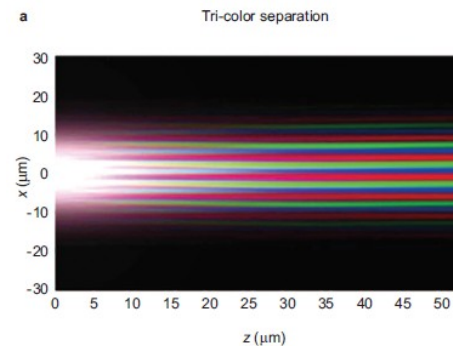
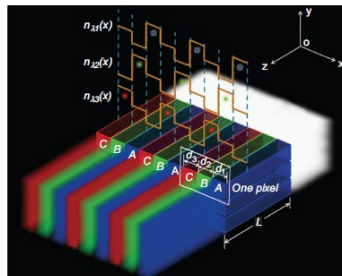




# Управление световыми потоками с помощью фотонно-кристаллических и световодных микроструктур

Климонский Сергей Олегович,  
доцент ФНМ МГУ



# План



- 1. Фотоника и фотонные кристаллы (ФК)**
- 2. Структуры с периодически распределенными центрами поглощения (ПРЦП-структуры)**
- 3. Разделение света с помощью световодных ПРЦП-микроструктур**

# Литература



1. J. P. Prineas, J. Y. Zhou\*, J. Kuhl et al. *Ultrafast ac Stark effect switching of the active photonic band gap from Bragg-periodic semiconductor quantum wells*. Appl. Phys. Lett., **81** (2002) 4332.
2. J. Li\*, B. Liang\*, Y. Liu\* et al. *Photonic Crystal Formed by the Imaginary Part of the Refractive Index*. Adv. Mater. **22** (2010) 2676.
3. M. Feng\*, Y. Liu\*, Y. Li\*, X. Xie\*, J. Zhou\*. *Light propagation in a resonantly absorbing waveguide array*. Optics Express **19** (2011) 7222.
4. Y.-K. Liu\*, S.-C. Wang\*, Y.-Y. Li\* et al. *Efficient color routing with a dispersion-controlled waveguide array*. Light: Science & Applications **2** (2013) e52.

---

\*State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Application,  
Sun Yat-sen (Zhongshan) University, Guangzhou 510275, CHINA

# Введение

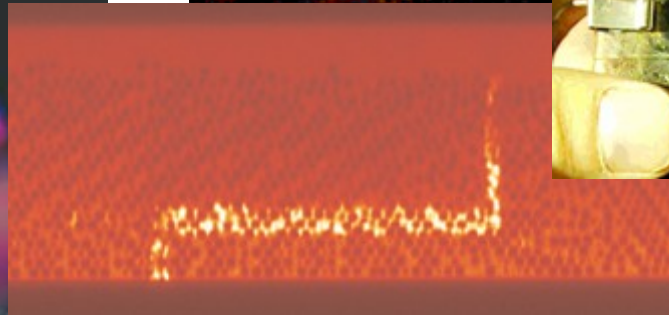
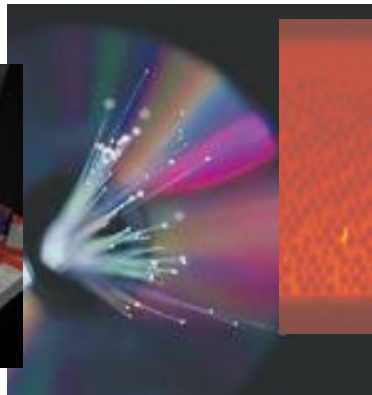
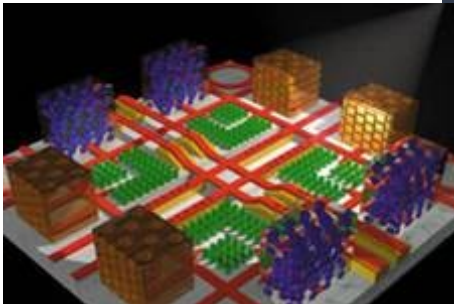
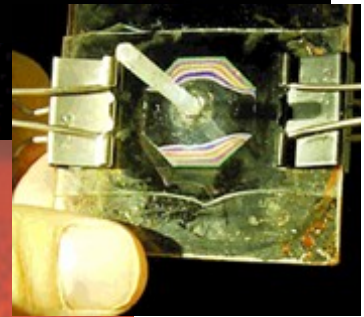
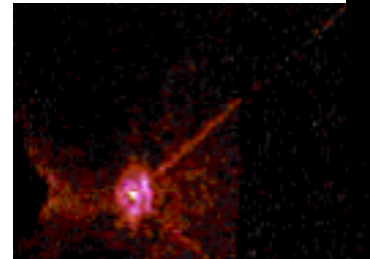
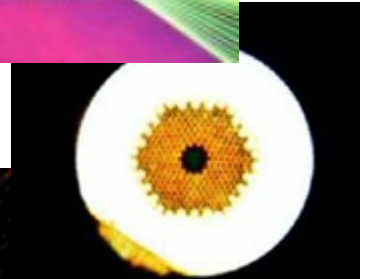
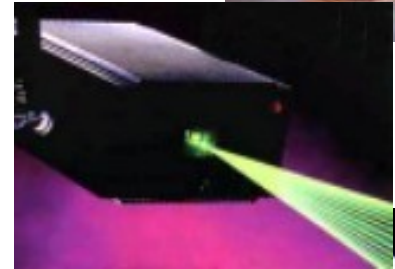


