

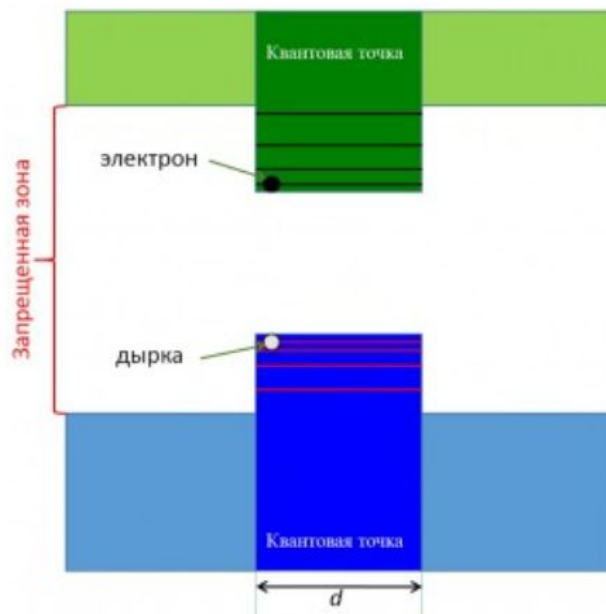
# Наноматериалы

Оптические свойства

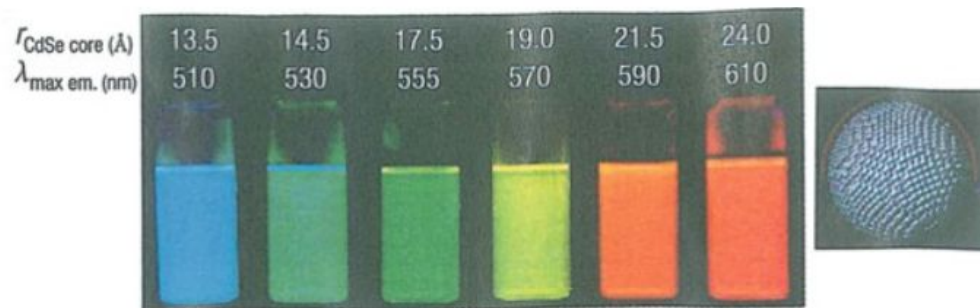
## Уровни энергии в квантовой точке

Уровни энергии электрона и дырки обратно пропорциональны квадрату ширины квантовой точки! Выбирая различные размеры и форму квантовых точек, можно добиться того, что они будут излучать или поглощать свет заданной длины волны. Это позволяет, используя один и тот же материал, но разные размеры и форму, создавать источники света, излучающие в заданном спектральном диапазоне!

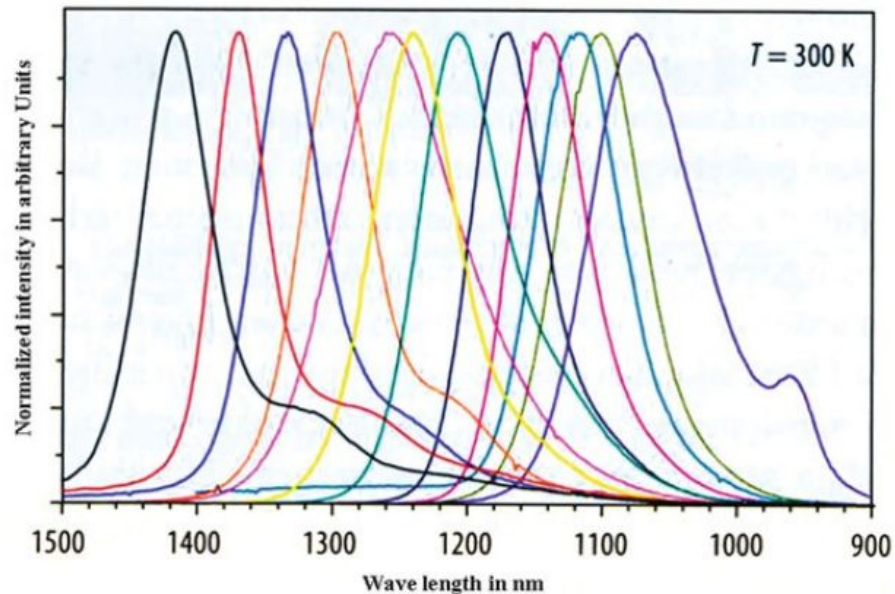
$$E_n^{electron} \approx \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2m_e d^2} \quad E_n^{hole} \approx \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2m_h d^2}$$



# Спектры излучения квантовых точек

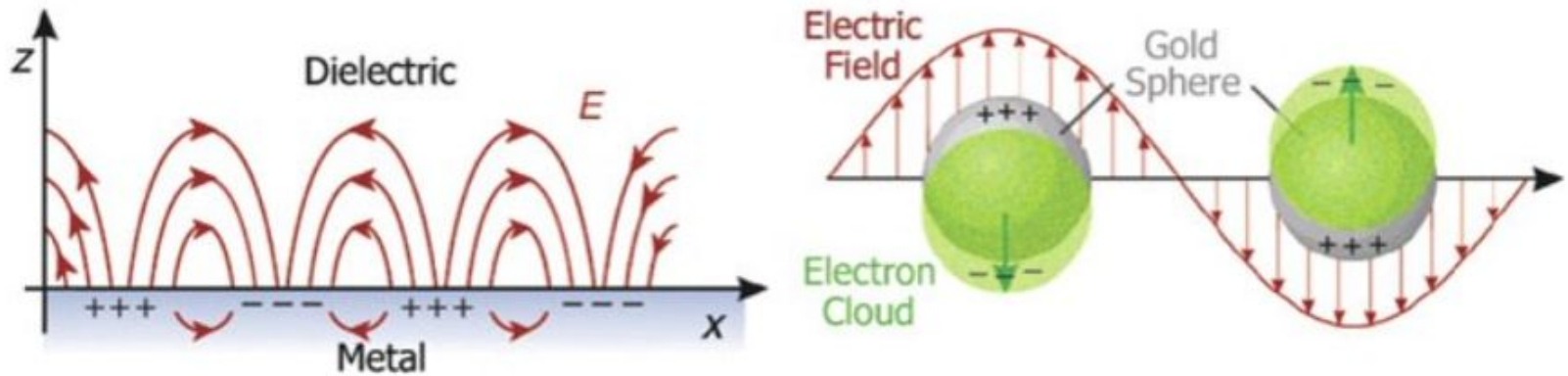


Зависимость флуоресценции квантовых точек «ядро-оболочка» CdSe/ZnS, облучаемых светом с  $\lambda = 470$  нм, от величины радиуса ядра.



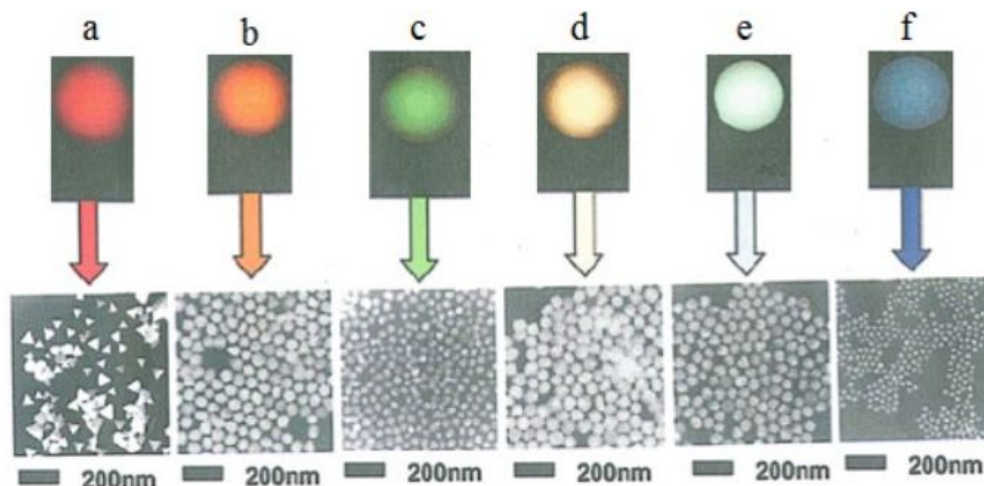
Нормированные спектры испускания квантовых точек In(Ga)As, помещенных в матрицу из GaAs.

