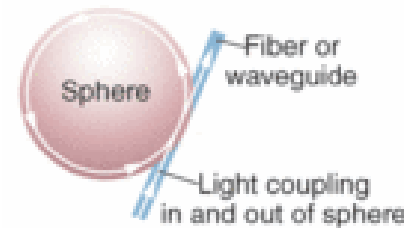
Моды (резонансы) Фабри-Перо



2D-микрорезонаторы (микродиски)



3D-микрорезонаторы (микросферы)

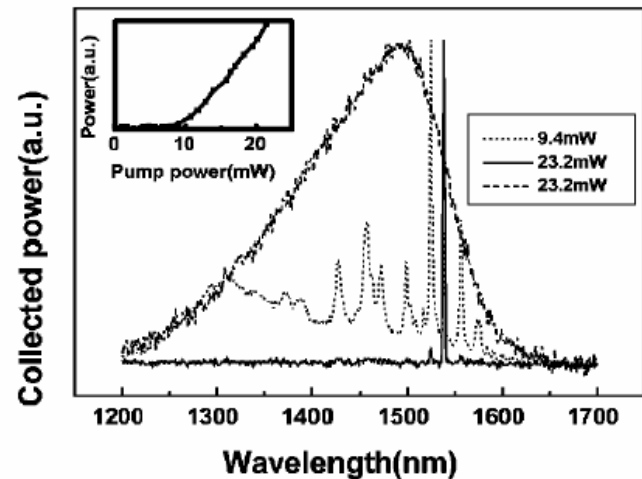
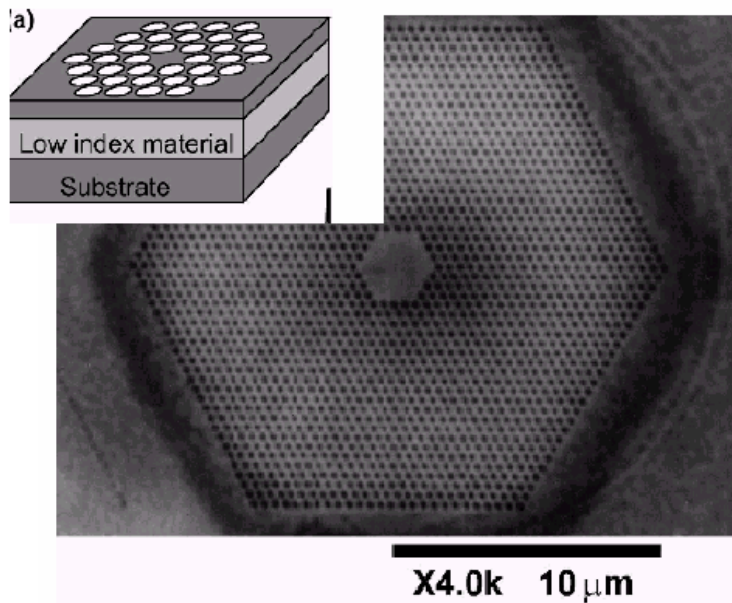


ФК с дефектом как лазерные микрорезонаторы

Two-dimensional photonic band-gap defect mode laser

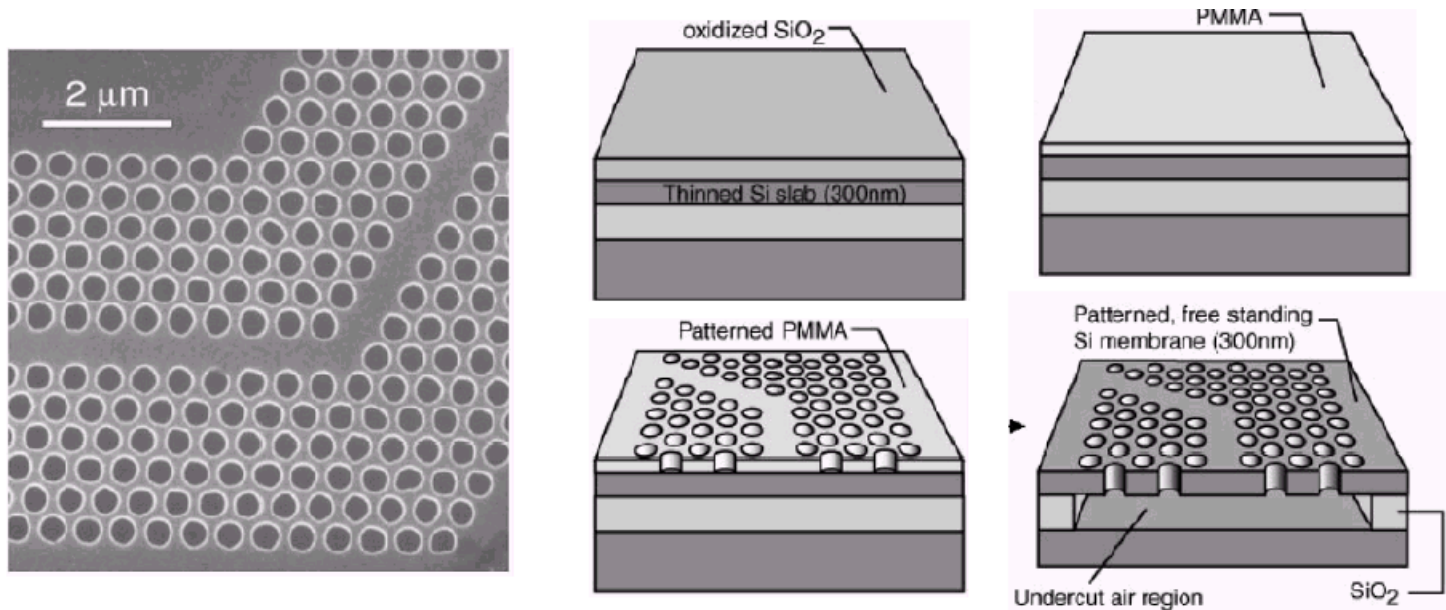
(Korean Adv. Inst. Technol.)

