



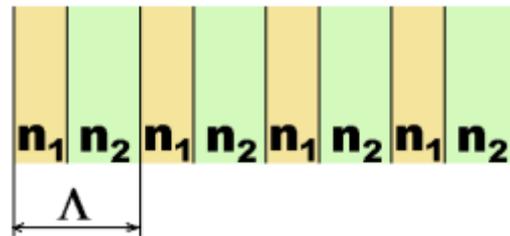
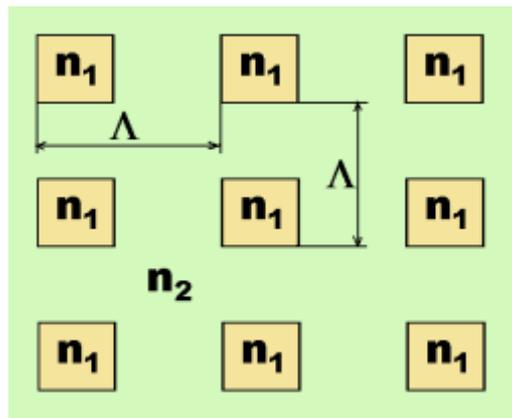
НАНОФОТОНИКА NANOPHOTONICS

PhC

Фотонные кристаллы.

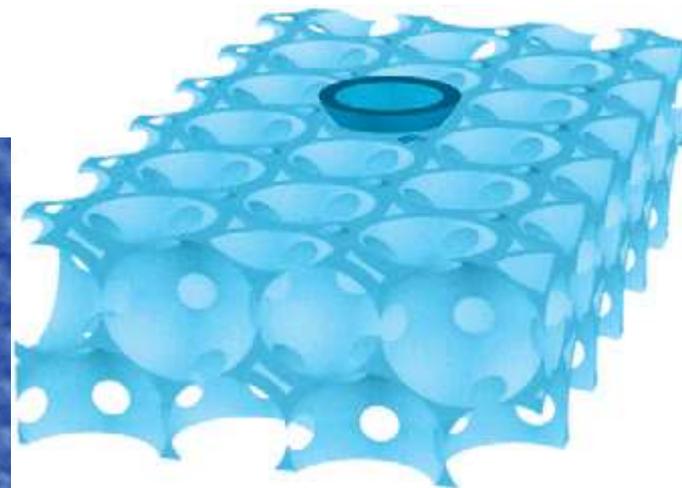
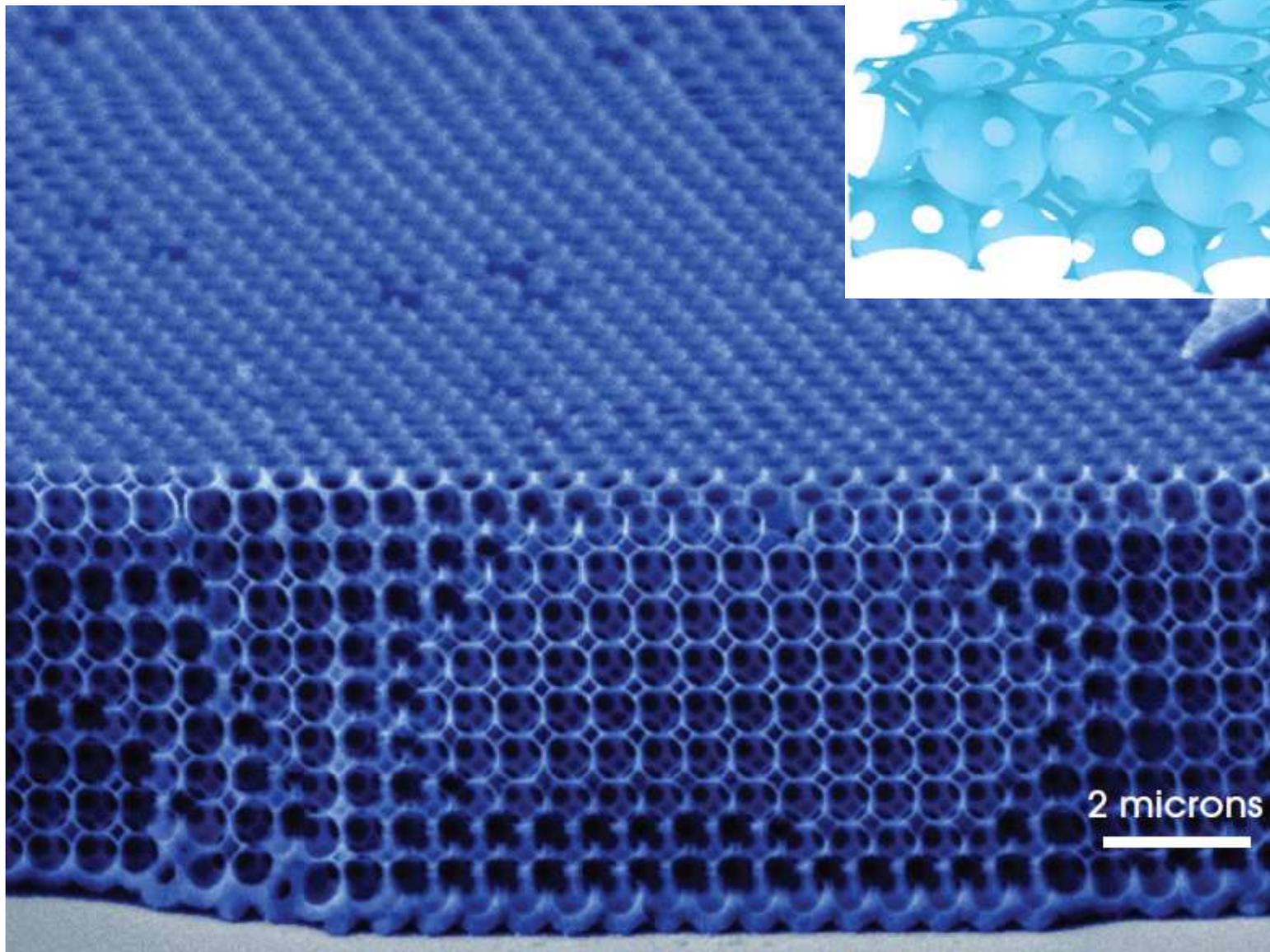
ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ

Фотонный кристалл – это периодическая по своим оптическим свойствам субмикронная структура (crystal superlattice), которая влияет на распространение в ней фотонов точно так же, как периодическая атомная структура полупроводникового кристалла оказывает влияние на движение в нём электронов. Иными словами, это материал, структура которого характеризуется периодическим изменением показателя преломления в пространственных направлениях.



Фотонные кристаллы встречаются в природе в различных видах (в живой и неживой природе), синтезируются искусственно и изучаются уже на протяжении ста последних лет. Искусственные фотонные кристаллы делают различными методами, чаще всего из обычного оксида кремния (silica). Первый искусственный трёхмерный фотонный кристалл был создан в начале 1990-х годов сотрудником Bell Labs Эли Яблоновичем (Eli Yablonovitch) На фото – живая бабочка Vanessa kershavi с фотонно-кристаллическими крыльями

ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ



ВИДЫ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

- Одномерные (плёночные структуры типа «брэгговского зеркала»), в которых коэффициент преломления периодически изменяется в одном пространственном направлении. Такие фотонные кристаллы состоят из параллельных друг другу слоев различных материалов с разными коэффициентами преломления и могут проявлять свои специфические оптические свойства только в одном пространственном направлении, перпендикулярном слоям.
- Двумерные (планарные структуры), в которых коэффициент преломления периодически изменяется в двух пространственных направлениях.
- Трёхмерные (структуры в виде сверхрешёток), в которых коэффициент преломления периодически изменяется в трёх пространственных направлениях.

Как и электрические среды в зависимости от ширины запрещённых и разрешённых зон, фотонные кристаллы можно разделить на *проводники* (света), *диэлектрики* (зеркала), *полупроводники* (выборочное отражение) и *сверхпроводники*.

ОДНОМЕРНЫЕ ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ

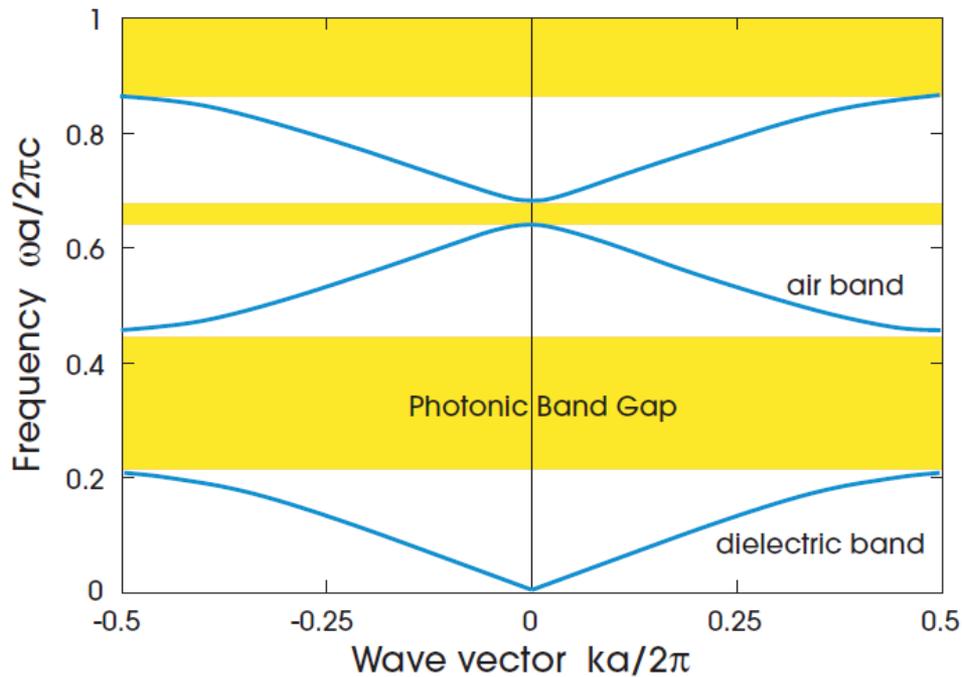
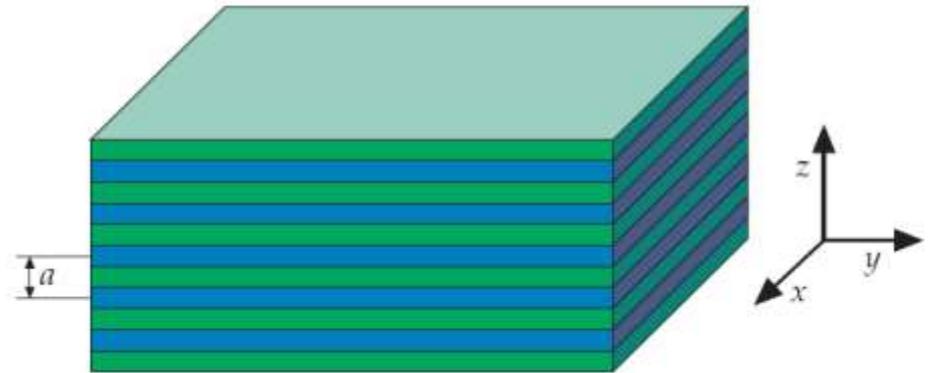
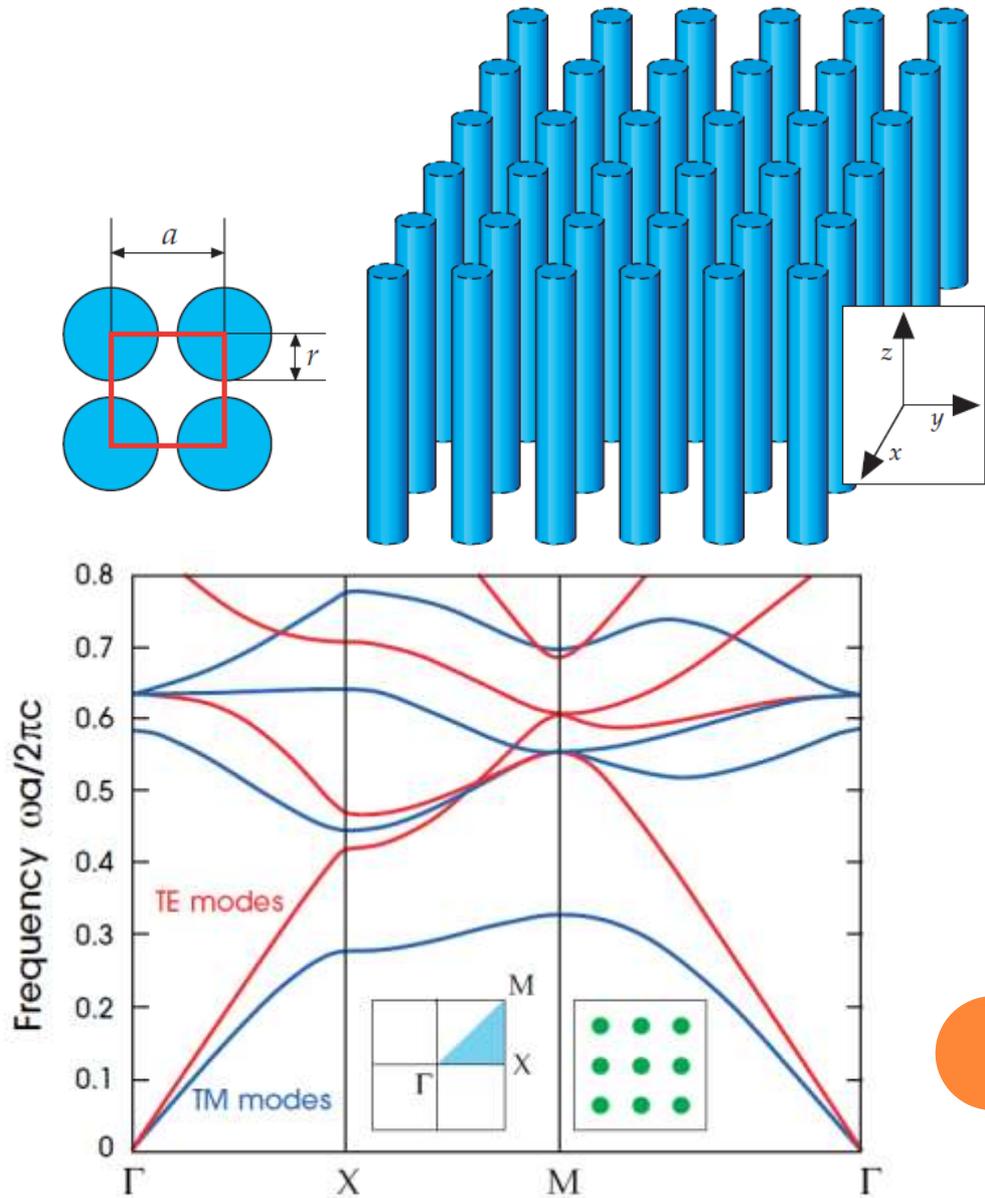