## Спектральные свойства металлических частиц

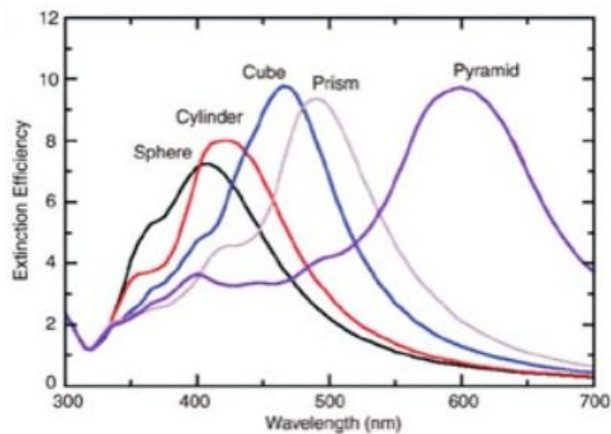


Колебания света в наноструктурах носят  
локализованный характер  
цвет зависит от размера частиц

# Зависимости спектров металлических наночастиц от их формы и размеров

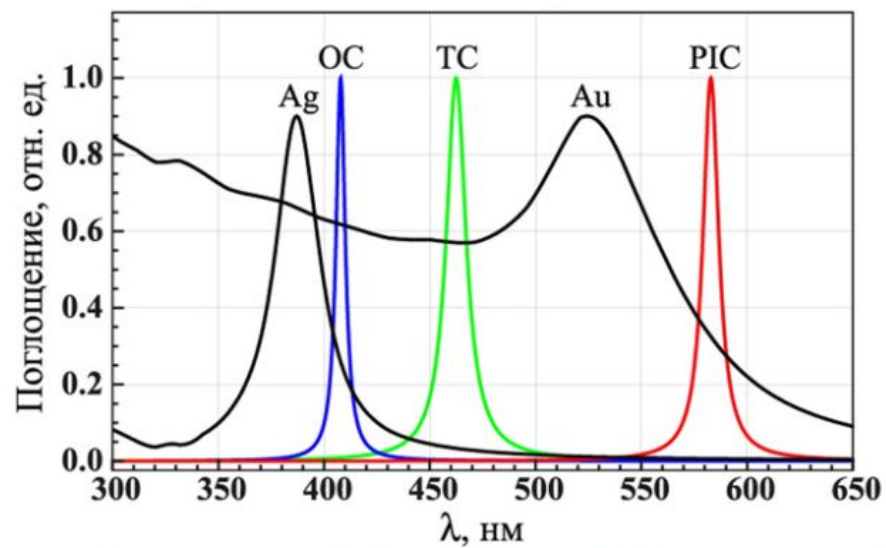
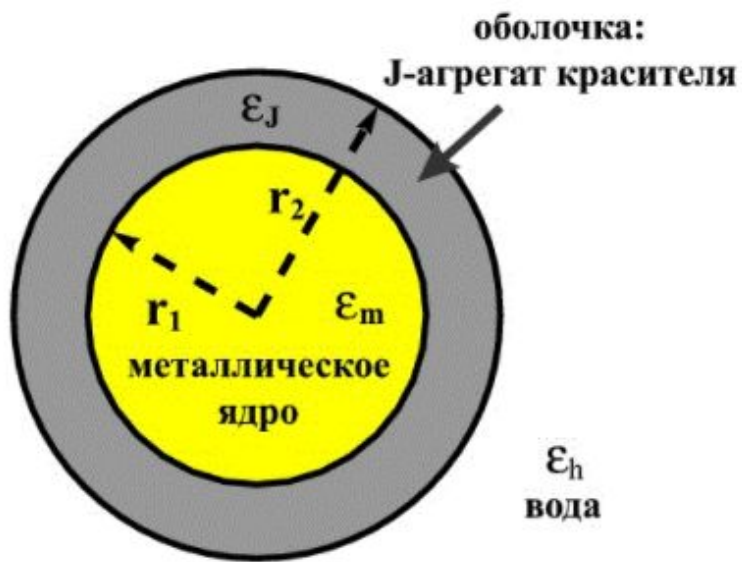


Максимумы в спектрах рассеяния для различных металлических наночастиц: а) серебряные нанопризмы; б) золотые шарики с размером 100 нм; в) золотые шарики с размером 50 нм; г) серебряные шарики с размером 100 нм; д) серебряные шарики с размером 80 нм; е) серебряные шарики с размером 40 нм; ф) серебряные шарики с размером 40 нм.



Зависимость спектра экстинкции наночастиц серебра от формы частицы.