InGaAsP on InP, room temperature operation,
pump by 980 nm 1 MHz semiconductor laser



Hwang et al Appl. Phys. Lett. **76** (2000) 2982

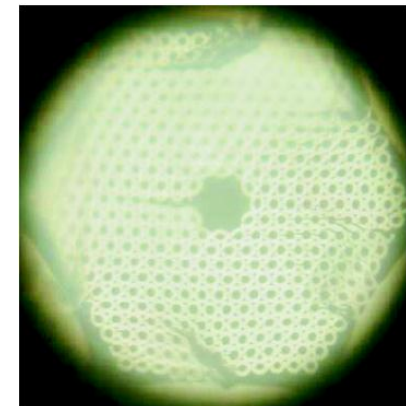
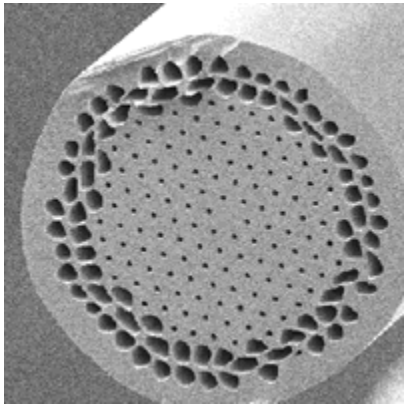
Волноводы из ФК



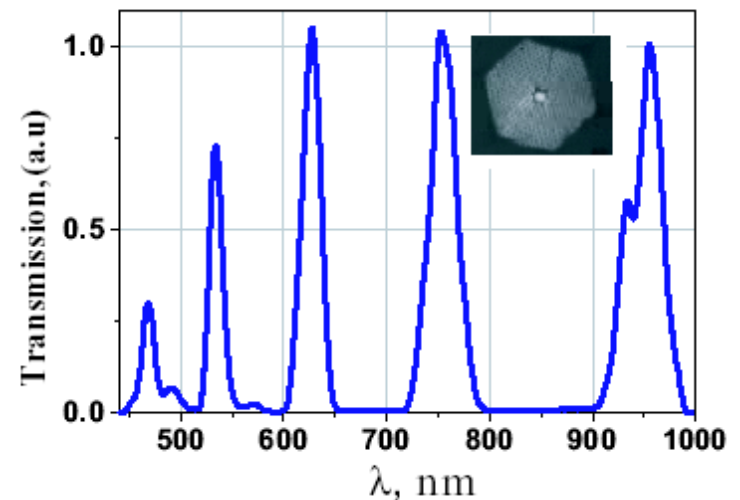
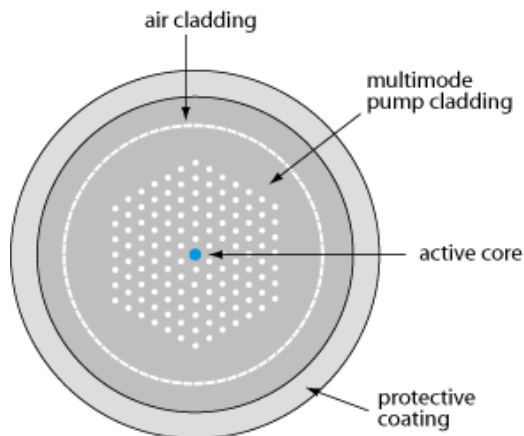
Loncar et al. Appl. Phys. Lett. **77** (2000) 1937

Note: Macroporous Si or porous Al_2O_3 properly impregnated with other materials can be used to fabricate planar “printed circuits”