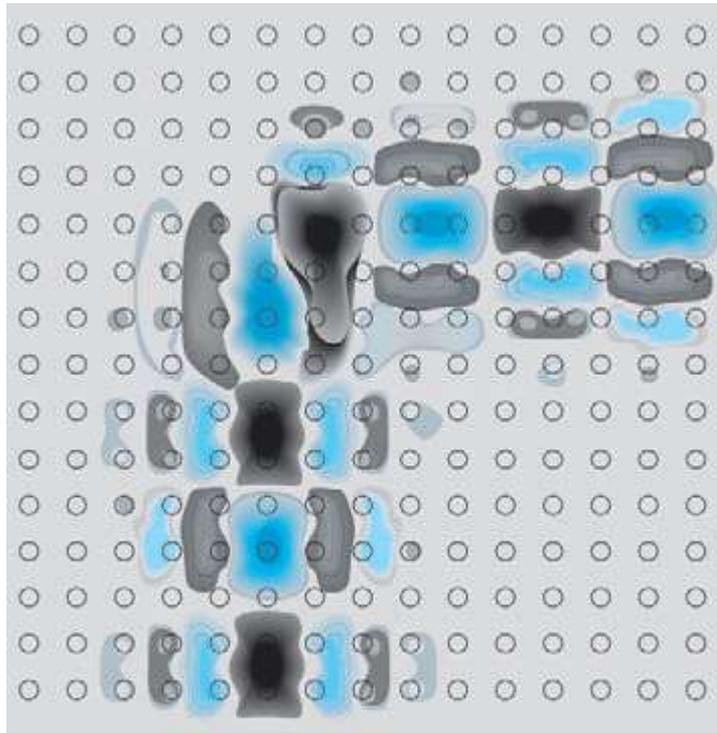
Figure 5: The photonic band structure of a multilayer film with lattice constant a and alternating layers of different widths. The width of the $\epsilon = 13$ layer is $0.2a$, and the width of the $\epsilon = 1$ layer is $0.8a$.

ДВУМЕРНЫЕ ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ

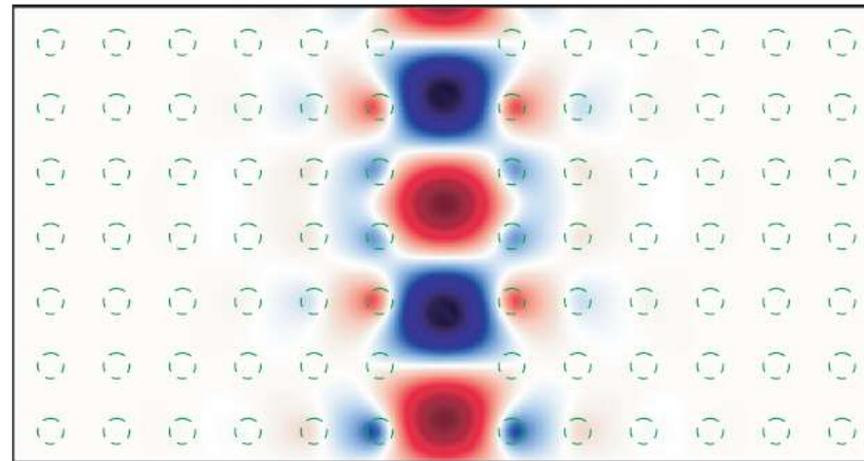
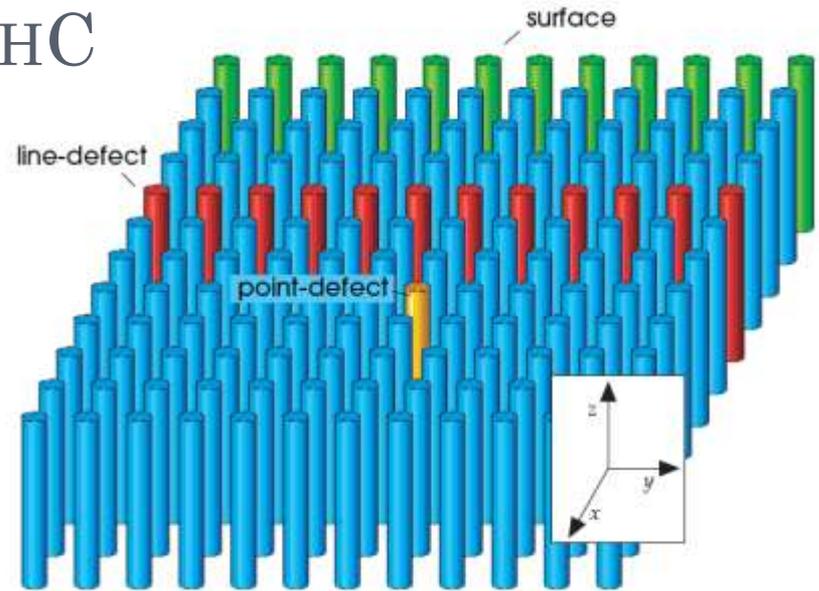
Любые неоднородности в структуре фотонного кристалла представляют собой дефекты, влияющие на распространение электромагнитной волны. В таких областях часто сосредотачивается электромагнитное поле, что используется в микрорезонаторах и волноводах, построенных на основе фотонных кристаллов.



ДЕФЕКТ В ДВУМЕРНОМ РНС



- нулевой уровень напряженности
- максимумы напряженности
- минимумы напряженности



negative  positive

E_z

Трёхмерные фотонные кристаллы

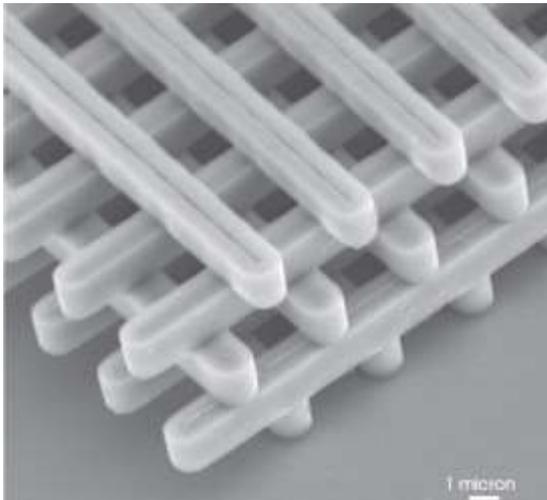
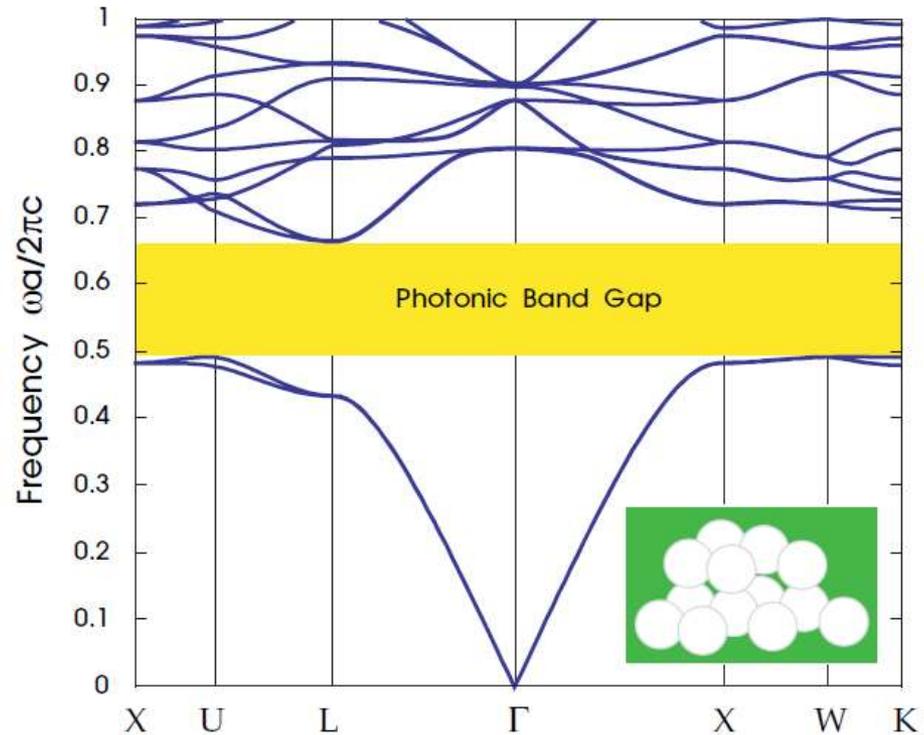
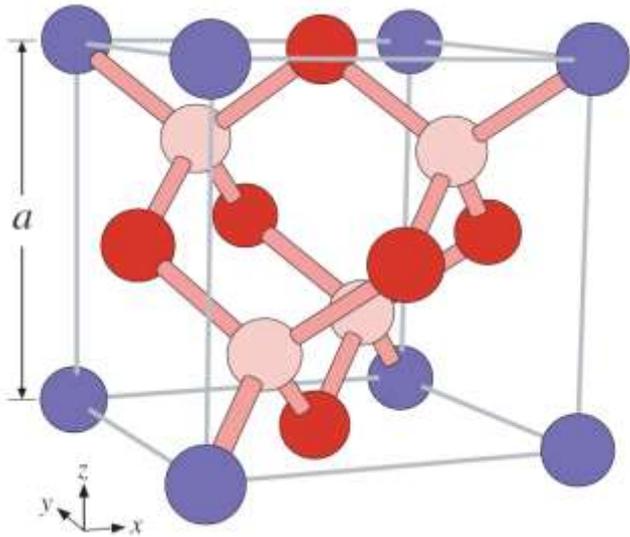
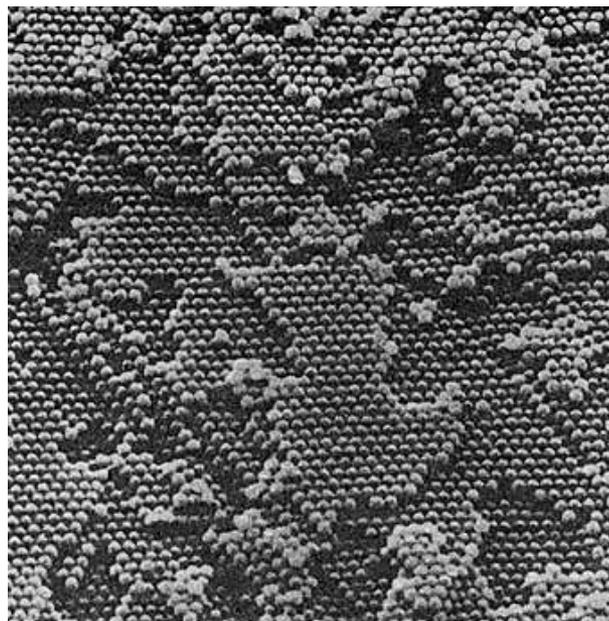
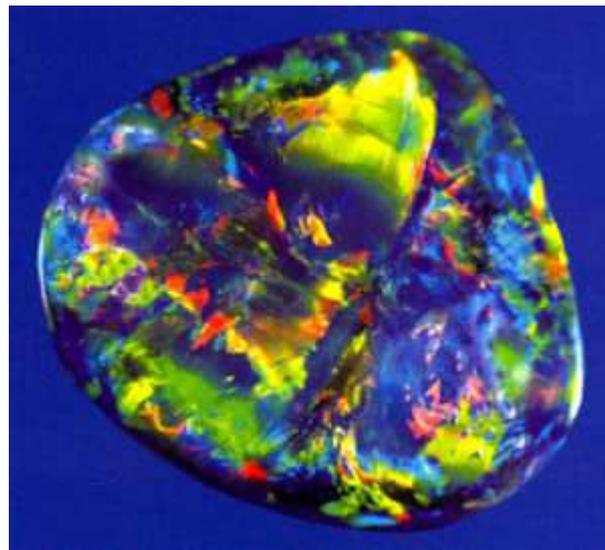