# Гибридные наночастицы



$$\lambda_{OC} = 408 \text{ нм}$$

$$\lambda_{TC} = 462 \text{ нм}$$

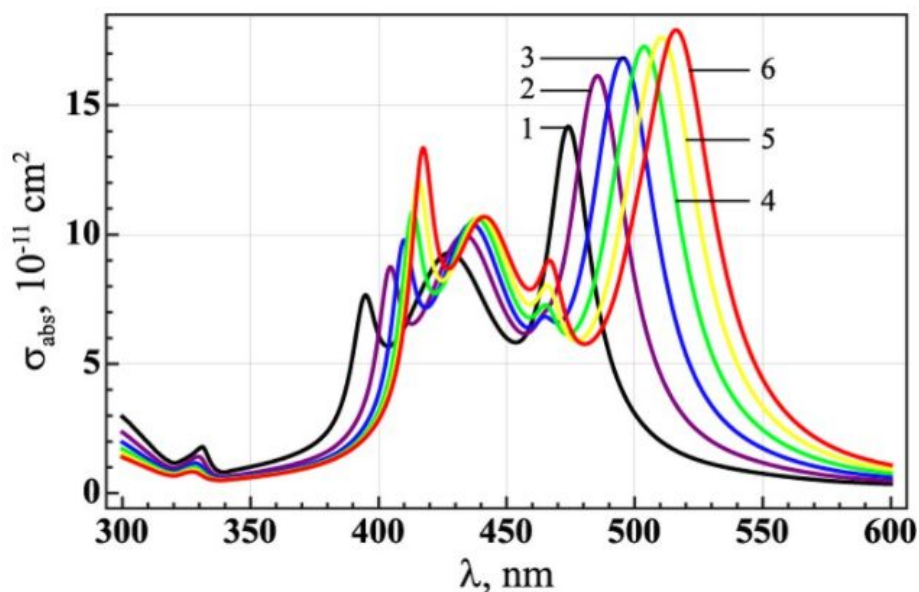
$$\lambda_{PIC} = 583 \text{ нм}$$

$$\lambda_{Ag} = 387 \text{ нм}$$

$$\lambda_{Au} = 524 \text{ нм}$$

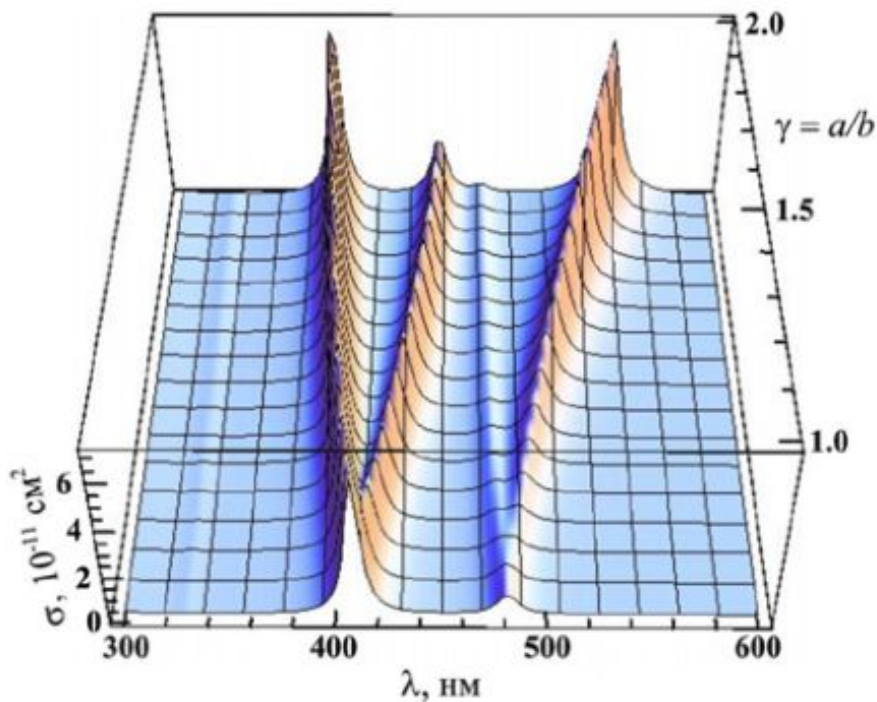
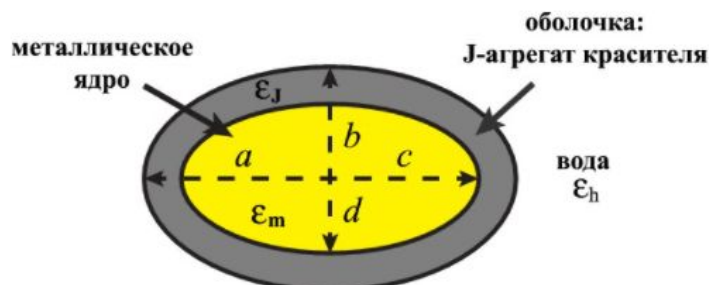
Зависимость характера спектров фотопоглощения гибридных наночастиц Ag/J-агрегат (положений и интенсивностей пиков) от толщины внешней оболочки красителя при фиксированном радиусе ядра

Толщины оболочки:  $\ell=2$  нм (1);  $\ell=4$  нм (2);  $\ell=6$  нм (3);  $\ell=8$  нм (4);  $\ell=10$  нм (5);  $\ell=12$  нм (6). Радиус ядра наночастицы не меняется:  $r = 30$  нм



# Зависимость оптических свойств гибридных наночастиц от их формы

Объект исследования: 2-х слойные сферодальные наночастицы с металлическим ядром (Ag, Au), покрытые J-агрегатом цианинового красителя.



## Ag/TC

$$a = 12 \rightarrow 24 \text{ нм};$$

$$b = 12 \text{ нм};$$

$$\gamma = a/b = 1 \rightarrow 2$$

Параметры  
металлического ядра

$$c = 10 \rightarrow 23 \text{ нм};$$

$$d = 10 \text{ нм}$$

Толщина оболочки  
красителя

$$m_a = a - c = 2 \rightarrow 1 \text{ нм}$$

$$m_b = b - d = 2 \text{ нм}$$



# Спектральные свойства гибридных наночастиц

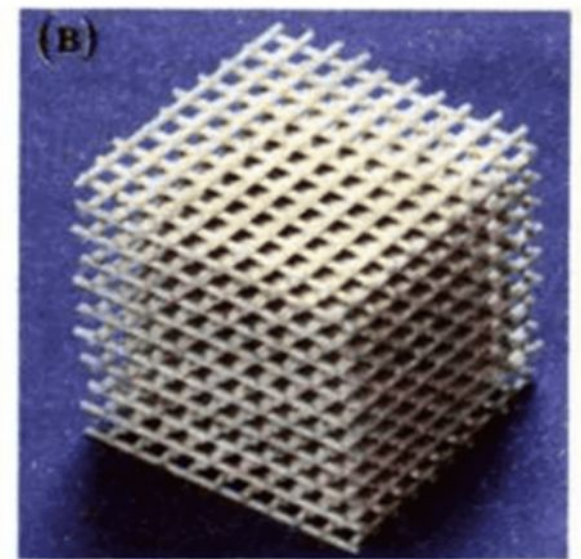
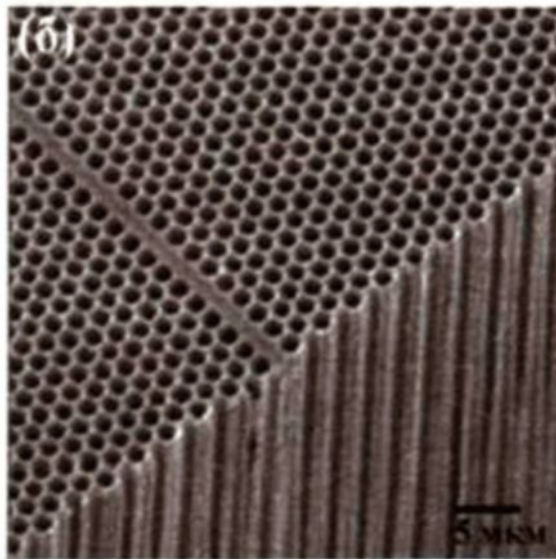
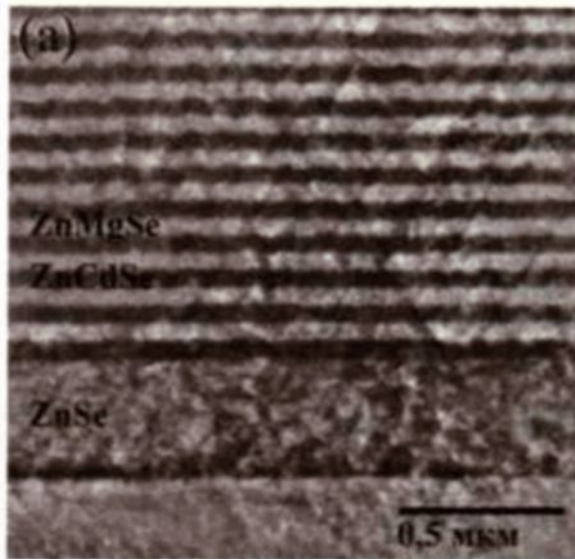
- Спектральные свойства гибридных частиц существенно отличаются от свойств компонентов, составляющих наночастицу
- Взаимодействие компонент наночастицы может приводить к смещению положения пиков в сечениях поглощения, возникновению новых пиков, а также изменению пиковых значений сечений поглощения
- Положения и количество пиков в сечениях поглощения зависят от формы наночастицы
- Для несферических частиц положения максимумов поглощения зависит от поляризации падающего излучения
- Выбирая различные геометрические параметры гибридной наночастицы, можно добиться смещения пиков поглощения в требуемую спектральную область, что открывает возможность управления спектральными свойствами гибридных наночастиц

## Выводы

- Оптические свойства наночастиц радикально отличаются от свойств объемного материала
- Практически для всех наночастиц спектральные характеристики существенно изменяются при изменении формы и размера частиц
- Варьируя геометрические параметры наночастиц, можно добиться требуемых оптических свойств
- При переходе к рассмотрению ансамблей наночастиц необходимо принимать во внимание взаимодействие между отдельными частицами
- Спектральные свойства гибридных наночастиц отличаются от свойств компонентов, из которых они состоят (целое не равно сумме частей!)

# Фотонный кристалл —

твердотельная структура с периодически изменяющейся диэлектрической проницаемостью либо неоднородностью, период которой сравним с длиной волны света



Примеры фотонных кристаллов различной размерности:

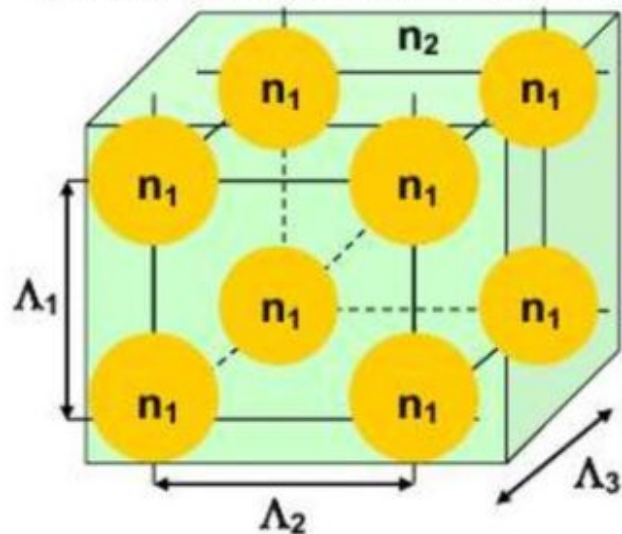
- а – одномерный фотонный кристалл (поперечное сечение, постоянная решетки 0,15 мкм);
- б - двумерный фотонный кристалл на основе макропористого кремния (постоянная решетки 1,5 мкм, высота пор 100 мкм);
- в - трехмерный фотонный кристалл на основе синтетического опала (постоянная решетки 300 нм)