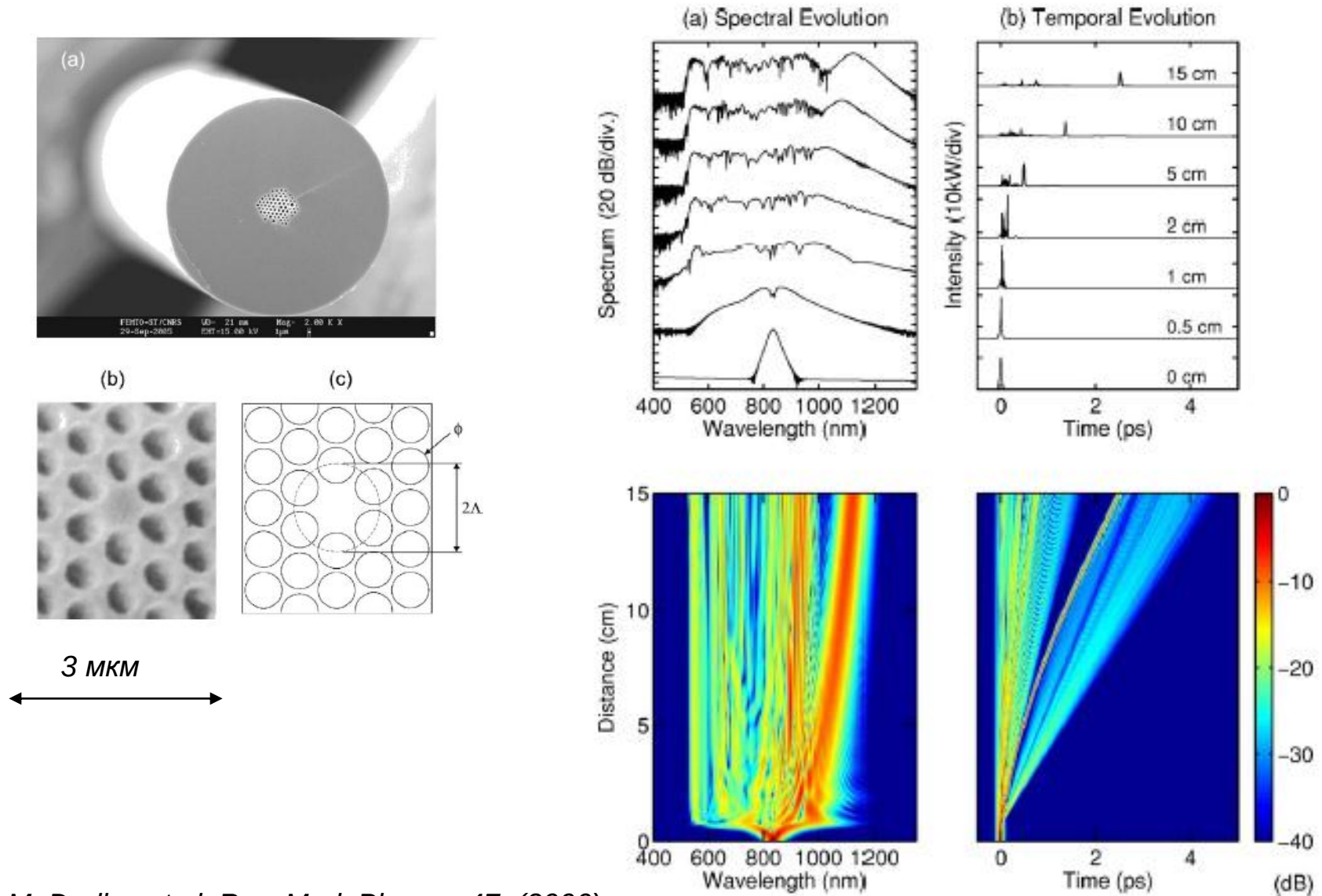
Фотонно-кристаллические волноводные структуры – “holey fibers” (дырчатые волноводы)



15 μm



Holey fibers и нелинейная оптика



Фотоника и нанофотоника

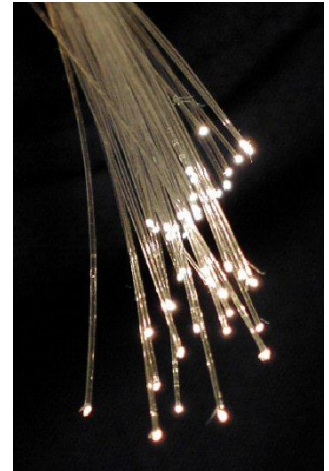
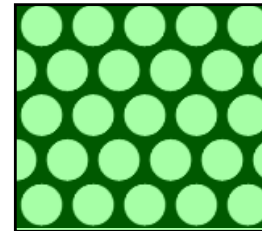
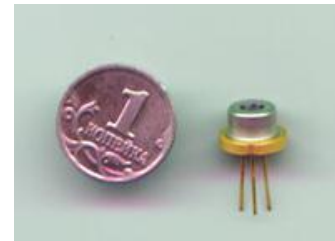
Фотоника может быть определена как область физики и технологии, связанная с излучением, поглощением, детектированием, распространением света и управлением светом (фотонами).

