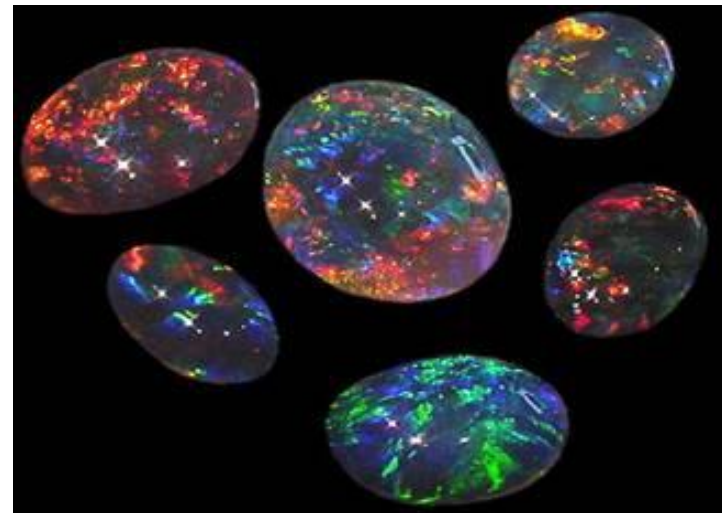




- **Понятия «фотоника» и «фотонный кристалл»; этапы и цели развития фотоники**
- **Примеры практических применений**
- **Работы по фотонным кристаллам на ФНМ МГУ**



Фотоника и фотонные кристаллы



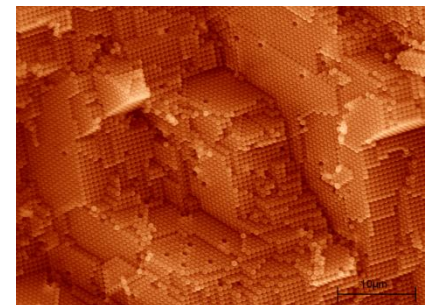
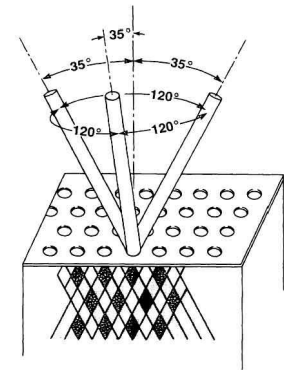
Этапы развития фотоники:

1. Открытие лазеров (Т. Мейман, 1960)
2. Создание оптоволоконной техники (80-90-е гг.)
3. Появление концепции фотонных кристаллов
(*E. Yablonovitch – 1987; S. John – 1987*)

- открытие и изучение реальных фотоннокристаллических структур
(*Astratov V.N. et al., 1995* - опалы);

- компьютерное моделирование структур;

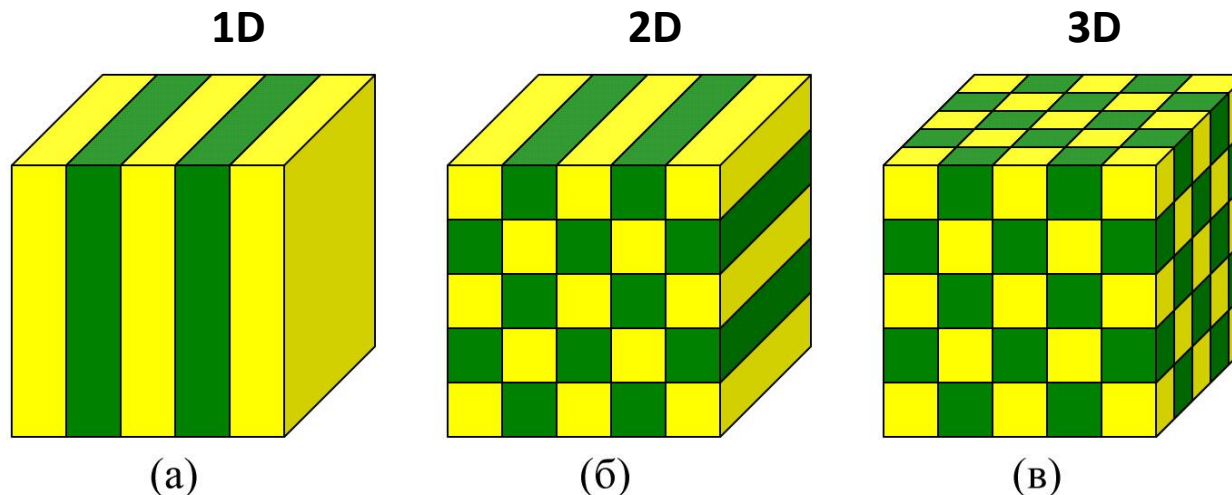
- развитие практических технологий.



Понятие фотонного кристалла



Фотонные кристаллы (ФК) – это композиционные материалы с пространственно-периодическим изменением коэффициента преломления в масштабах длины волны света, имеющие фотонные запрещенные зоны в спектре оптических состояний.

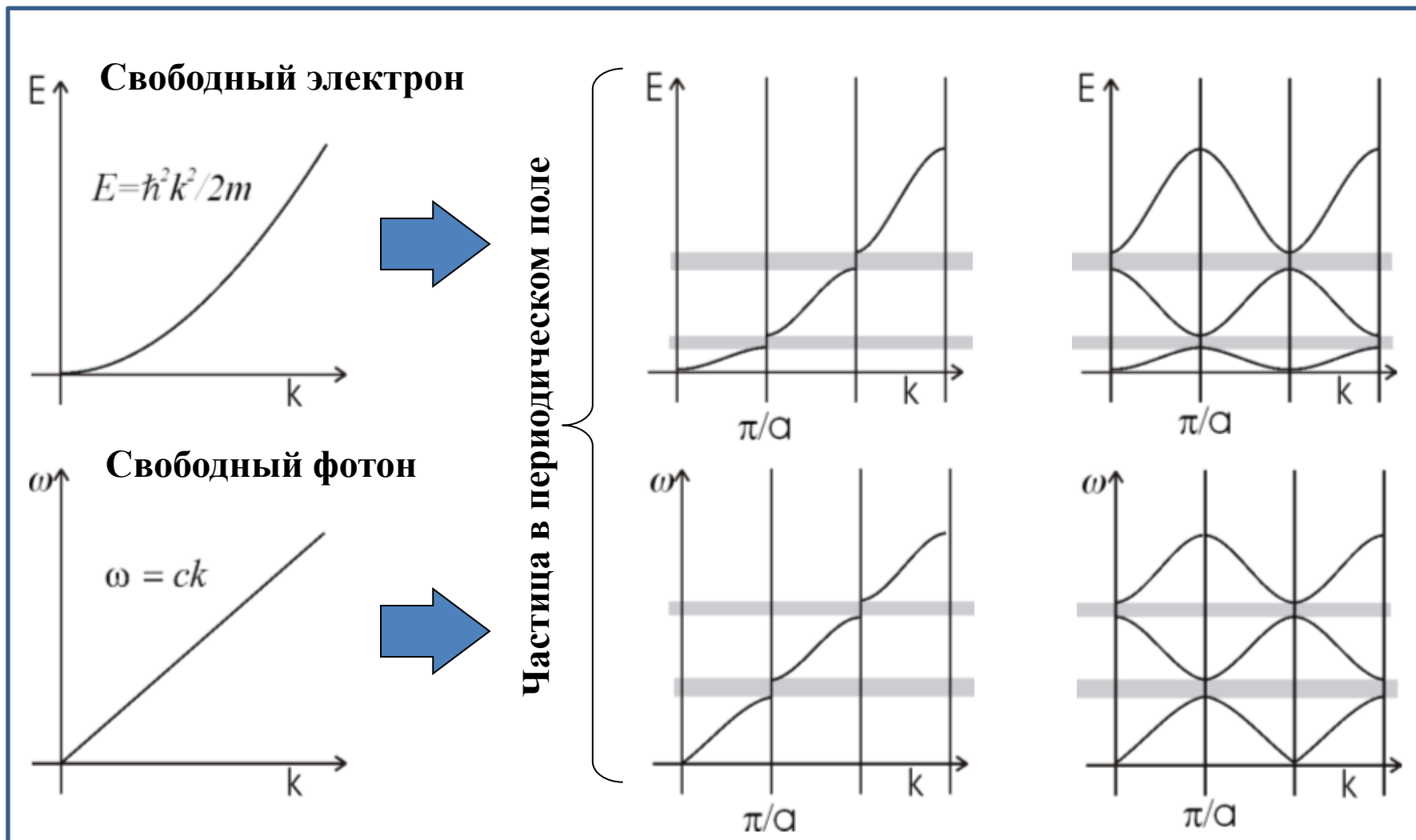


Схематическое представление одномерного (а), двухмерного (б) и трехмерного (в) ФК, образованного двумя разными материалами.

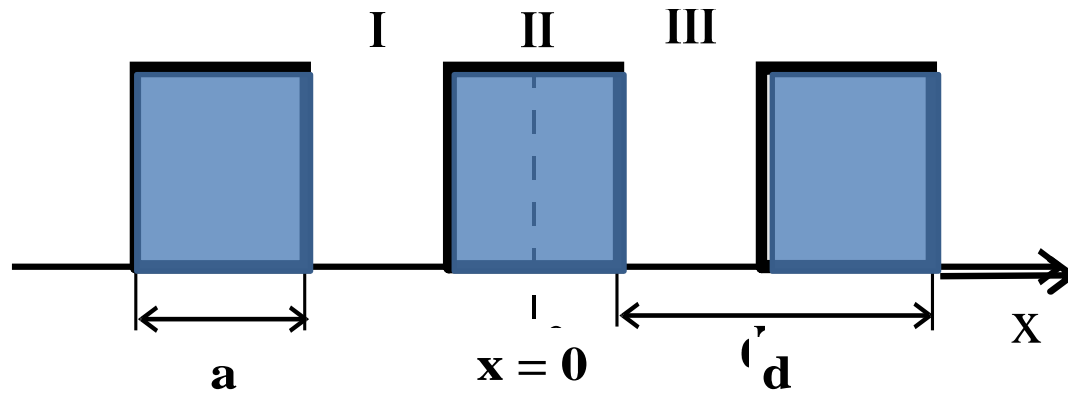
Понятие фотонного кристалла



Фотонные кристаллы – «полупроводники для света».



Основы теории фотонных кристаллов: одномерный случай



Периодическая многослойная структура с периодом d :
белые области – вакуум, синие – диэлектрическая среда.

Основы теории фотонных кристаллов: одномерный случай



$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 E(x)}{\partial x^2} + \frac{\varepsilon(x)\omega^2}{c^2} E(x) = 0 \\ E(x+d) = \exp(ikd)E(x) \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{- из уравнений Максвелла;} \\ \text{- из условия периодичности ФК.} \end{array}$$



Решения для областей I – III:

$$E_I(x) = A \exp(igx) + B \exp(-igx)$$

$$E_{II}(x) = C \exp(iqx) + D \exp(-iqx)$$

$$E_{III}(x) = A \exp(igx) + B \exp(-igx), \text{ где } g = \omega/c, \quad q = \sqrt{\varepsilon}\omega/c.$$

Граничные условия:

$$E_I(x) = E_{II}(x)|_{x=-a/2} \quad E'_I(x) = E'_{II}(x)|_{x=-a/2} \quad E_{II}(x) = E_{III}(x)|_{x=+a/2} \quad E'_{II}(x) = E'_{III}(x)|_{x=+a/2}$$



Результат:

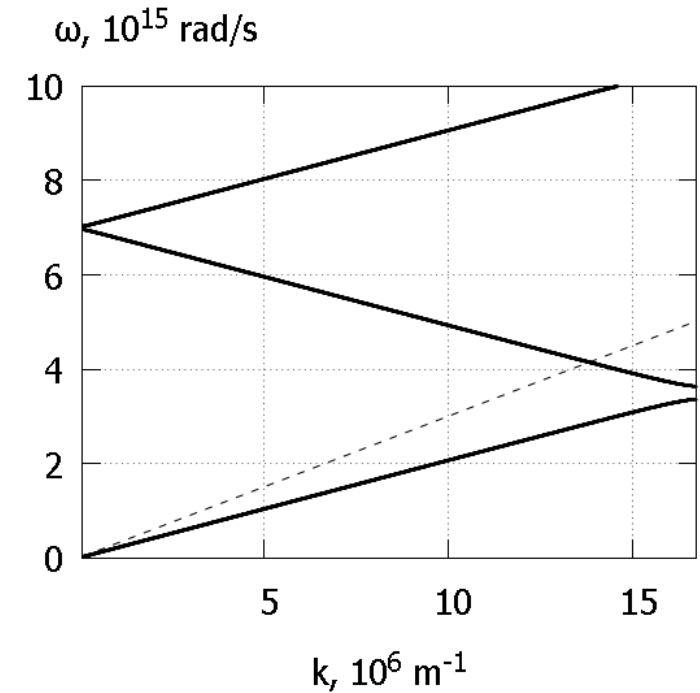
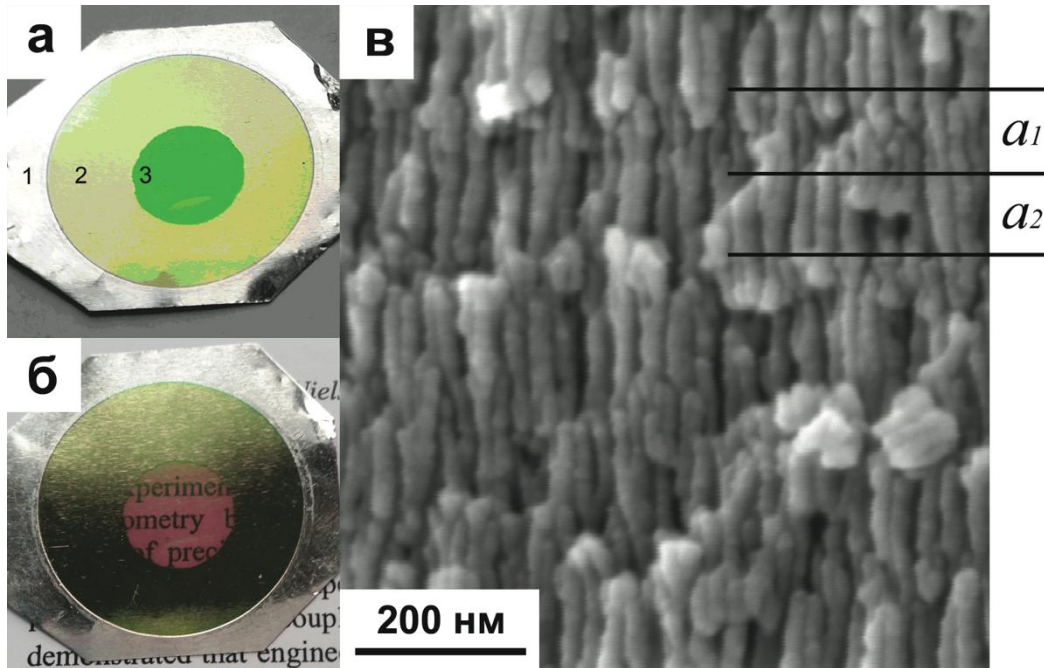
$$\cos(kd) = \cos[g(d-a)]\cos(qa) - \frac{1}{2} \left(\frac{g}{q} + \frac{q}{g} \right) \sin[g(d-a)]\sin(qa)$$