# Фотонные кристаллы

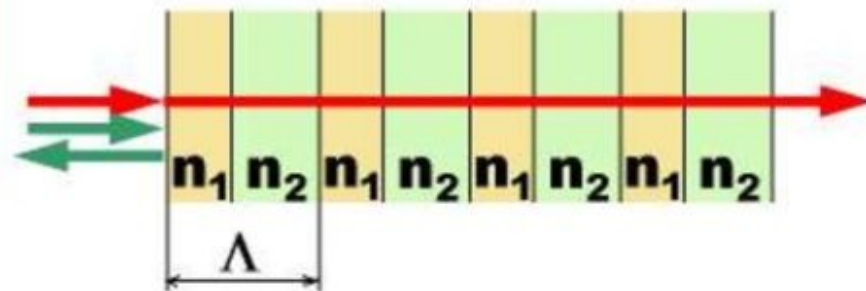
**Фотонный кристалл** - это материал, структура которого характеризуется периодическим изменением показателя преломления в пространственных направлениях .

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

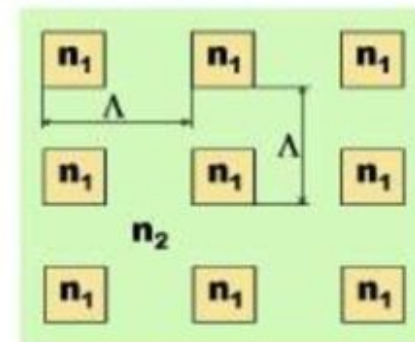
Трехмерный фотонный кристалл

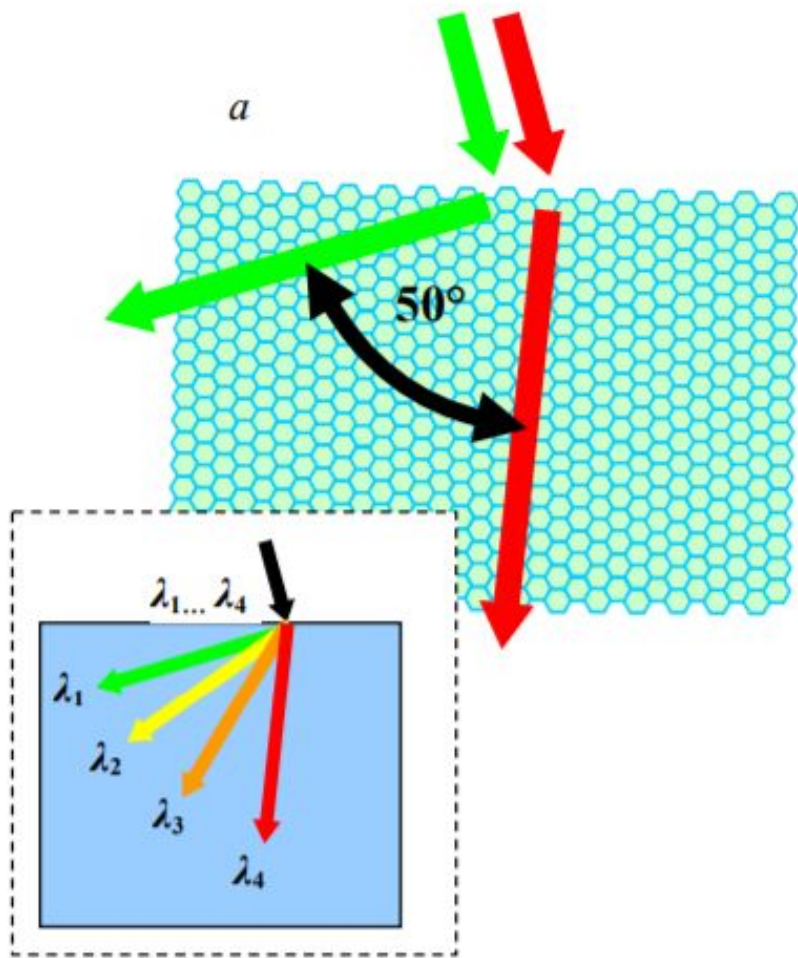


Одномерный фотонный кристалл

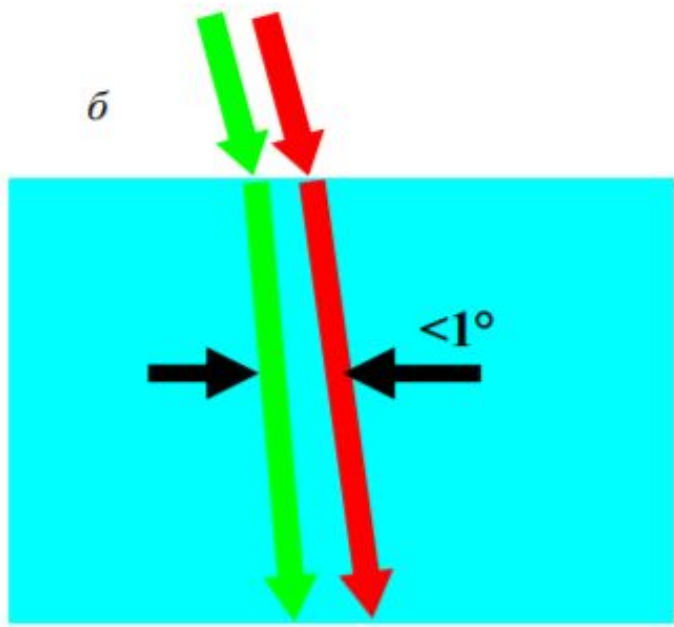


Двумерный фотонный кристалл



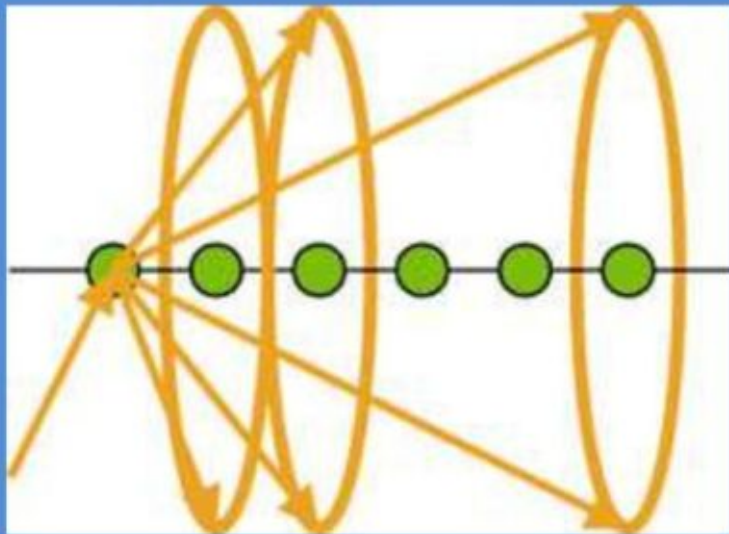


Свет в фотонном кристалле



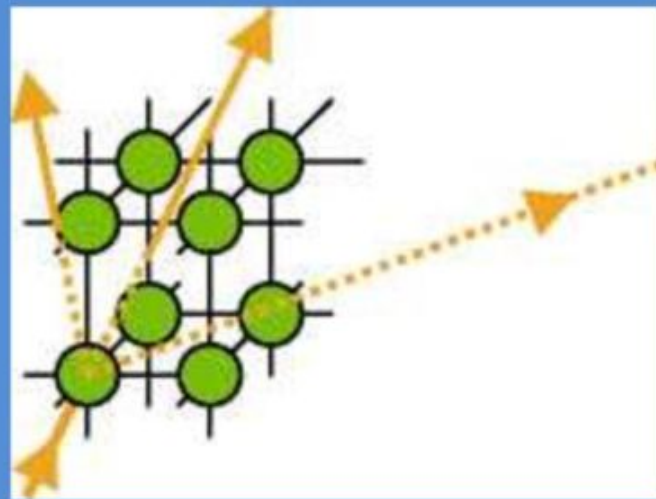
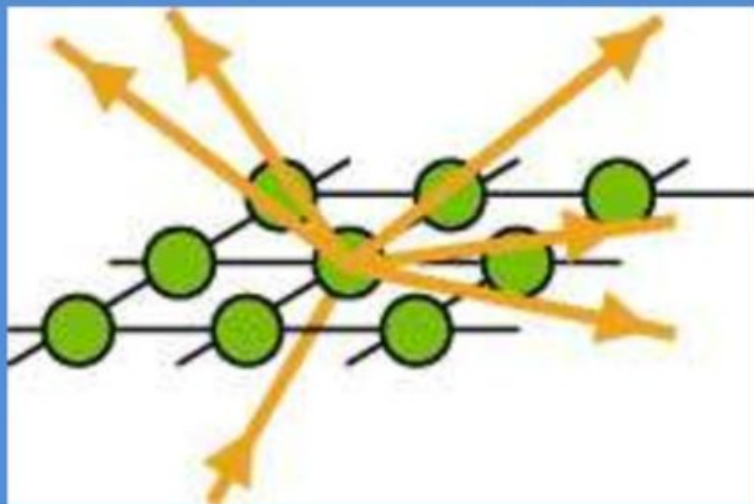
Свет в кремниевой пластинке

На рисунках схематично показано явление дифракции лучей света на периодических структурах различной размерности. При рассеянии фотонов на 1D- и 2D-структурах всегда находятся такие направления распространения дифрагировавших лучей, для которых условие максимума интерференции выполнено.

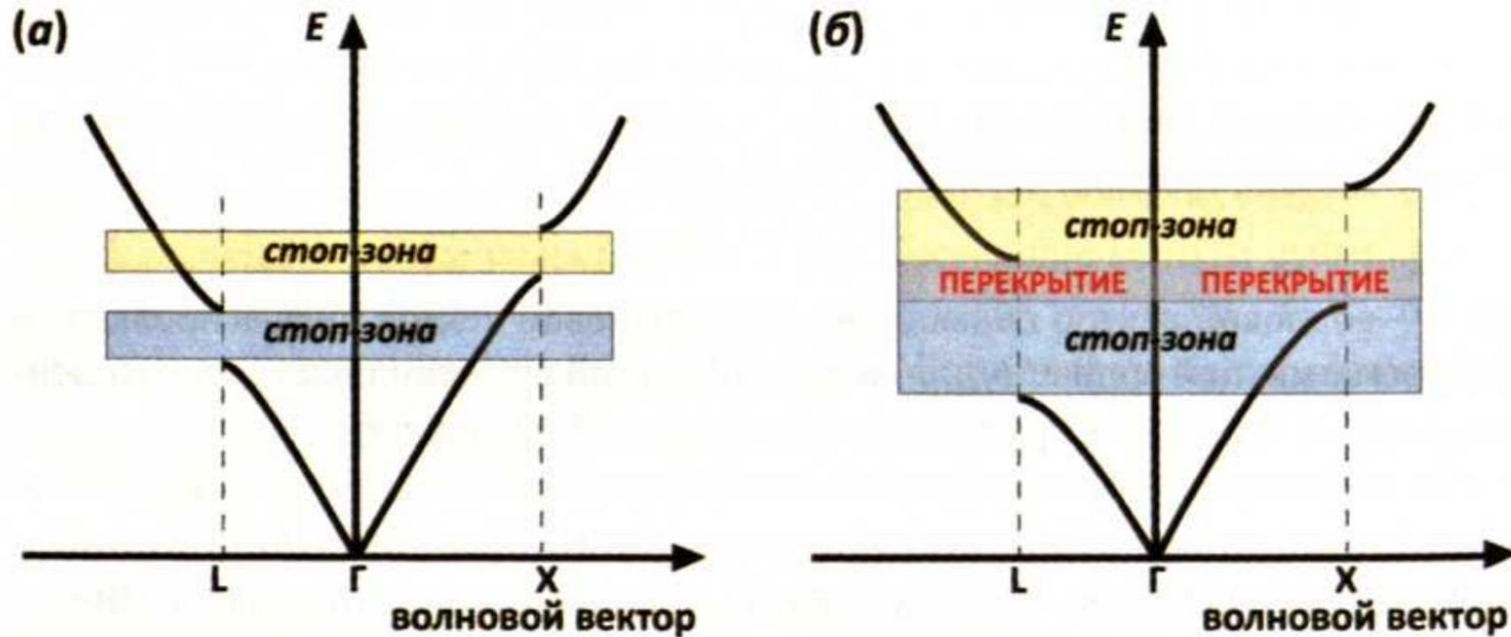


Для одномерного кристалла - нити, такие направления образуют конические поверхности, а в двумерном случае - совокупность отдельных, изолированных друг от друга лучей.