**Электроника, спинтроника, фотоника ...**

**Фотоника – область физики и технологии,  
занимающаяся контролем и  
преобразованием оптических сигналов.**

# Фотоника и фотонные кристаллы

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

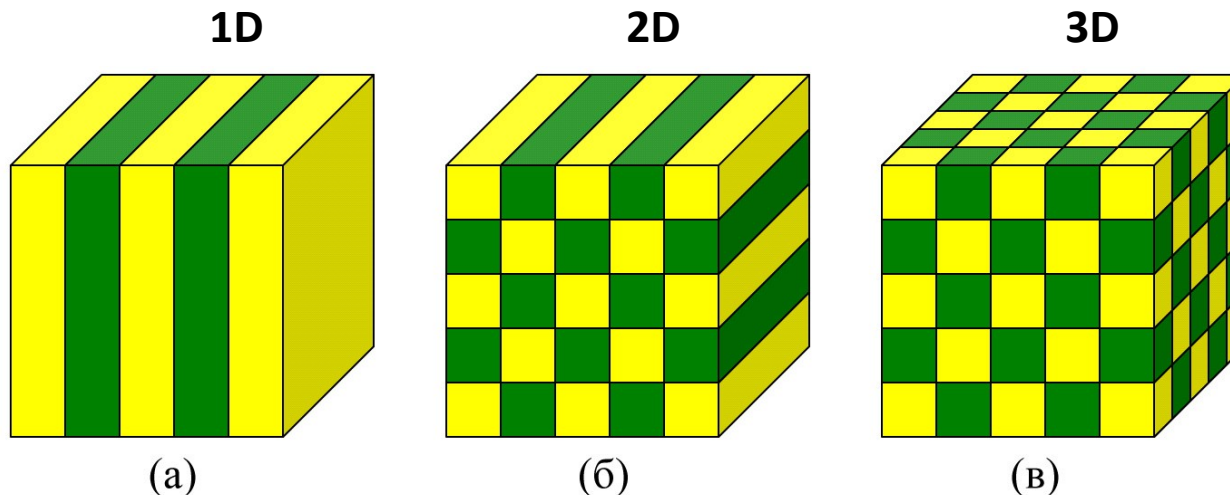




# Понятие фотонного кристалла



**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.

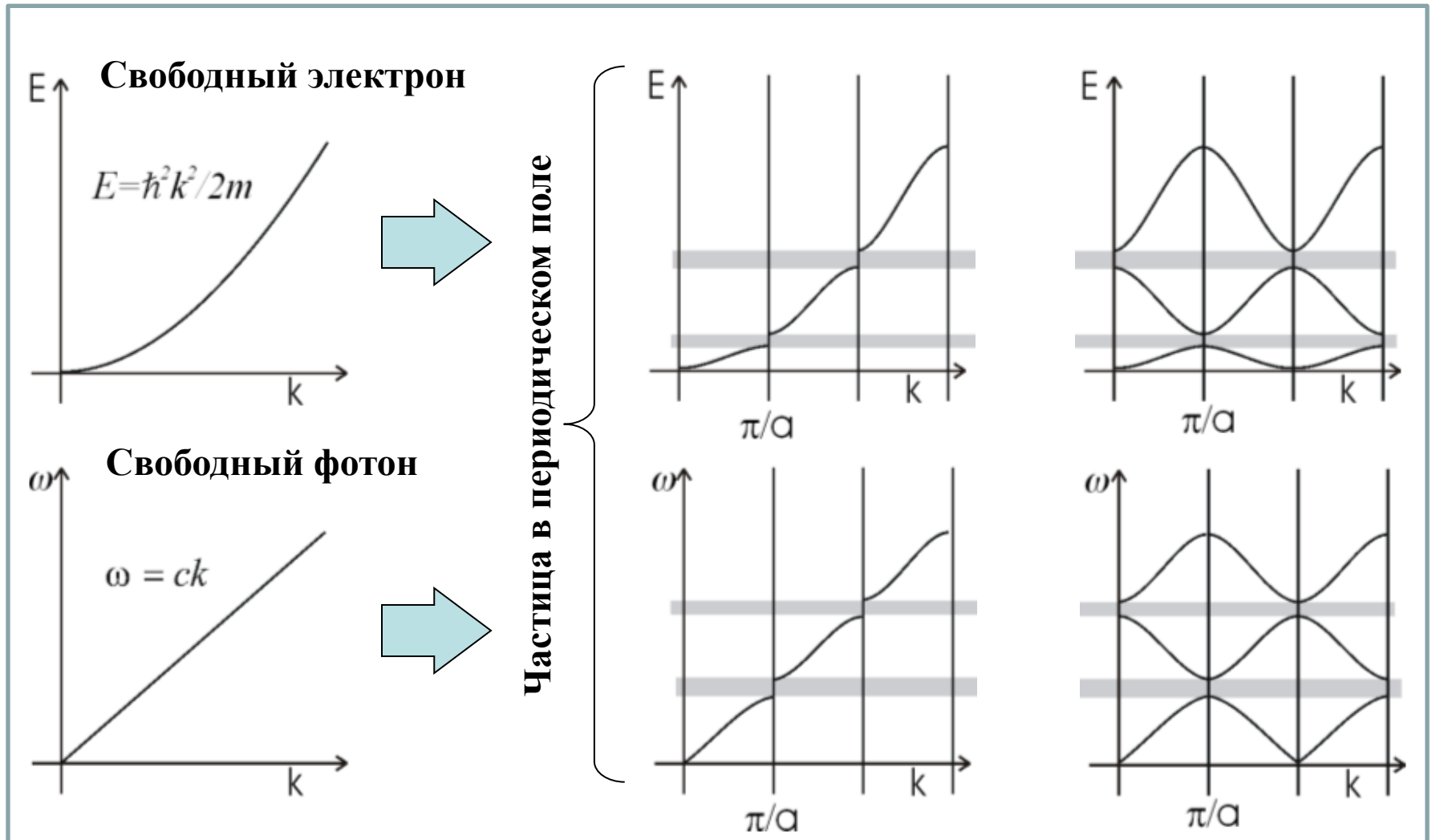


Схематическое представление одномерного (а), двухмерного (б) и трехмерного (в) ФК, образованного двумя разными материалами.

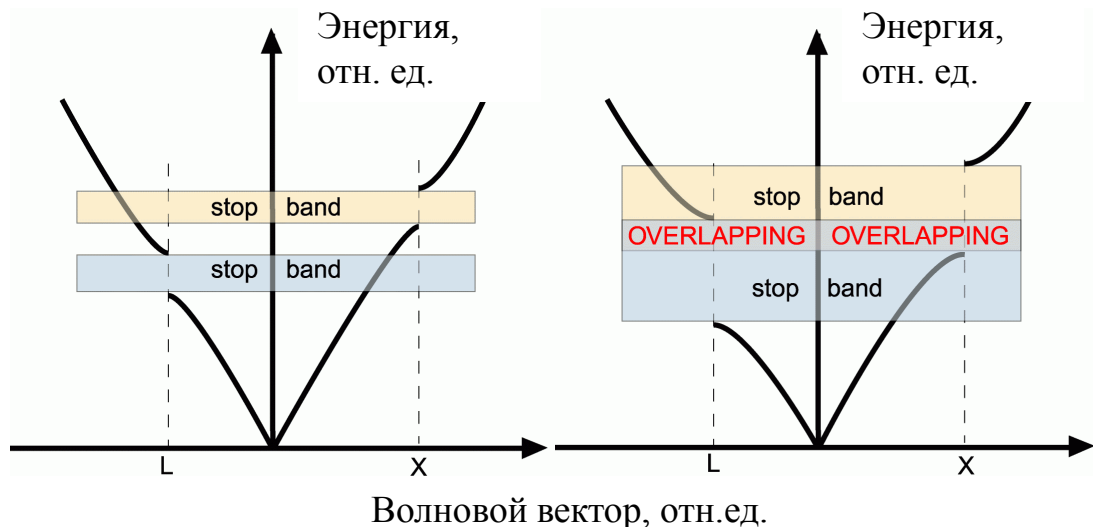
# Понятие фотонного кристалла



**Фотонные кристаллы – «полупроводники для света».**



# Трехмерные кристаллы: запрещенные зоны и стоп-зоны

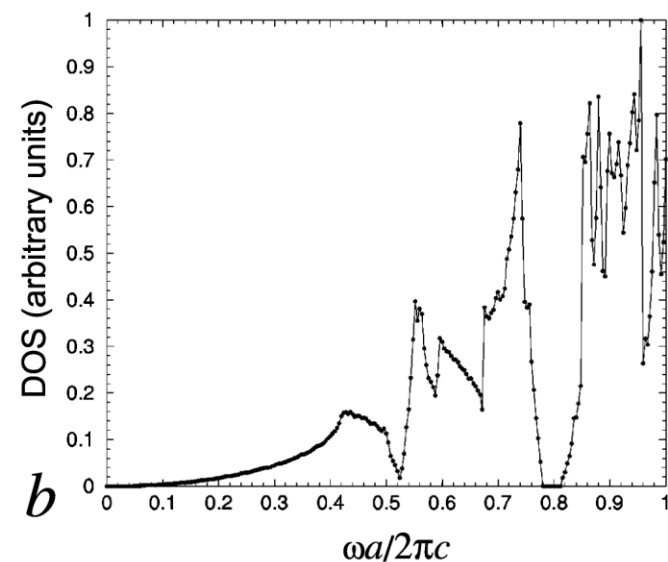
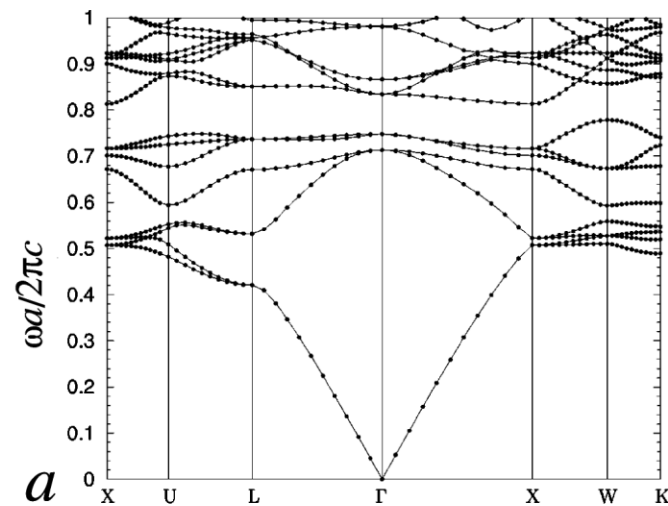


Нет полной  
запрещенной зоны

Есть полная  
запрещенная зона

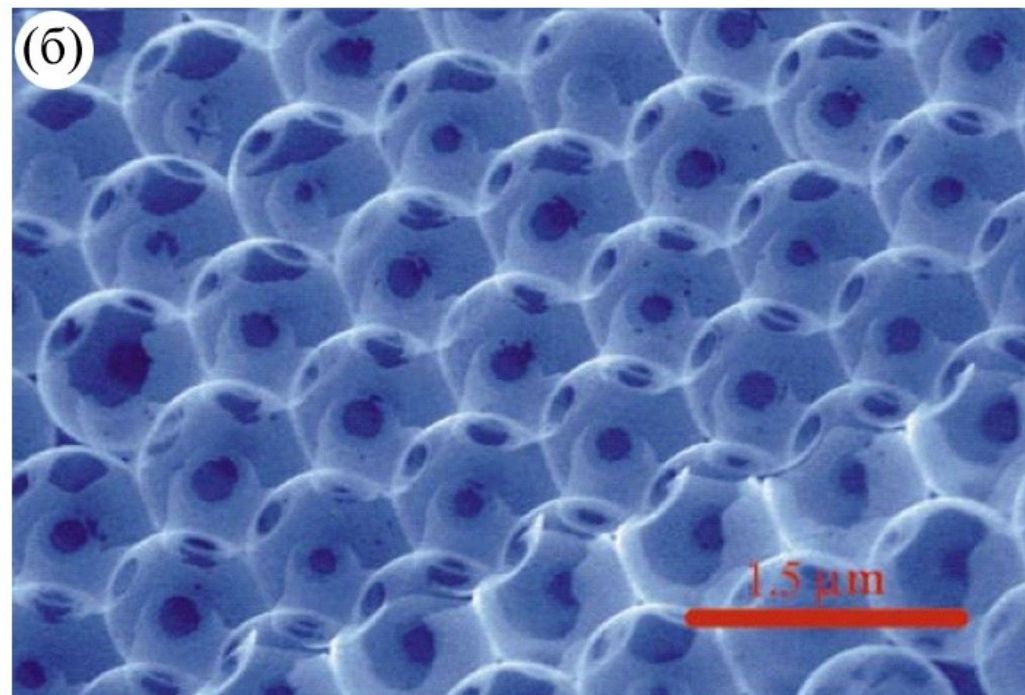
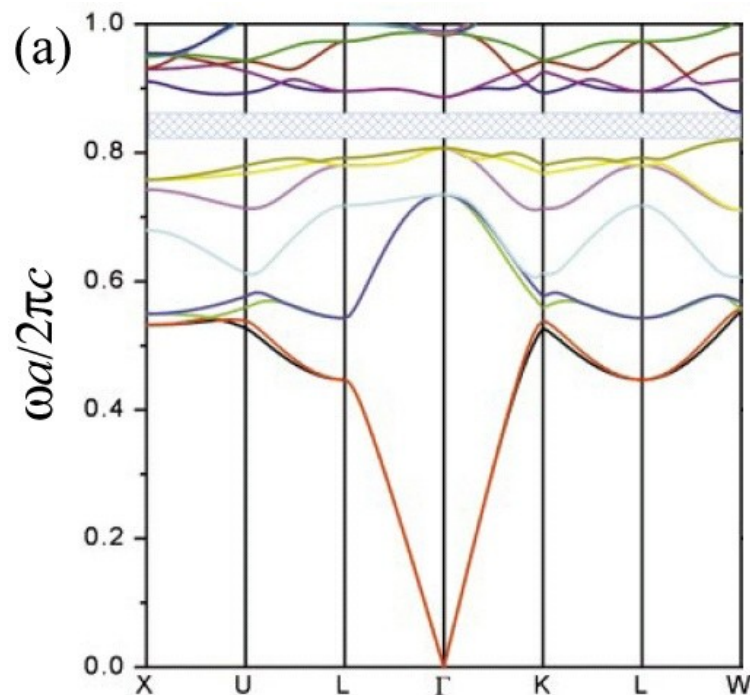
Зонная структура (a) и плотность оптических состояний DOS (b) для инвертированного опала из кремния