Figure 3: The photonic band structure for the lowest bands of a diamond lattice of air spheres in a high dielectric ($\epsilon = 13$) material (inset). A complete photonic band gap is shown in yellow. The wave vector varies across the irreducible Brillouin zone between the labelled high-symmetry points; see appendix B for a discussion of the Brillouin zone of an fcc lattice.

ОПАЛЫ

Природный опал представляет собой гидрогель двуоксида кремния $\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ с переменным количеством воды. Окраска опалов может быть вызвана примесями железа, никеля, марганца и др.

Так называемые «благородные опалы» состоят из однородных по размеру сферических частиц $\alpha\text{-SiO}_2$ диаметром 150-450 нм, которые, в свою очередь, образованы из более мелких глобулярных структур диаметром 5-50 нм. Пустоты упаковки сфер $\alpha\text{-SiO}_2$ заполнены аморфным оксидом кремния. В синтетических опалах сферические частицы диоксида кремния образуют высокоупорядоченные гексагональные плотноупакованные слои перпендикулярно оси роста фотонного кристалла.



ФИЗИКА ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

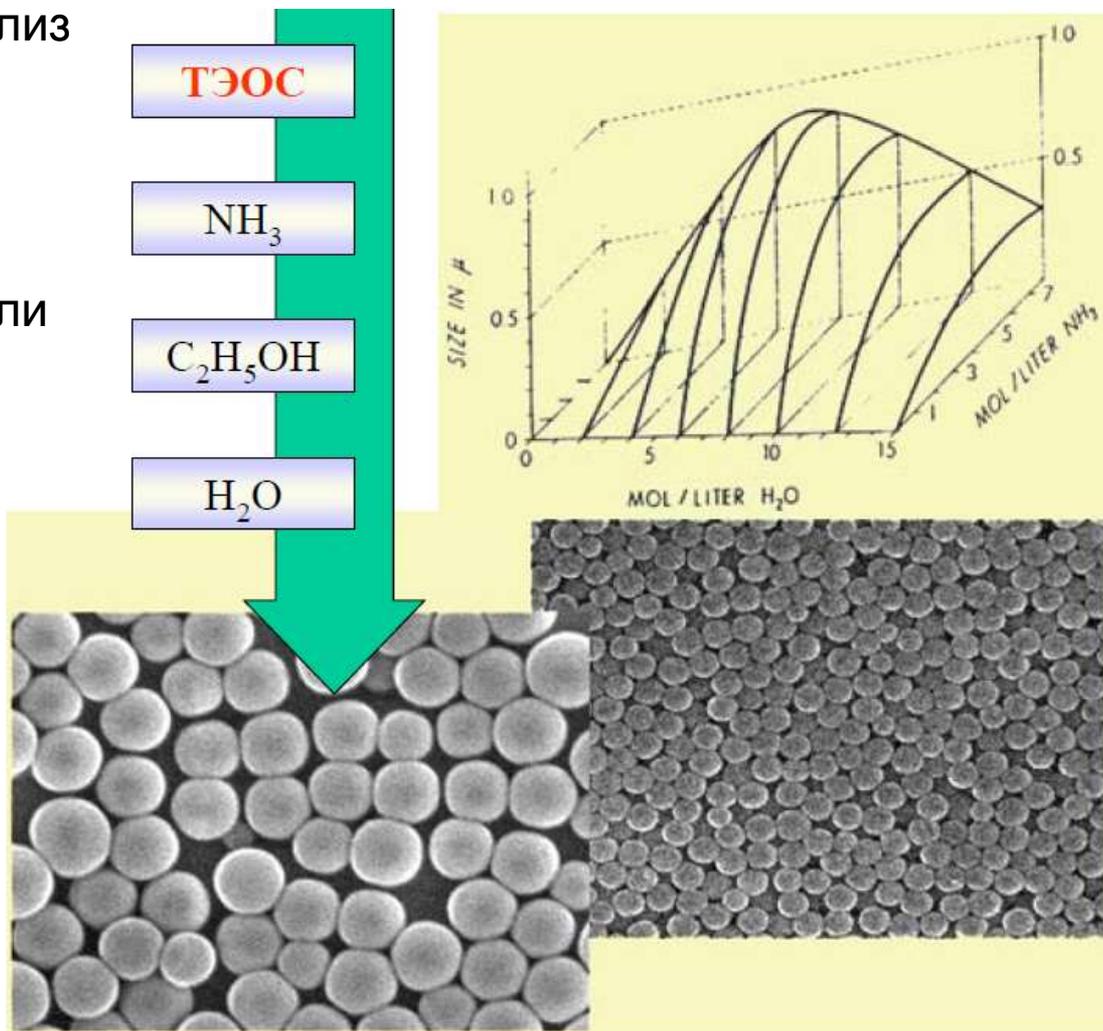
Физический механизм образования фотонной запрещённой зоны в кристаллах такой же, как и для электронов в диэлектриках и полупроводниках, и обусловлен распространением волны в среде с периодическим полем. Поэтому теория распространения электромагнитных волн в PhC имеет весьма близкую формальную аналогию с квантовой теорией электронов в кристаллах и позволяет использовать понятия блоховских волн, обратной решетки, зон Бриллюэна.

В случае, когда фотонная запрещённая зона перекрывает электронную запрещённую зону, существенно проявляются квантовые свойства PhC. В этом случае время жизни возбужденного атома находящегося в фотонном кристалле, может быть увеличено в несколько раз.

ПОЛУЧЕНИЕ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

1. Слой монодисперсных микросфер из оксида кремния

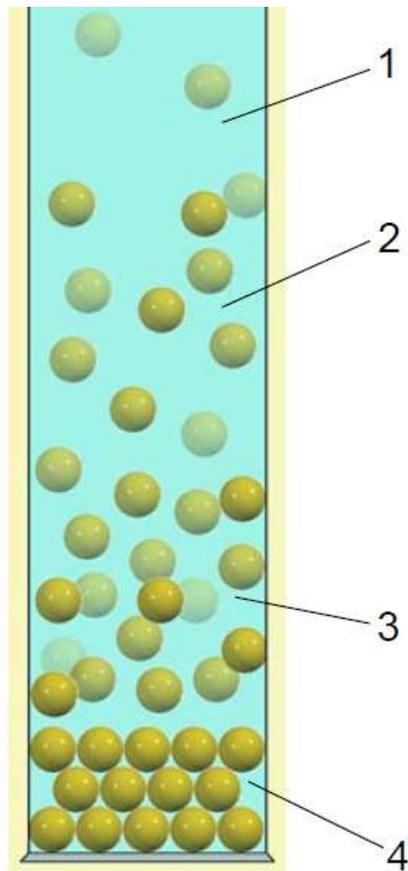
Метод Штёбера: гидролиз тетраэтилового эфира кремниевой кислоты в растворе этилового спирта в присутствии гидроксида аммония или аммиака



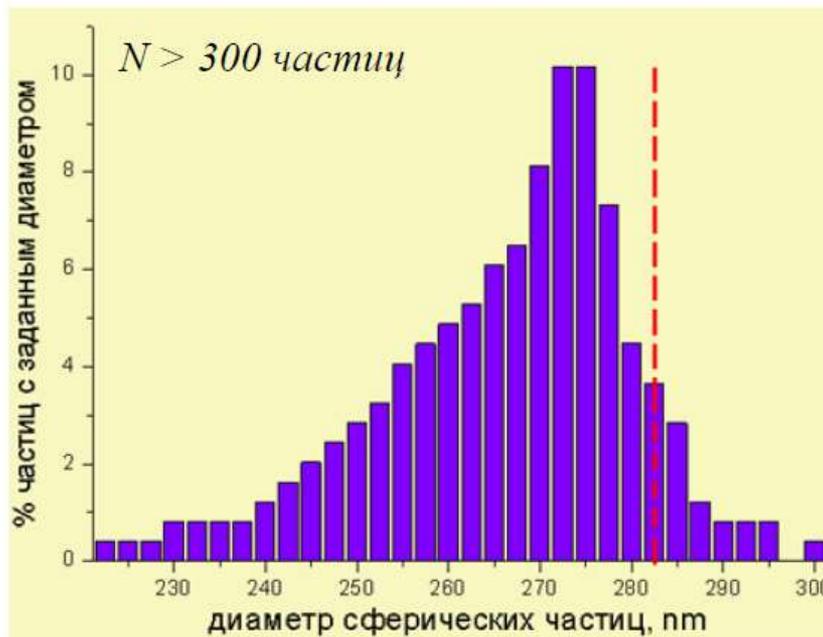
Получаются сферы в диапазоне от 0.1 до 1.6 мкм с отклонением среднего размера не более 5%

ПОЛУЧЕНИЕ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

2. Седиментация



- 1 – осветленная зона
- 2 – зона свободного осаждения
- 3 – зона стесненного осаждения
- 4 – осадок



$$F_A = \frac{1}{6} \pi \rho_{ж} g a^3$$
$$F_c = 3\pi \mu V a$$
$$F_T = \frac{1}{6} \pi \rho_{SiO_2} g a^3$$

Для области 2 (закон Стокса)

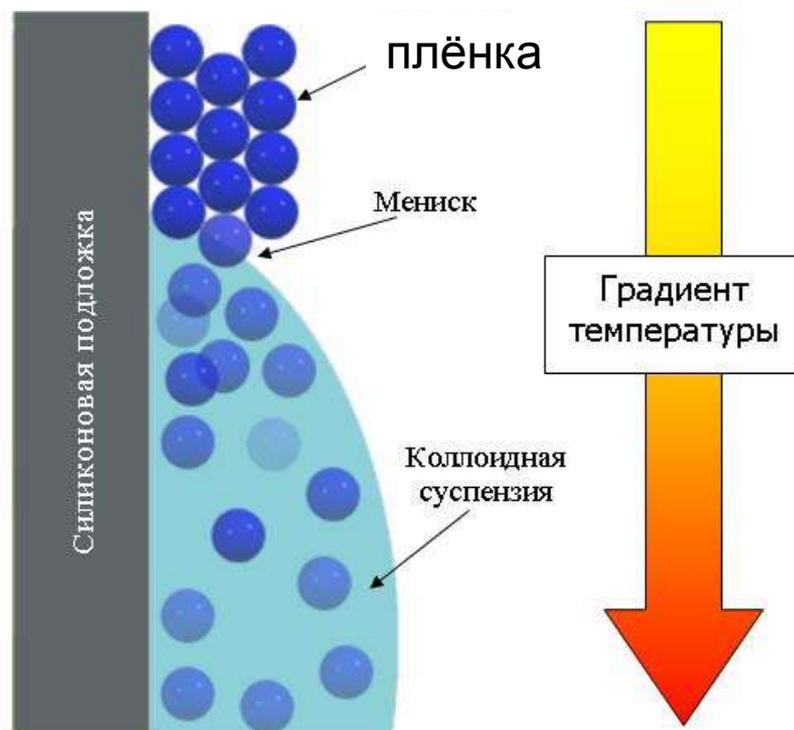
$$V = \frac{(\rho_{SiO_2} - \rho_{ж}) g a^2}{18\mu}$$