В области частот, в которой правая часть выражения по модулю больше единицы, возникает **фотонная запрещенная зона!**

Основы теории фотонных кристаллов: одномерный случай



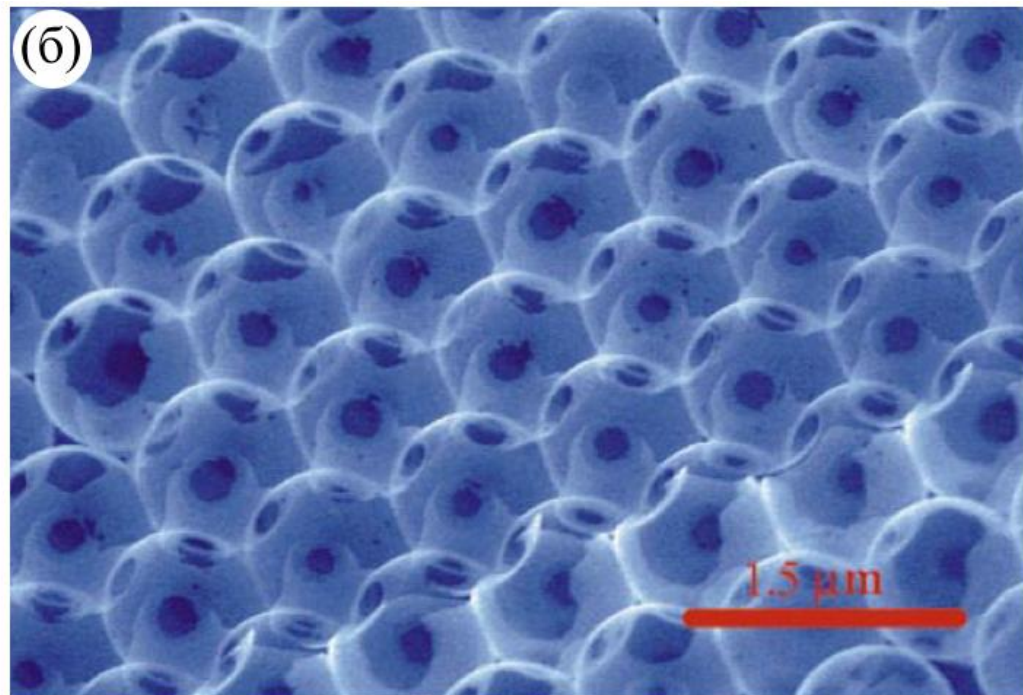
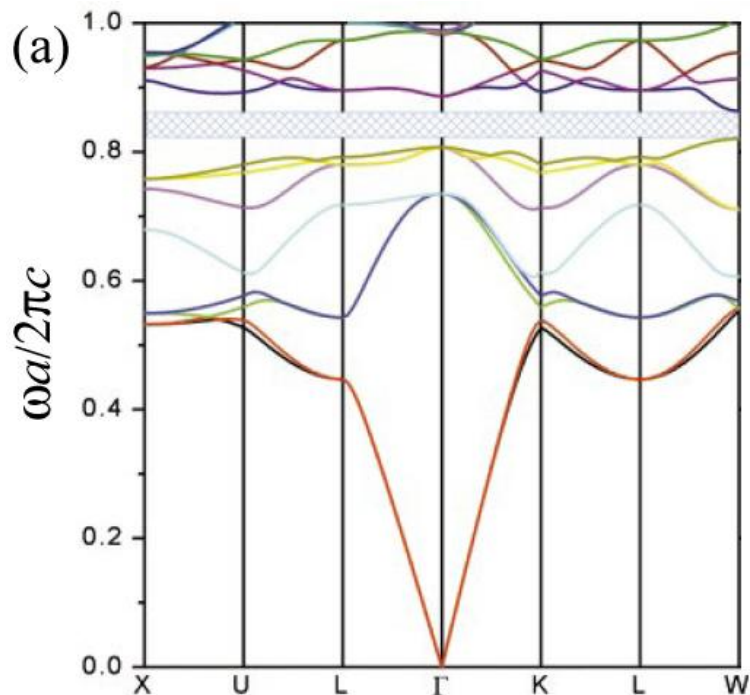
Периодическая структура из пористого Al_2O_3



$$d = 165 \text{ нм}, a = d/2, n_1 = 1.54, n_2 = 1.36.$$

В. С. Горелик, С. О. Климонский, В. В. Филатов, К. С. Напольский.
Оптика и спектроскопия **120** (2016) 562.

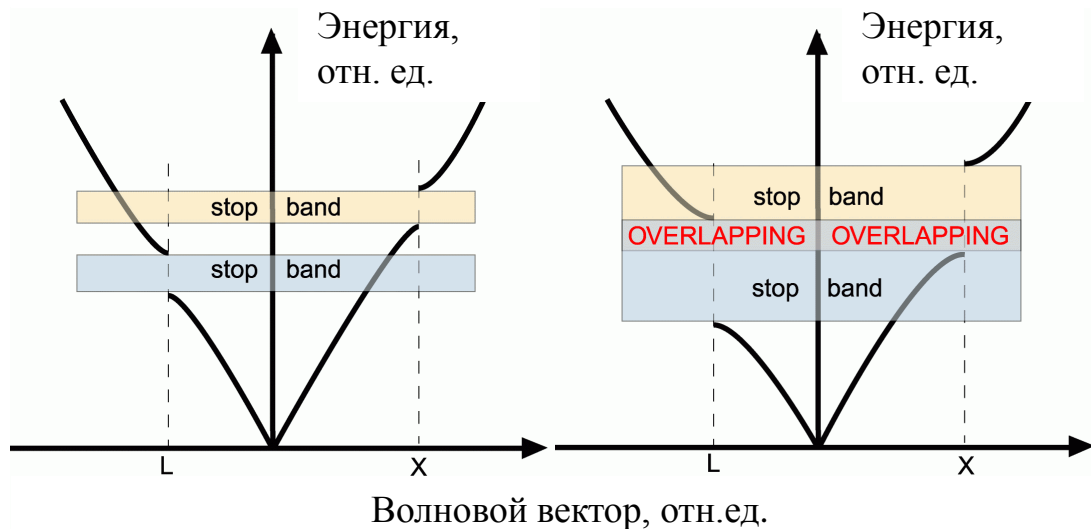
Специфика трехмерных фотонных кристаллов



(а) Зонная структура для ФК, образованного полыми кремниевыми микросферами, упакованными в ГЦК решетку.

(б) Электронно-микроскопическое изображение соответствующего ФК (A. Blanco et al., *Nature*, 405 (2000) 437).

Трехмерные кристаллы: запрещенные зоны и стоп-зоны

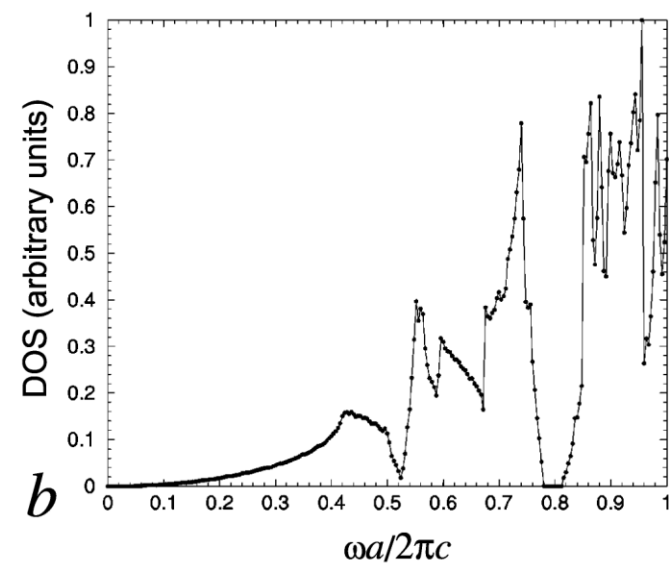
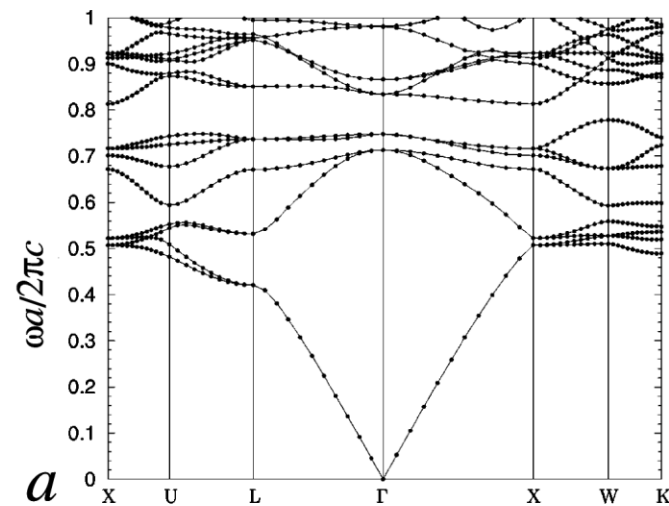


Нет полной
запрещенной зоны

Есть полная
запрещенная зона

Зонная структура (a) и плотность оптических состояний DOS (b) для инвертированного опала из кремния

(Bush K. and John S., *Phys. Rev. E*, 1998, v.58, p.3896).



Специфика трехмерных фотонных кристаллов

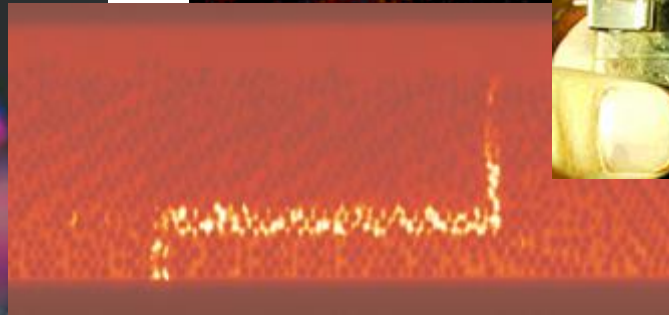
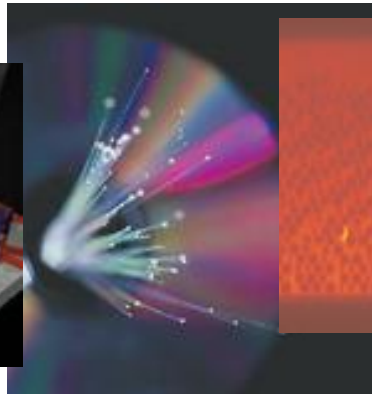
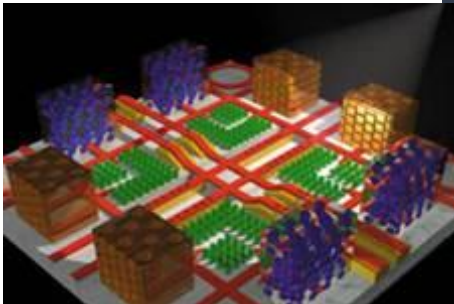
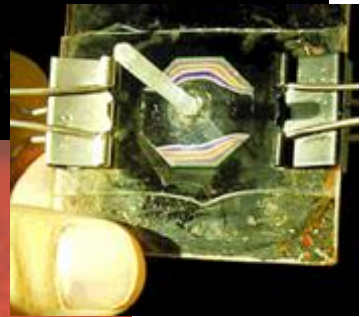
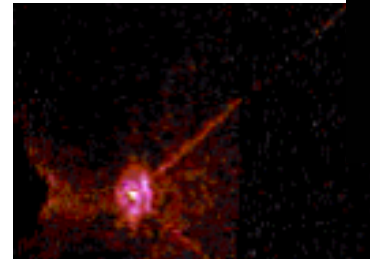
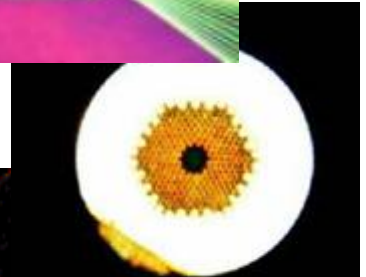