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





# Специфика трехмерных фотонных кристаллов



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

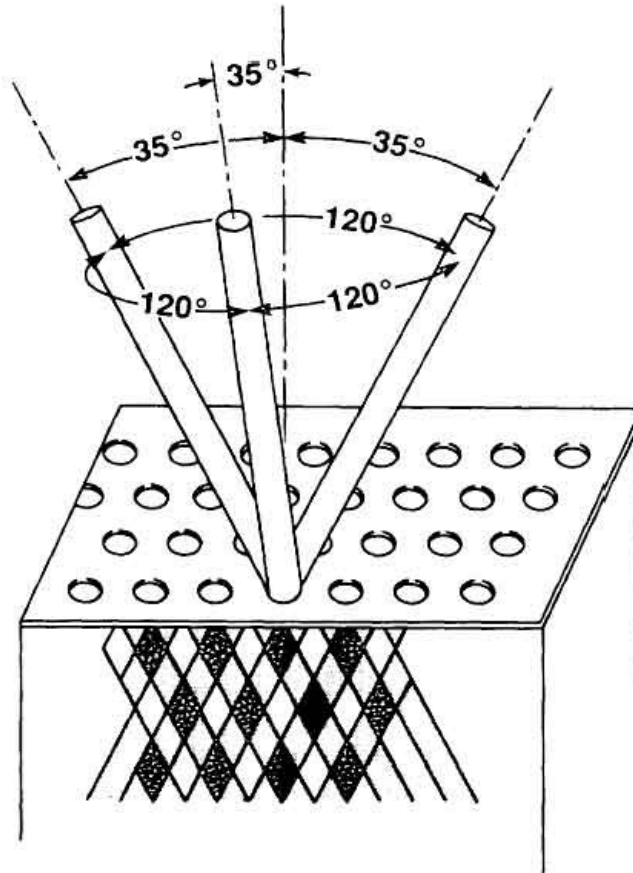
(б) Электронно-микроскопическое изображение соответствующего ФК (A. Blanco et al., *Nature*, 405 (2000) 437).

# 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.**

# Методы синтеза ФК



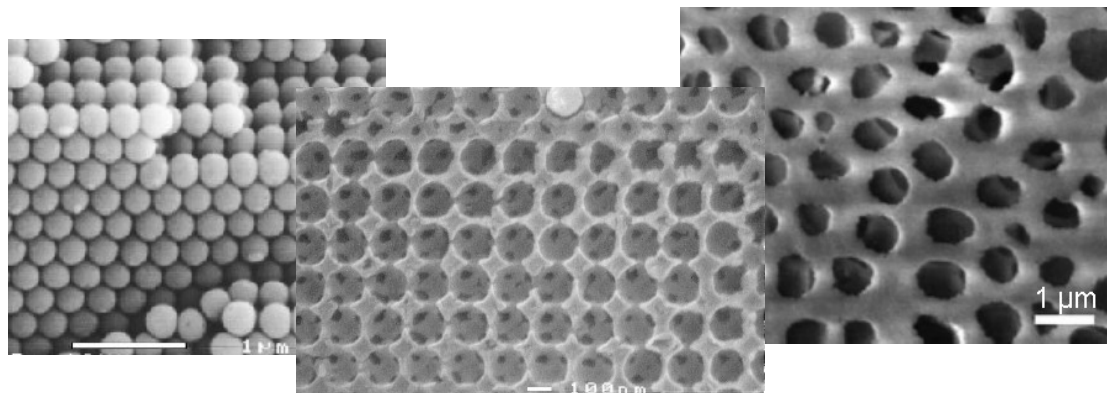
**Схема получения ФК Яблоновича путем высверливания упорядоченных отверстий в диэлектрическом материале (E. Yablonovitch et al., *Phys. Rev. Lett.*, **67** (1991) 2295).**



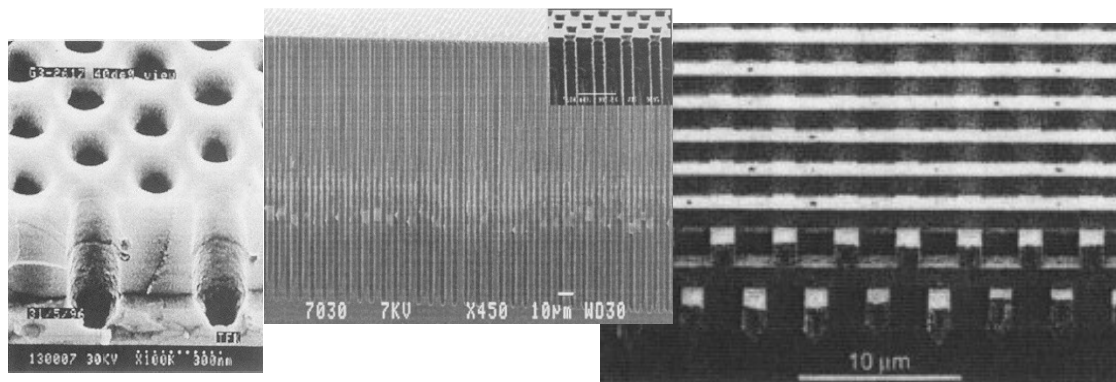
# Методы синтеза ФК



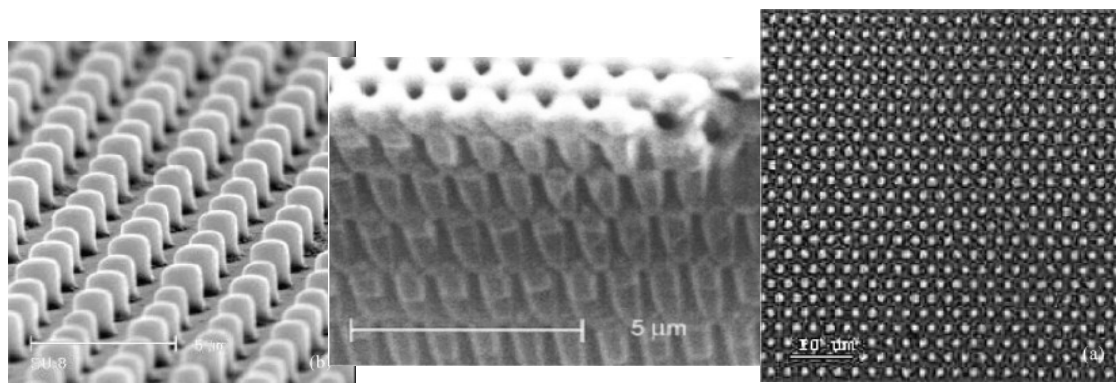
## САМОСБОРКА



## ЛИТОГРАФИЯ



## ГОЛОГРАФИЯ



# Активные фотонные кристаллы



**Активные фотонные кристаллы:** фотоннокристаллическая структура возникает в результате воздействия возбуждающего света.

**ПРЦП-структуры:** фотоннокристаллическая структура является следствием периодической модуляции коэффициента экстинкции  $\kappa$ . Коэффициент преломления, определяемый соотношением Крамерса-Кронига

$$n(\omega) = n(0) + \frac{\omega^2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{dx^2 \kappa(x)}{x^2 (x^2 - \omega^2)},$$

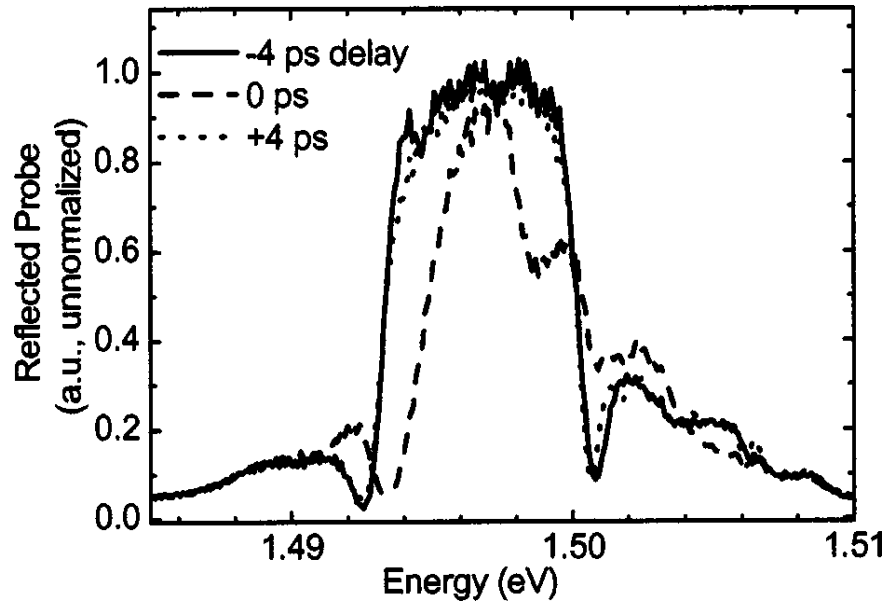
также подвергается при этом периодической модуляции.



