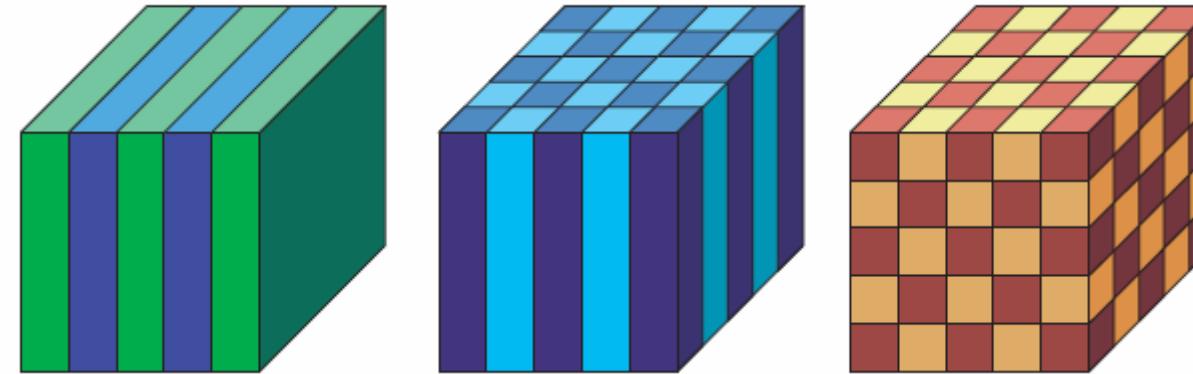


Семинар студентов и аспирантов ИФМ РАН



Фотонные кристаллы

Подготовил А. А. Беспалов

ИФМ РАН, 2013

Что такое фотонный кристалл?

Eli Yablonovitch, Sajeev John, 1987: предложена трёхмерная структура с щелью в спектре фотонов.

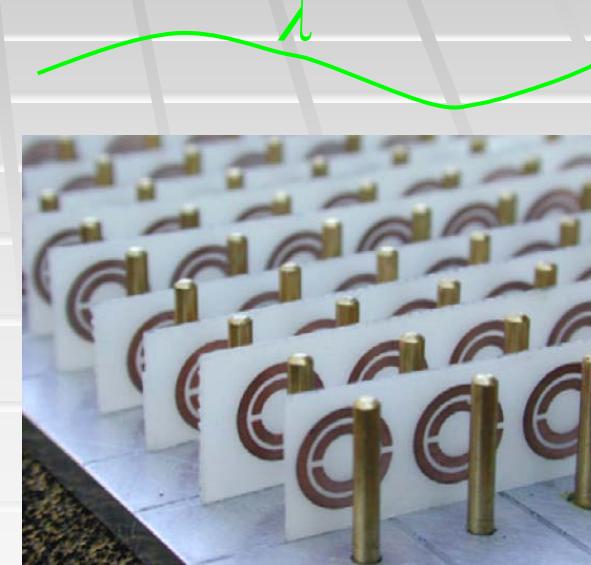
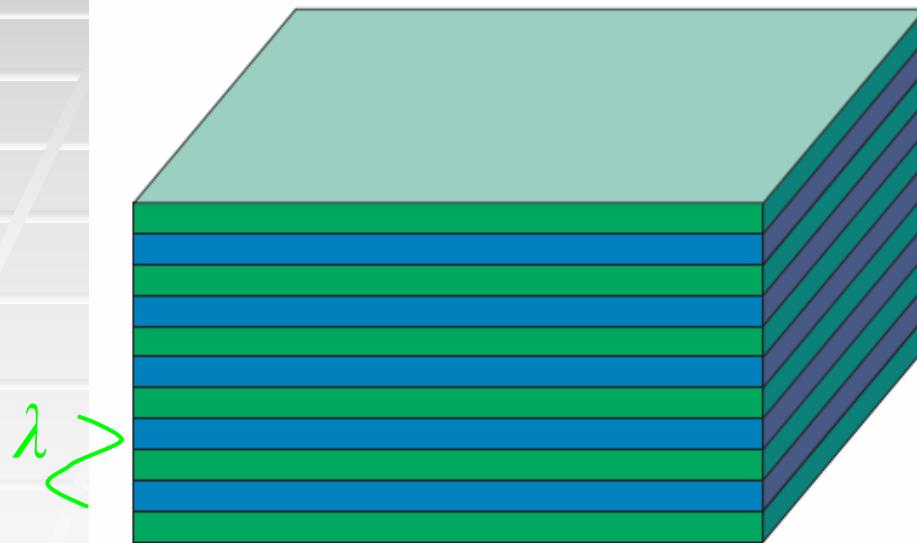
John D. Joannopoulos, “Photonic crystals: molding the flow of light”, 1995.