Дифракция света в трехмерных ФК приводит к тому, что он перераспределяется по разным разрешенным направлениям, но при этом не распространяется в направлениях стоп-зон. В результате **ФК можно рассматривать как среду, управляющую направлениями световых потоков.** Для работы в видимом диапазоне спектра такая среда должна иметь **субмикронную периодичность.**

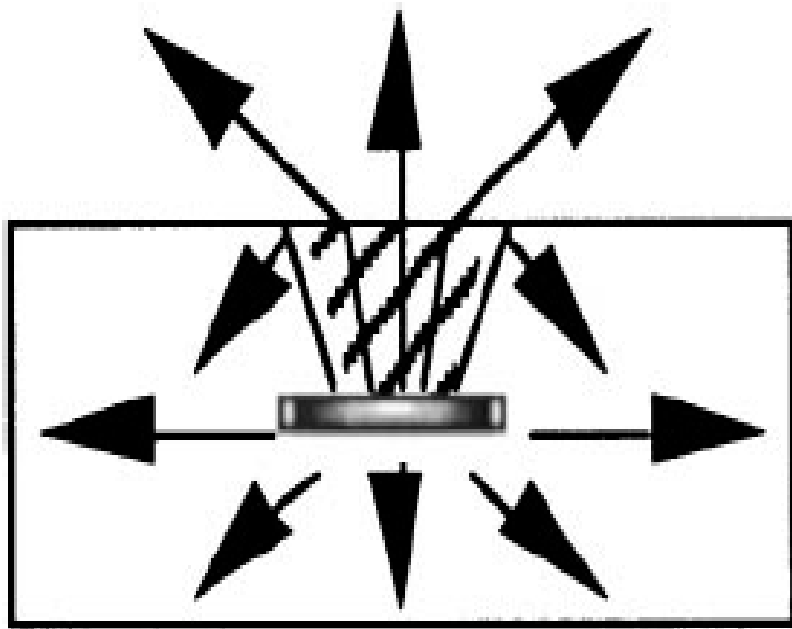
Возможные применения



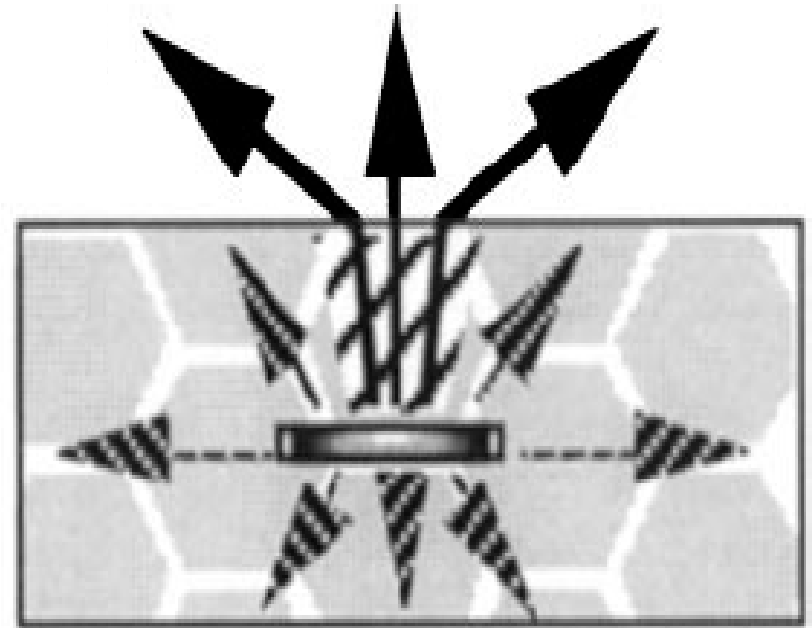
- Эффективные светоизлучающие устройства (к.п.д. ~ 50%)
- Низкопороговые лазеры
- Новые типы световых волокон
- Высокоскоростные оптические переключатели
- Оптические фильтры
- Устройства управления световыми потоками
- Суперпризмы
- Оптические ячейки памяти
- Фотонные компьютеры



Светодиоды на основе фотонных кристаллов



Обычный
светодиод



Светодиод на основе
фотонного кристалла

Методы синтеза ФК

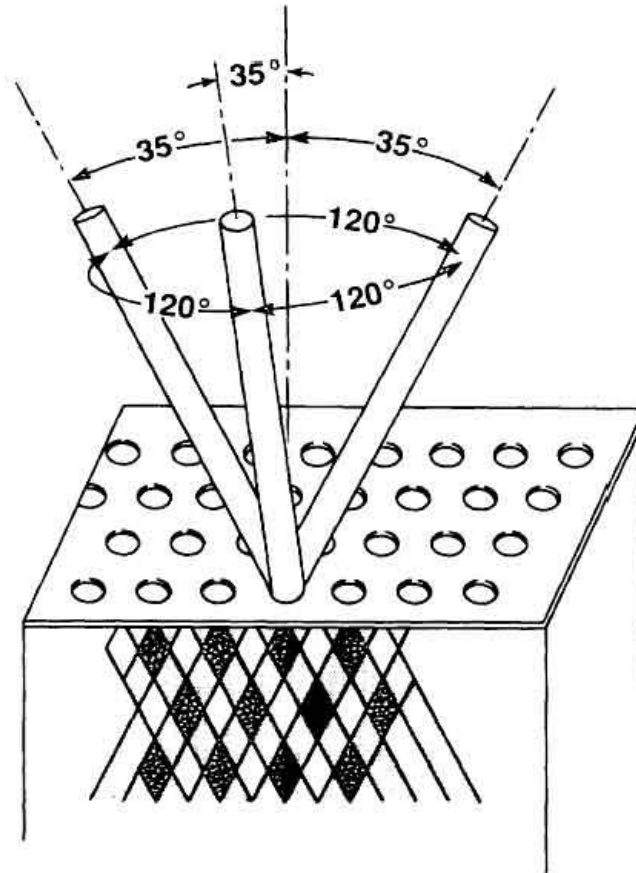
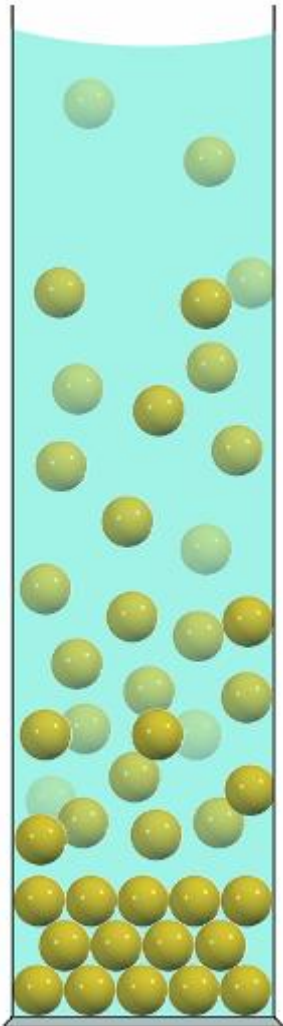


Схема получения ФК Яблоновича путем высверливания упорядоченных отверстий в диэлектрическом материале (E. Yablonovitch et al., *Phys. Rev. Lett.*, **67 (1991) 2295).**

Синтез коллоидных кристаллов



Естественная седиментация

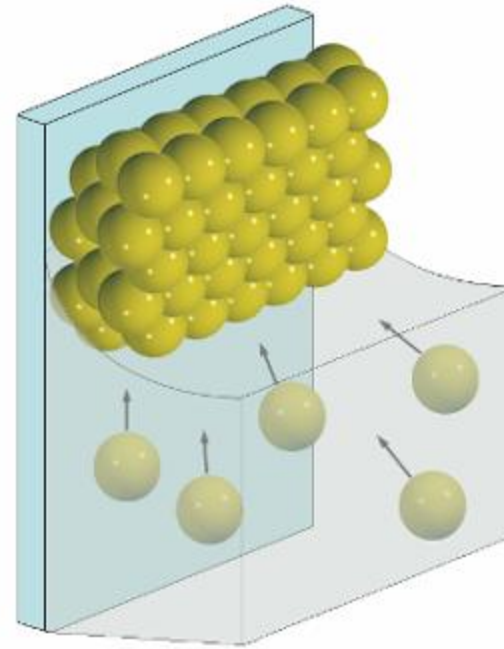


(«объемные образцы»)

Температура:
комнатная

Продолжительность:
1-9 месяцев

Вертикальное осаждение



(«пленочные образцы»)

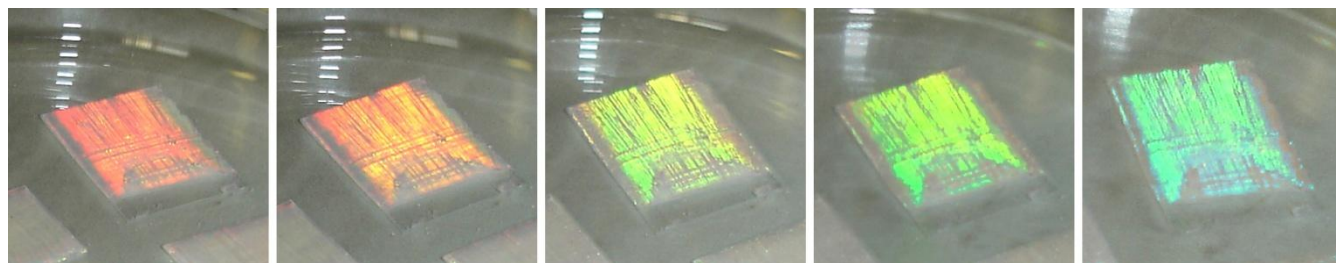
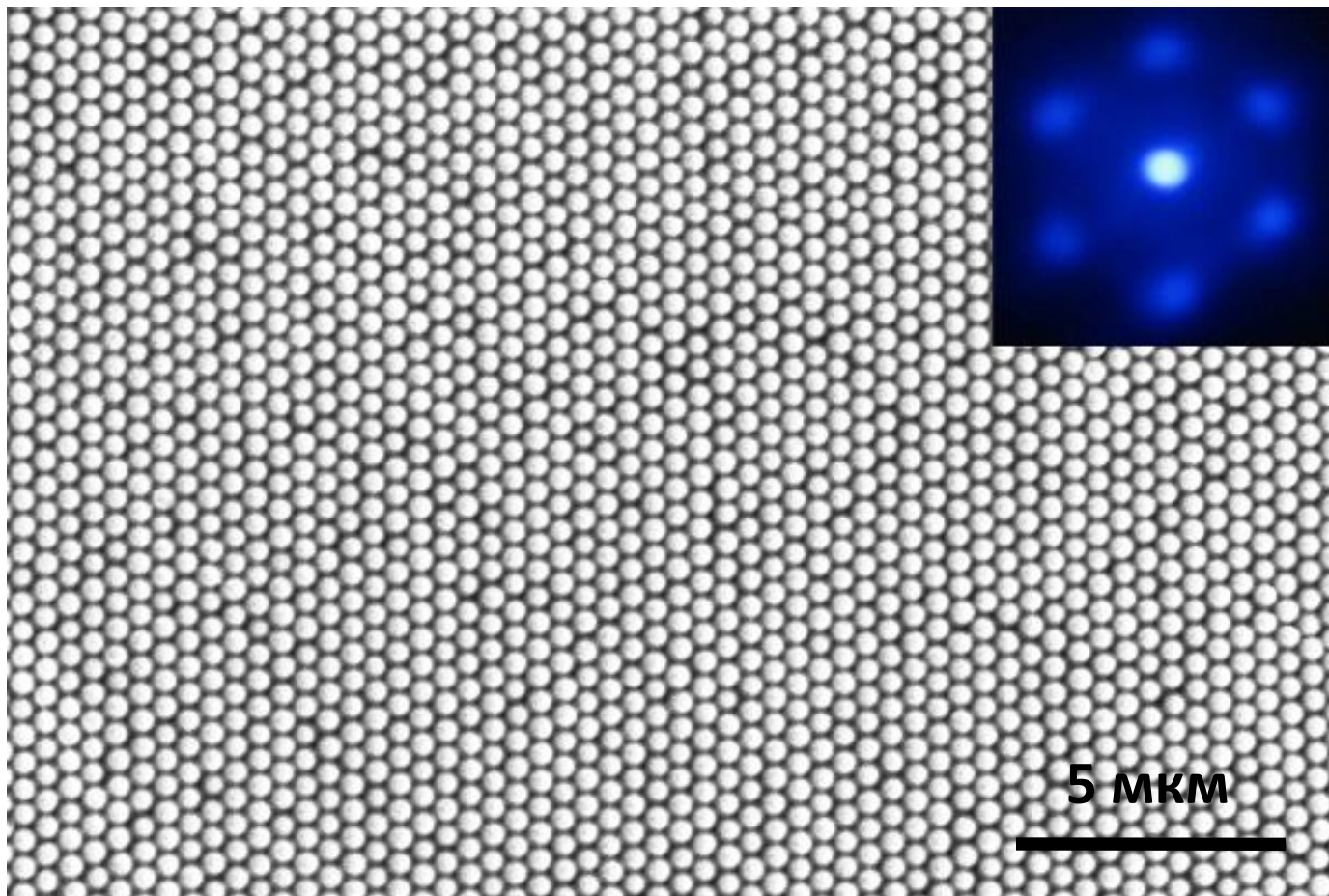
Температура:
45-50 °C

Продолжительность:
несколько дней

Синтез коллоидных кристаллов



Вертикальное
осаждение:
(Синицкий А.С.)