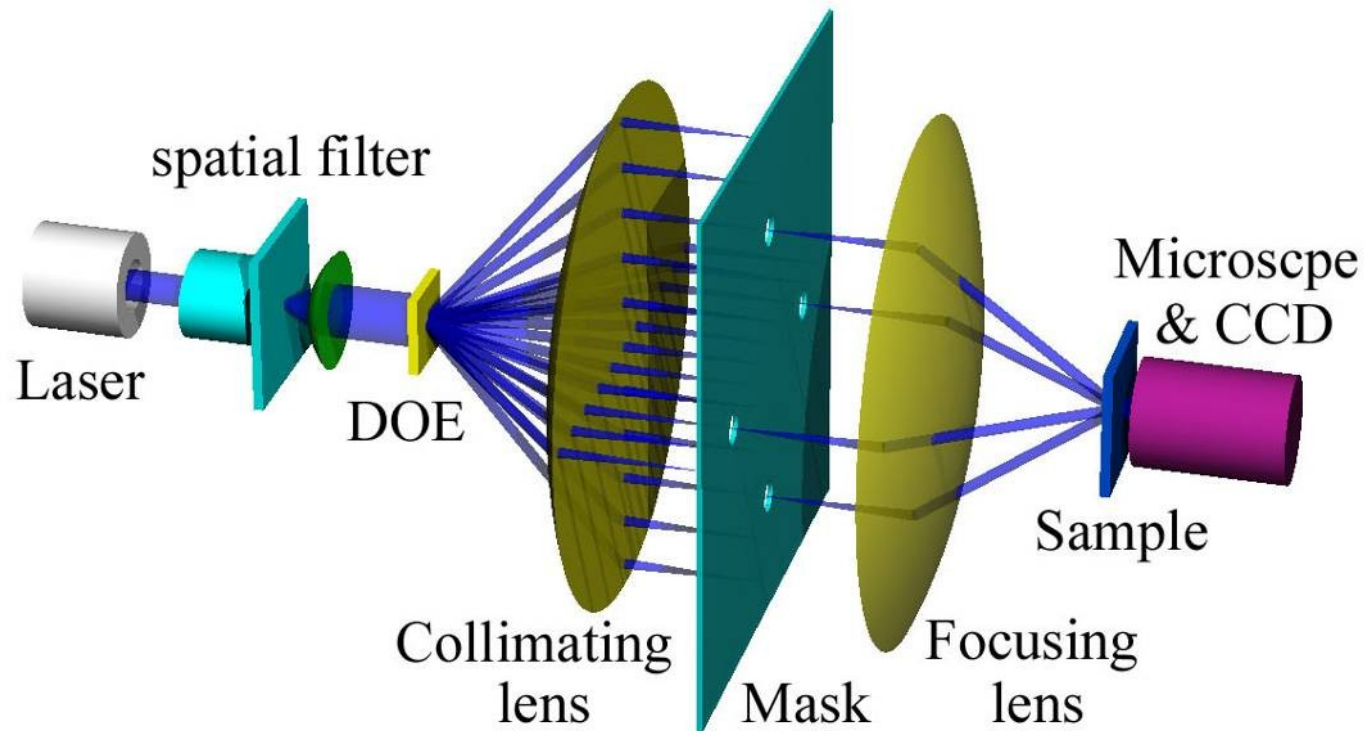
# Активные фотонные кристаллы



J. P. Prineas, J. Y. Zhou, J. Kuhl et al., Appl. Phys. Lett., 81 (2002) 4332 –  
одномерная (1D) активная фотоннокристаллическая структура на  
основе чередующихся слоев  $\text{In}_{0.04}\text{Ga}_{0.96}\text{As}/\text{GaAs}$ .



# Голографический синтез

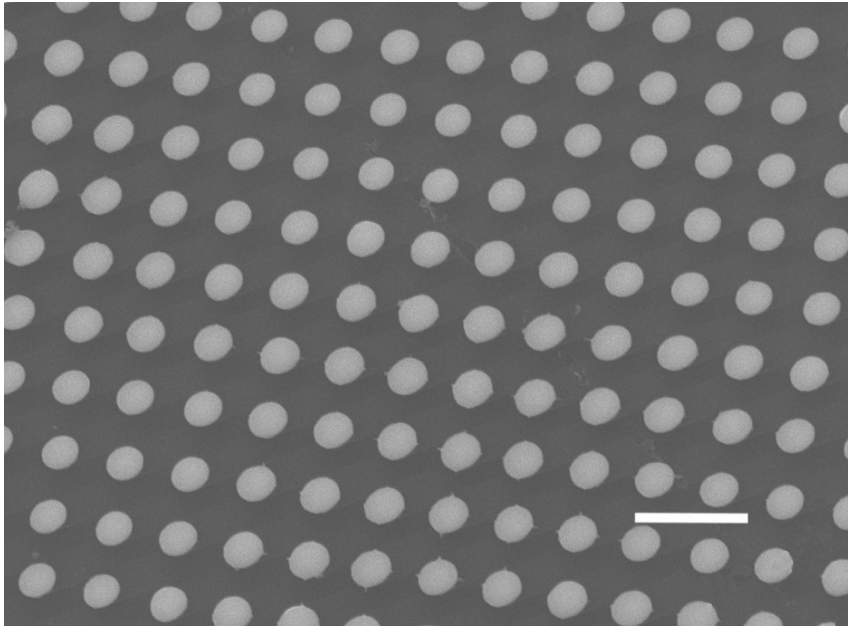


Установка четырехлучевого голографического синтеза двумерных фотонных кристаллов с использованием дифракционного элемента DOE.

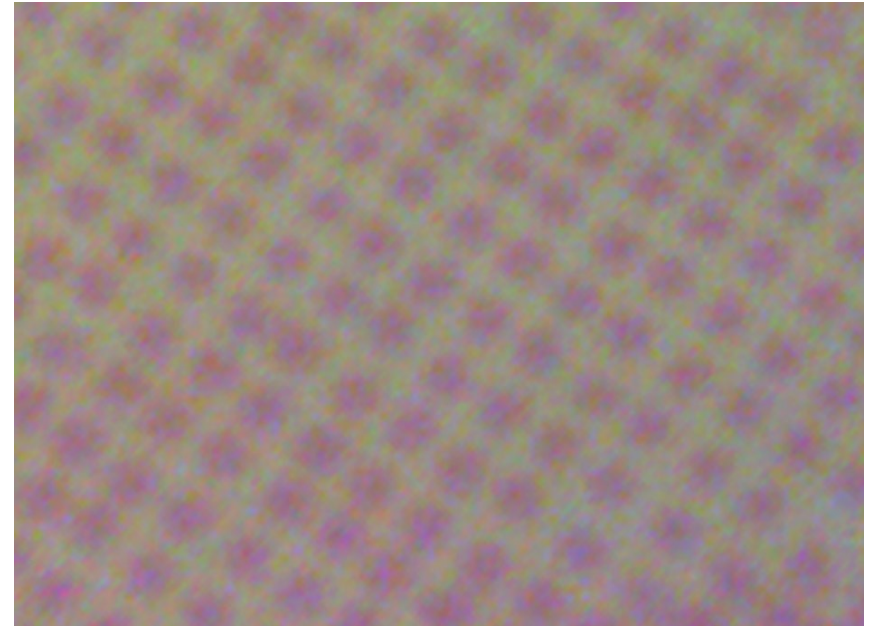
$\lambda = 488 \text{ нм}$ .

J. Li et al., Adv. Mater. **22** (2010) 2676.

# Квадратная матрица и 2D ПРЦП-структура на ее основе



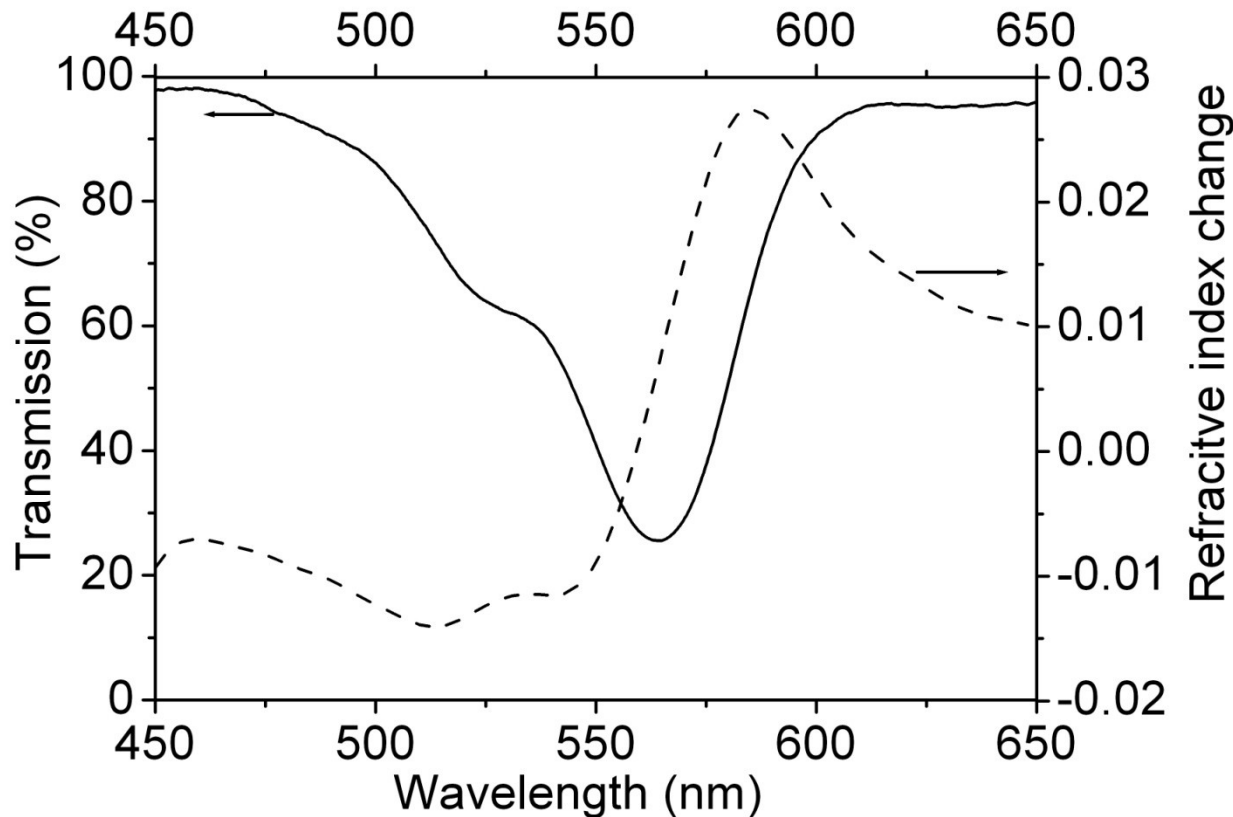
Электронномикроскопическое изображение квадратной голографической матрицы. Масштабная метка - 5  $\mu\text{m}$ .



Оптическая микрофотография фотоннокристаллической 2D ПРЦП-структуры.