Общепринятого определения термина "Фотоника" не существует !

*Фотоника как область науки началась в 1960 с изобретением **лазера**, а также с изобретения **лазерного диода** в 1970-х с последующим развитием **оптоволоконных систем связи** как средств передачи информации, использующих световые методы.*

Некоторые основные элементы и устройства фотоники:

- светодиод
- лазер
- оптоволокну
- фотонный кристалл
- оптический усилитель и т.п.



Нанофотоника является разделом фотоники, в котором исследуются явления со считанным количеством фотонов и исследуются поведение света на нанометровой шкале, в том числе при взаимодействии с наночастицами и наноструктурами.

Метаматериалы

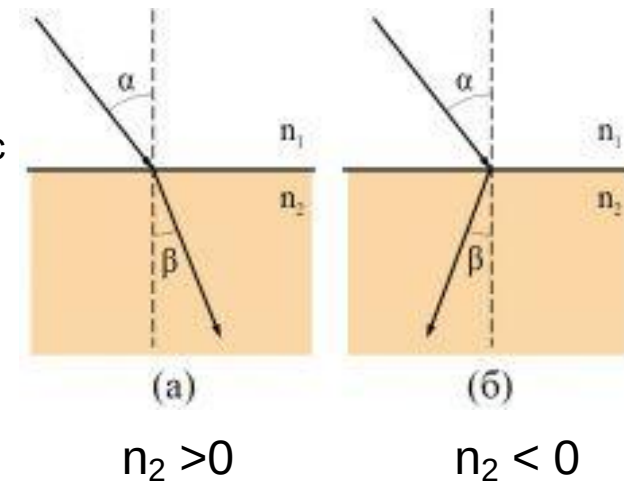
Метаматериалы – это композитные материалы, свойства которых обусловлены не столько индивидуальными физическими свойствами их компонентов, сколько **микроструктурой**.

Термин «метаматериалы» особенно часто применяют по отношению к тем композитам, которые демонстрируют свойства, нехарактерные для объектов, встречающихся в природе.

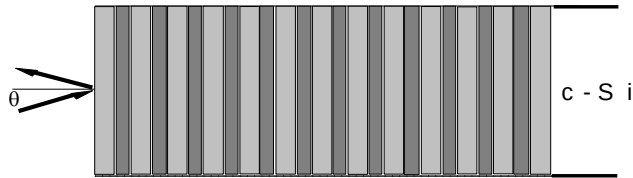
Показатель преломления связан с фундаментальными характеристиками вещества, диэлектрической проницаемостью ϵ и магнитной проницаемостью μ , простым соотношением: $n^2 = \epsilon \cdot \mu$. Несмотря на то, что данному уравнению удовлетворяют как положительные, так и отрицательные значения n , ученые долго отказывались верить в физический смысл последних – до тех пор, пока советский ученый **В.Г.Веселаго** в 1967 г. не показал, что $n < 0$ в том случае, если одновременно $\epsilon < 0$ и $\mu < 0$. Природные материалы с отрицательной диэлектрической проницаемостью хорошо известны – это любой металл при частотах выше плазменной частоты (при которой металл становится прозрачным). В этом случае $\epsilon < 0$ достигается за счет того, что свободные электроны в металле экранируют внешнее электромагнитное поле. Гораздо сложнее создать материал с $\mu < 0$, в природе такие материалы не существуют. Однако, английский ученый **Д.Пендри** (John Pendry) в 1999 г. показал, что отрицательная магнитная проницаемость может быть получена для проводящего кольца с зазором.