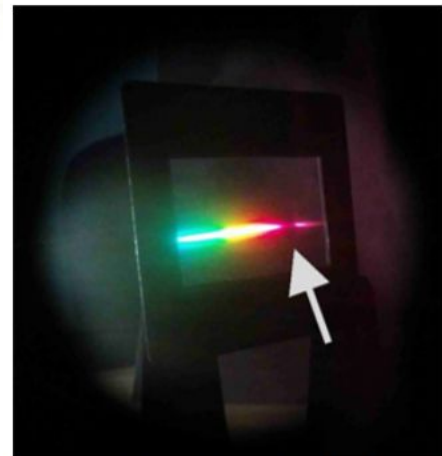
Трехмерный случай принципиально отличается от одномерного и двумерного тем, что условие максимума интерференции для данной длины волны света может оказаться невыполнимым ни для одного из направлений в пространстве. Распространение фотонов с такими длинами волн в трехмерном кристалле невозможно, а соответствующие им энергии образуют запрещенные фотонные зоны.



# Формирование стоп-зон в фотонных кристаллах



Положение стоп-зон для направлений  $\Gamma$ -L и  $\Gamma$ -X в ГЦК-решетке не перекрывается (а) при малом контрасте, перекрывается (б) при достаточном контрасте диэлектрической проницаемости (формирование полной запрещенной зоны)

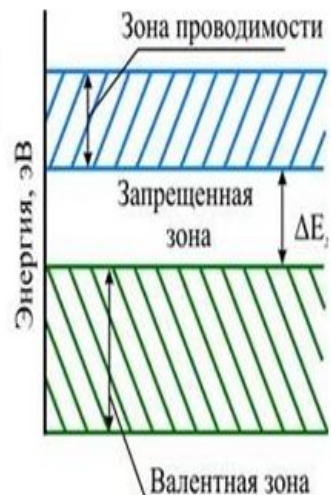
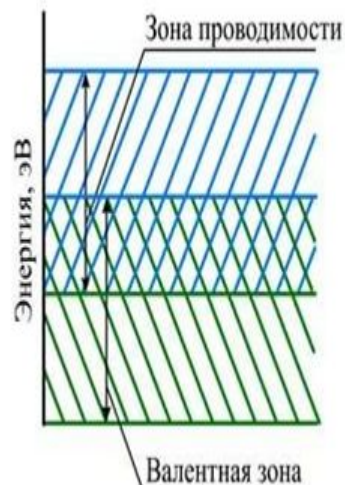


# Материалы

Проводники

Полупроводники

Диэлектрики



0,05-3  
эВ

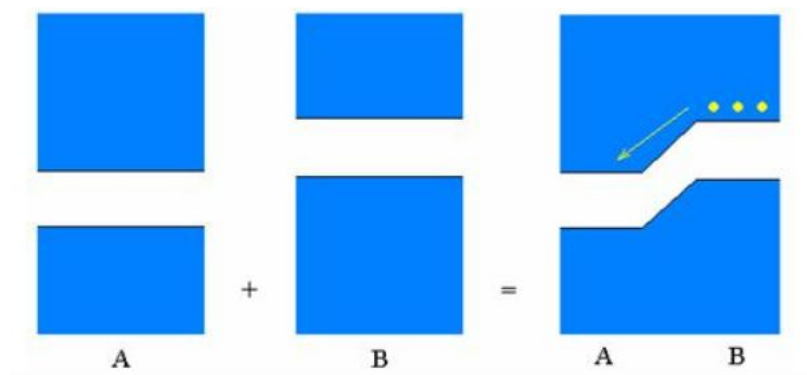


> 3  
эВ

Фотонные проводники, полупроводники,  
диэлектрики



# Компьютер на фотонных кристаллах



Фотонный p-n переход

## Преимущества:

- Скорость света в 1000-10000 раз больше скорости электронов
- Нет расходов на сопротивление
- Нет нагрева материала