Темплатные методы синтеза инвертированных опалов

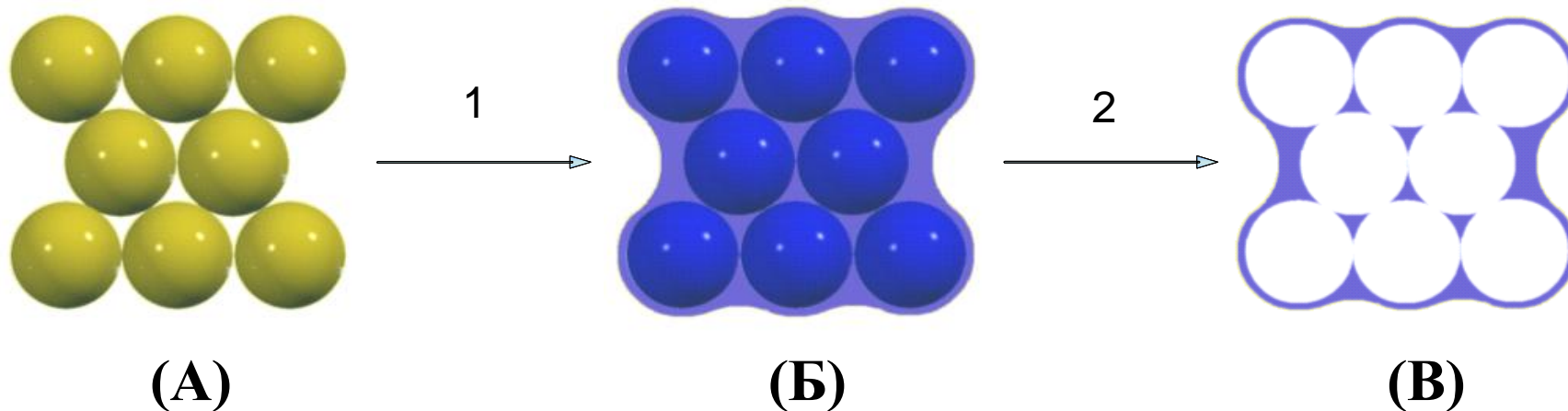
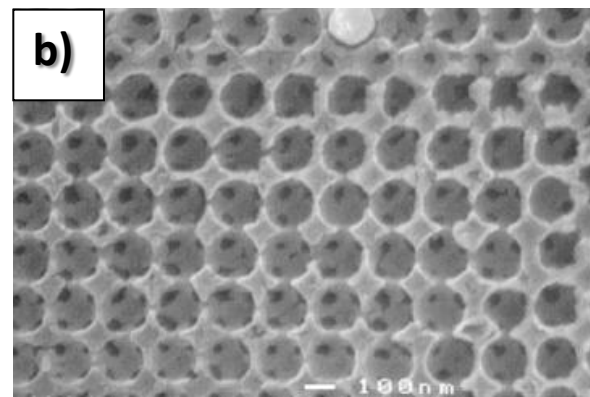
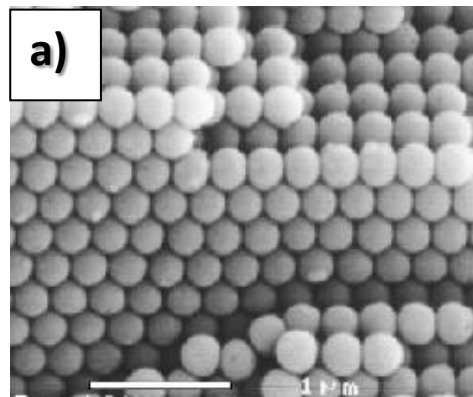


Схема темплатного синтеза инвертированных опалов.

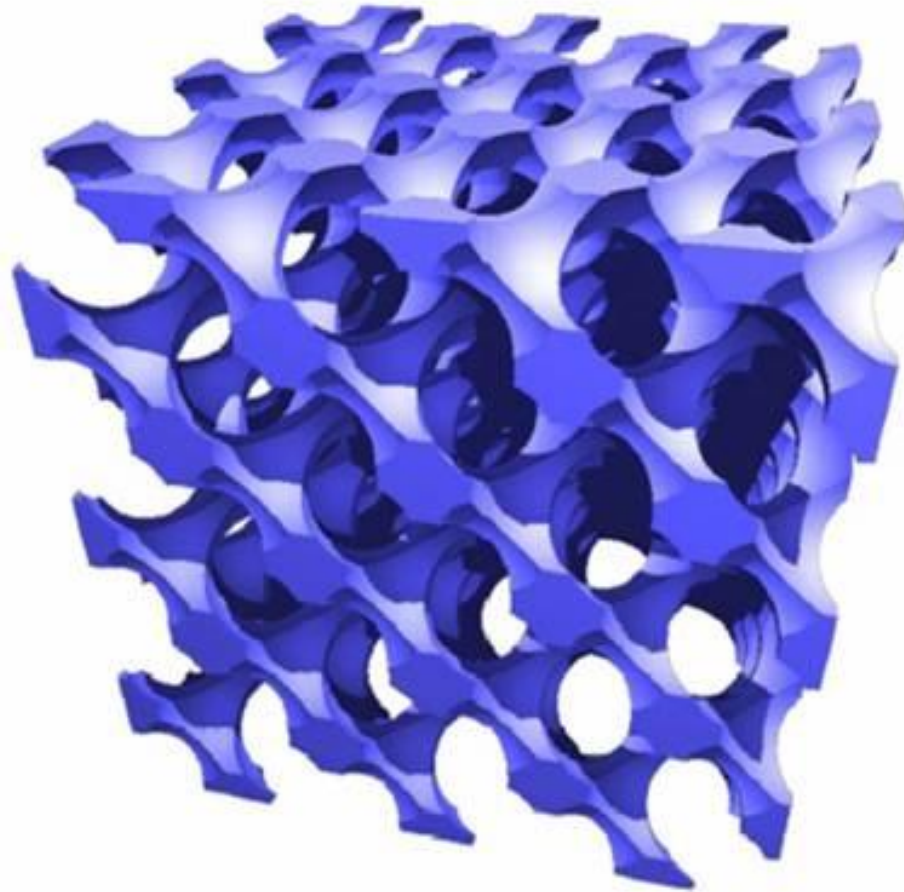
(A) – синтез темплата, (Б) – заполнение пустот прекурсором,

(B) – удаление темплата.

*Электронные снимки
прямого (a) и
инвертированного (b)
фотонного кристалла*



Темплатные методы синтеза инвертированных опалов



Структура инвертированного опала (компьютерное моделирование).

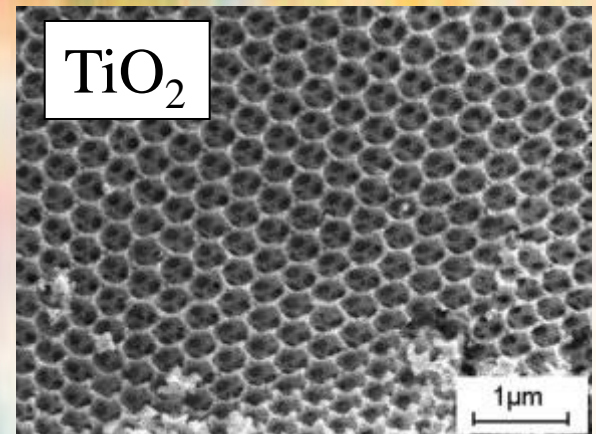
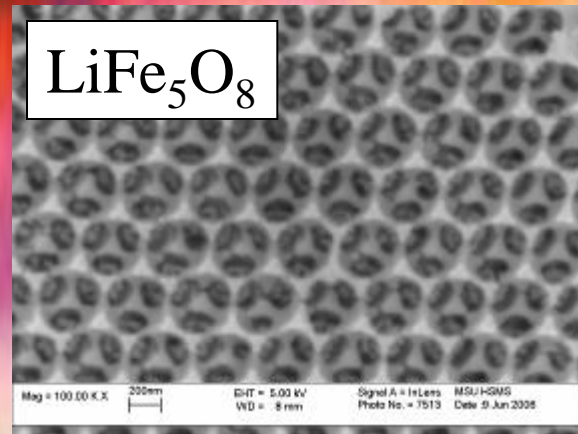
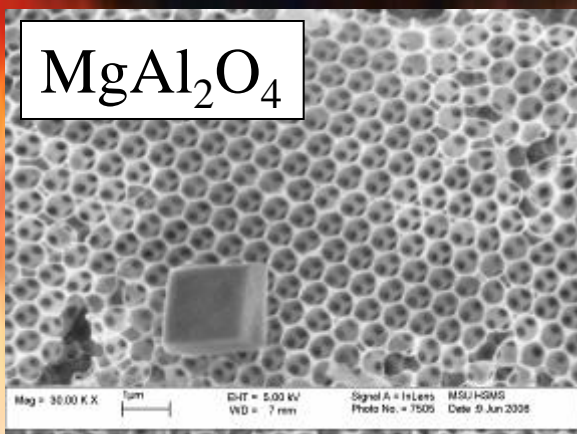
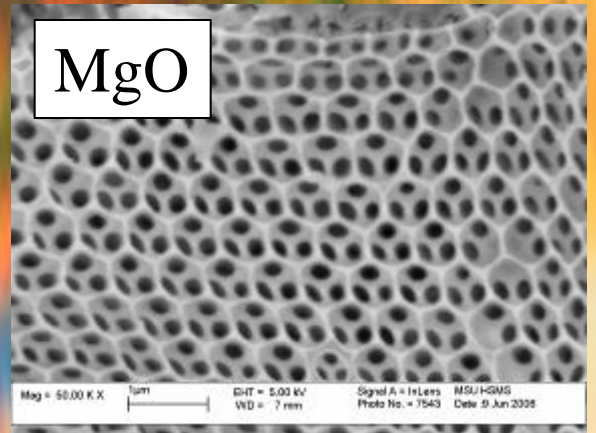
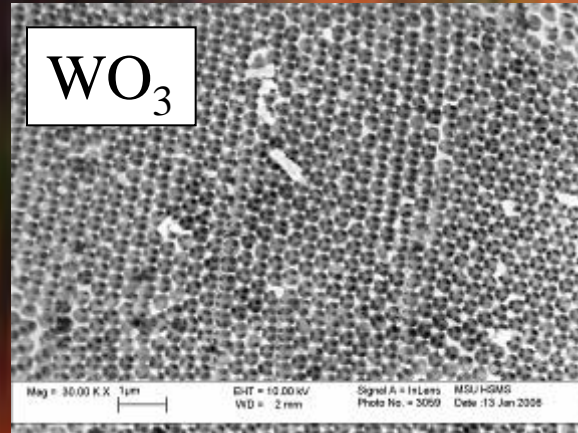
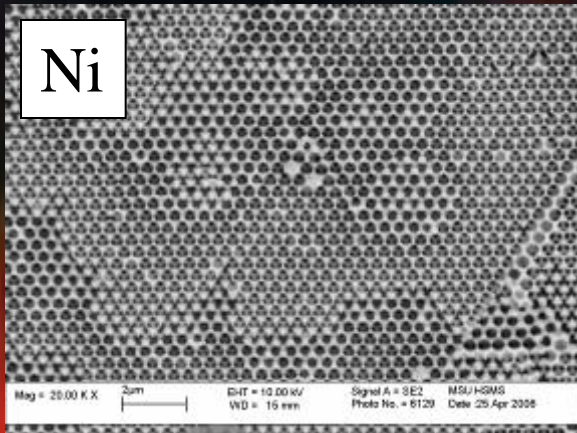
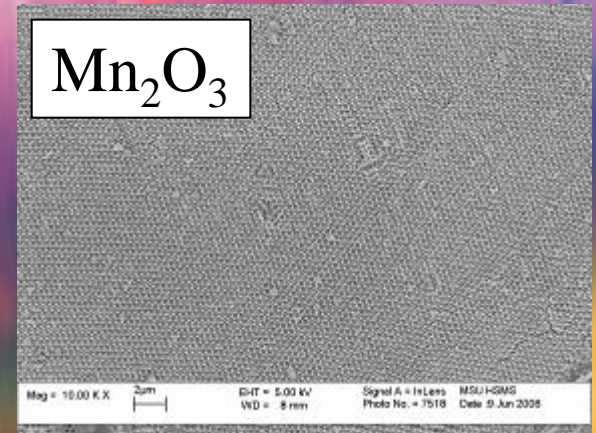
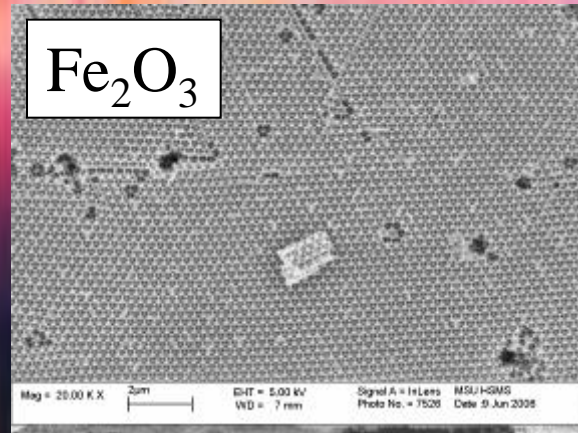
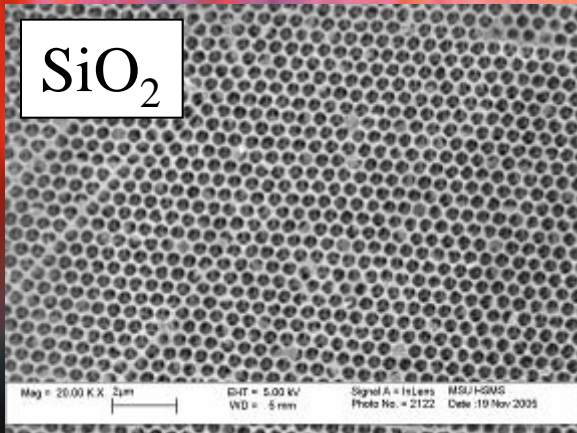
Темплатные методы синтеза инвертированных опалов