Метаматериал с $n < 0$ для радиодиапазона



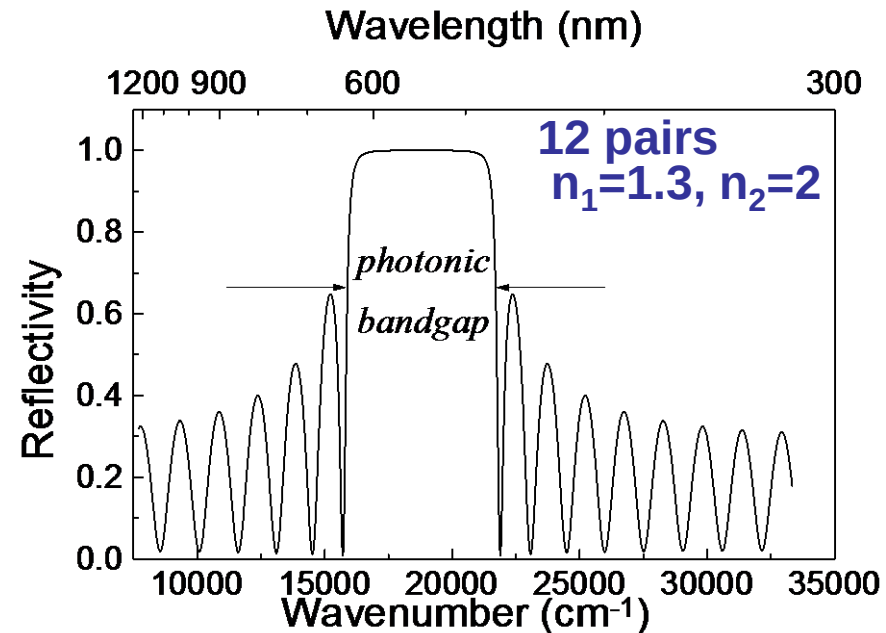
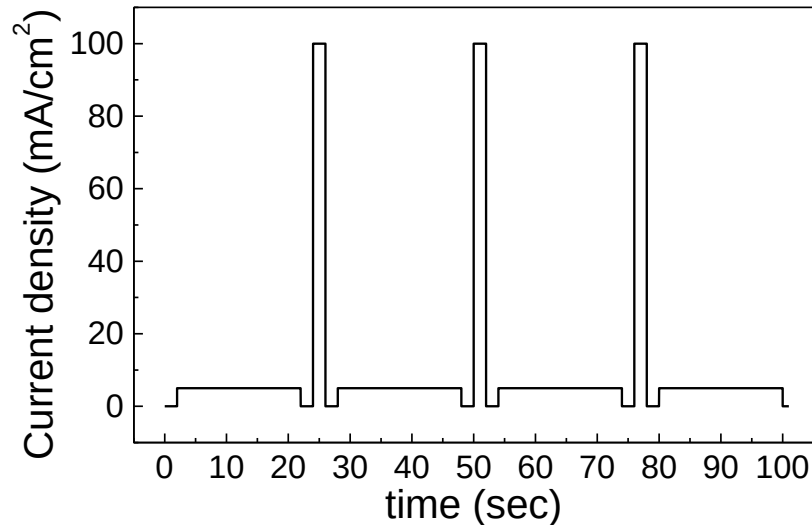
Одномерные фотонные кристаллы на основе пористого кремния



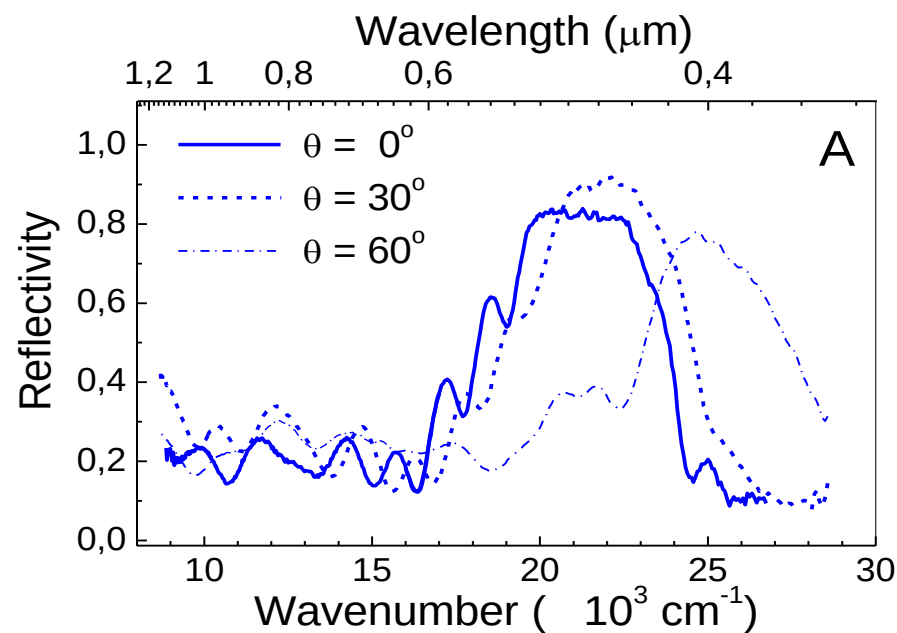
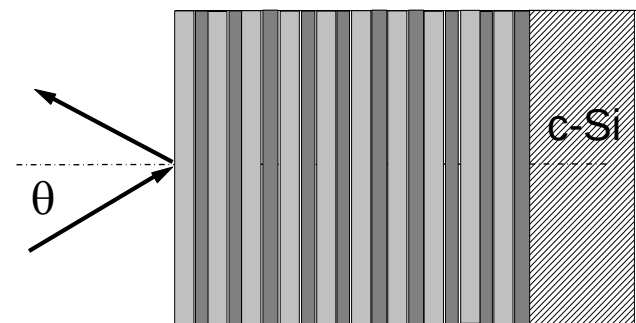
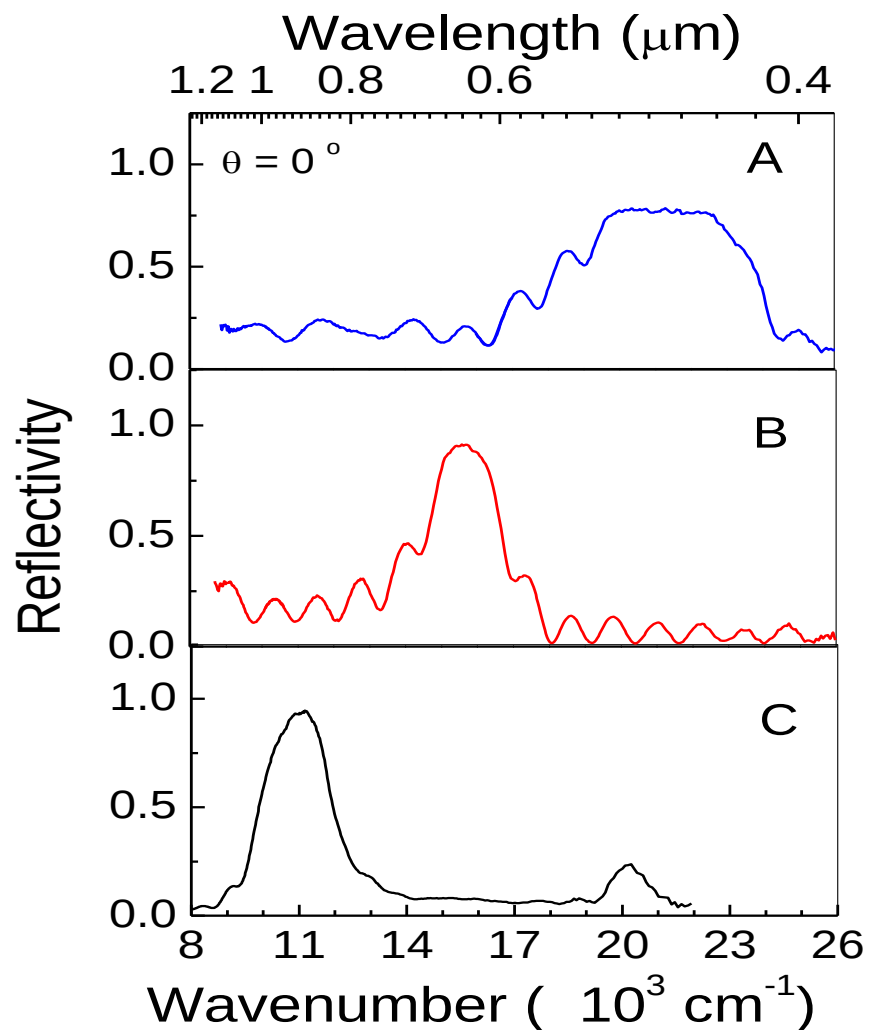
Идеальное брэгговское
зеркало