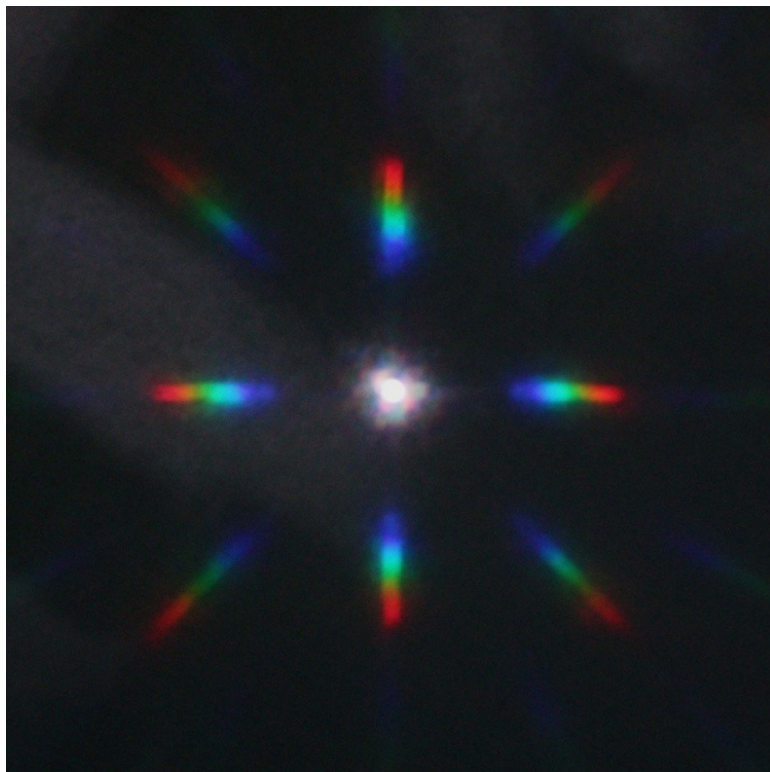
J. Li et al., Adv. Mater. **22** (2010) 2676.

# Оптические свойства фоторезиста с родамином-В



Спектр пропускания фоторезиста SU-8 с родамином-в (сплошная линия) и соответствующие изменения коэффициента преломления (пунктирная линия).

# Полученные дифракционные картины



**А**

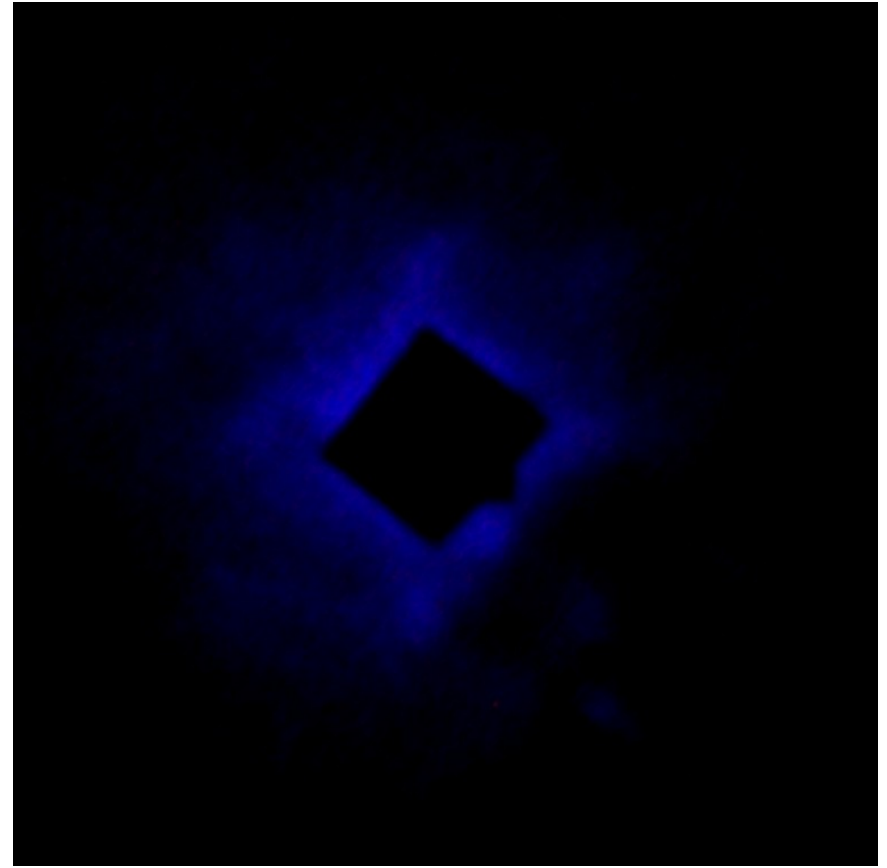
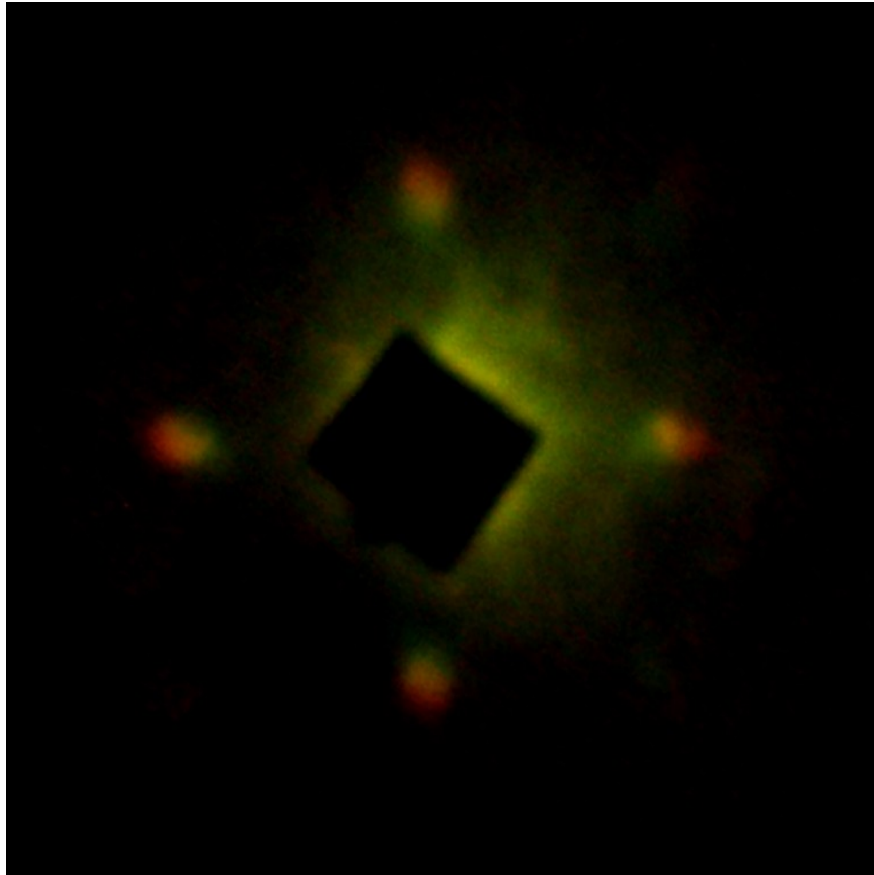


**Б**

**А – исходная матрица.  
Б – 2D ПРЦП-структура.**



# Дифракционные картины на ПРЦП-структуре для разных длин волн



J. Li et al., Adv. Mater. **22** (2010) 2676.

# Расчет яркости дифракционной картины

$$I(f_x, f_y, \lambda) \propto |E(f_x, f_y, \lambda)|^2 \propto |FT(t(x, y, \lambda))|^2$$

$$t(x, y, \lambda) = \begin{cases} \exp(i2\pi d n_b / \lambda) & (\text{air or SU8 without dye}) \\ T(\lambda) \exp(i2\pi d n_r / \lambda) & (\text{SU8 with dye}) \end{cases}$$

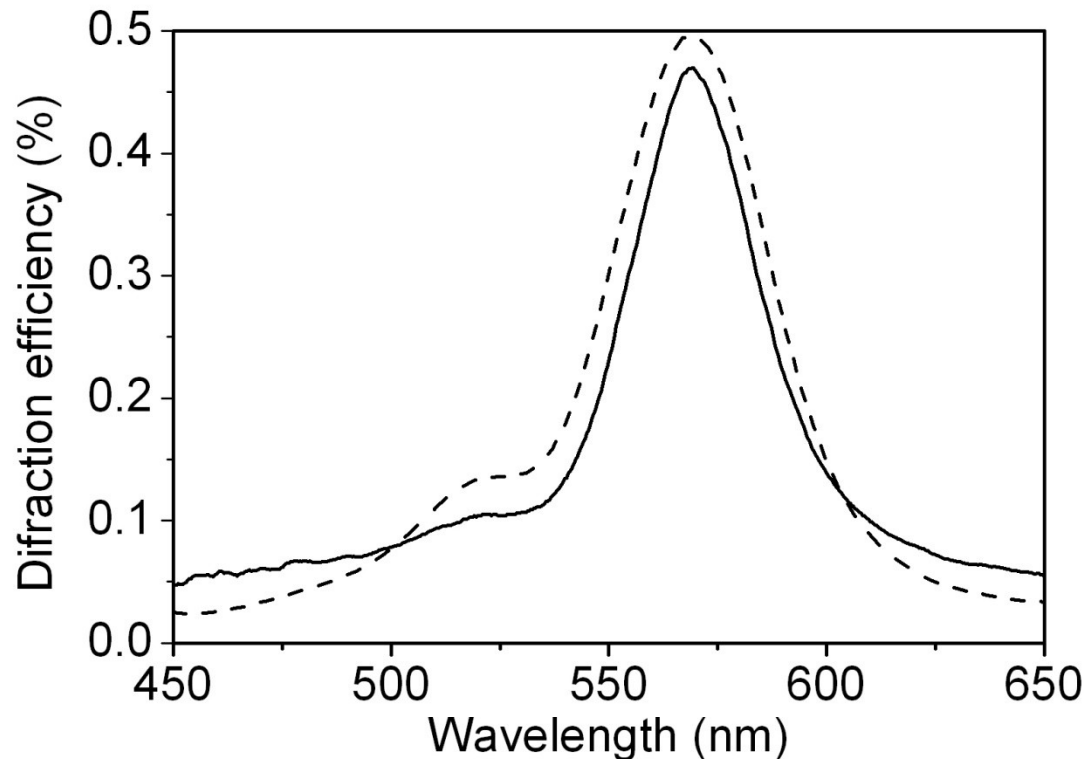


Отношение интенсивностей дифракционных пятен первого и нулевого порядка

$$\eta_{10} = \frac{I_1}{I_0} = \frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{(1 + T^2 - 2T \cos \varphi)}{(1 + T^2 + 2T \cos \varphi)},$$