Фотонный кристалл – среда с периодически меняющейся в пространстве диэлектрической проницаемостью.

Фотонные кристаллы

vs.

Метаматериалы



План доклада

- Общая теория. Аналогии между квантовой механикой и линейной электродинамикой.
- Классы фотонных кристаллов.
- Устройства, использующие фотонные кристаллы.
- Необычные явления в фотонных кристаллах.

Общая теория: аналогии между квантовой механикой и линейной электродинамикой.

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \mathbf{H} = -\frac{i\varepsilon(\mathbf{r})\omega}{c} \mathbf{E} \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} = \frac{i\omega}{c} \mathbf{H} \end{cases}$$



$$\hat{\Theta} \mathbf{H} = \frac{\omega^2}{c^2} \mathbf{H}$$
$$\hat{\Theta} = \operatorname{rot} \frac{1}{\varepsilon(\mathbf{r})} \operatorname{rot}$$

+ граничные условия:
нулевые на бесконечности;
условия Борна-Кармана.

Оператор $\hat{\Theta}$ эрмитов!

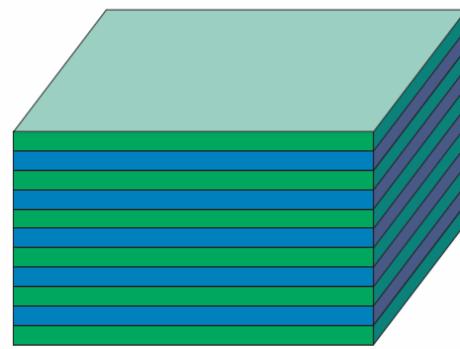
$$\delta \frac{\int \mathbf{H}^* \hat{\Theta} \mathbf{H} d^3 r}{\int |\mathbf{H}|^2 d^3 r} = 0$$

- Вариационный принцип.
- Теория возмущений (в том числе для учёта диссипации).
- Приложения теории групп, в том числе – **теорема Блоха**.

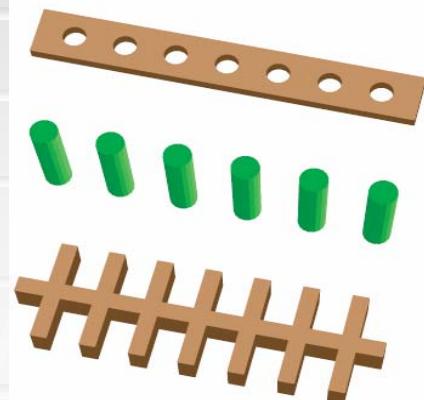
-
- Масштабируемость: $\varepsilon(\mathbf{r}) \rightarrow \varepsilon\left(\frac{\mathbf{r}}{s}\right)$  $\omega \rightarrow \frac{\omega}{s}$