**Скорость осаждения
микросфер
250-400 нм - 2,3-7,7 мм/сут**

ПОЛУЧЕНИЕ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

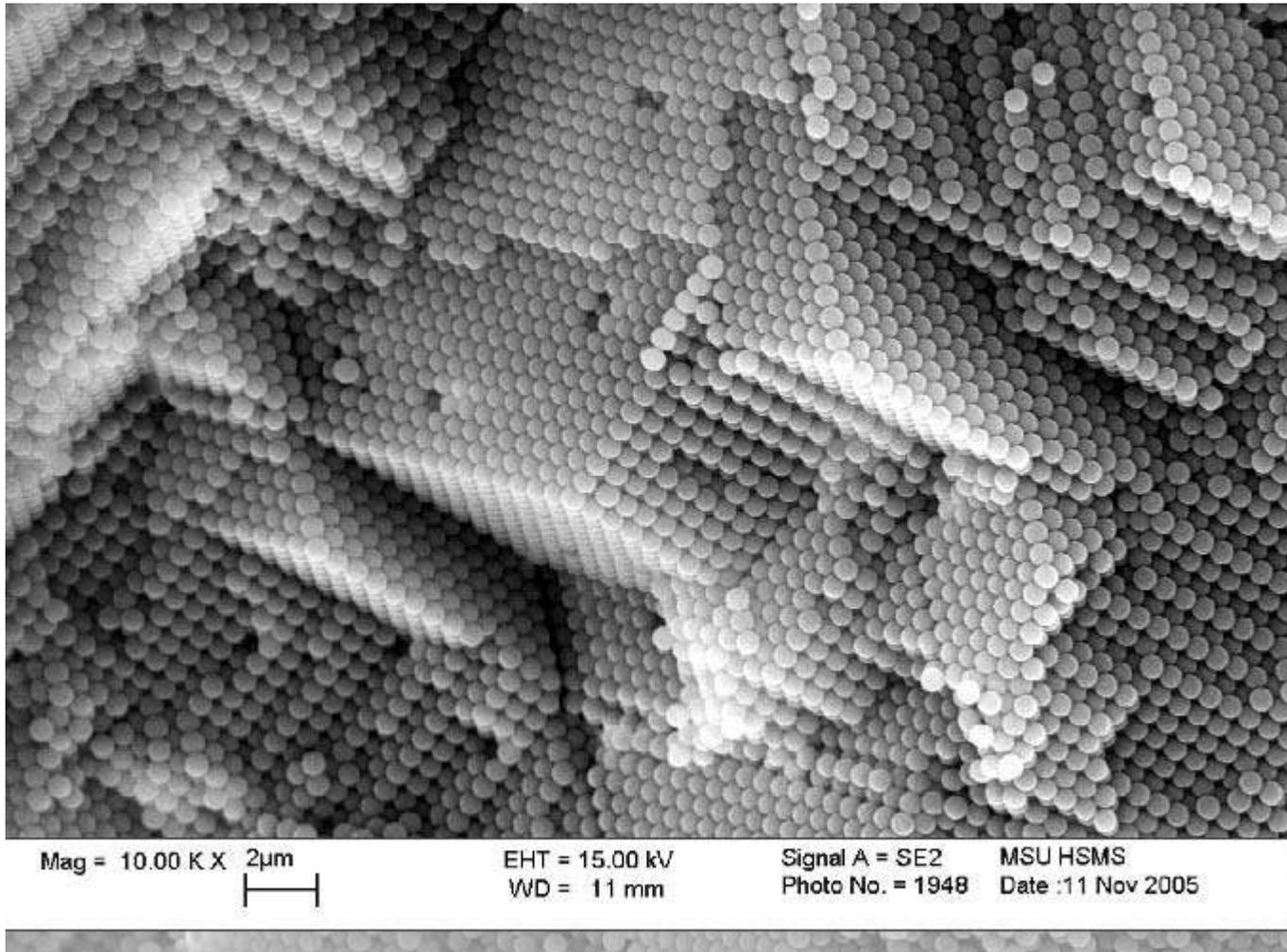
Естественное осаждение – очень медленный процесс, как правило, требующий нескольких недель или даже месяцев, особенно в том случае, когда диаметр частиц не превышает 300 нм. *Центрифугирование* позволяет значительно ускорить процесс формирования коллоидных кристаллов. Однако, полученные в таких условиях материалы упорядочены хуже, так как при высокой скорости осаждения разделение частиц по размерам не успевает произойти.

Большое распространение получил метод упорядочения коллоидных сфер, связанный с *использованием капиллярных сил*. Кристаллизация субмикронных частиц на границе мениска между вертикальной подложкой и коллоидной суспензией по мере испарения последней приводит к образованию тонкой, плоской, хорошо упорядоченной структуры.



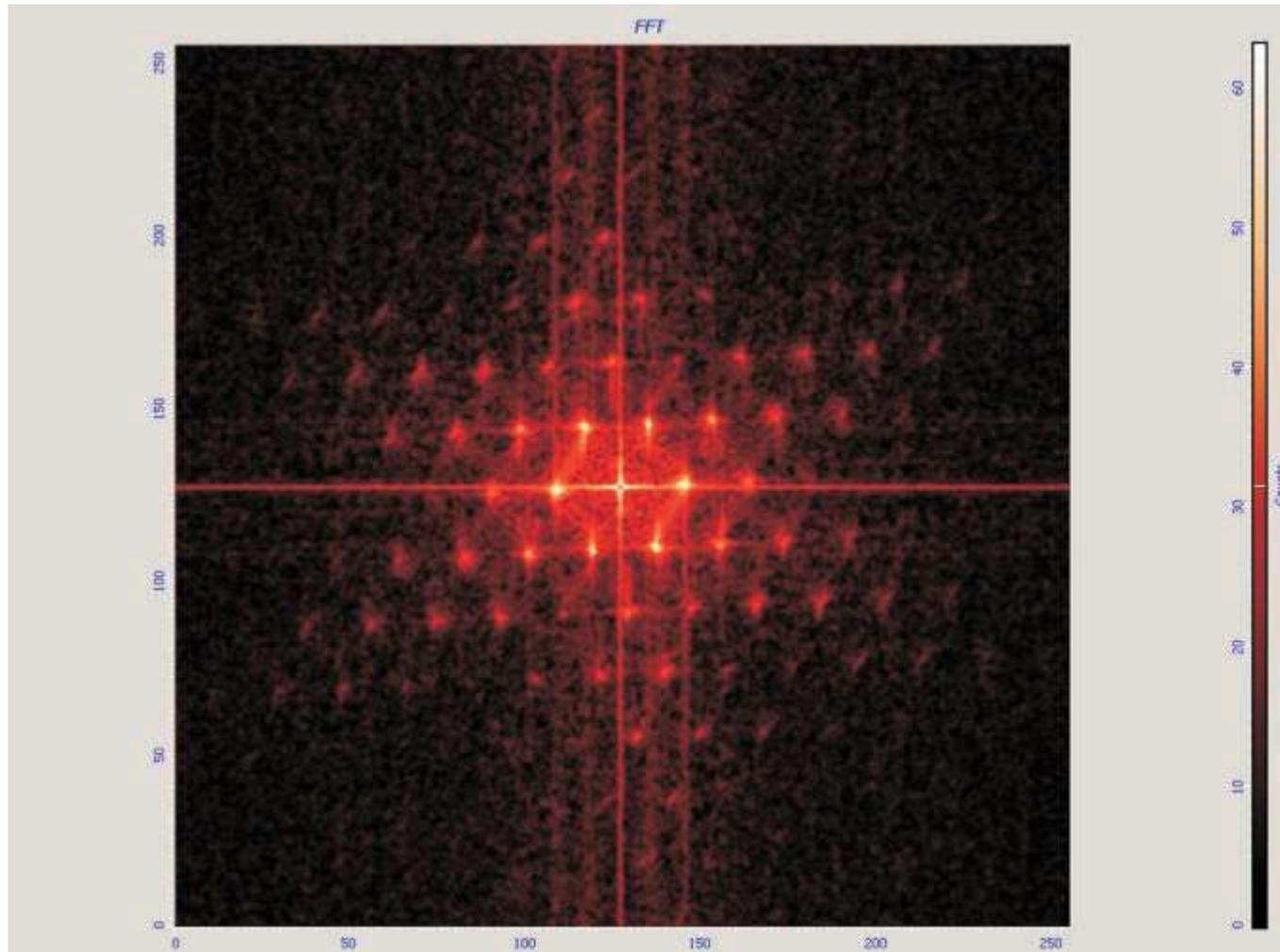
ФОТОННЫЙ КРИСТАЛЛ ПОЛИСТИРОЛА

Изображение с растрового электронного микроскопа



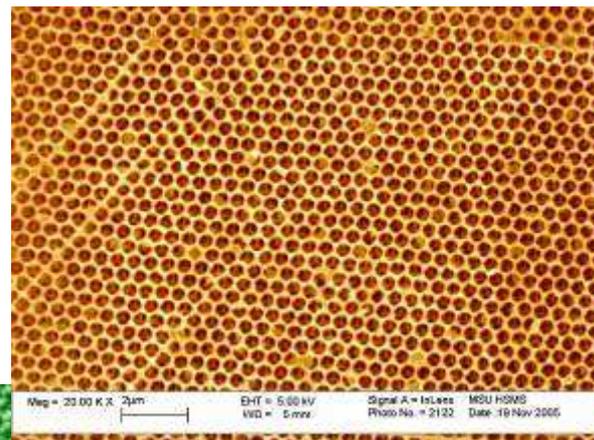
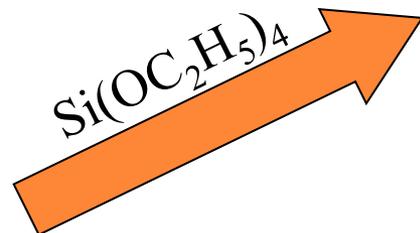
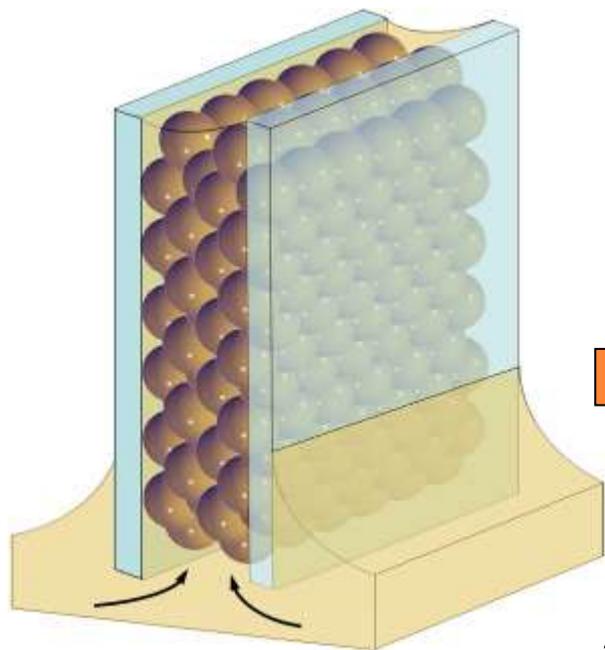
ФОТОННЫЙ КРИСТАЛЛ ПОЛИСТИРОЛА