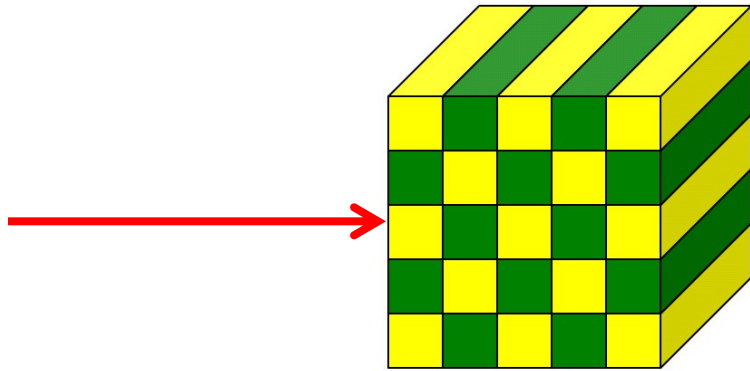
где  $\varphi = 2\pi d(n_r - n_b)/\lambda$  – фазовый контраст дифракционной решетки,  $T$  – пропускание фоторезиста с красителем.

# Зависимости яркости дифракции от длины волны



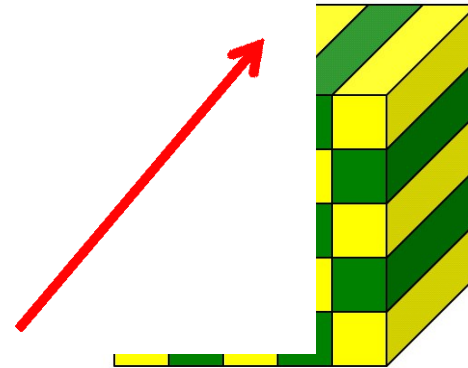
Экспериментальная (сплошная линия) и расчетная (пунктир) кривые отношения интенсивностей дифракционных пятен первого и нулевого порядка для ПРЦП-структуры.

# Зависимости яркости дифракции от длины волны

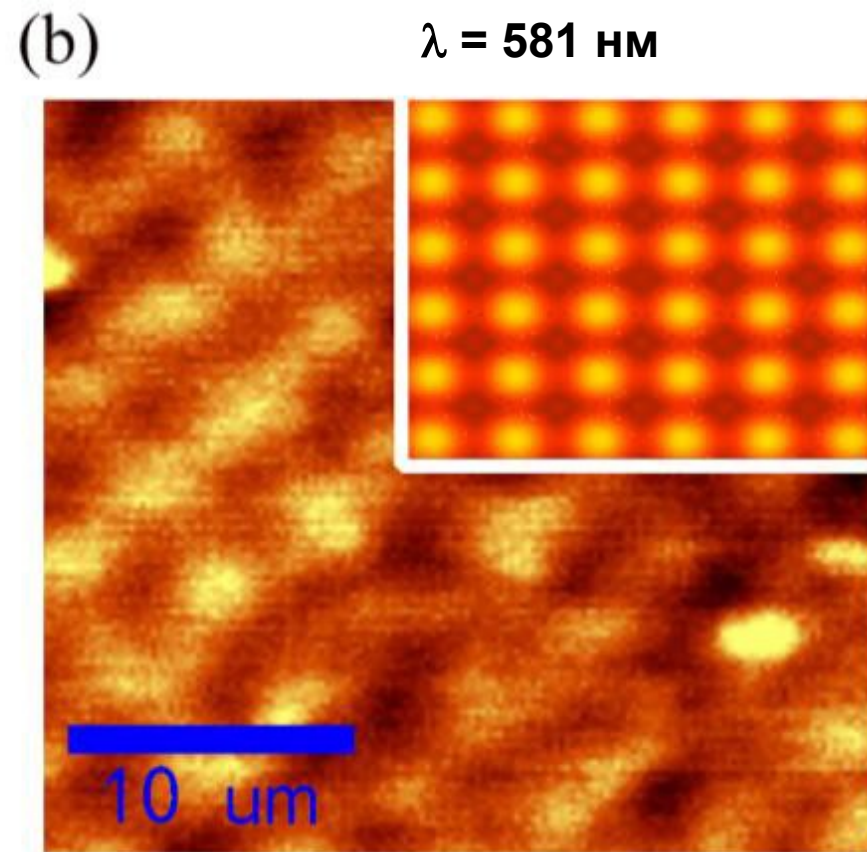
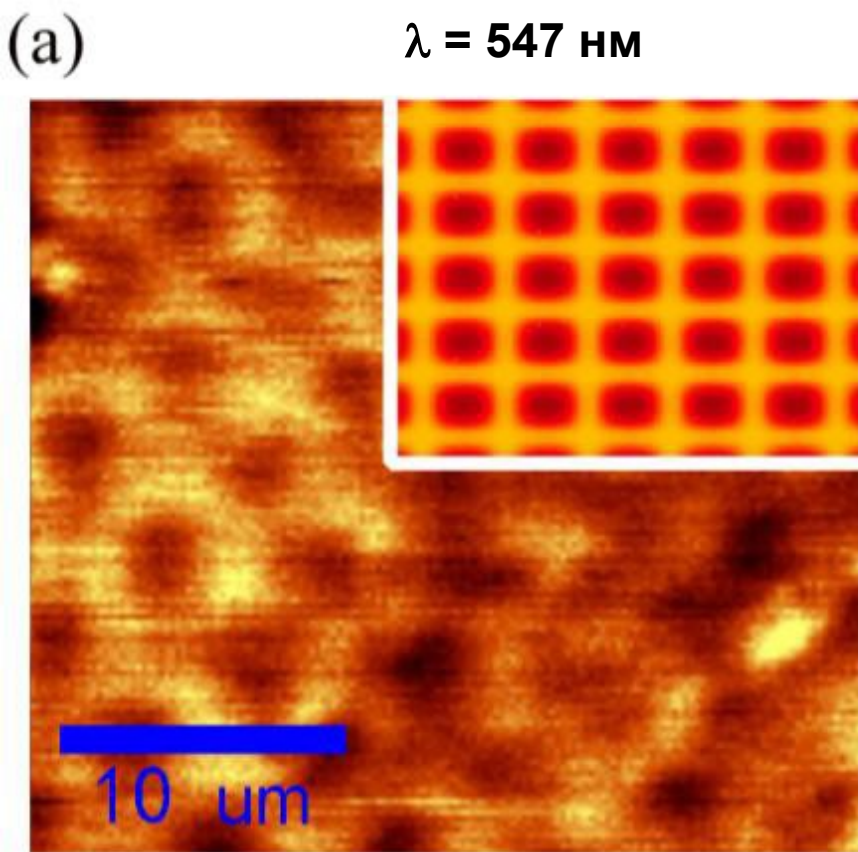


**2D фотонный кристалл**

**2D световодная  
микроструктура**



# Световодные свойства 2D ПРЦП-структуры



**Пропускание 2D ПРЦП-структуры для разных длин волн**

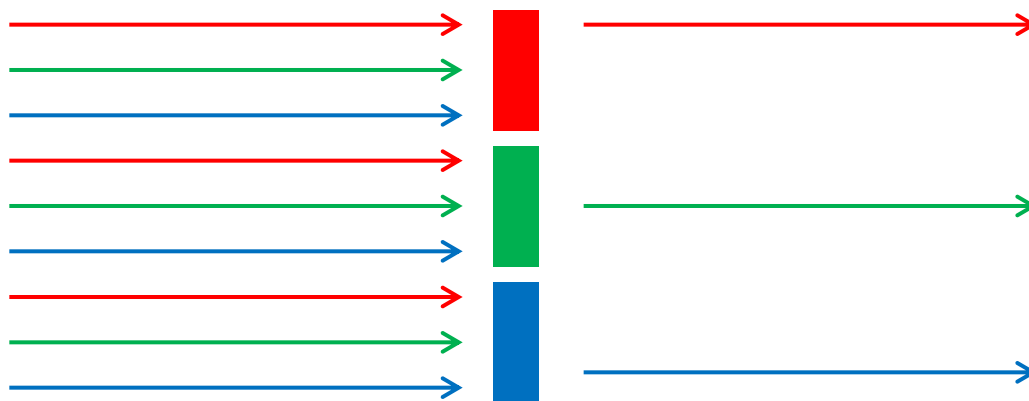
M. Feng et al., Optics Express **19** (2011) 7222.