Классификация фотонных кристаллов

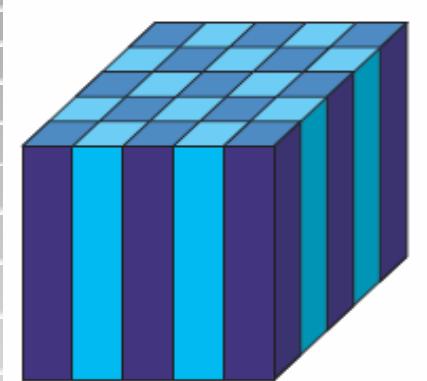
Одномерные



Периодические
диэлектрические
волноводы

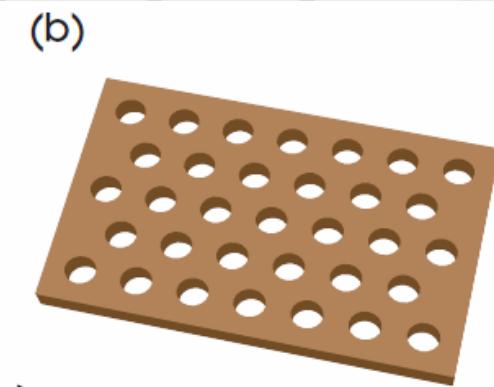
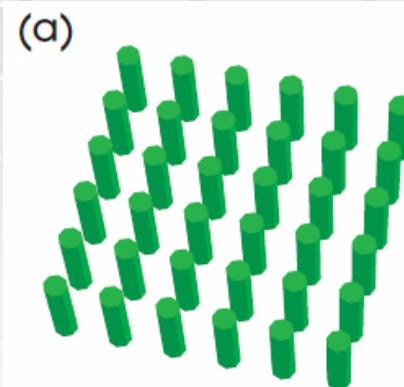
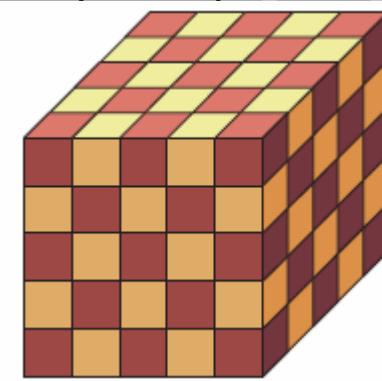


Двумерные

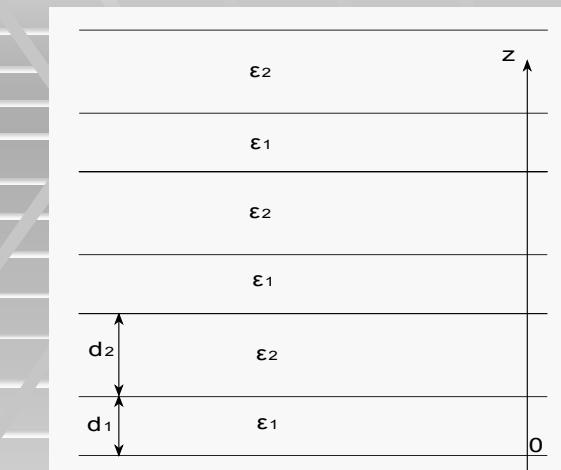


Пластины (Slabs)