Фурье-образ с изображения атомно-силового микроскопа

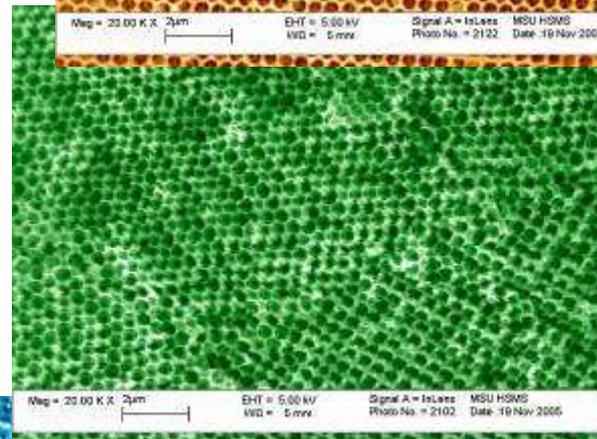
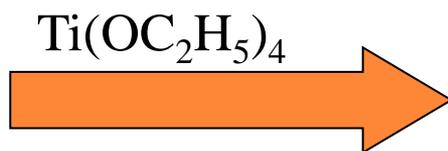


ПОЛУЧЕНИЕ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

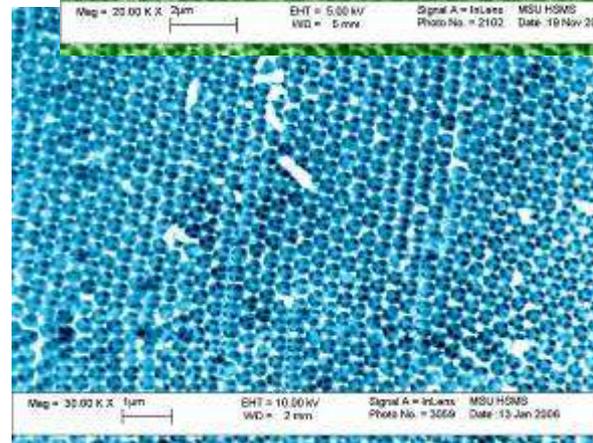
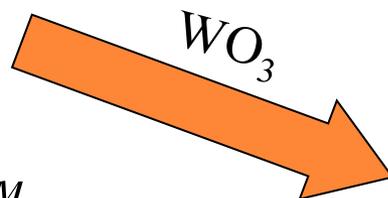
Инвертированные опалы



SiO_2



TiO_2



WO_3

*Пропитка коллоидного
кристалла под действием
капиллярных сил*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Для расчётов фотонных кристаллов используют классическую систему уравнений Максвелла, строя алгоритм, позволяющий вычислять распространение электромагнитного поля через периодическую структуру с локально нарушенной периодичностью (нестационарная задача электродинамики, решаемая, обычно, одним из методов конечно-разностной аппроксимации на периодической сетке).

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

- наличие локальных электрических токов и изменение электрической индукции в некоторой точке пространства порождают вихревое магнитное поле (ротор \vec{H}).

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

- связь ротора вектора напряжённости электрического поля \vec{E} с изменяющимся во времени вектором магнитной индукции \vec{B} и символизирует факт возникновения вихревого электрического поля при изменении индукции магнитного поля.

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho,$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0.$$

Даже при отсутствии зарядов ($\rho = 0$) и токов ($\vec{j} = 0$) эти уравнения имеют отличные от нуля решения, что говорит о возможности самостоятельного существования электромагнитного поля, распространяющегося в виде волны.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Простейшим случаем электромагнитной волны является плоская монохроматическая волна, вектор напряжённости электрического поля которой в пространстве и во времени описывается уравнением:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}$$

Аналогичное уравнение для синфазного изменения вектора напряжённости магнитного поля не рассматривают, поскольку основные оптические эффекты при взаимодействии света и вещества возникают вследствие изменения электрической составляющей волны.

Материальные уравнения:

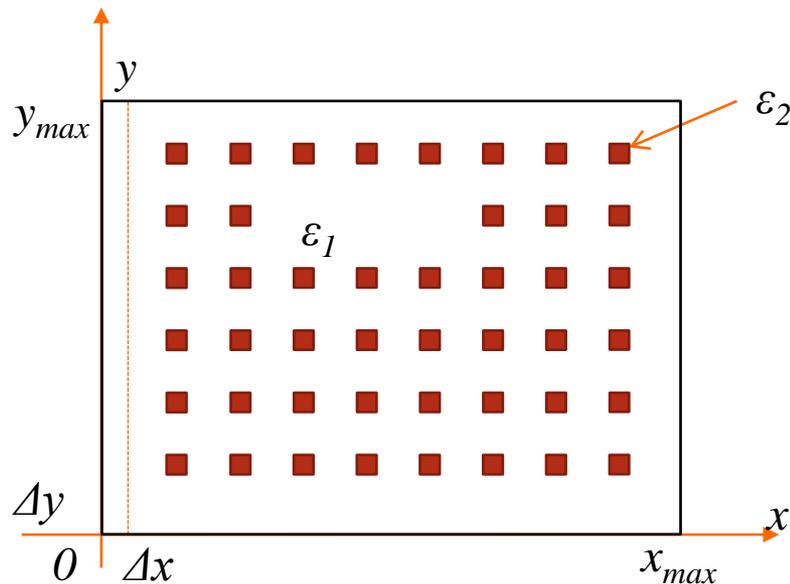
$$\begin{aligned}\vec{D} &= \hat{\epsilon} \epsilon_0 \vec{E} \\ \vec{B} &= \hat{\mu} \mu_0 \vec{H} \\ \vec{j} &= \hat{\sigma} \vec{E}\end{aligned}$$

В случае оптически изотропных сред тензорные величины будем считать скалярными.

$$n^* = \sqrt{\epsilon \mu}$$

FDTD – ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

1) Рассматриваем двумерный фотонный кристалл в виде периодической структуры из стержней квадратного сечения (с длиной стороны l) бесконечной высоты с диэлектрической проницаемостью ε_2 , пересекающих под прямым углом модельную плоскость xu тела с диэлектрической проницаемостью ε_1 (см. рисунок). Периодичность стержней в одном месте может быть нарушена в виде точечного либо линейного дефекта (отсутствия стержней).



2) Предполагаем, что в системе нет токов и нет свободных зарядов, что существенно упрощает решение уравнений Максвелла.

3) Введём прямоугольную сетку с постоянным шагом по осям координат и по времени:
 $x_i = i \cdot \Delta x, i = 0 \dots N_x; y_j = j \cdot \Delta y, j = 0 \dots N_y; t_n = n \cdot \Delta t, n = 0 \dots n_{max}.$

FDTD – СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ

Общий вид системы пространственных уравнений без учёта токов и зарядов:

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} [\vec{\nabla} \times \vec{E}]$$

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = -\frac{1}{\varepsilon} [\vec{\nabla} \times \vec{H}]$$

Здесь ε , μ - относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости.

Распишем уравнения по каждой из трёх координатных компонент для \vec{H} и \vec{E} :

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right]$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right]$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right]$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right]$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right]$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right]$$

FDTD – УПРОЩАЕМ ДЛЯ ДВУМЕРНОГО СЛУЧАЯ

Сведём задачу к двумерному случаю, предполагая, что моделируемая структура простирается в бесконечность по оси z , не изменяя своих свойств, заданных в плоскости xy . В этом случае падающая волна также однородна в z -направлении, т.е. все частные производные по координате z (но не по времени!) должны быть равны нулю.

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{-1}{\mu} \frac{\partial E_z}{\partial y}$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial H_z}{\partial y}$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial E_z}{\partial x}$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{-1}{\varepsilon} \frac{\partial H_z}{\partial x}$$

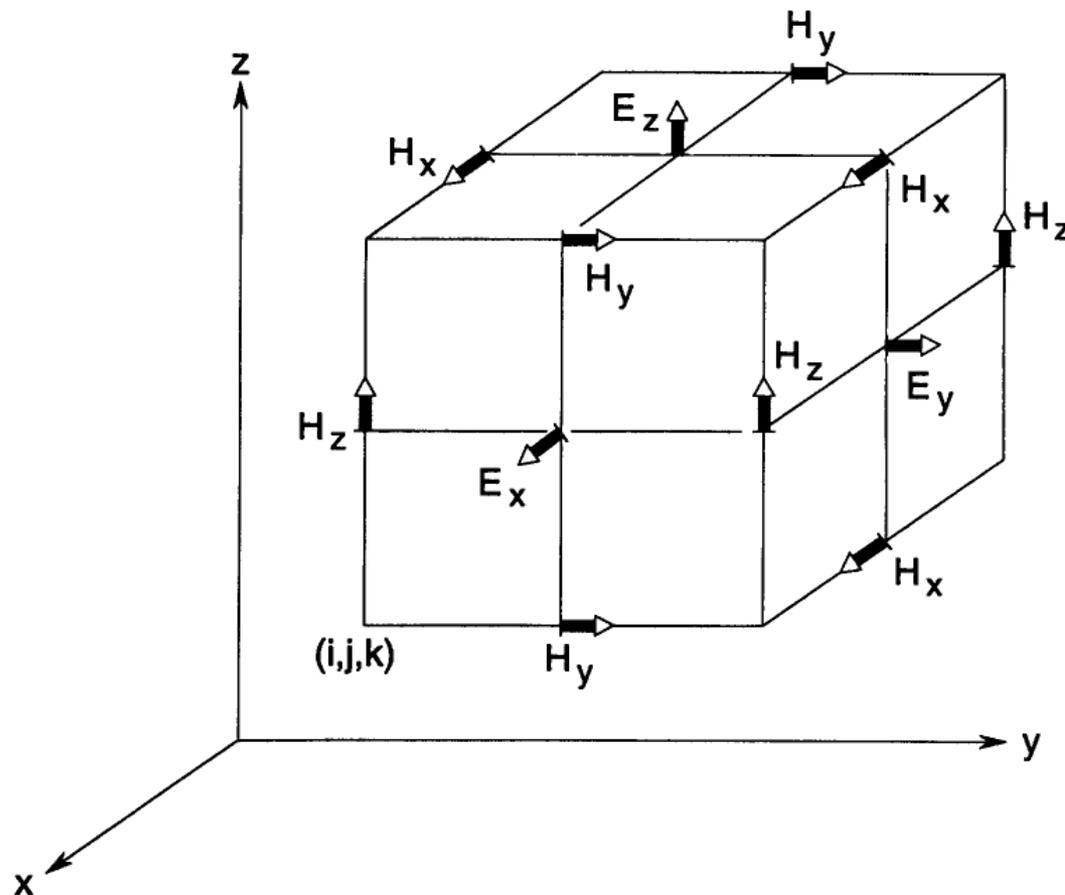
$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right]$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right]$$

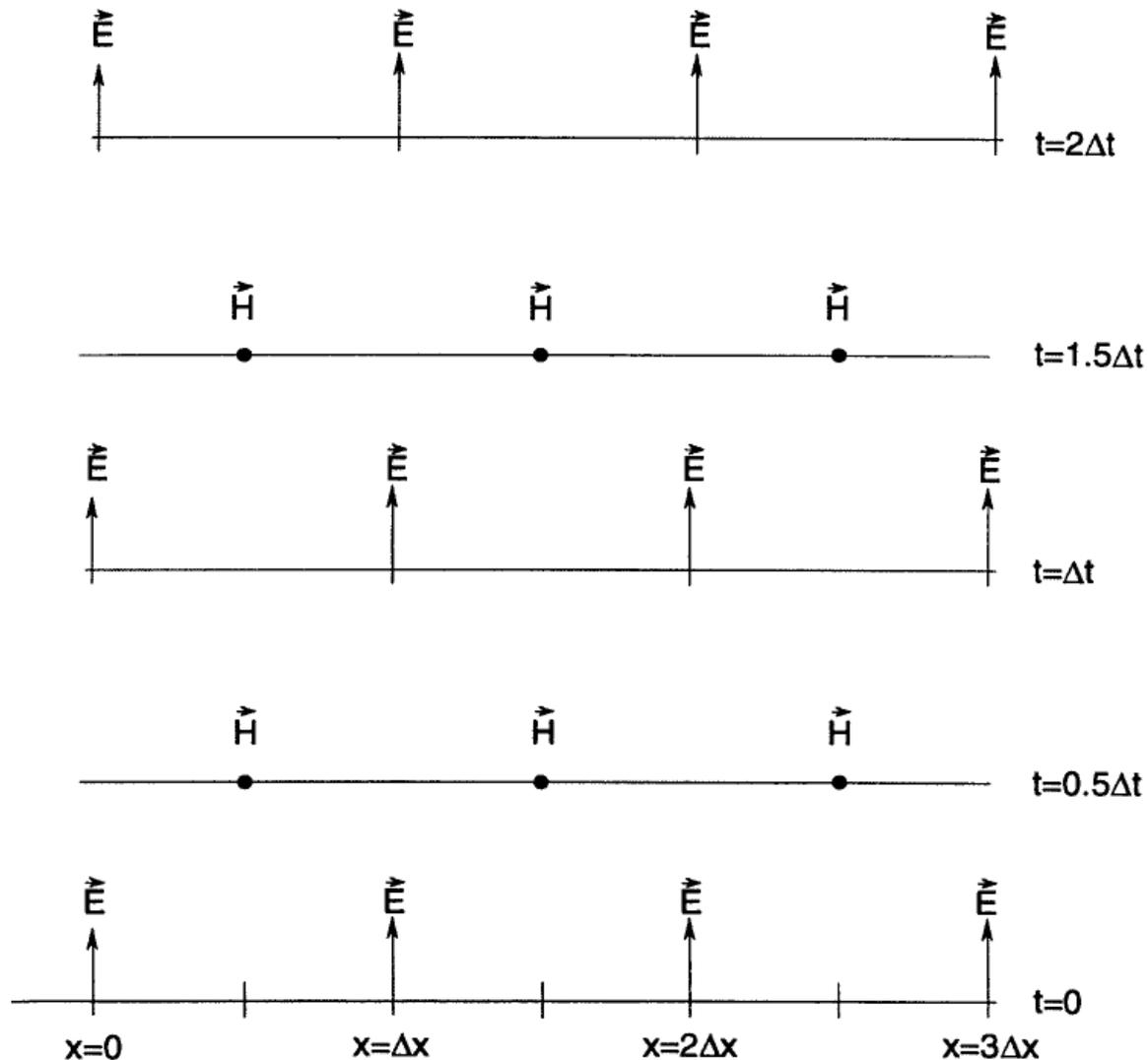
Набор **синих** уравнений имеет аббревиатуру TM_z (transverse-magnetic mode - вектор \vec{E} находится в плоскости, перпендикулярной оси z), а набор **красных** уравнений соответственно TE_z (transverse-electric mode - вектор \vec{E} параллелен оси z). Эти два режима не имеют общих компонент и могут быть рассчитаны независимо один от другого.