Условие Брэгга:

$$n_1 d_1 + n_2 d_2 = \lambda/2$$

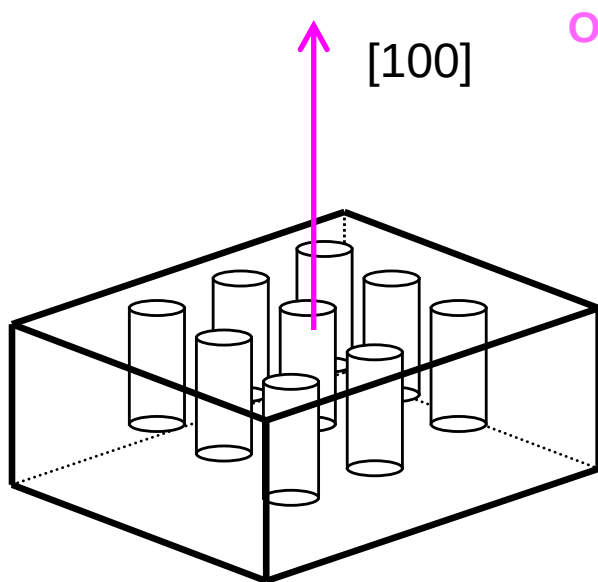


Спектры отражения одномерных фотонных кристаллов на основе пористого кремния



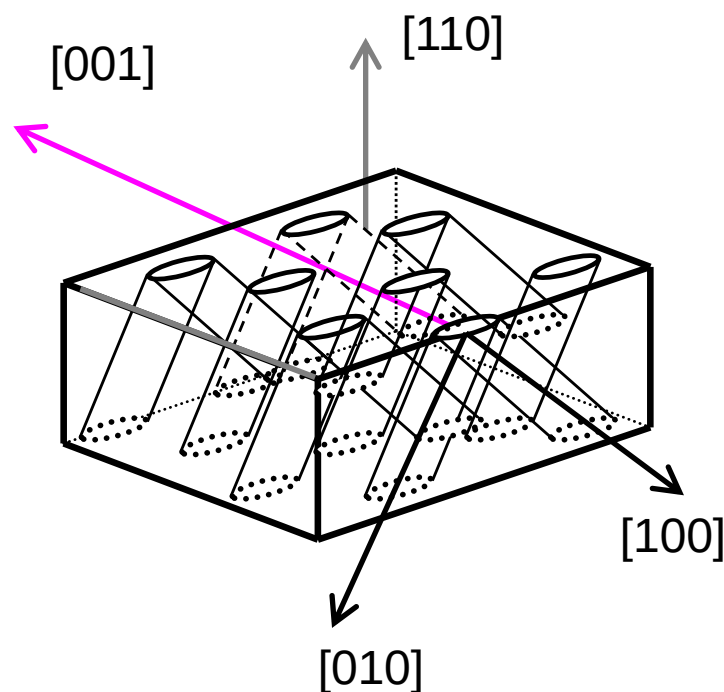
Оптическая анизотропия пленок пористого кремния с ориентацией поверхности (100) и (110)