Трёхмерные



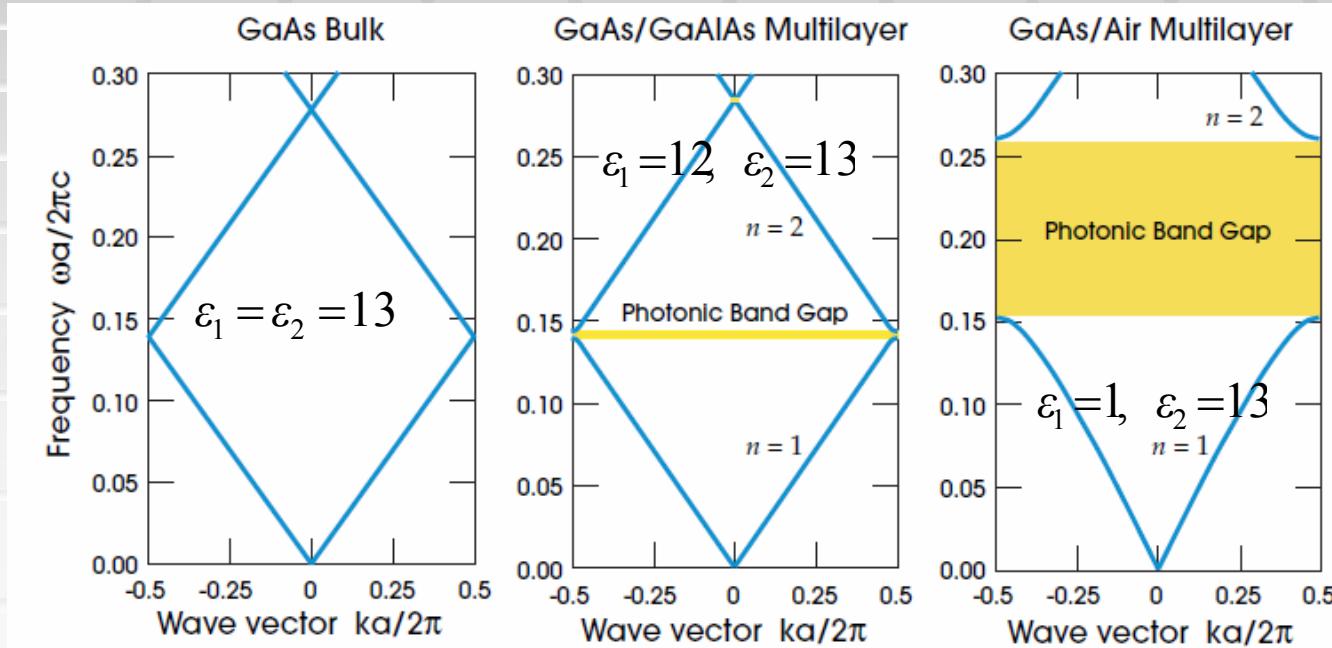
Одномерные фотонные кристаллы



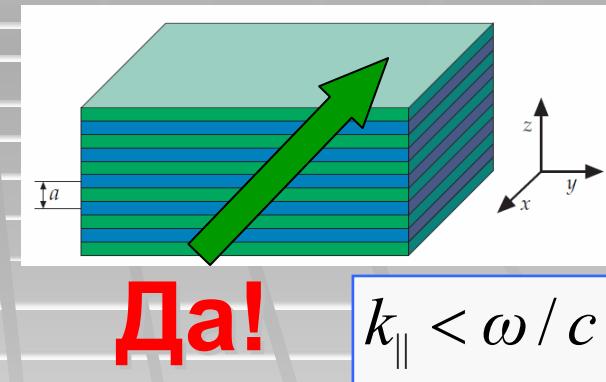
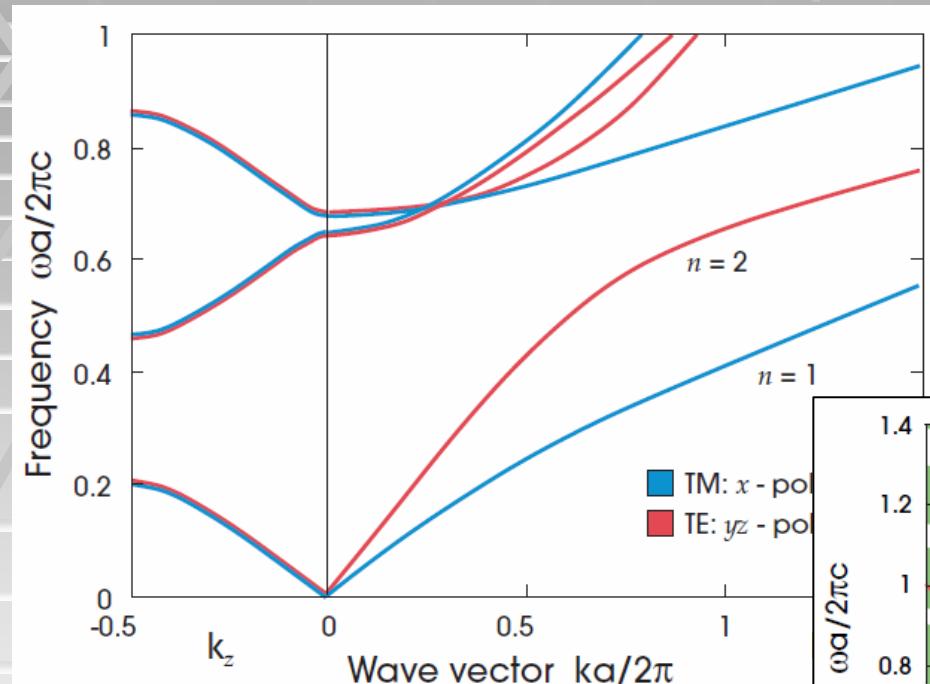
TM: $\cos k_z d + \left(\frac{k_2 \epsilon_1}{k_1 \epsilon_2} + \frac{k_1 \epsilon_2}{k_2 \epsilon_1} \right) \sin k_1 d_1 \sin k_2 d_2 - 2 \cos k_1 d_1 \cos k_2 d_2 = 0.$