FDTD – THE FINITE-DIFFERENCE TIME-DOMAIN METHOD

Пространственная ячейка Yee (общий случай):



FDTD – ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИАГРАММА АЛГОРИТМА YEE



FDTD – РАЗНОСТНЫЕ УРАВНЕНИЯ (TE_z)

$$\frac{E_x^{n+\frac{1}{2}}_{i,j+\frac{1}{2}} - E_x^{n-\frac{1}{2}}_{i,j+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \frac{1}{\varepsilon_{i,j+\frac{1}{2}}} \cdot \frac{H_z^n_{i,j+1} - H_z^n_{i,j}}{\Delta y}$$

$$\frac{E_y^{n+\frac{1}{2}}_{i-\frac{1}{2},j+1} - E_y^{n-\frac{1}{2}}_{i-\frac{1}{2},j+1}}{\Delta t} = \frac{-1}{\varepsilon_{i-\frac{1}{2},j+1}} \cdot \frac{H_z^n_{i,j+1} - H_z^n_{i-1,j+1}}{\Delta x}$$

$$\frac{H_z^{n+1}_{i,j+1} - H_z^n_{i,j+1}}{\Delta t} = \frac{1}{\mu_{i,j+1}} \left(\frac{E_x^{n+\frac{1}{2}}_{i,j+\frac{3}{2}} - E_x^{n+\frac{1}{2}}_{i,j+\frac{1}{2}}}{\Delta y} - \frac{E_y^{n+\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j+1} - E_y^{n+\frac{1}{2}}_{i-\frac{1}{2},j+1}}{\Delta x} \right)$$

FDTD – РАСЧЁТНЫЕ ФОРМУЛЫ (TE_z)

$$E_x^{n+\frac{1}{2}}_{i,j+\frac{1}{2}} = E_x^{n-\frac{1}{2}}_{i,j+\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j+\frac{1}{2}}} \cdot \frac{H_{zi,j+1}^n - H_{zi,j}^n}{\Delta y}$$

$$E_y^{n+\frac{1}{2}}_{i-\frac{1}{2},j+1} = E_y^{n-\frac{1}{2}}_{i-\frac{1}{2},j+1} - \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i-\frac{1}{2},j+1}} \cdot \frac{H_{zi,j+1}^n - H_{zi-1,j+1}^n}{\Delta x}$$

$$H_{zi,j+1}^{n+1} = H_{zi,j+1}^n + \frac{\Delta t}{\mu_{i,j+1}} \left(\frac{E_x^{n+\frac{1}{2}}_{i,j+\frac{3}{2}} - E_x^{n+\frac{1}{2}}_{i,j+\frac{1}{2}}}{\Delta y} - \frac{E_y^{n+\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j+1} - E_y^{n+\frac{1}{2}}_{i-\frac{1}{2},j+1}}{\Delta x} \right)$$

FDTD – РАСЧЁТЫ ДЛЯ (TM_z) И ПО ВРЕМЕНИ

Разностные уравнения и расчётные формулы для случая TM_z выводятся аналогичным образом.

В итоге получим три уравнения для трёх неизвестных на одной временной точке с итерационным расчётом по времени: для вычисления значений на текущем шаге используются значения на предыдущем.

Поскольку начальные значения компонент \vec{E} либо \vec{H} известны во всех узлах сетки для $t = 0$, промежуточные значения на полушаге по пространственной сетке могут быть рассчитаны линейной аппроксимацией вида

$$H_{y,i,j+\frac{1}{2}}^0 = \frac{1}{2} (H_{y,i,j+1}^0 + H_{y,i,j}^0)$$

FDTD – УСЛОВИЕ УСТОЙЧИВОСТИ

Условие устойчивости для явной конечно-разностной схемы

$$\Delta t \leq \left(v \sqrt{\Delta x^{-2} + \Delta y^{-2}} \right)^{-1}$$

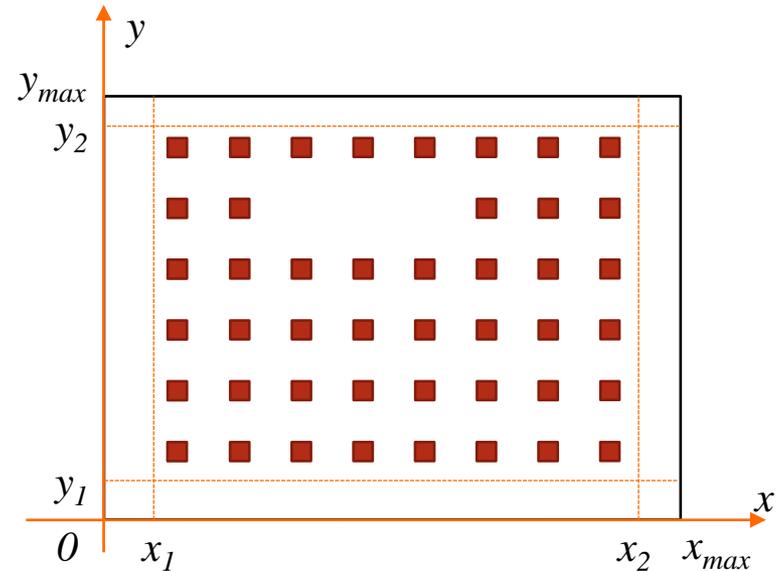
где v – максимальная скорость распространения электромагнитных волн в рассчитываемом материале.

При численном решении данной системы уравнений значения μ и ε берутся в каждой точке сетки и, в принципе, могут быть различными для различных компонент векторов напряжённости, поэтому моделируемое вещество может быть оптически неоднородным и / или анизотропным.

PML – СУТЬ ПРОБЛЕМЫ

При численном моделировании открытых систем, для которых решается волновое уравнение, постановка правильных граничных условий чрезвычайно важна. Граничные условия типа «*Perfectly Matched Layer Absorbing Boundary Conditions*» часто используются для устранения некорректностей при расчёте поведения электромагнитной волны вблизи границ рассчитываемого пространства. В общем случае каждая компонента электромагнитного поля разделяется на две части. В декартовых координатах 6 \vec{E} и \vec{H} компонент поля заменяются на 6 подкомпонент для каждого из векторов, в частности для напряжённости электрического поля:

$$E_{xy}, E_{xz}, E_{yx}, E_{yz}, E_{zx}, E_{zy}.$$



Обычно толщина PML-слоя составляет 10% от размеров области

РМЛ – ИЗМЕНЕНИЕ БАЗОВОЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ

Случай TE_z

$$\varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma_y E_x = \frac{\partial H_z}{\partial y}$$

$$\varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} + \sigma_x E_y = -\frac{\partial H_z}{\partial x}$$

$$\mu \frac{\partial H_{zx}}{\partial t} + \sigma_x^* H_{zx} = -\frac{\partial E_y}{\partial x}$$

$$\mu \frac{\partial H_{zy}}{\partial t} + \sigma_y^* H_{zy} = \frac{\partial E_x}{\partial y}$$

Случай TM_z

$$\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} + \sigma_y^* H_x = -\frac{\partial E_z}{\partial y}$$

$$\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} + \sigma_x^* H_y = -\frac{\partial E_z}{\partial x}$$

$$\varepsilon \frac{\partial E_{zx}}{\partial t} + \sigma_x E_{zx} = \frac{\partial H_y}{\partial x}$$

$$\varepsilon \frac{\partial E_{zy}}{\partial t} + \sigma_y E_{zy} = -\frac{\partial H_x}{\partial y}$$

Здесь $H_z = H_{zx} + H_{zy}$, $E_z = E_{zx} + E_{zy}$;
 $\sigma^* = \sigma \frac{\mu}{\varepsilon}$ (“магнитная проводимость”).

RML – ПОСТАНОВКА УСЛОВИЙ

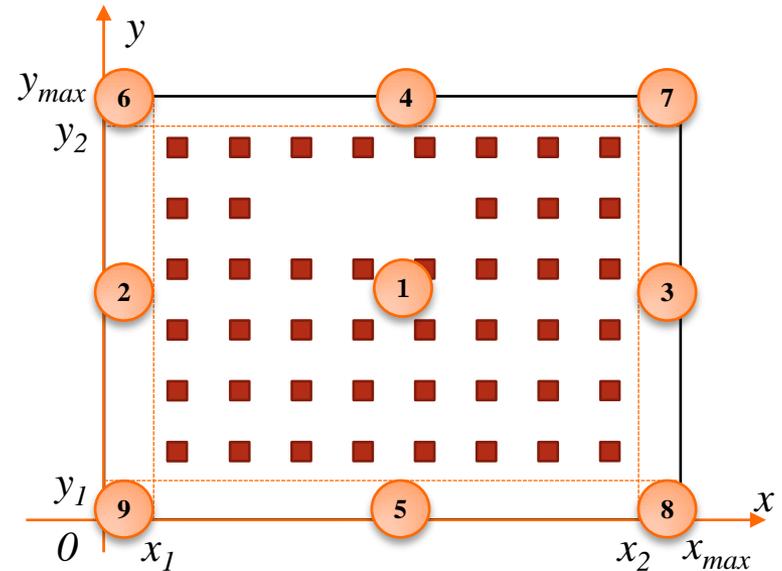
1. $x_1 \leq x < x_2; y_1 \leq y < y_2$
 $\rightarrow \sigma_x = 0; \sigma_y = 0;$
- 2, 3. $0 \leq x < x_1; x_2 \leq x < x_{max};$
 $y_1 \leq y < y_2 \rightarrow \sigma_y = 0;$
- 4, 5. $x_1 \leq x < x_2;$
 $0 \leq y < y_1; y_2 \leq y < y_{max} \rightarrow \sigma_x = 0;$

Для областей 6-9 обнуления величин электрической и магнитной проводимости не происходит.

На внешней границе $E_z = 0$.