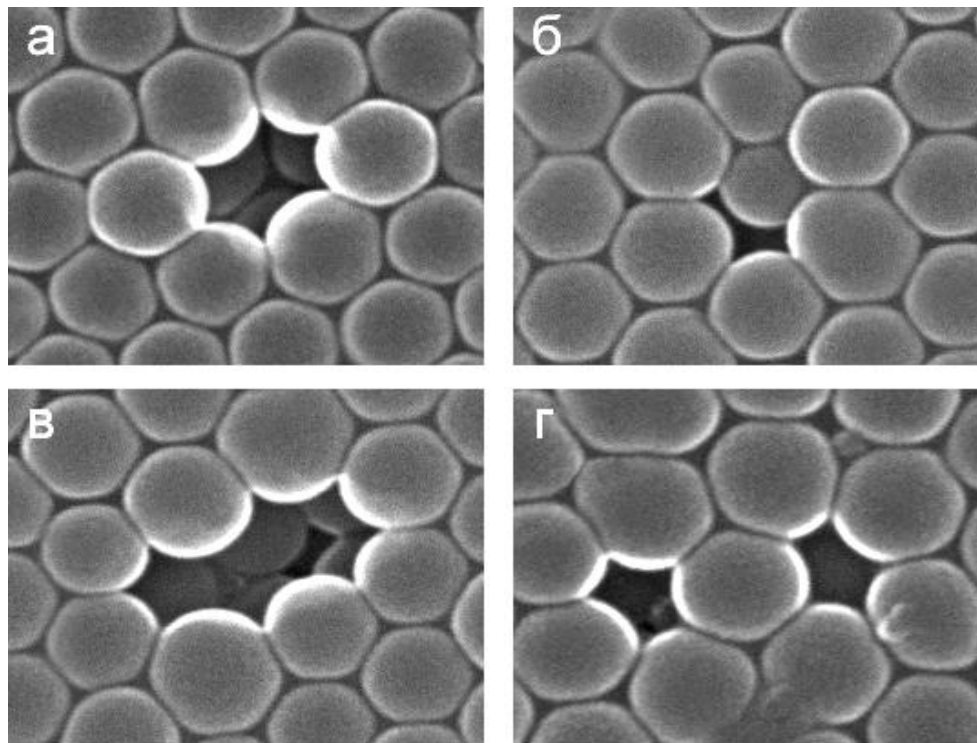
Условия синтеза оксидных инвертированных опалов

(Синицкий А.С.)

Состав инвертированного опала	Состав раствора прекурсора	Температура и продолжительность отжига
SiO ₂	6 мл Si(OC ₂ H ₅) ₄ , 4 мл EtOH, 3 мл H ₂ O, 1 мл HCl	550 °С, 10 ч
TiO ₂	Ti(OC ₄ H ₉) ₄ – гептан (1:1)	400-600 °С, 10 ч
Al ₂ O ₃	Насыщенный водно-спиртовой (1:1) Al(NO ₃) ₃	300-600 °С, 10 ч
ZnO	Насыщенный водно-спиртовой (1:1) Zn(NO ₃) ₂	300-600 °С, 10 ч
WO ₃	Золь WO ₃ в этиловом спирте, синтез	400-600 °С, 10 ч
Mn ₃ O ₄	Насыщенный водно-спиртовой (1:1) (CH ₃ COO) ₂ Mn	300-600 °С, 10 ч
Fe ₂ O ₃	Насыщенный водно-спиртовой (1:1) Fe(NO ₃) ₃	300-600 °С, 10 ч
MgO	Насыщенный водно-спиртовой (1:1) Mg(NO ₃) ₂	300-600 °С, 10 ч

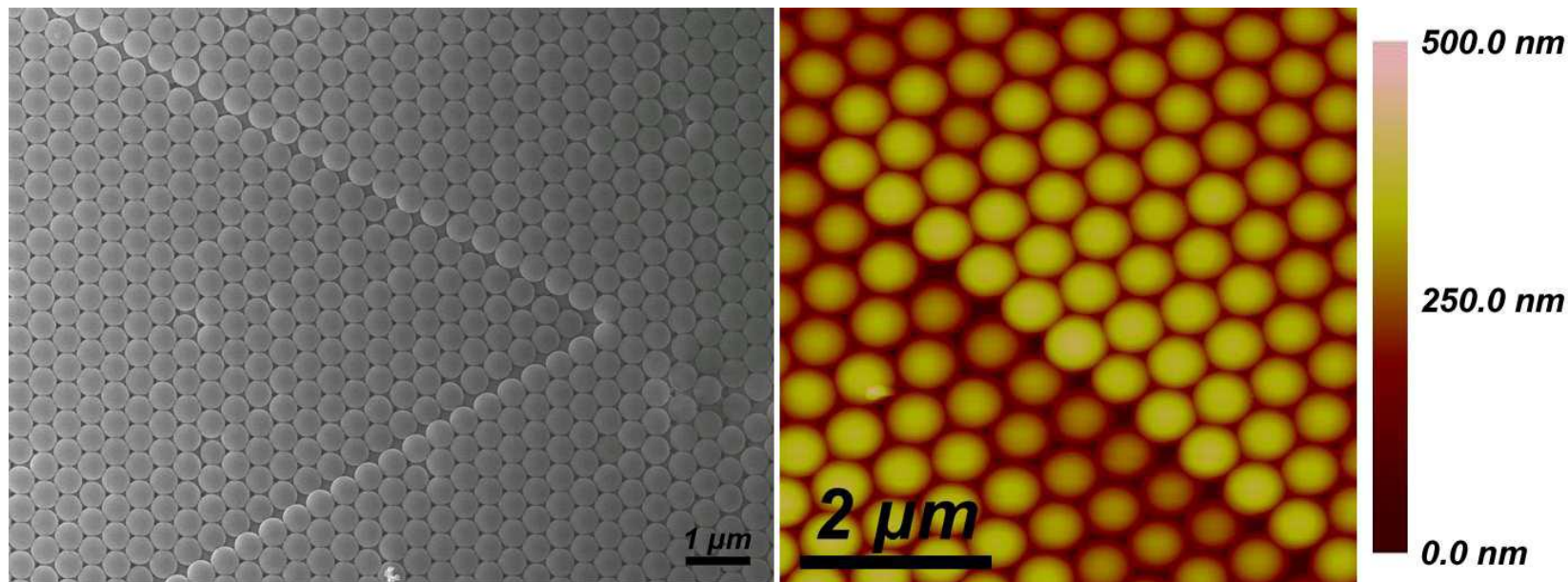


Реальная структура опалов и инвертированных опалов



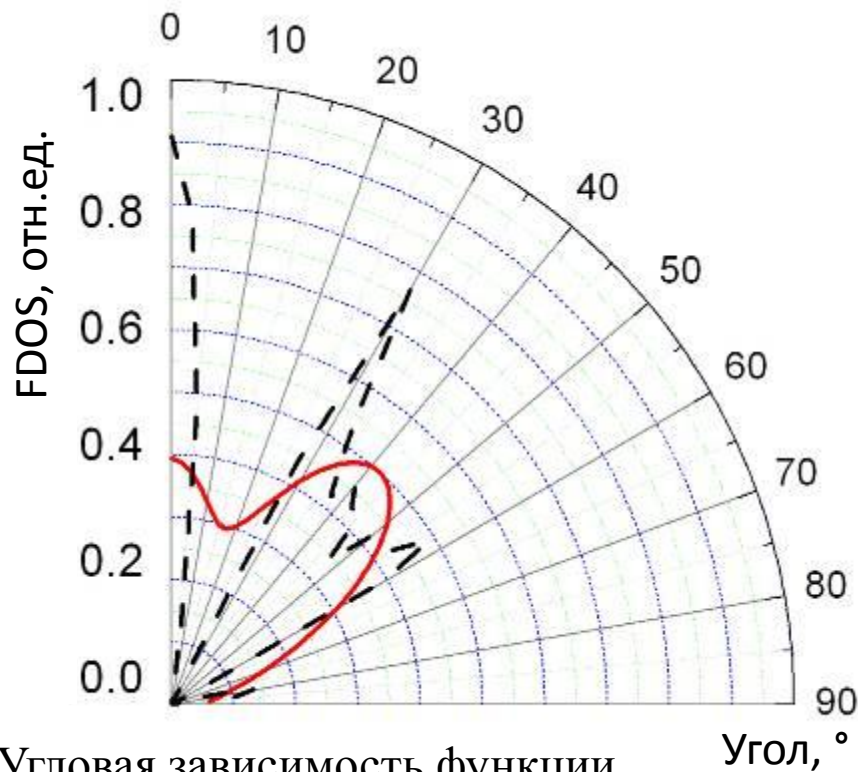
Микрофотографии точечных дефектов в упаковке сферических частиц SiO_2 (средний диаметр микросфер – 270 нм):
(а) – вакансия, (б) – междузлияе, (в) и (г) – вакансионные комплексы
(А.С. Синицкий, А.В. Кнотько, Ю.Д. Третьяков, *Неорган. Матер.*, **41** (2005) 1336).

Реальная структура опалов и инвертированных опалов



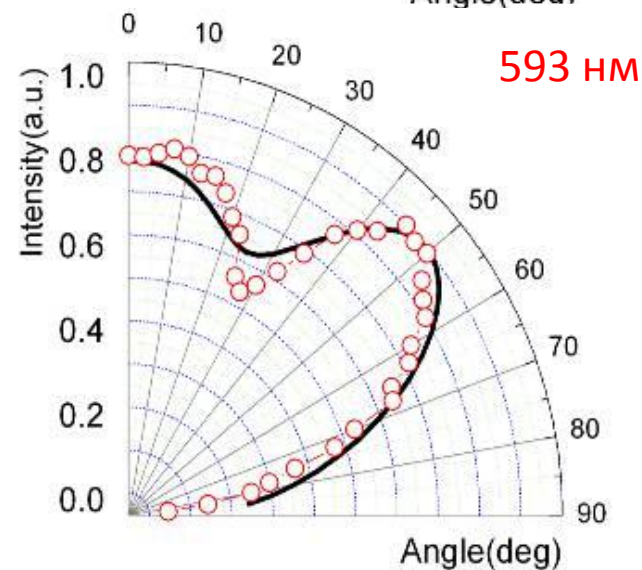
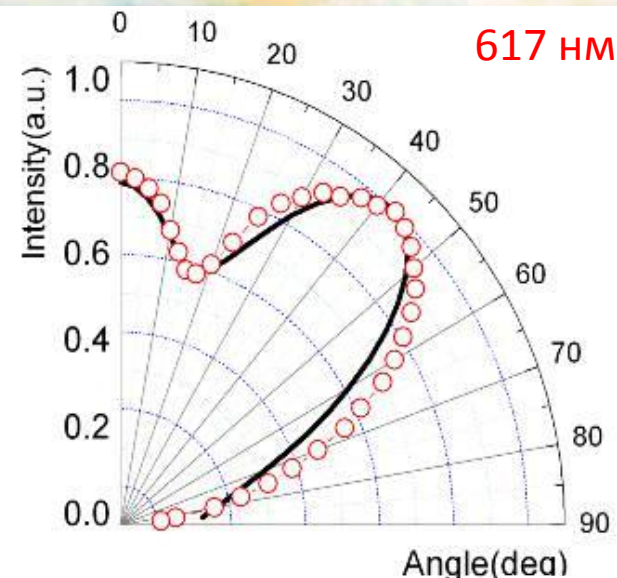
Проявление парных наклонных дефектов упаковки в верхнем плотноупакованном слое пленочного опала. Слева – данные электронной микроскопии, справа – данные атомно-силовой микроскопии (J. Hilhorst, V.V. Abramova, A.S. Sinitskii, N.A. Sapoletova, K.S. Napolskii, A.A. Eliseev, ..., A.V. Petukhov, *Langmuir*, **25** (2009) 10408).