TE: $\cos k_z d + \left(\frac{k_2}{k_1} + \frac{k_1}{k_2} \right) \sin k_1 d_1 \sin k_2 d_2 - 2 \cos k_1 d_1 \cos k_2 d_2 = 0.$

$$k_{1,2}^2 = \epsilon_{1,2} \frac{\omega^2}{c^2} - k_{\parallel}^2$$

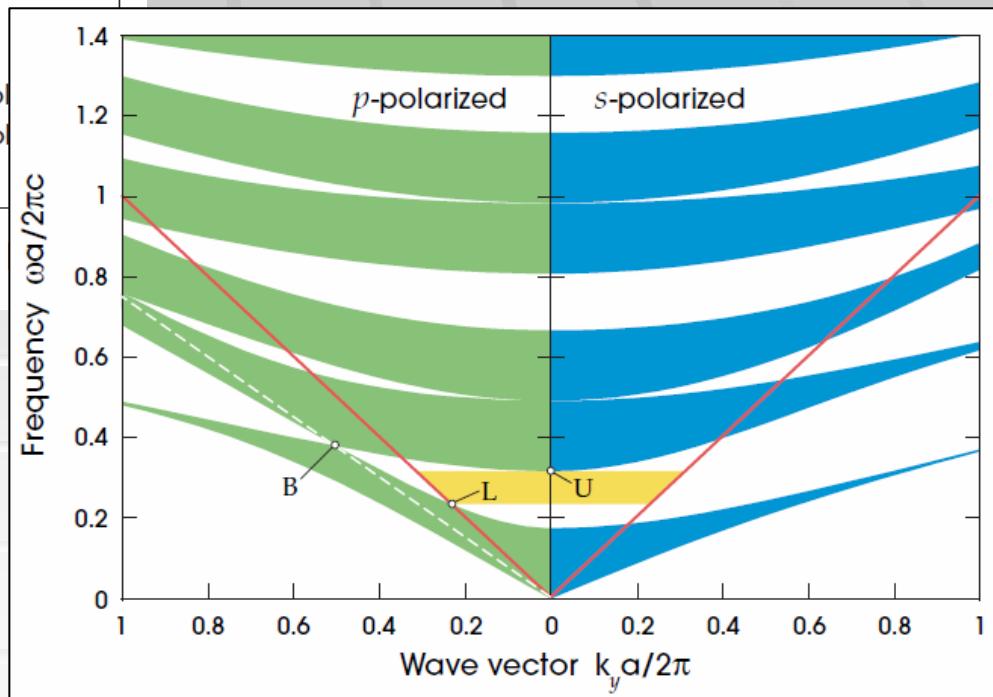


Распространение под углом к нормали



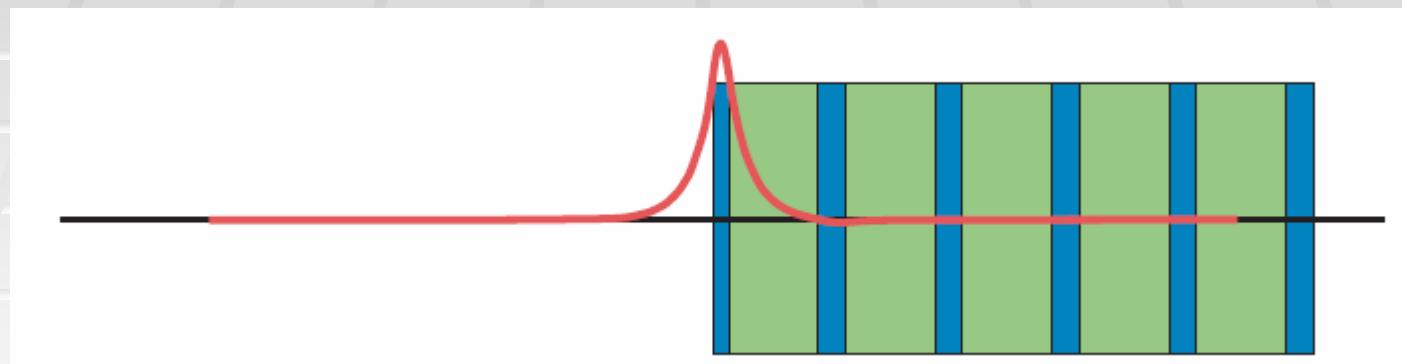
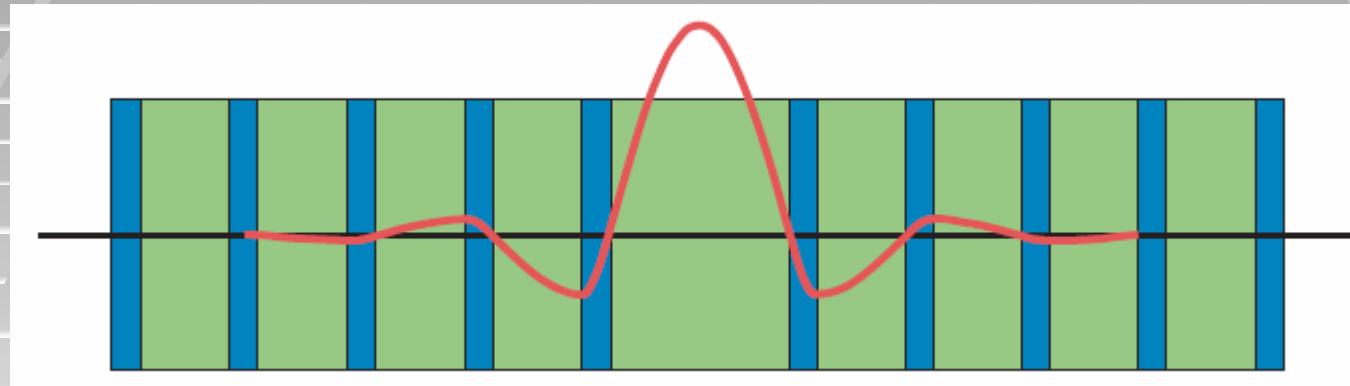
Да!