Вариант постановки условий на σ_x
 (аналогично для σ_y):

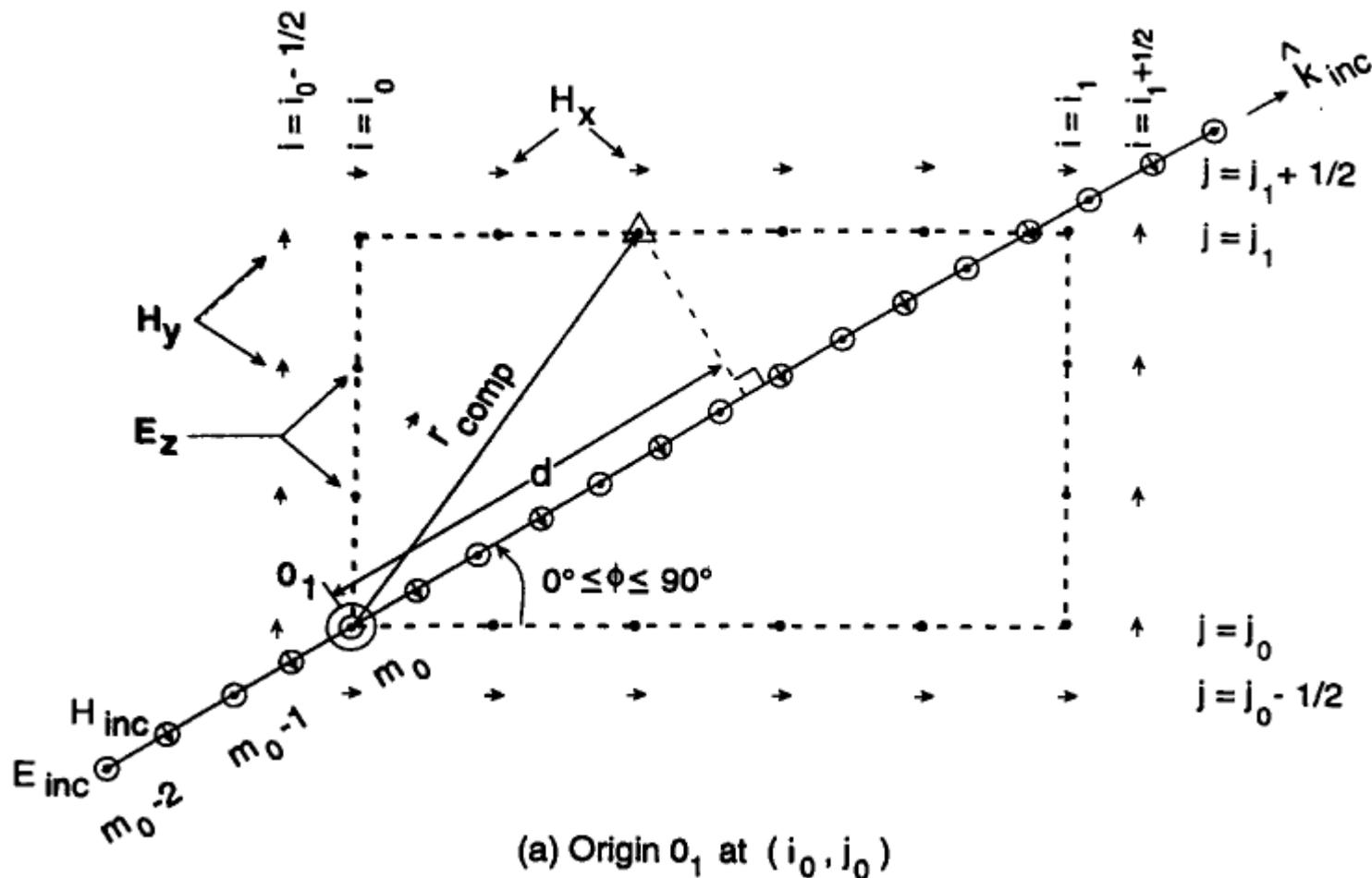
Константа C может выбираться эмпирически в диапазоне от 10 до 10^5 .



$$\sigma_x = \begin{cases} C \left(\frac{x_1 - x}{x_1} \right)^4 ; & 0 \leq x \leq x_1 \\ 0 ; & x_1 \leq x \leq x_2 \\ C \left(\frac{x - x_2}{x_2} \right)^4 ; & x_2 \leq x \leq x_{max} \end{cases}$$

ВОЗБУЖДЕНИЕ ПОЛЯ В РНС

Наиболее простой случай – плоская волна, падающая под углом $0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$, определяемая вектором \vec{k}_{inc}



ВОЗБУЖДЕНИЕ ПОЛЯ В РНС

В более сложном случае рассматривают падение волнового пакета на фотонный кристалл (для расчёта дисперсионных кривых), вводимое, например, как движение зарядов вдоль оси x :

$$j(x, t) = f(t) \sin\left(\pi \frac{x}{a}\right)$$

$$f(t) = \exp\left(-\left(\frac{t - t_0}{2\Delta f}\right)^2\right) \cdot \sin \omega t$$

Необходимые константы, в том числе и частотная область Δf , задаются априори.

ЧТО ВАС ЖДЁТ?

Практика:

Моделирование энергетических и оптических свойств фотонных кристаллов на основе разработок Joannopoulos Research Group (MIT).



Поскольку базовые алгоритмы метода FDTD разработаны достаточно давно, в настоящее время существует несколько популярных реализаций таких алгоритмов, которыми можно воспользоваться для моделирования структуры фотонного кристалла с дефектами. Наиболее известными являются разработки группы Массачусетского технологического института (MIT) под руководством проф. J. Joannopoulos – это программные продукты *MEEP* и *MPB*, распространяемые по GNU GPL.

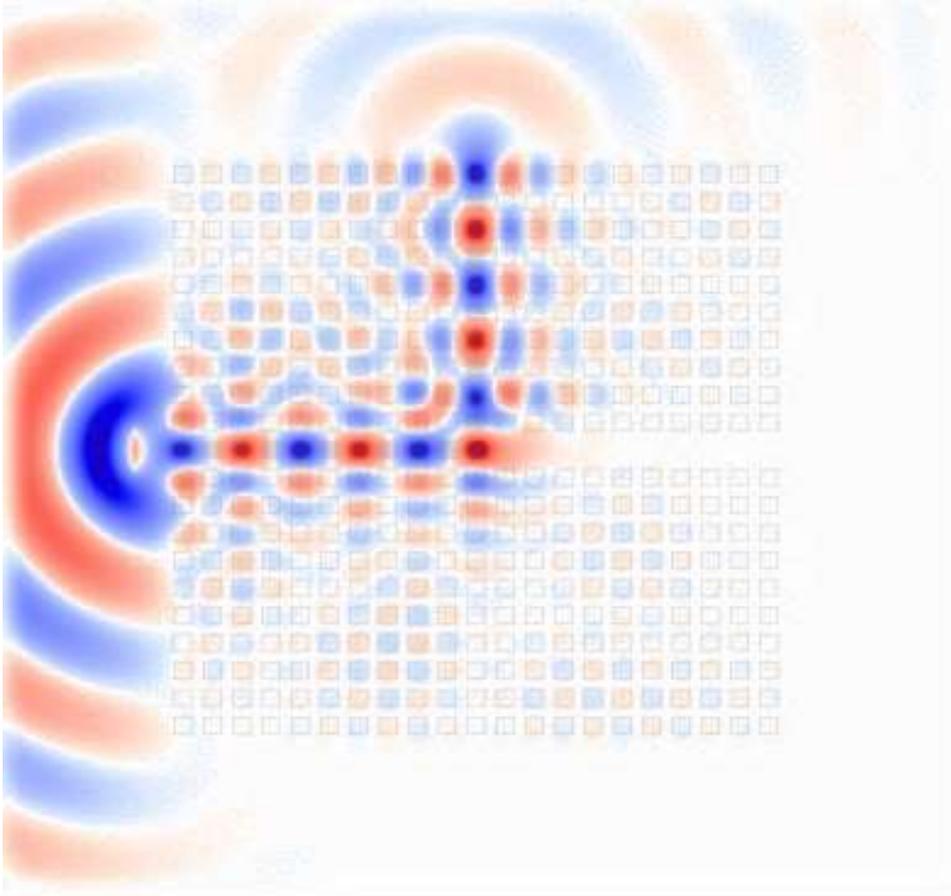
<http://ab-initio.mit.edu/wiki/index.php/Meep>

МЕЕР и МРВ

Программа МЕЕР является трёхмерным FDTD-симулятором с постановкой PML-условий с возможностью проведения параллельных (кластерных) вычислений. Результатом работы программы являются пространственно-временные карты распространения электромагнитной волны в исследуемой среде (которые особенно хорошо визуализируются для случая двумерного фотонного кристалла) и расчёты энергетического спектра волнового пакета в выбранной точке пространства.

Программа МРВ используется для расчёта фотонной запрещённой зоны в исследуемых пространственных периодических диэлектрических структурах.

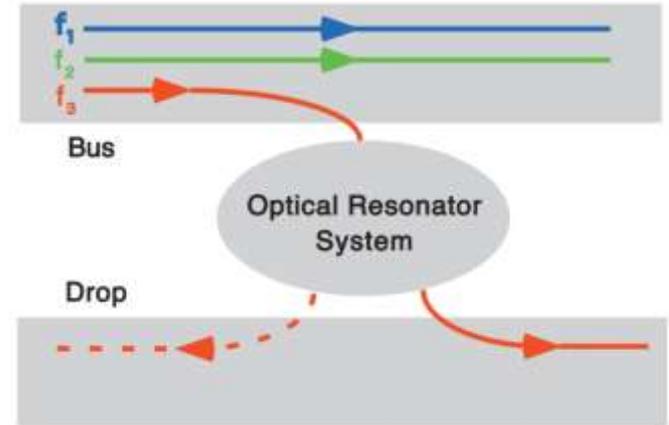
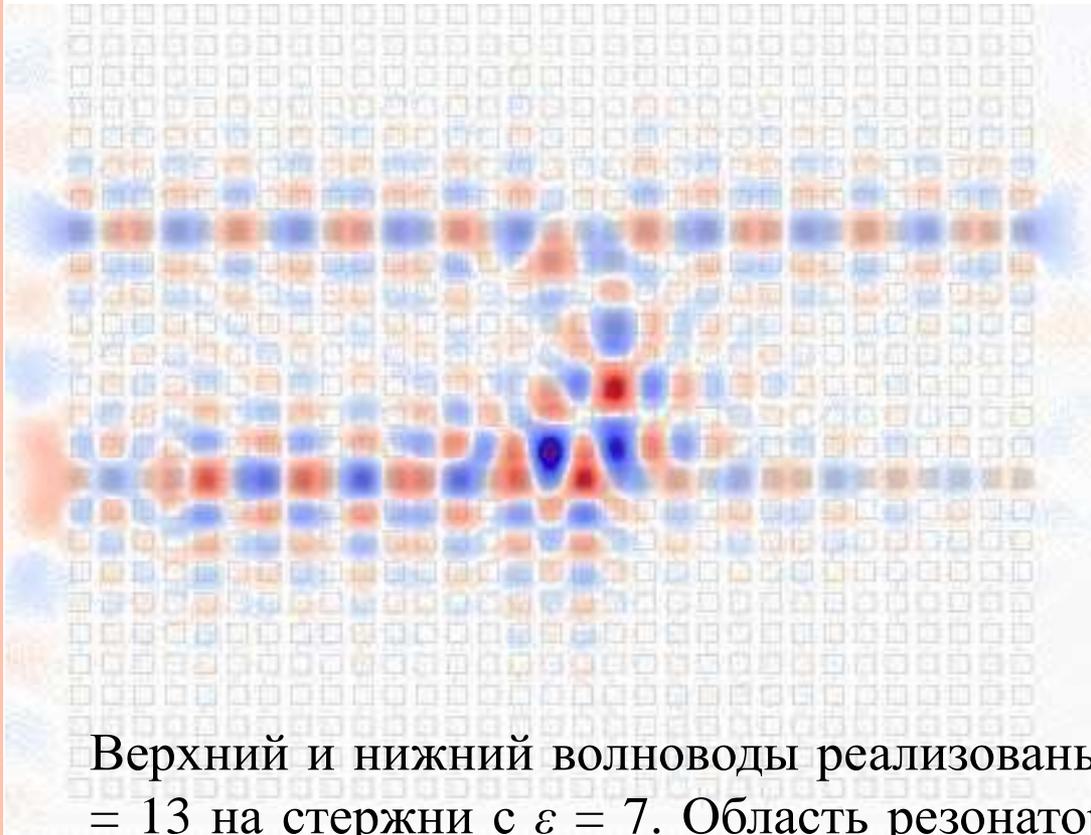
МЕЕР: ВОЛНОВОД С ПОВОРОТОМ НА 90°



В представленной модели используется структура неинвертированного фотонного кристалла, в которой среда имеет диэлектрическую проницаемость равную единице, а стержни – 12. Волновод создаётся «заменой вещества» с $\epsilon=6$ для двух рядов пор, определяющих путь распространения электромагнитной волны.