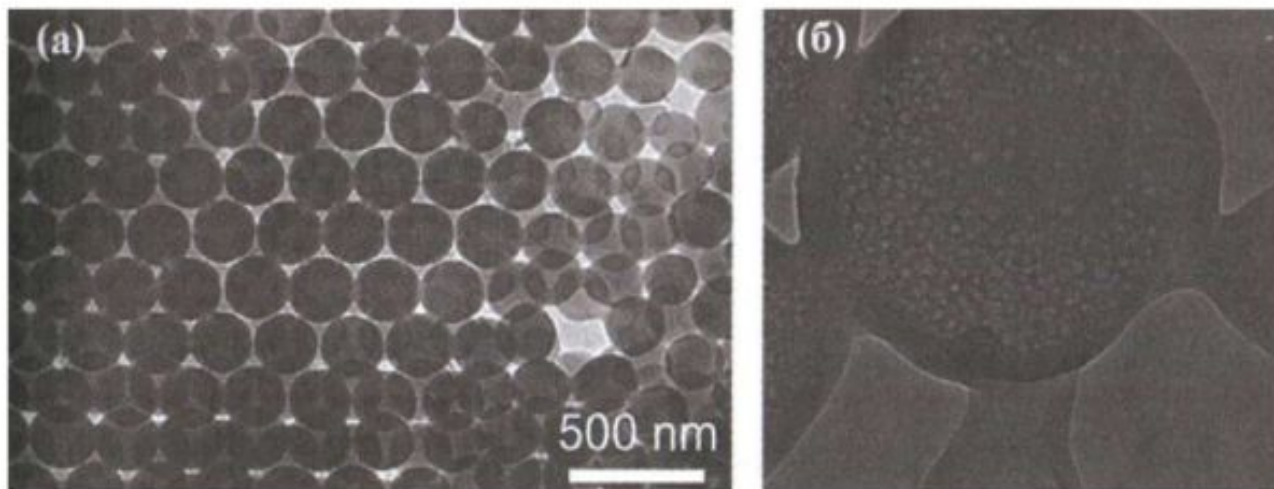
## Недостатки:

- Размер фотонов

# Природные опалы



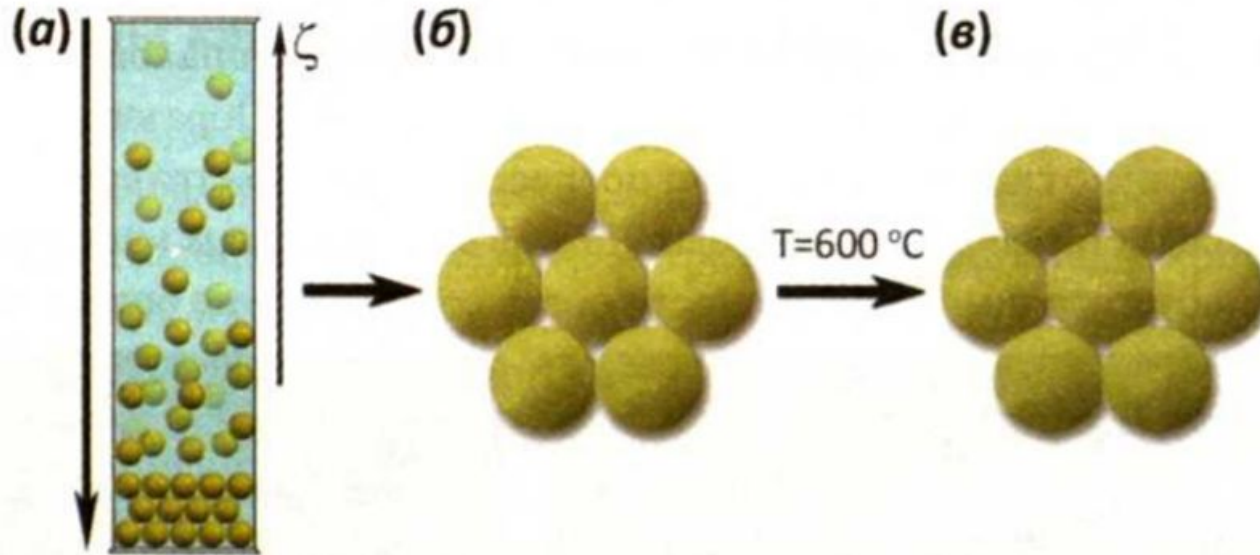
$\text{SiO}_2$  – 65-90%,  $\text{H}_2\text{O}$  4-20%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  до 9%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  до 3%,  $\text{TiO}_2$  до 5%  
Твердость 5,5-6 (Моос), показатель преломления 1,44-1,46



Микрофотографии природного опала: а) упаковка микросфер; б) внутренняя структура опаловых шаров