# Проблема разделения света



## Разделение света с помощью фильтров

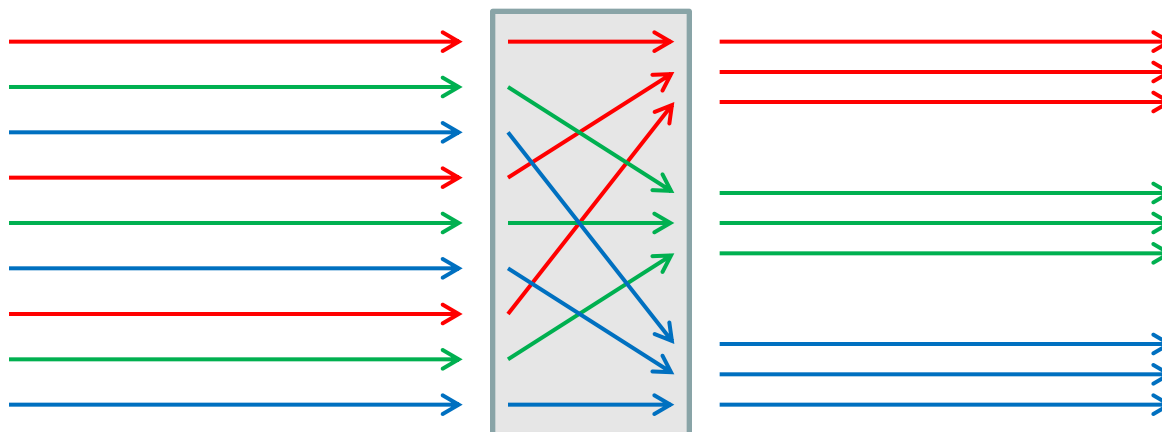


**2/3 мощности теряется!**

# Проблема разделения света



## Перераспределение света в пространстве



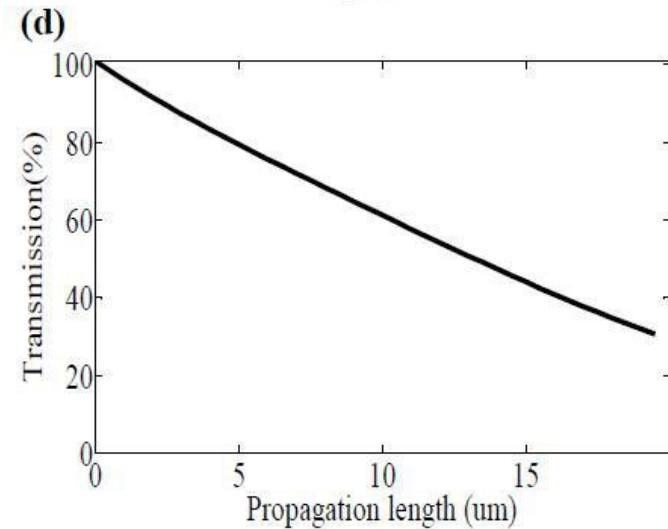
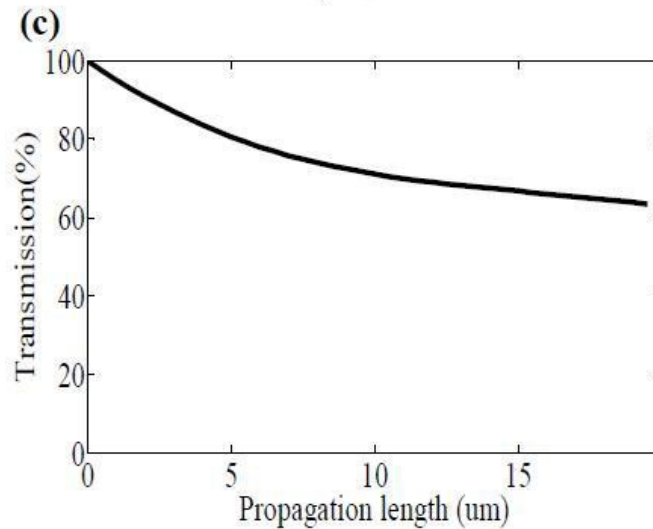
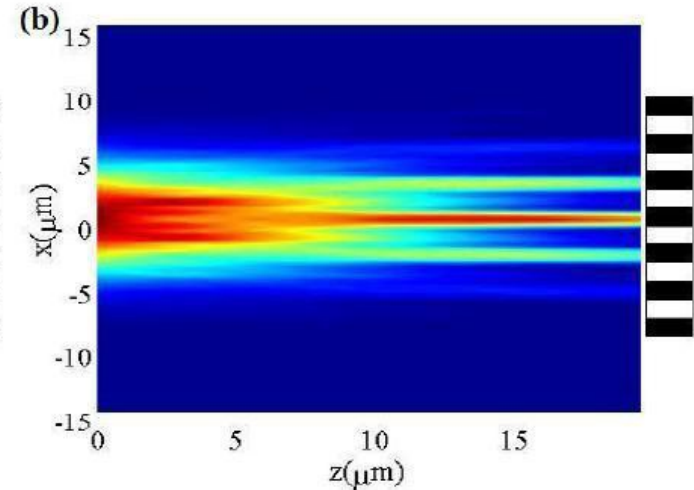
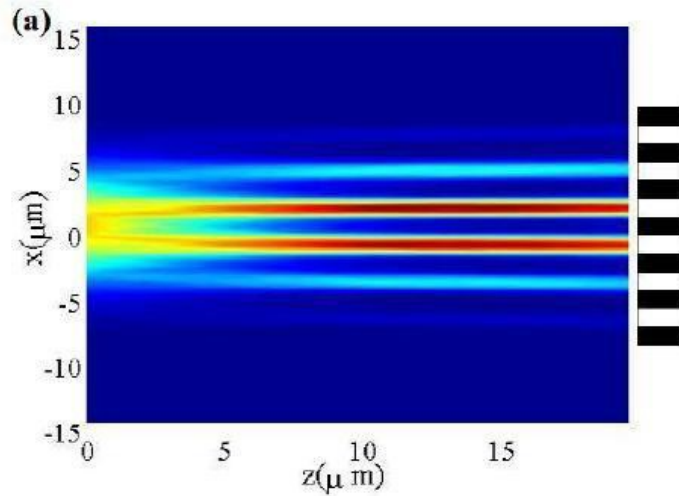
**Нет потерь мощности!**

# Моделирование световодных свойств 1D ПРЦП-структуры

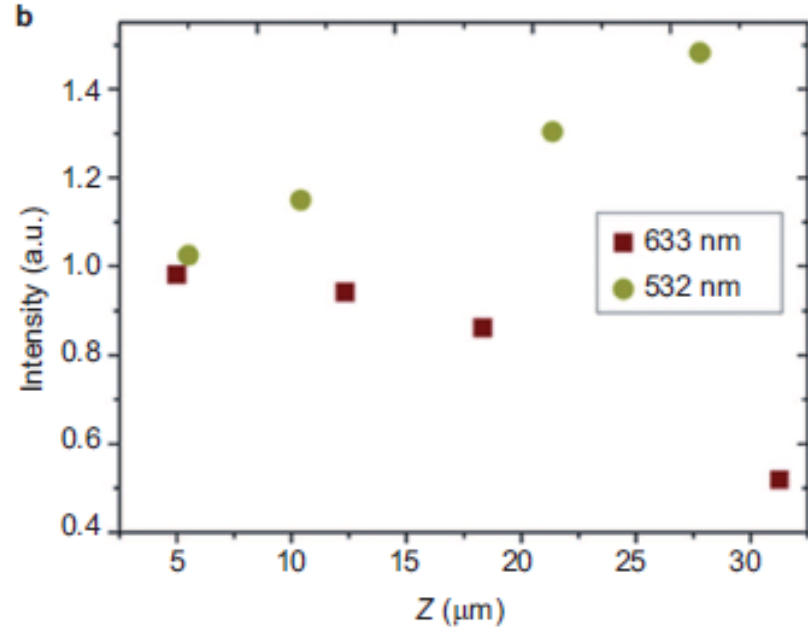
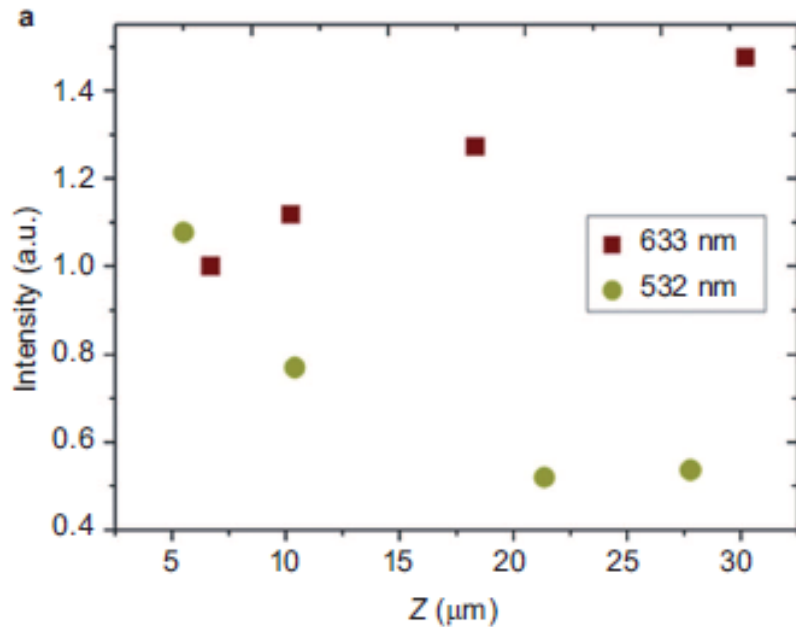