c-Si (100)



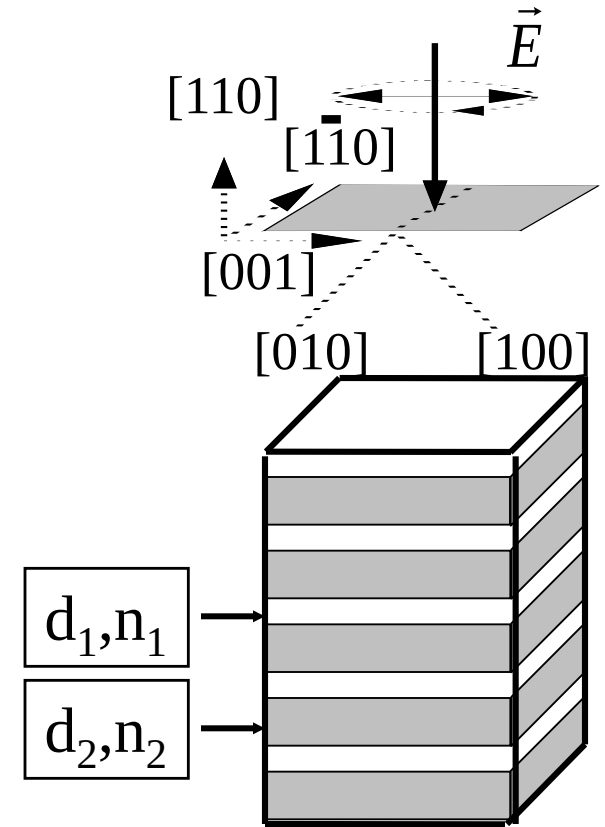
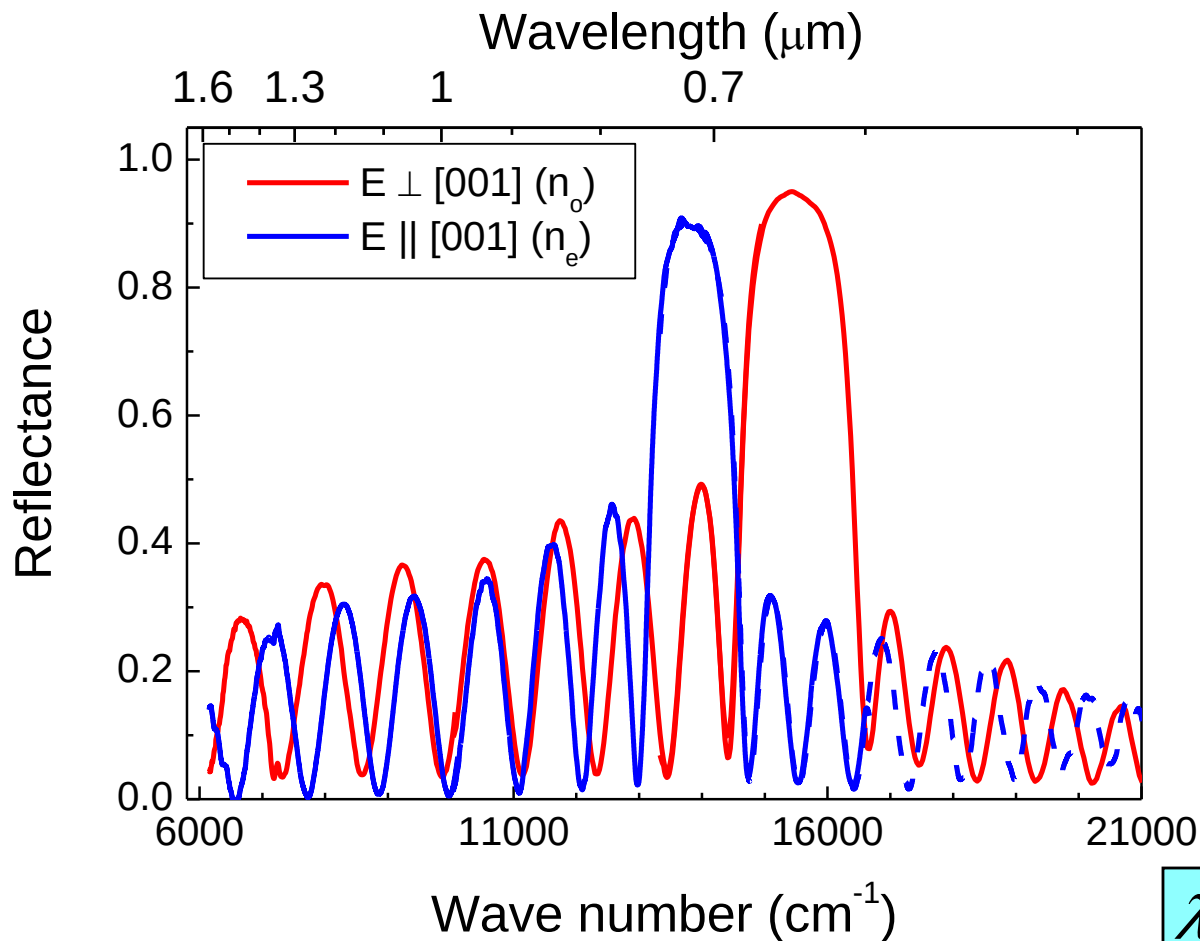
Positive crystal ($n_e > n_o$)