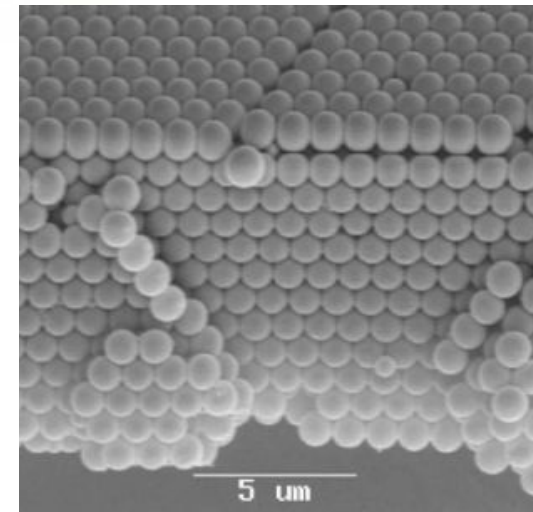
# Синтетические опалы



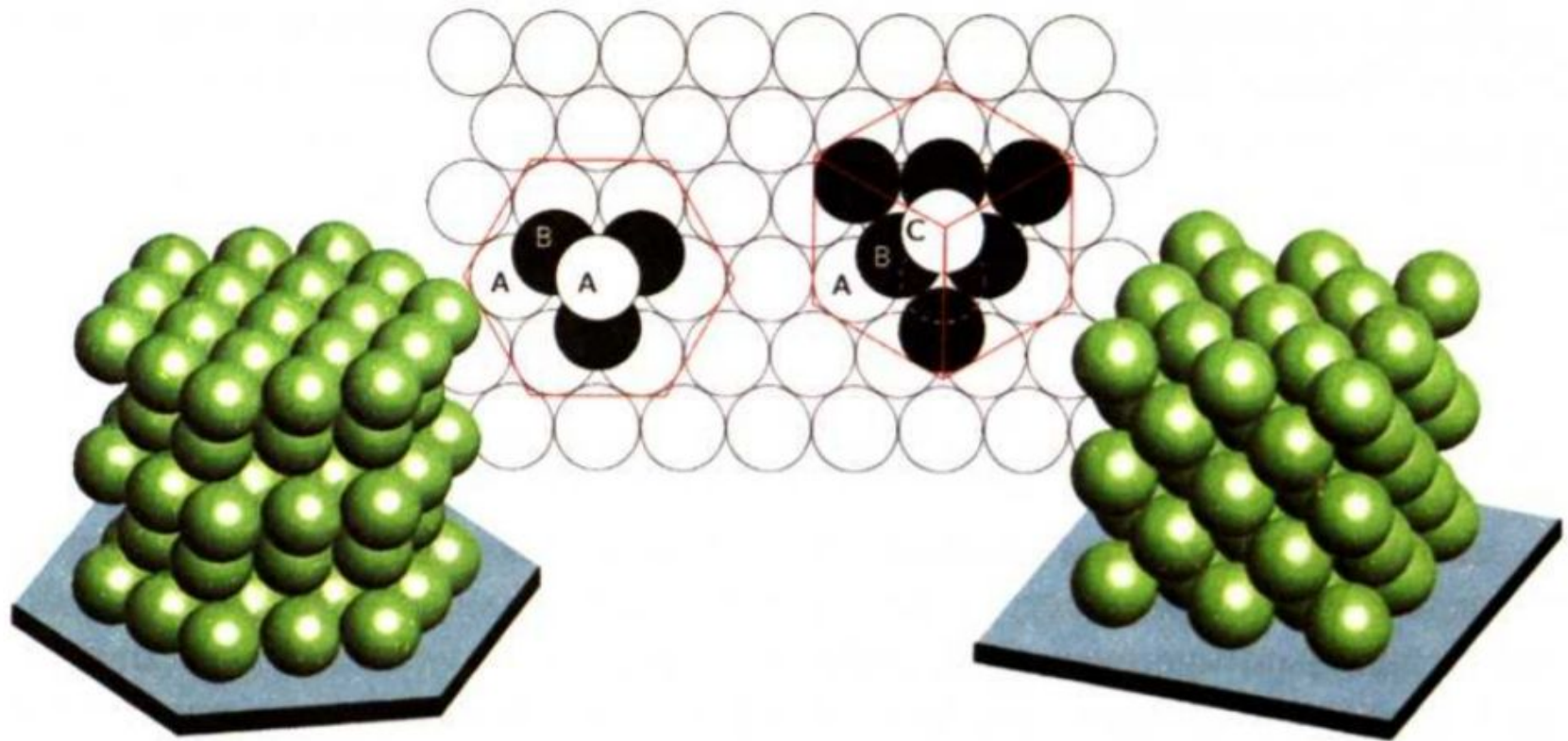
Стадии выращивания синтетических опалов: (а) – осаждение частиц из суспензии, (б) – высушивание, (в) – отжиг образца

Синтез сфер  $\text{SiO}_2$  диаметром 200-1000 нм  
Внутри сфера состоит из упакованных сфер диаметром 1-10 нм

Плотнейшая шаровая упаковка



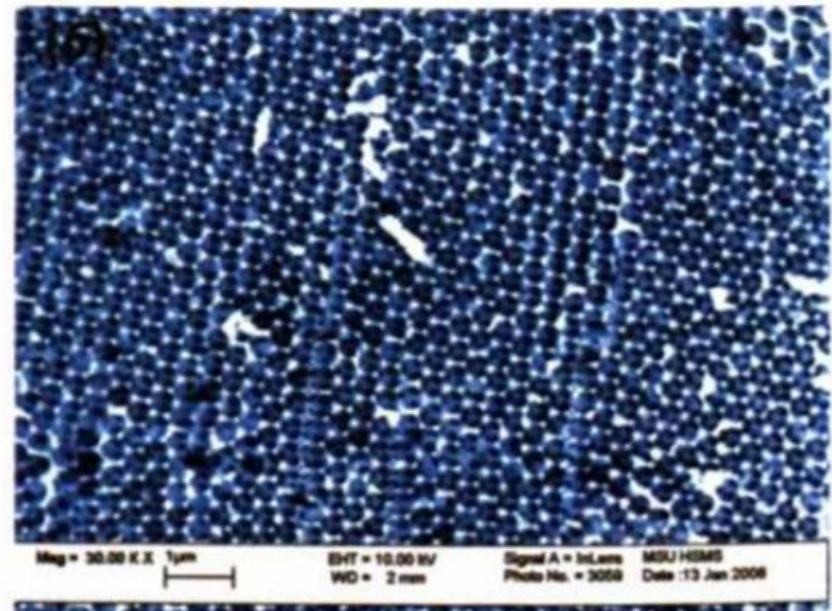
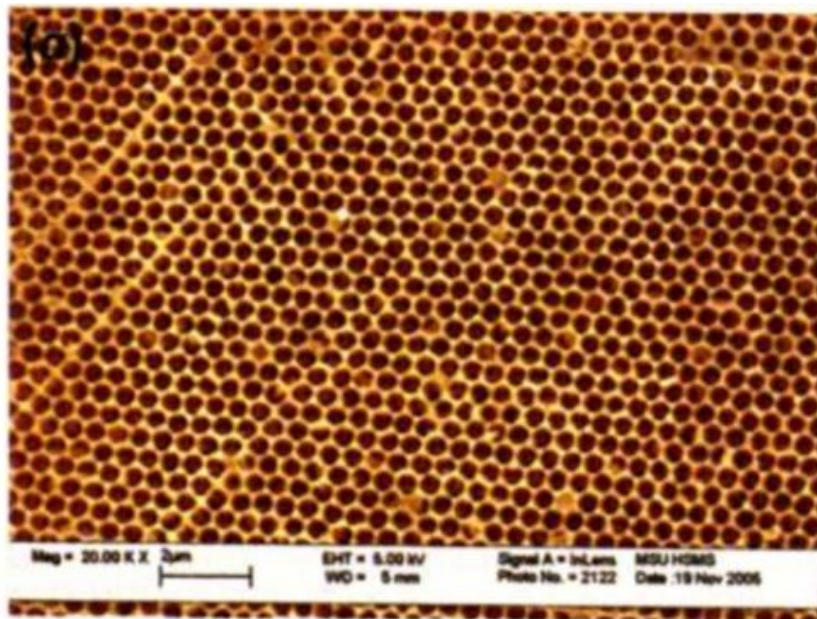
# Синтетические опалы



Формирование плотноупакованной структуры сферических частиц: периодичность плотноупакованных слоев в гексагональной и кубической структурах, а также результирующие ГПУ (АВАВ...) и ГЦК (АВСАВС...) упаковки

# Инвертированные опалы

Матрица  $\text{SiO}_2$  + вещества с высоким показателем преломления ( $\text{Si}$ ,  $\text{Ge}$ ,  $\text{GaP}$ ,  $\text{GaN}$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{WO}_3$ ),  
заполняющие пустоты

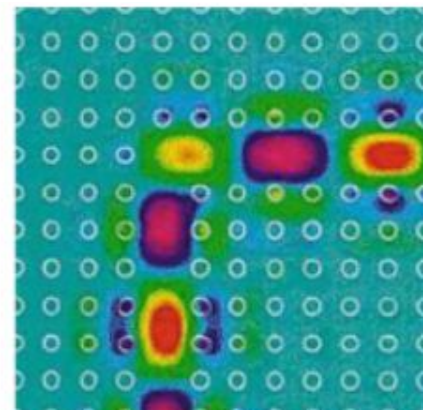
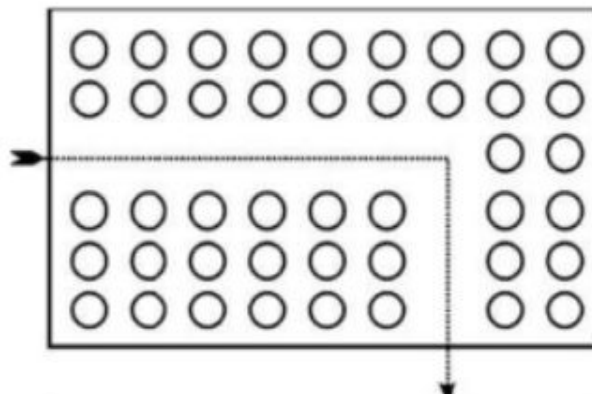
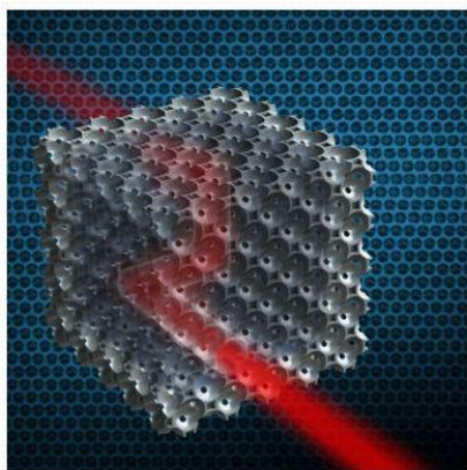
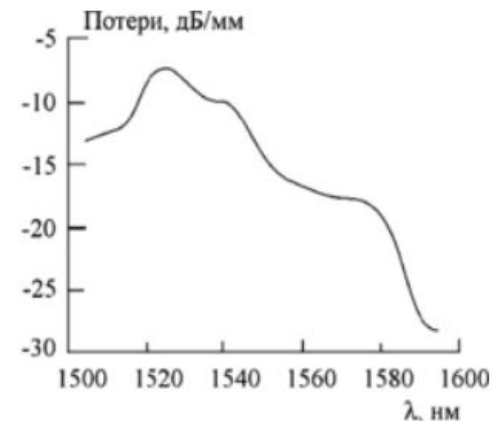
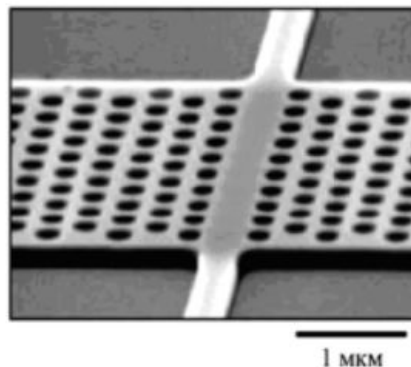
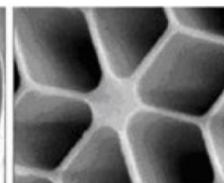
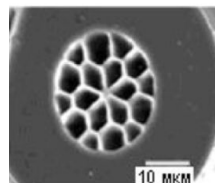