$$k_{\parallel} < \omega / c$$

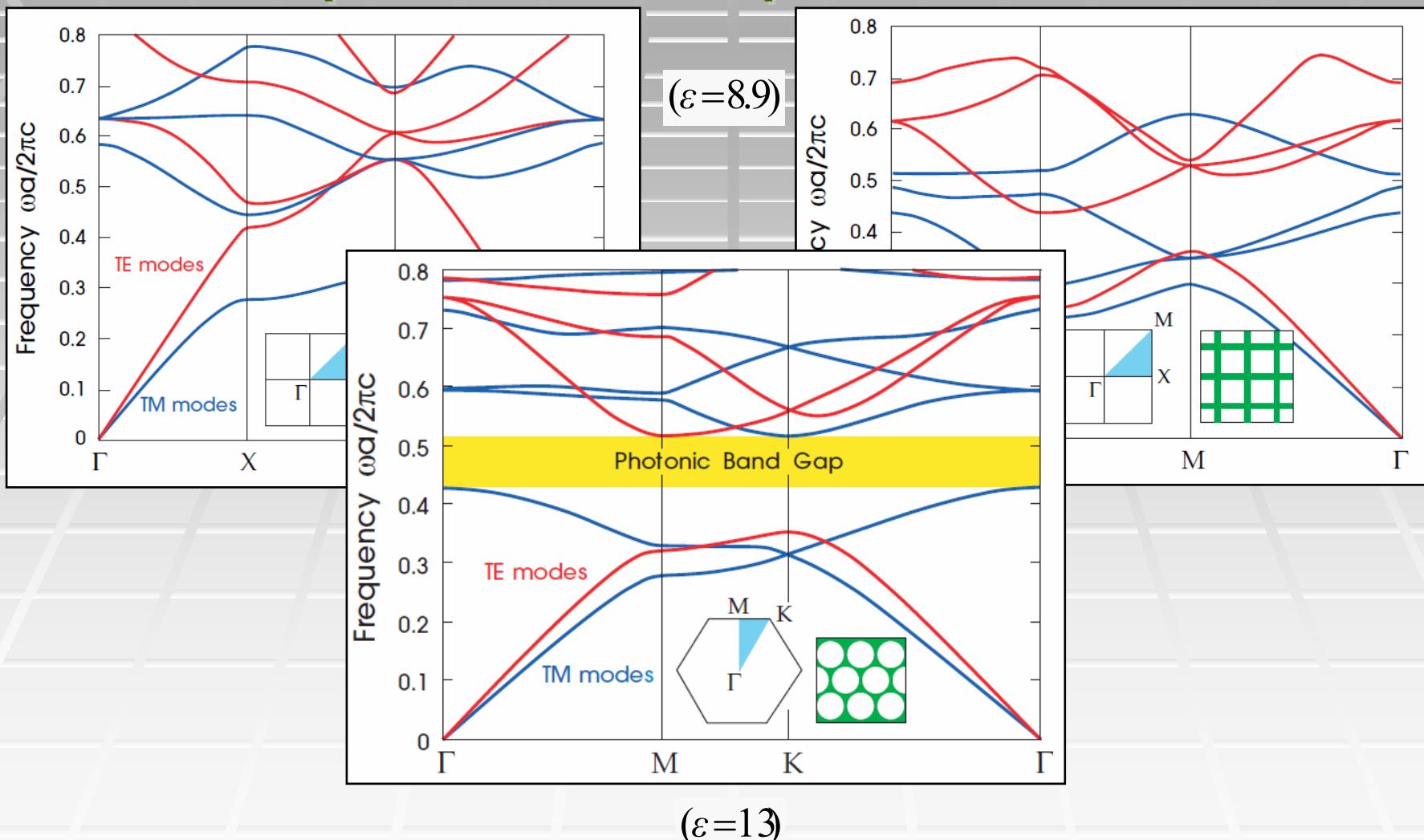


При распространении под углом к нормали запрещённой зоны нет.
Можно ли сделать многослойную структуру, отражающую свет, падающий по произвольным углом?