Люминесценция инвертированных опалов $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{-Eu}(\text{руса})_3$



Угловая зависимость функции плотности оптических состояний (FDOS) для $\lambda = 617$ нм

Угловые зависимости интенсивности люминесценции Eu^{3+} из инвертированного опала Mg_2SiO_4

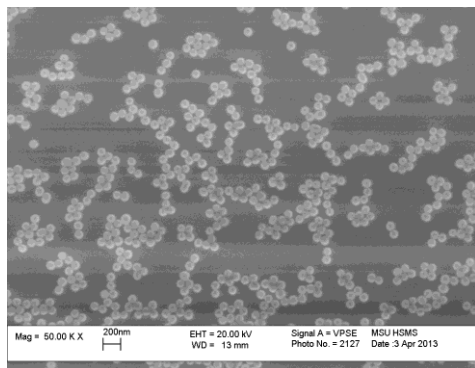
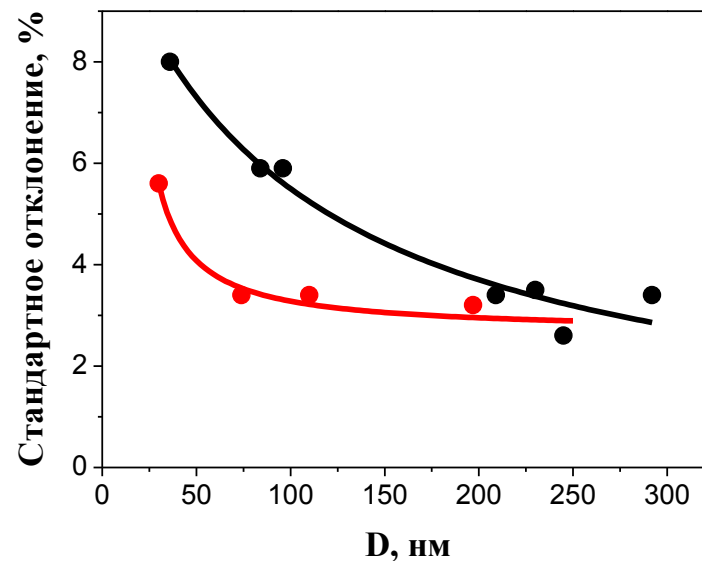
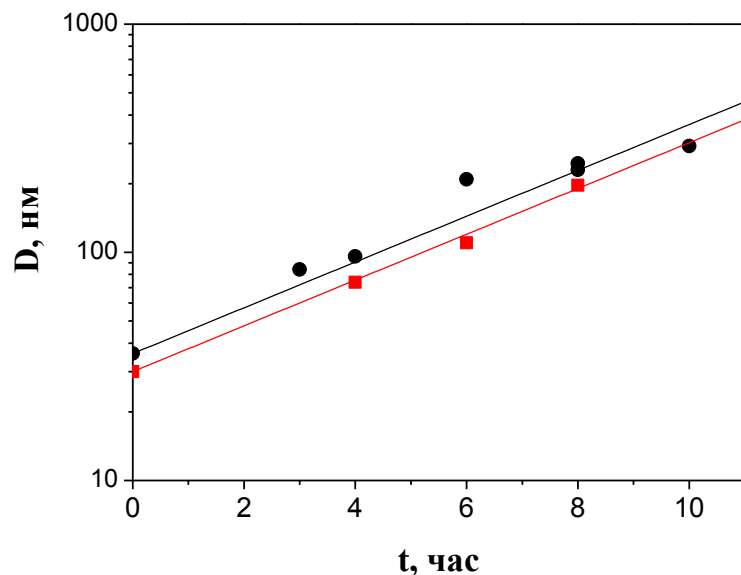




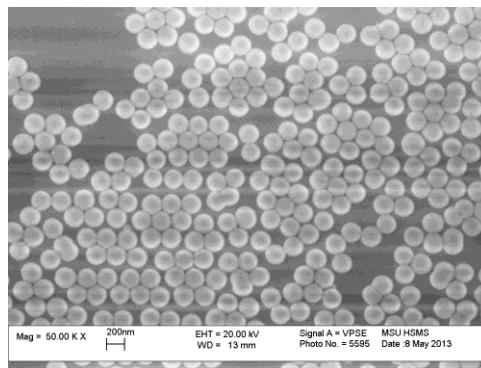
Как бороться с несовершенством структуры?

- сужать дисперсию коллоидных микрочастиц;
- применять «мягкие», сохраняющие структуру методы инвертирования;
- применять другие, более прогрессивные по сравнению с коллоидной химией, методы изготовления фотонных кристаллов: циклическое вытравливание пор, интерференционная литография и пр.

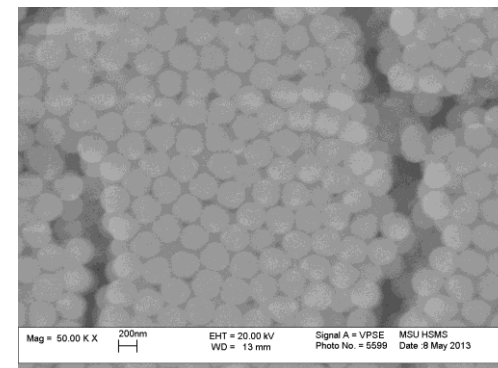
Доращивание зародышей SiO_2



d = 84 нм



d = 209 нм



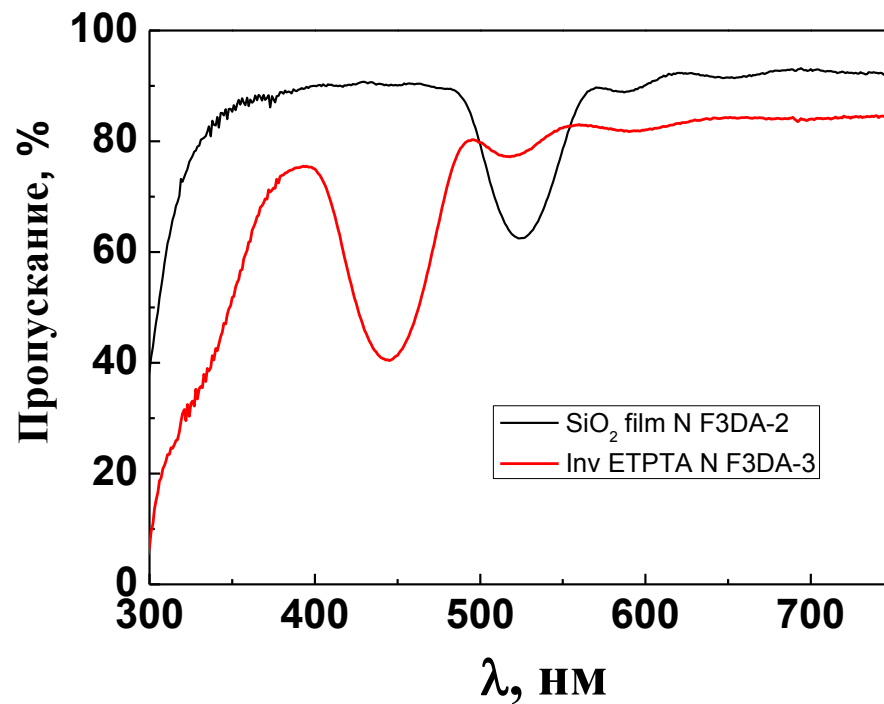
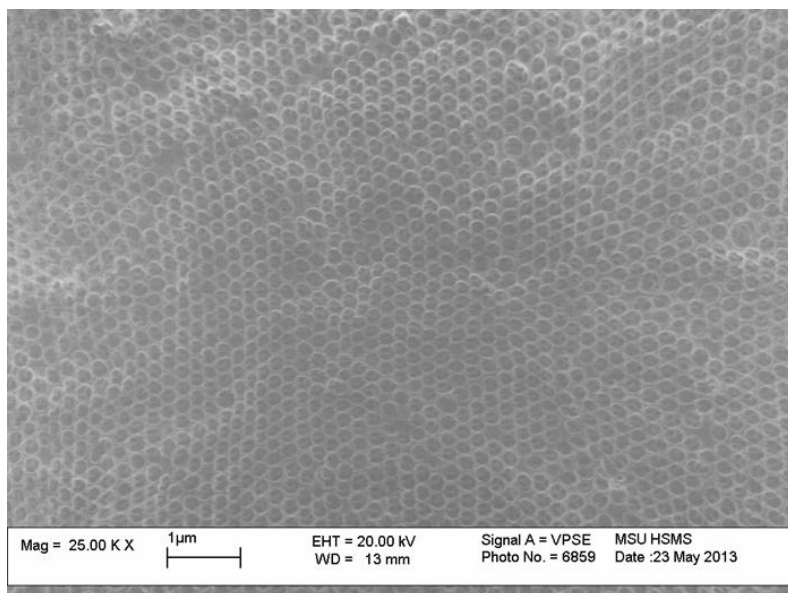
d = 292 нм

Климонский С.О., Т. Бахия, А.В. Кнотько, А.В. Лукашин,
Доклады РАН **457** (2014) 50.

Инвертирование с помощью фоторезиста



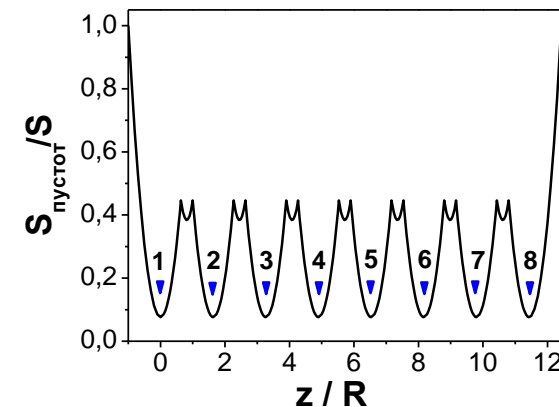
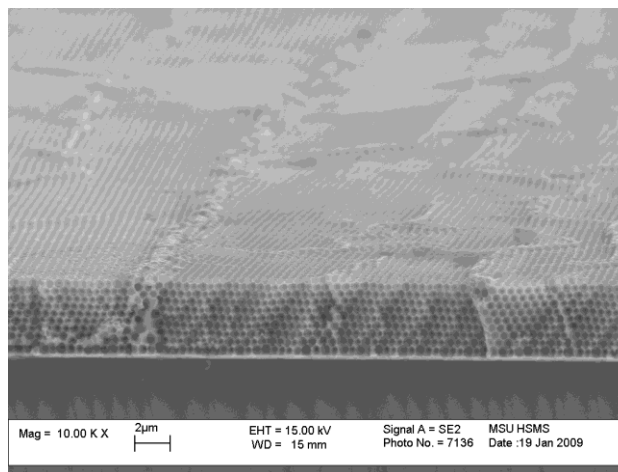
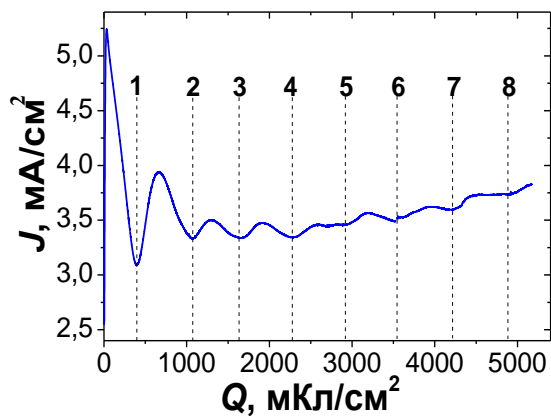
ETPTA = триметилпропан этоксилат триакрилат



Электроосаждение металлических фотонных кристаллов



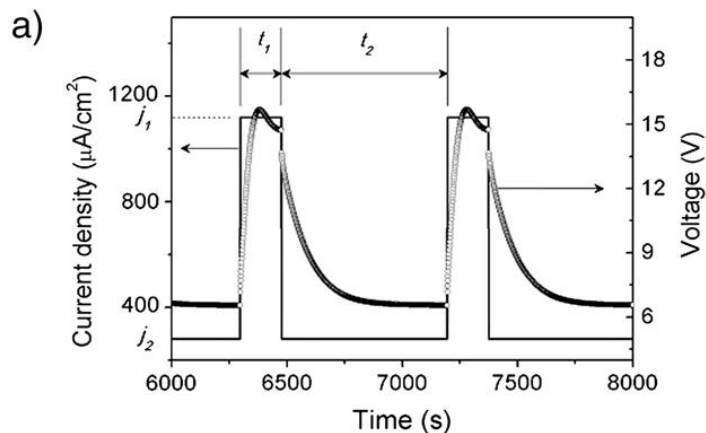
Осаждаемый металл	Состав электролита	Потенциал осаждения, В
Ni	0,6 M NiSO ₄ , 0,1 M NiCl ₂ , 0,3 M H ₃ BO ₃ , 3,5 M C ₂ H ₅ OH	-0,9
Co	0,2 M CoSO ₄ , 0,3 M H ₃ BO ₃ , 3,5 M C ₂ H ₅ OH	-0,9
Pd	0,05 M PdCl ₂ , 0,5 M HCl, 3,5 M C ₂ H ₅ OH	0,1