Микрофотографии инвертированных опалов  $\text{SiO}_2$  и  $\text{WO}_3$

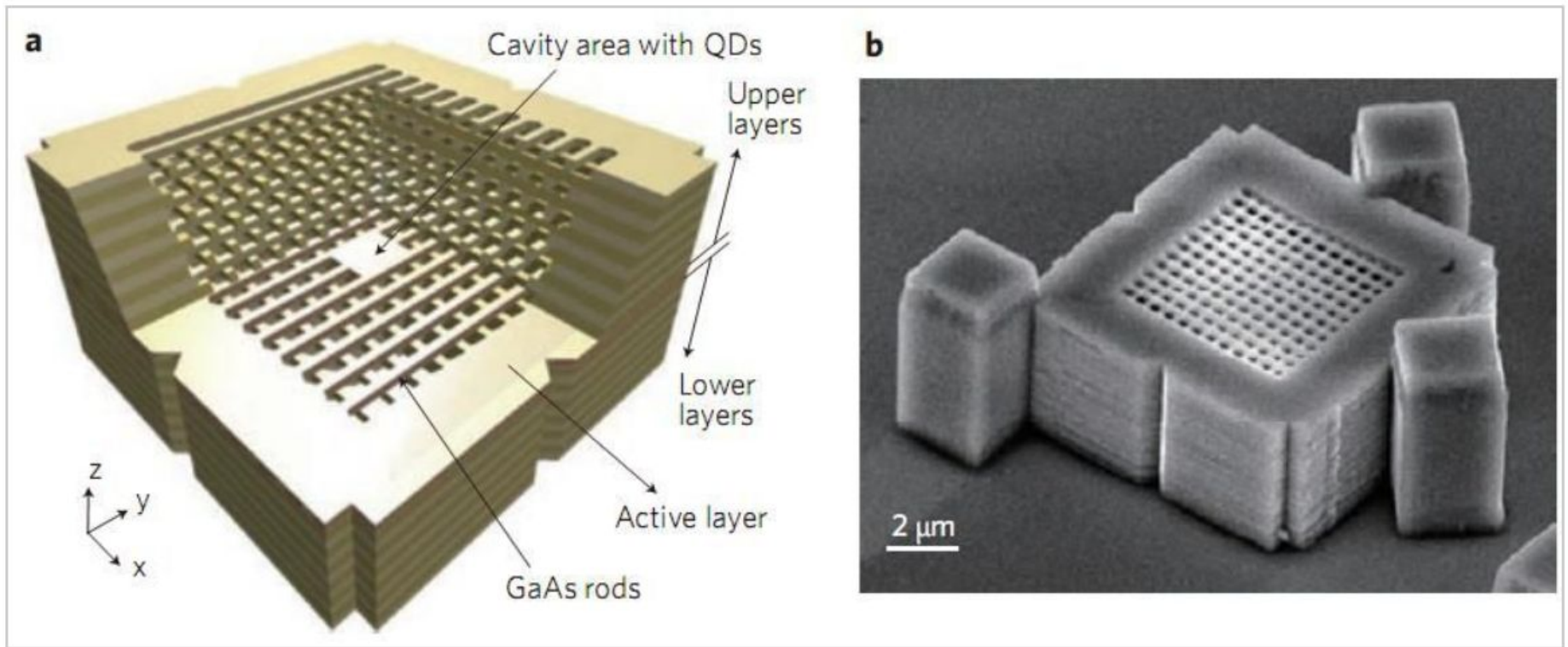
# ФОТОННЫЕ ВОЛНОВОДЫ

## Преимущества:

- Уменьшение габаритов
- Возможность менять спектральную характеристику
- Способность передавать большую оптическую мощность
- Возможность поворачивать световой поток



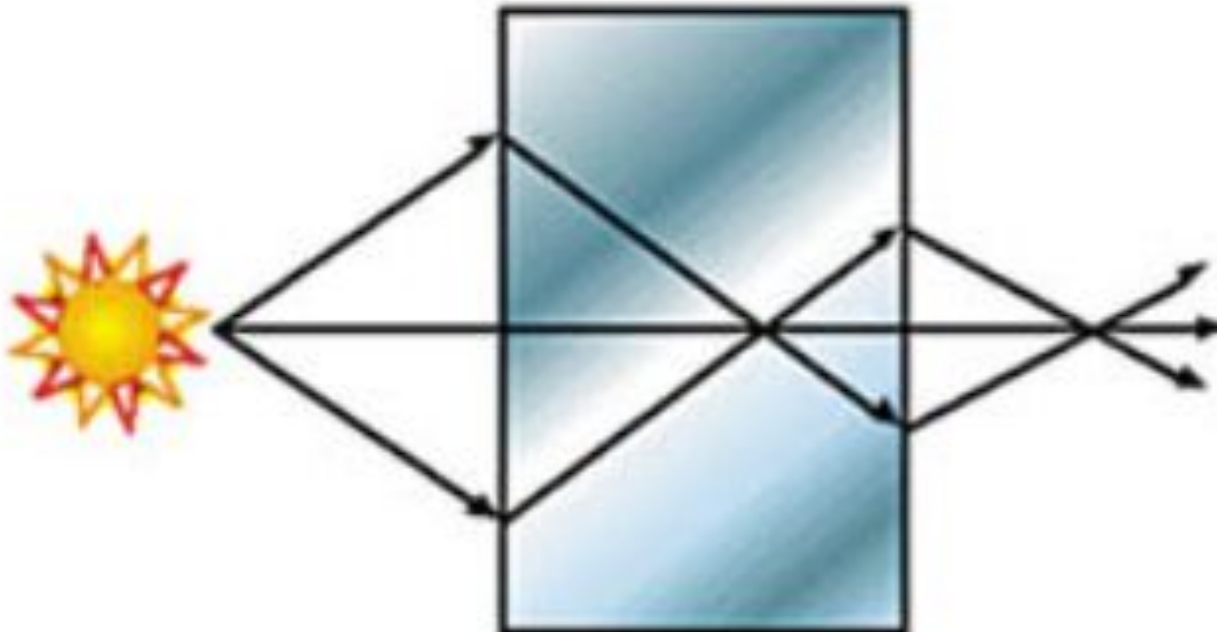
# Лазеры с фотонными кристаллами



Излучатель - квантовая точка, матрица - фотонный кристалл

- Излучение мощнее в 1000 раз
- Лучшее качество луча

# Суперлинзы



Свет концентрируется в точку размером меньше длины волны



# Применение фотонных кристаллов

Краска

Волноводы

Суперлинзы

Лазеры

Фотонные  
кристаллы

Суперпризмы

Дисплеи

Суперпро-  
водники

Компьютеры