c-Si (110)



Negative crystal ($n_o > n_e$)

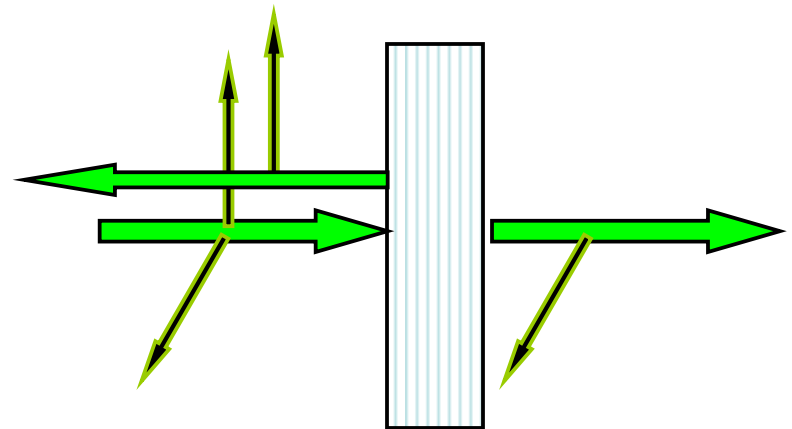
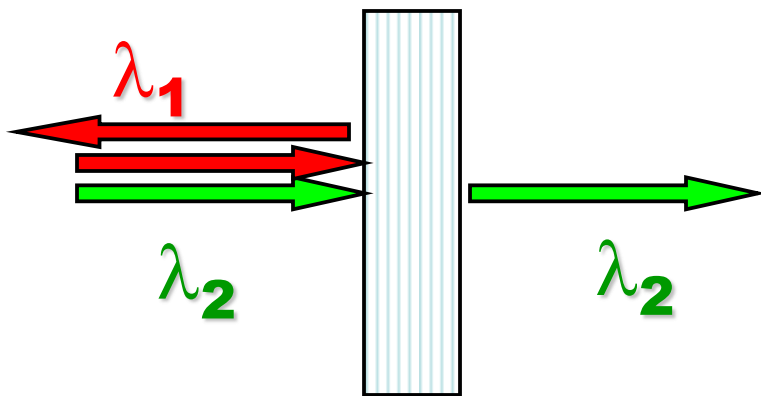
Фотонные кристаллы с поляризационно - перестраиваемой запрещенной зоной



$$\lambda_{\text{Bragg}}^{o,e} = 2(d_1 n_1^{o,e} + d_2 n_2^{o,e})$$

Применения анизотропного наноструктурированного кремния

- Волновые пластинки ($\lambda/2$, $\lambda/4$: $\lambda=0.5-8 \mu\text{m}$ и $12 \mu\text{m} \rightarrow \infty$)
- Фазовосогласующие среды для генерации гармоник
- Дихроичные зеркала и фотонные кристаллы
- Плоские «окна Брюстера»



Образцы дихроичных 1D-фотонных кристаллов из анизотропно-наноструктурированного кремния



Эффективные оптические свойства многослойных структур пористого кремния (цветные круглые области) определяются упорядоченной структурой 1D-фотонного кристалла с поляризационно-зависимой фотонной запрещенной зоной. В результате коэффициент отражения многослойных структур кардинально отличаются от такового для c-Si, из которого они изготовлены.

Контрольные вопросы к

Лекции 8:

- Что такое фотонный кристалл?
- Что такое фотонная запрещенная зона?
- В чем заключается условие Брэгга?
- Что такое микрорезонатор?
- Что такое фотонно-кристаллический волновод?
- Для чего могут быть использованы фотонные кристаллы и микрорезонаторы?