1D-фотонные кристаллы на основе анодного оксида алюминия

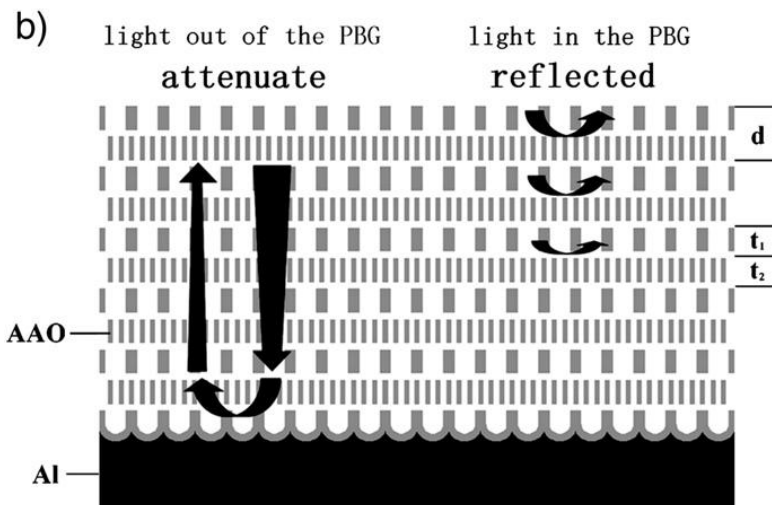


Метод импульсного анодирования алюминия с циклически меняющейся плотностью тока

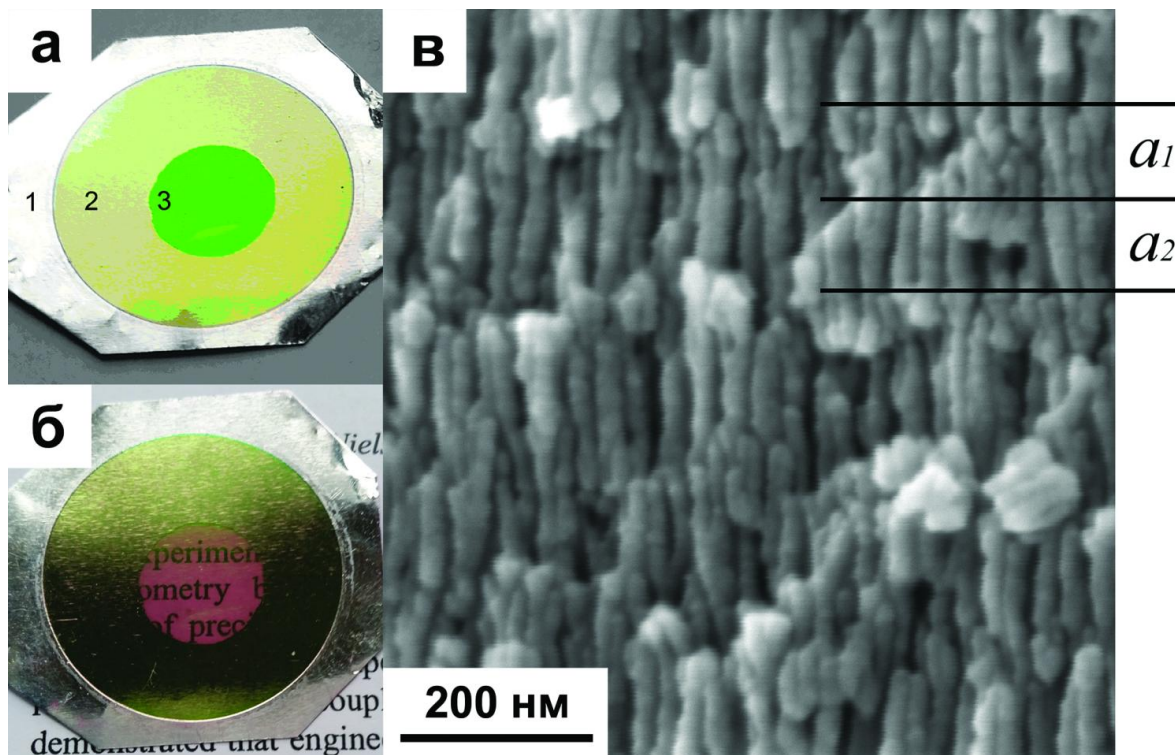


Y. Liu et al. Electrochemistry

Commun. 13 (2011) 1336.



1D-фотонные кристаллы на основе анодного оксида алюминия

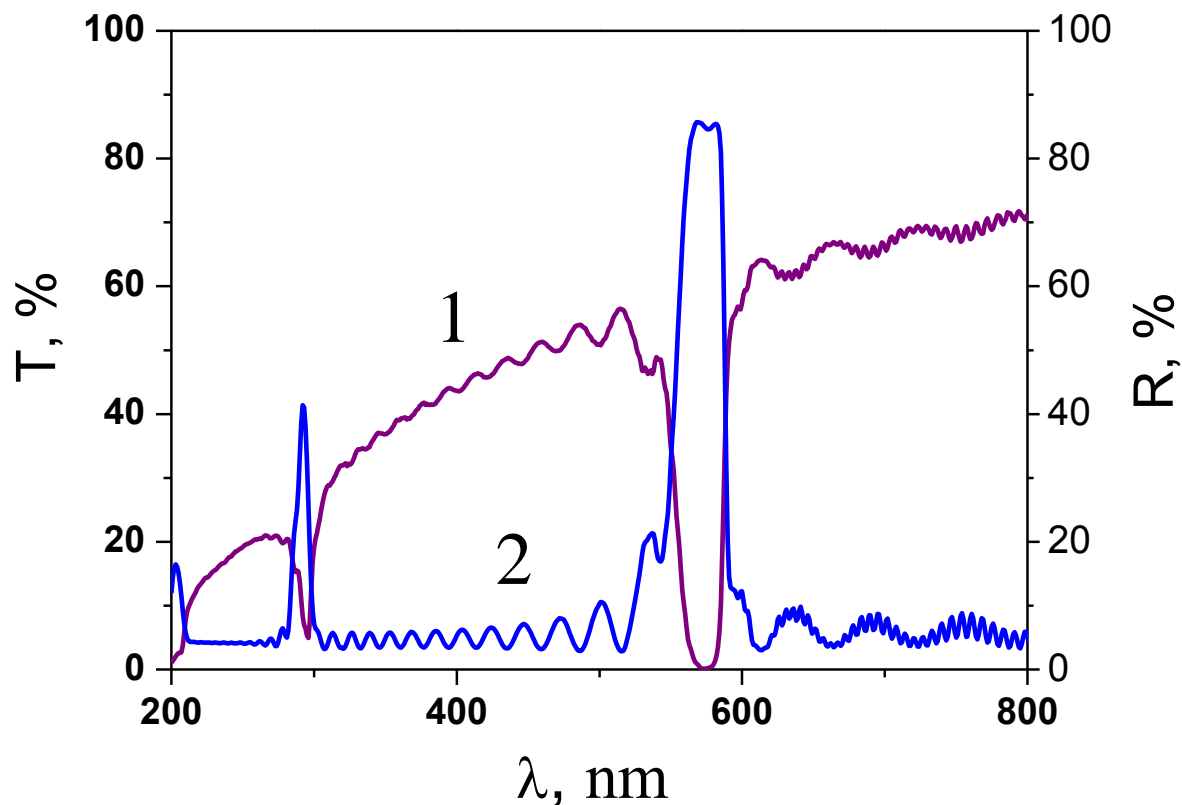


(а, б) Фотографии пористой пленки (ПП) анодного оксида алюминия:
1 – поверхность алюминия; 2 – поверхность ПП на алюминии; 3 – поверхность ПП в свободном состоянии.

(в) Электронномикроскопическое изображение поперечного скола ПП.

В.С. Горелик, С.О. Климонский, В.В. Филатов, К.С. Напольский.
Оптика и спектроскопия **120** (2016) 562.

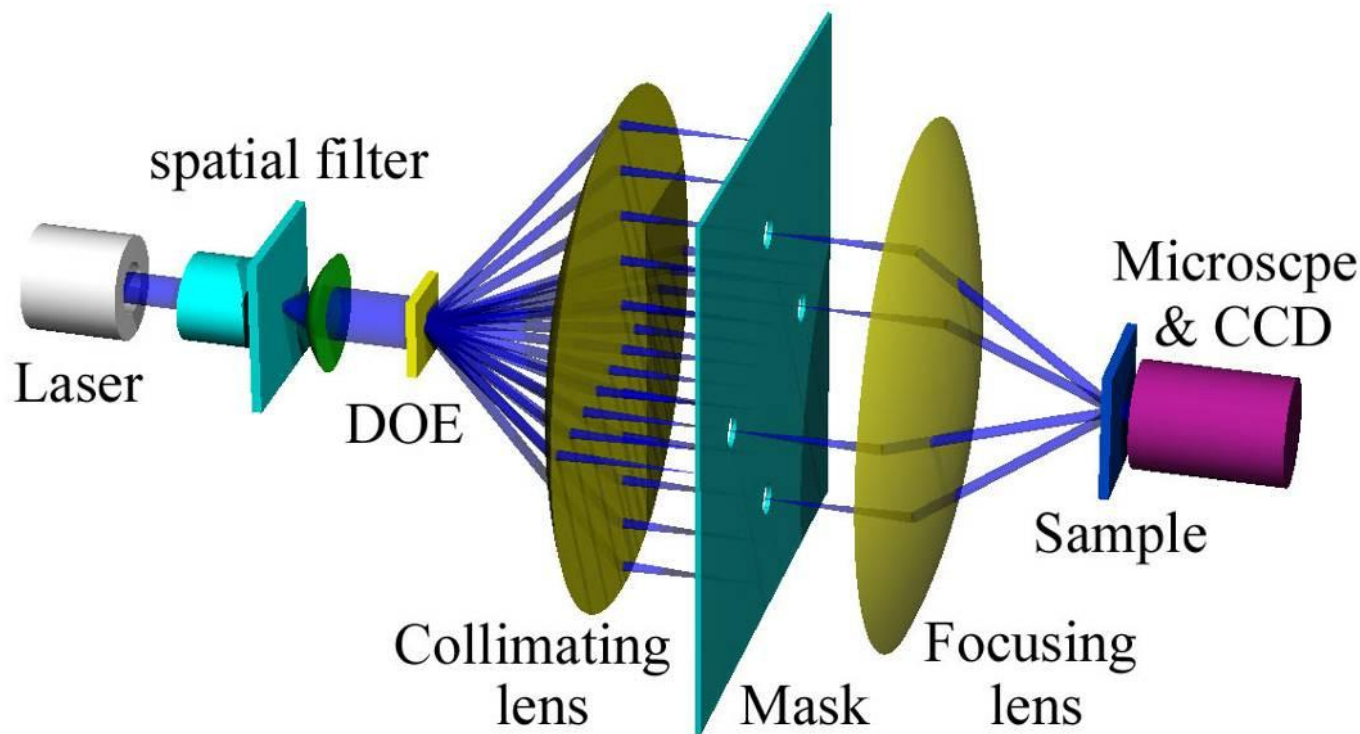
1D-фотонные кристаллы на основе анодного оксида алюминия



1 – спектр пропускания в нормальном направлении;
2 – спектр отражения под углом 8° от лицевой стороны образца.

В.С. Горелик, С.О. Климонский, В.В. Филатов, К.С. Напольский.
Оптика и спектроскопия **120** (2016) 562.

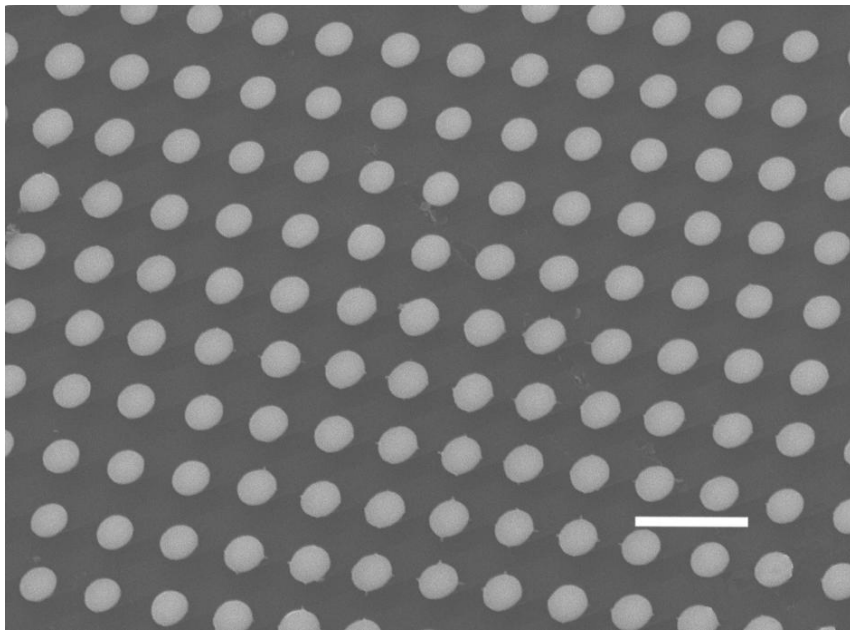
Интерференционная литография



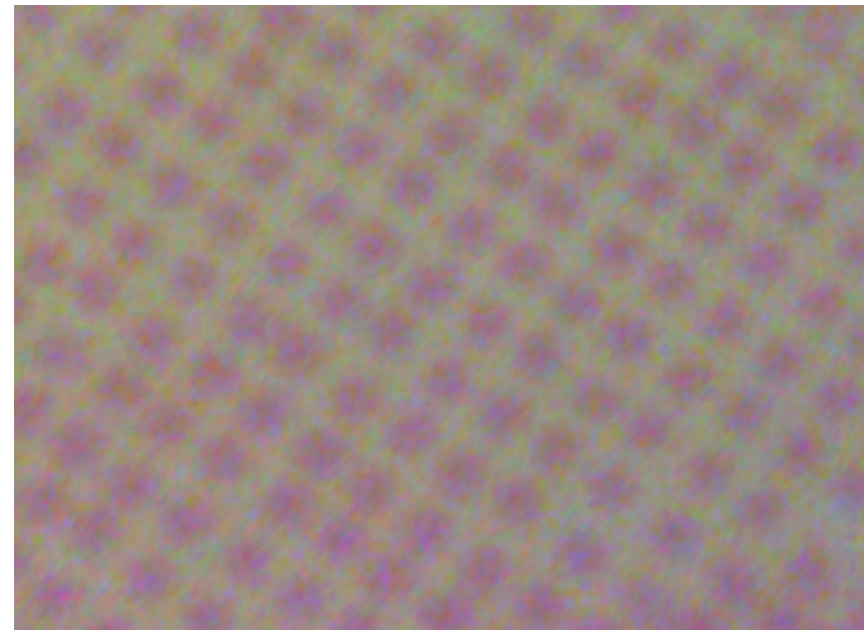
Установка четырехлучевого голографического синтеза двумерных фотонных кристаллов с использованием дифракционного элемента DOE.
 $\lambda = 488$ нм.