554 нм

574 нм



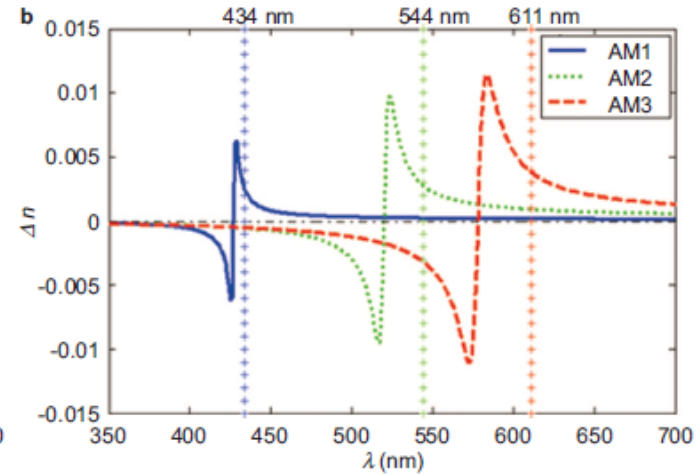
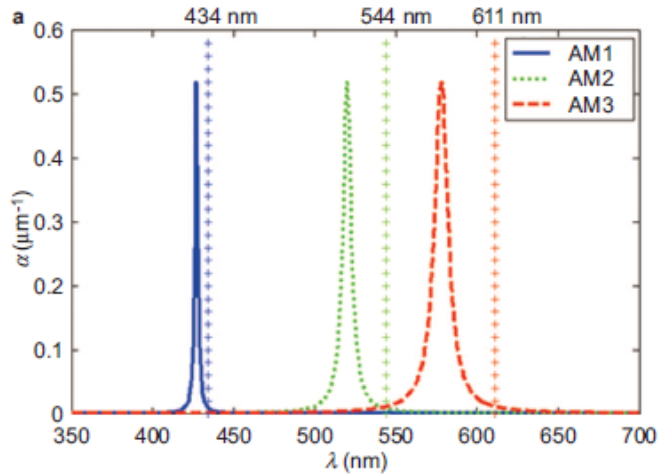
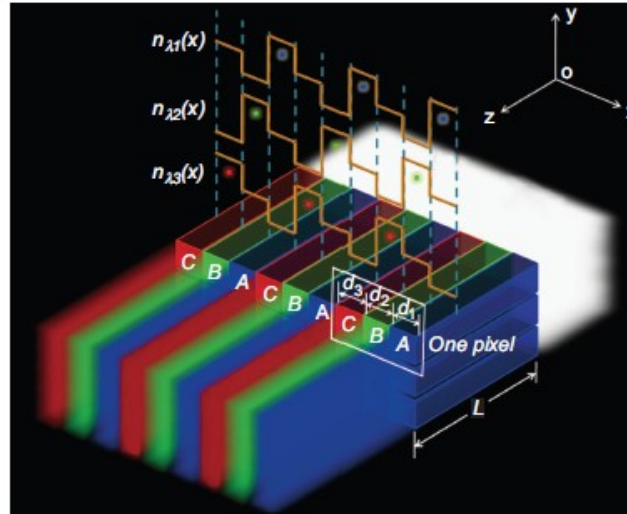
# Экспериментальные данные по световодным свойствам 1D ПРЦП-структуры



**Интенсивность рассеянного света в зависимости от глубины проникновения в 1D ПРЦП-структуру (данные конфокальной микроскопии)**

Y.-K. Liu et al., Light: Science & Applications 2 (2013) e52.

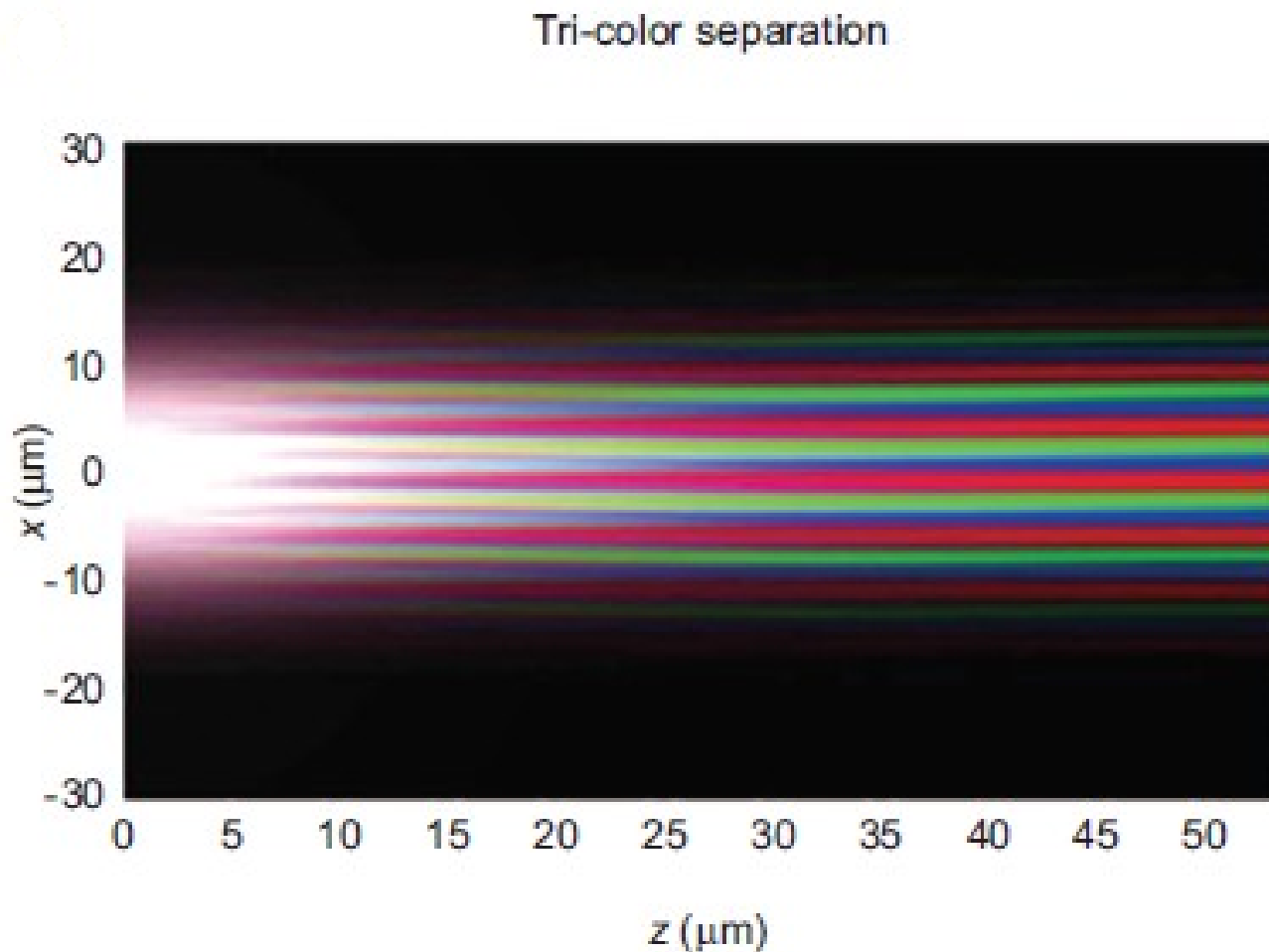
# Трехцветная 1D ПРЦП-структура



Y.-K. Liu et al., Light: Science & Applications 2 (2013) e52.



# Трехцветная 1D ПРЦП-структура

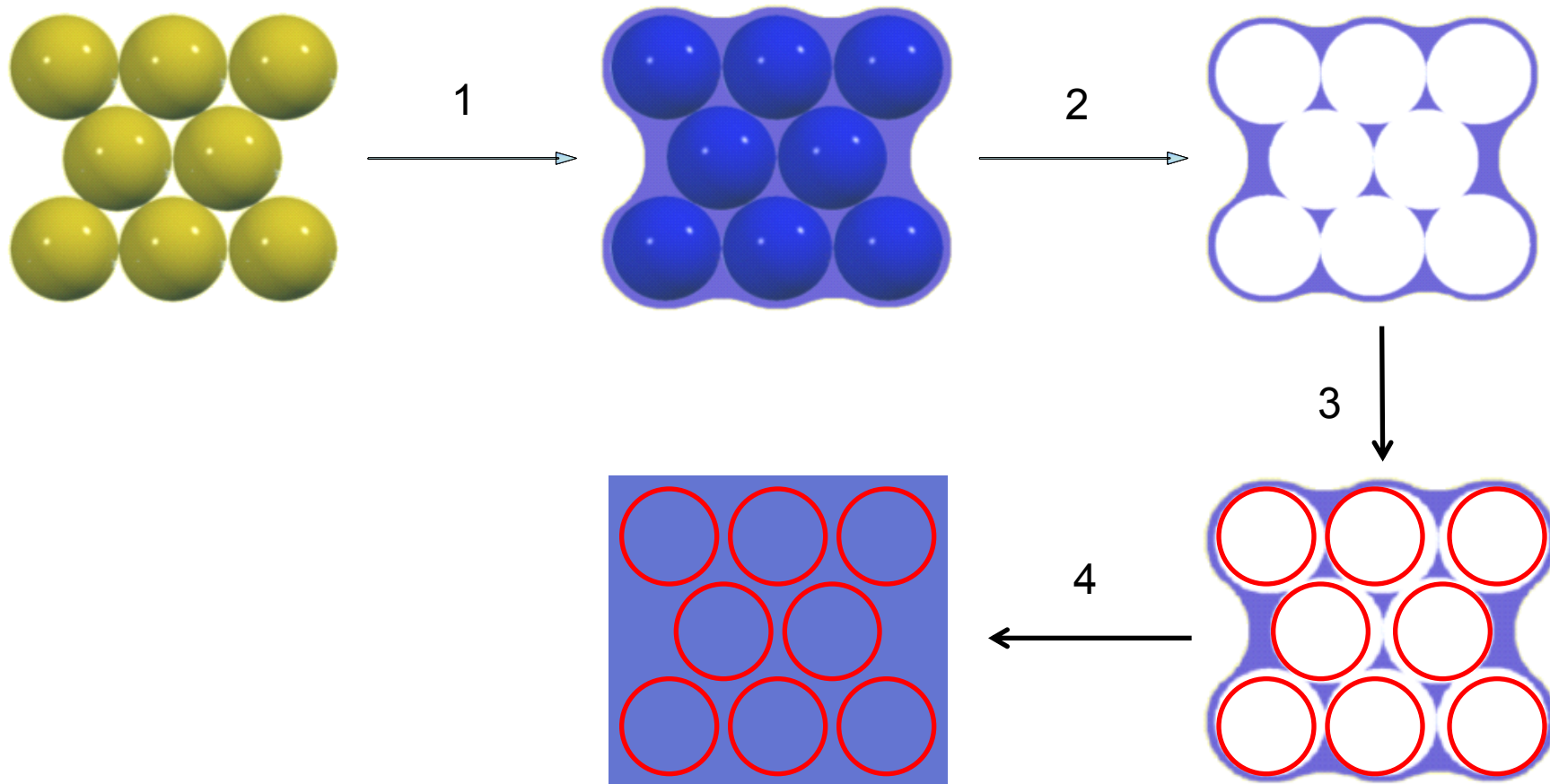


Y.-K. Liu et al., Light: Science & Applications **2** (2013) e52.

# Проблемы



## Изготовление трехмерных ПРЦП-структур:



# Проблемы



**Красители или квантовые точки?**



**Благодарю за внимание!**