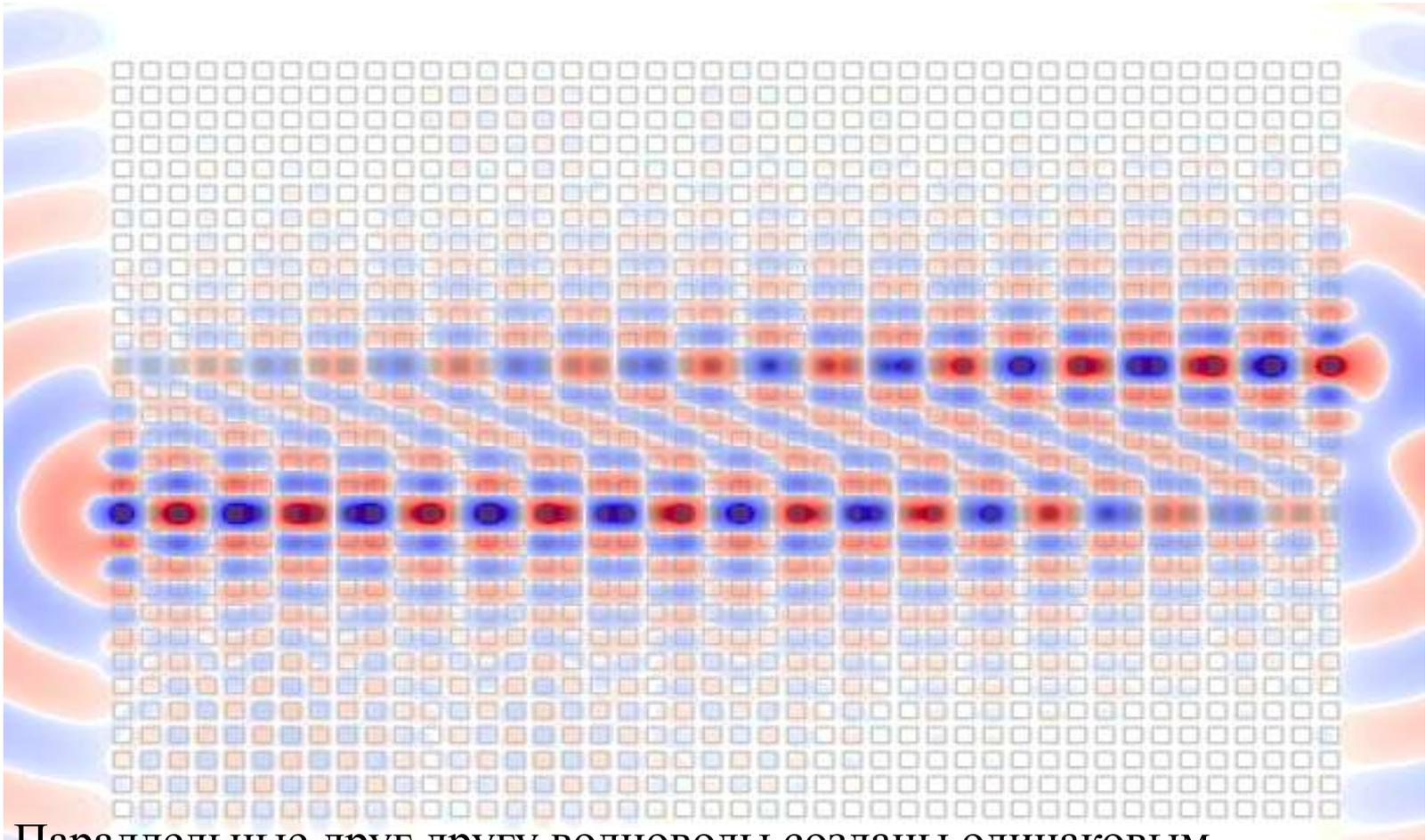
Источник излучения находился вне фотонного кристалла (на рисунке-слева).

МЕЕР: ПЕРЕБРАСЫВАЮЩИЙ ФИЛЬТР



Верхний и нижний волноводы реализованы заменой стержней с $\varepsilon = 13$ на стержни с $\varepsilon = 7$. Область резонатора реализована на трёх вертикальных рядах стержней заменой на материал с $\varepsilon = 5.5$ в шахматном порядке. Созданные условия не позволяют направить свет во втором волноводе в каком-либо одном направлении, поэтому свет распространяется от области резонанса в противоположные стороны с равной интенсивностью.

МЕЕР: ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВОЛНОВОДЫ

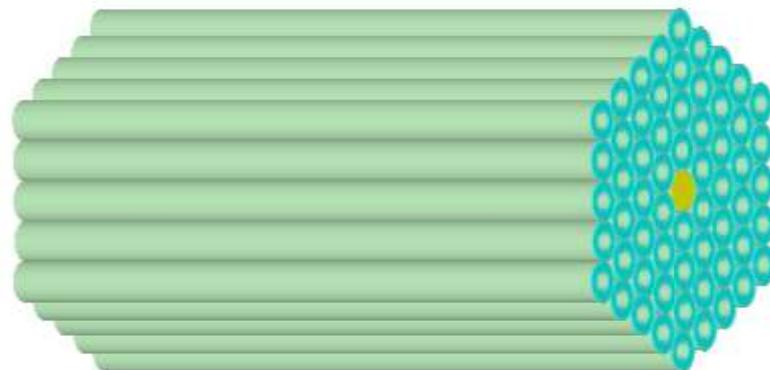
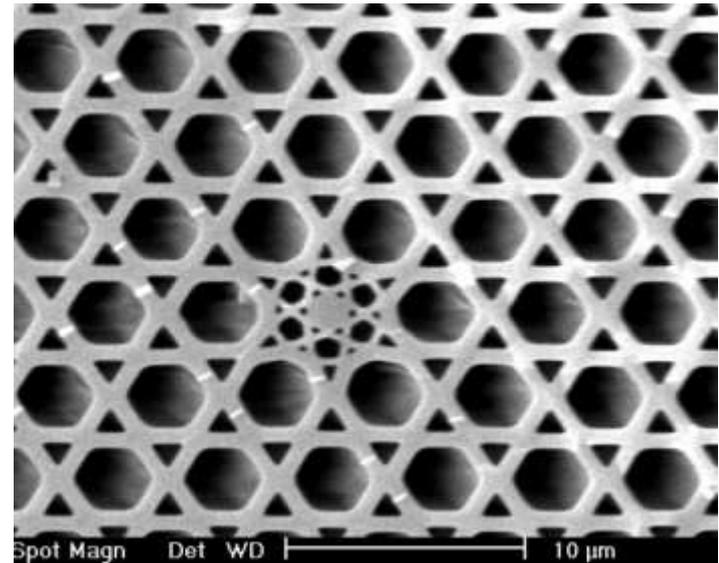


Параллельные друг другу волноводы созданы одинаковым изменением диэлектрической проницаемости стержней. Источник электромагнитных волн находится слева в нижнем волноводе на границе фотонного кристалла.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ

1. Дырчатые волноводы.

Кристалл состоит из спечённых стеклянных нитей, центральная из которых – пустотелая. Такое волокно в поперечном сечении является двумерным кристаллом с зонной структурой фотонного изолятора. При этом в продольном направлении волокно является идеальным проводником.



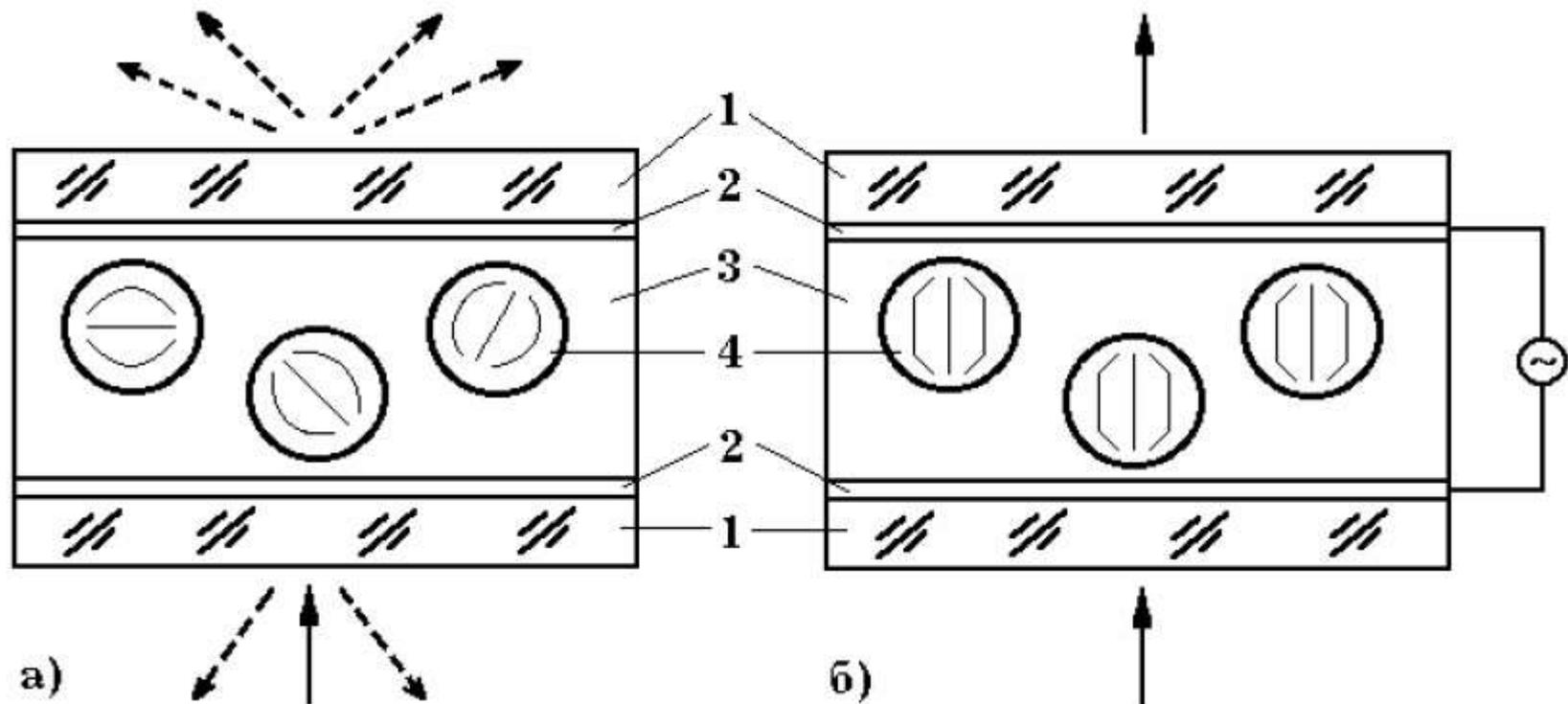
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ

2. Жидкокристаллические композиты на основе фотонных кристаллов.

Создание PhC-структур на основе жидких кристаллов или с включением ЖК в качестве дефектов структуры для эффективного управления оптическими свойствами фотонных кристаллов. Перестраиваемость спонтанного излучения, волноводных эффектов и локализации света может значительно увеличить технологическую ценность композитных жидкокристаллических материалов с фотонной запрещенной зоной.

Одно из больших преимуществ PhC-материалов в том, что большинство из них состоит из пор. Эти поры могут быть пропитаны другими электрооптически-активными материалами, которые позволяют перестраивать зонную структуру PhC глобально или локально. Модификация спектра PhC может быть реализована посредством управления анизотропией таких материалов, к представителям которых относятся различные жидкие кристаллы.

РНС НА ОСНОВЕ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ



Полимерный фильтр с микропорами, заполненный нематическим жидким кристаллом с положительной диэлектрической анизотропией

ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Искусственно созданный фотонный кристалл теоретически может заменить любую оптическую систему, и, приближаясь к фантастическим перспективам, сделать то, что современные системы линейной или нелинейной оптики сделать не в состоянии – например, локализовать группу фотонов в некоторой области пространства либо сформировать материал с отрицательным показателем преломления.

- Создание световедущих каналов любого профиля
- Спектральное разделение каналов и кросс световых потоков
- Зеркала для избирательного отражения света (оптические фильтры)
- Изготовление ювелирных украшений
- Создание сверхмалых лазеров
- Фотонные ИС и устройства оперативной памяти
- Оптические каналы связи без потерь

aspire invent achieve