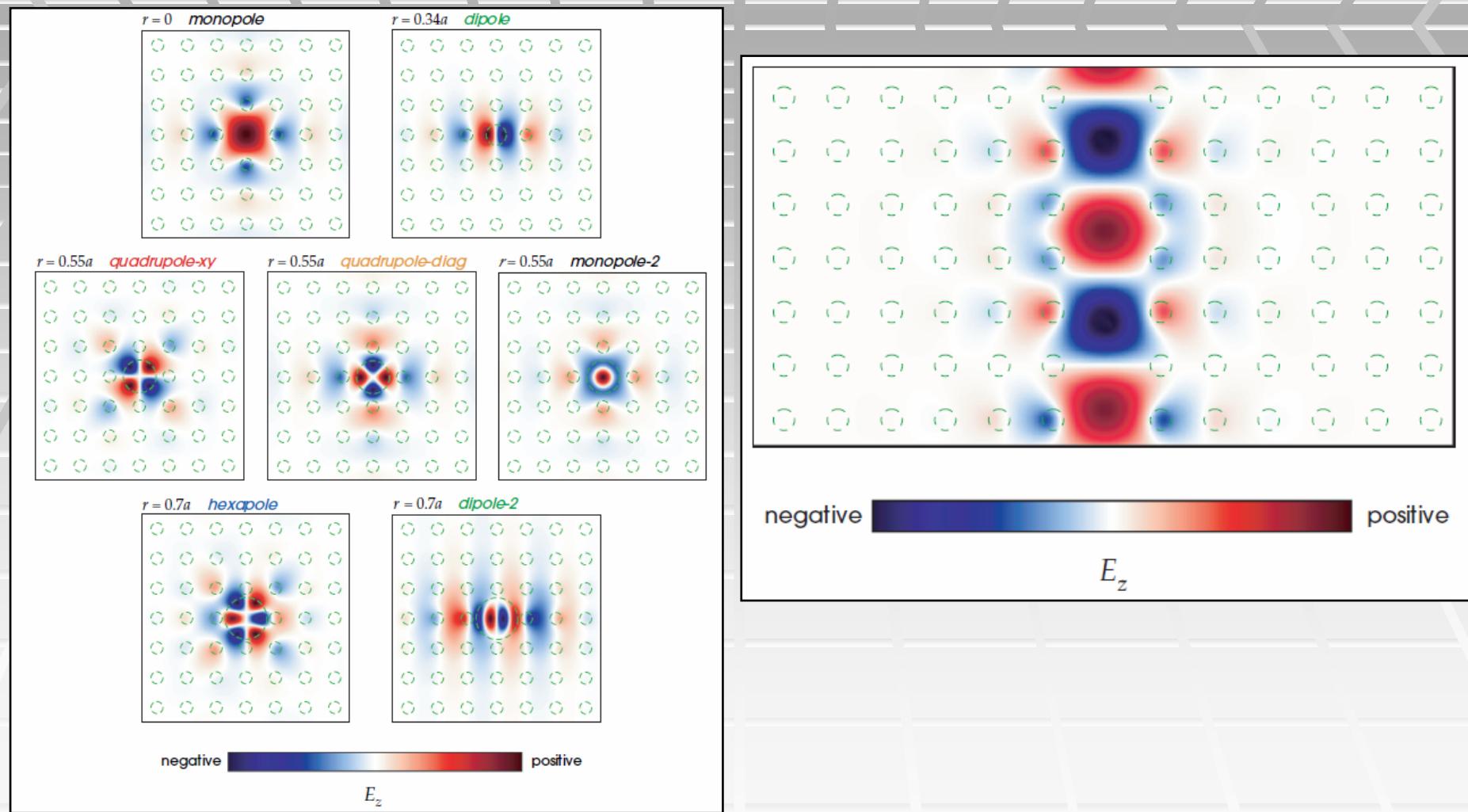
Локализованные состояния на дефектах



Характерные спектры двумерных фотонных кристаллов