J. Li, ..., S.O. Klimonsky, A.S. Slesarev, Yu.D. Tretyakov et al., Adv. Mater. **22** (2010) 2676.

Квадратная матрица и ПРЦП-структура на ее основе



Электронномикроскопическое изображение квадратной голографической матрицы. Масштабная метка - 5 μm .

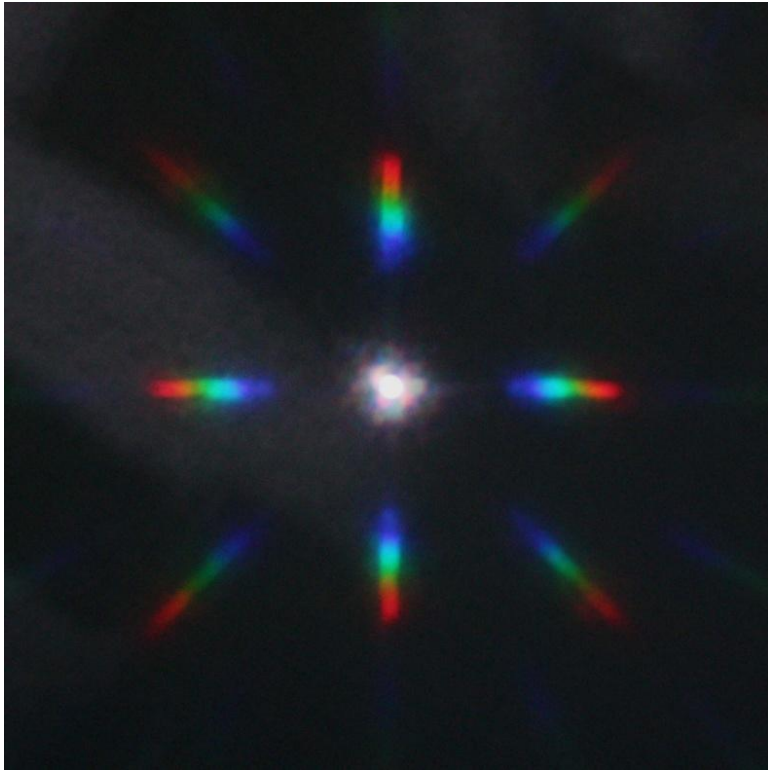


Оптическая микрофотография фотоннокристаллической ПРЦП-структуры.

ПРЦП = периодическое распределение центров поглощения

J. Li, ..., S.O. Klimonsky, A.S. Slesarev, Yu.D. Tretyakov et al., Adv. Mater. **22** (2010) 2676.

Дифракция на ПРЦП-структуре



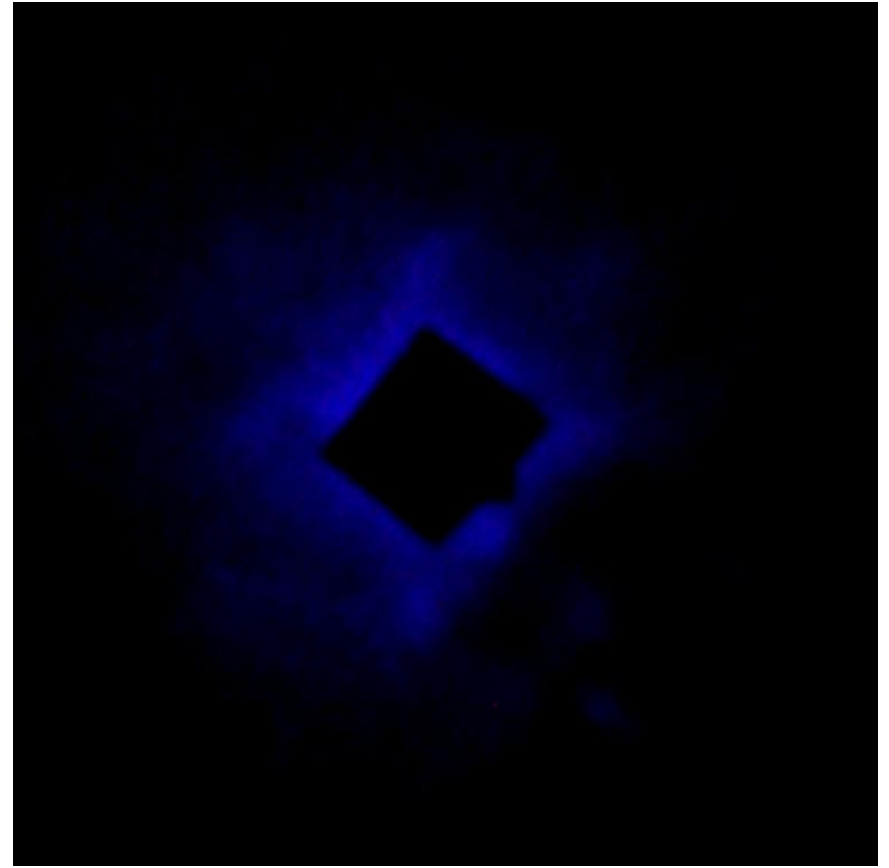
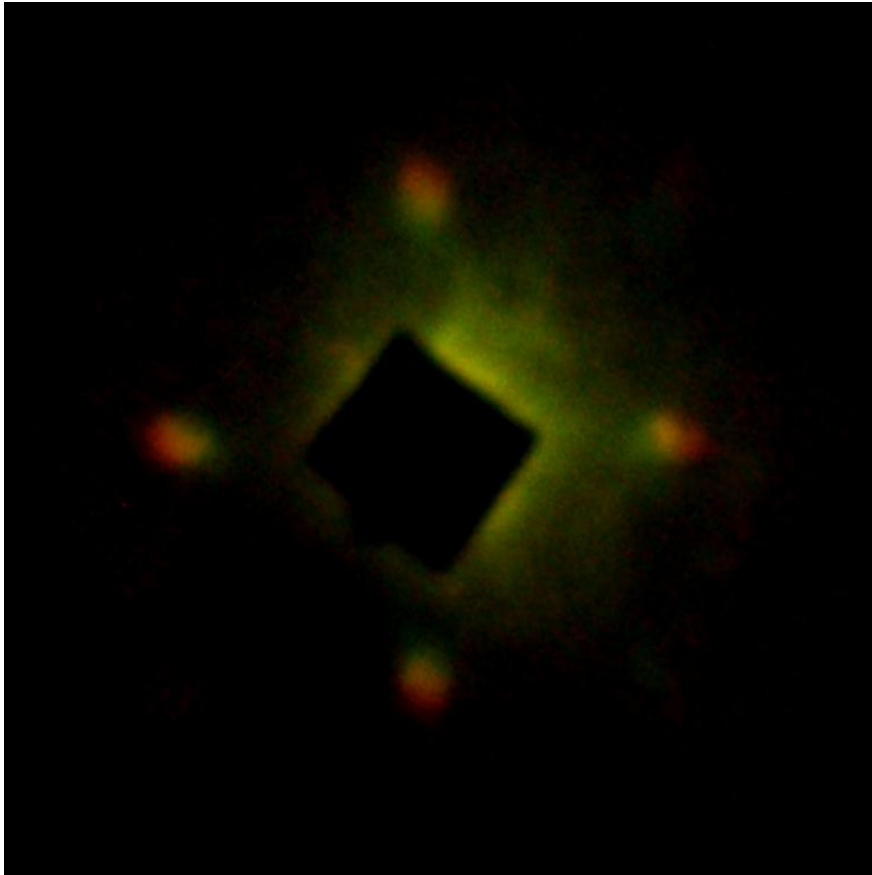
Исходная матрица



ПРЦП-структура

J. Li, ..., S.O. Klimonsky, A.S. Slesarev, Yu.D. Tretyakov et al., Adv. Mater. **22** (2010) 2676.

Дифракция на ПРЦП-структуре



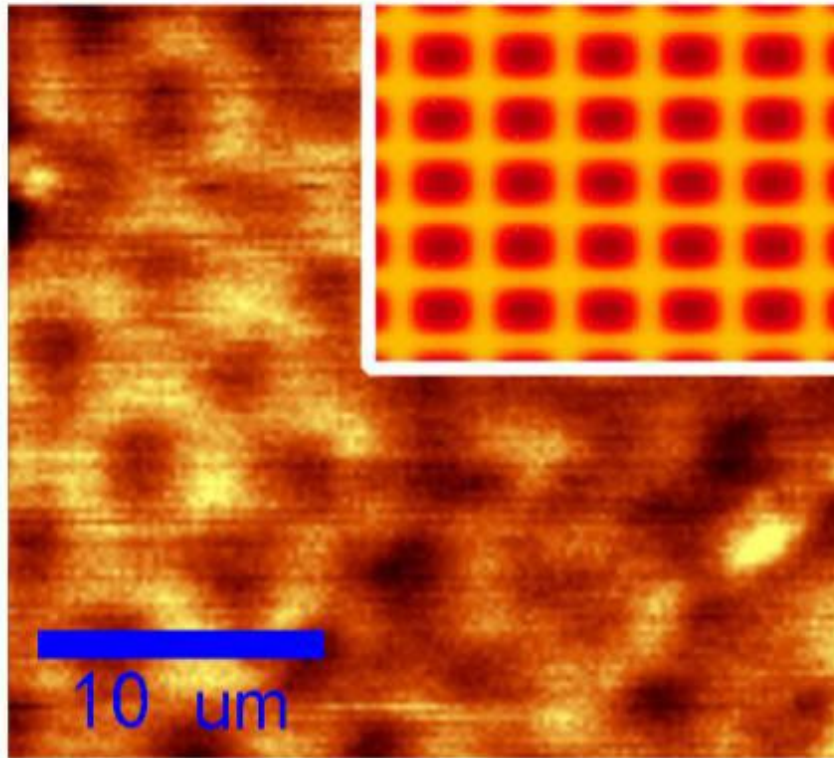
J. Li, ..., S.O. Klimonsky, A.S. Slesarev, Yu.D. Tretyakov et al., Adv. Mater. **22** (2010) 2676.

Пропускание ПРЦП-структуры



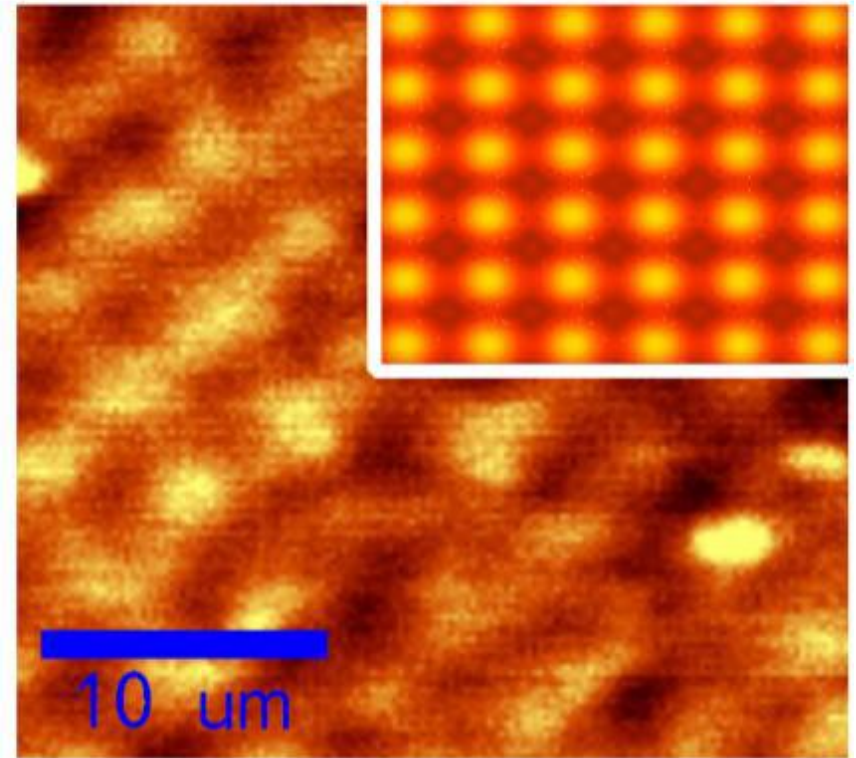
(a)

$\lambda = 547 \text{ нм}$



(b)

$\lambda = 581 \text{ нм}$



Пропускание 2D ПРЦП-структуры для разных длин волн

M. Feng et al., Optics Express **19** (2011) 7222.

Заключение



Фотоника – это, прежде всего, наука о микро- и наноструктурированных оптических материалах.



Благодарю за внимание!