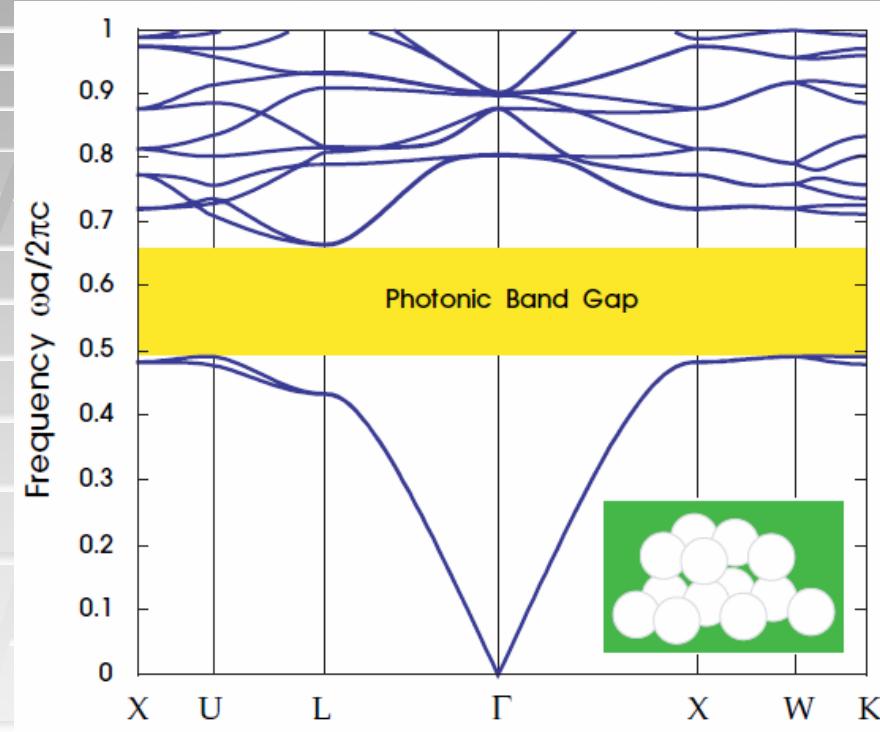


Локализованные состояния на дефектах



Трёхмерные фотонные кристаллы с щелью в спектре

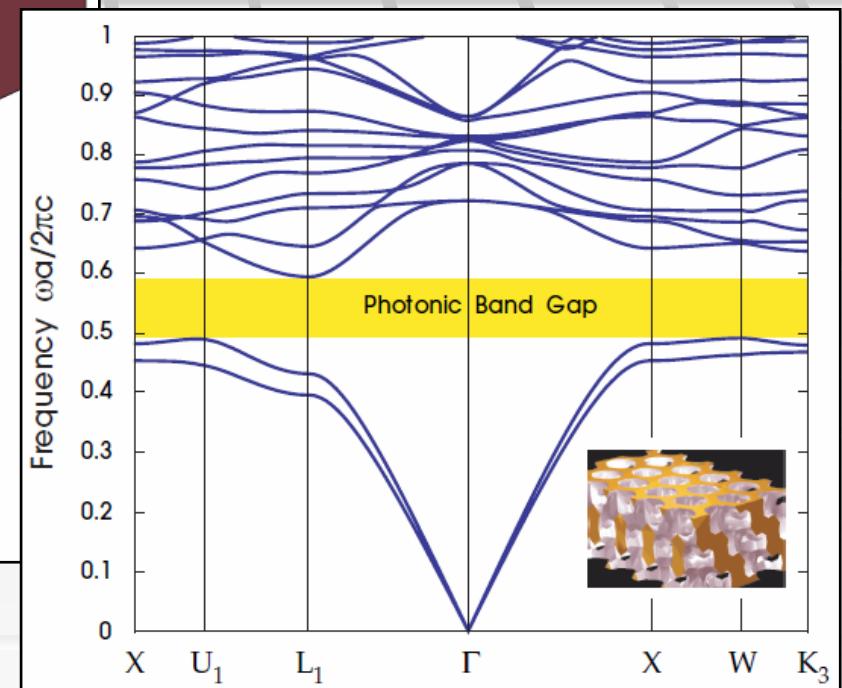
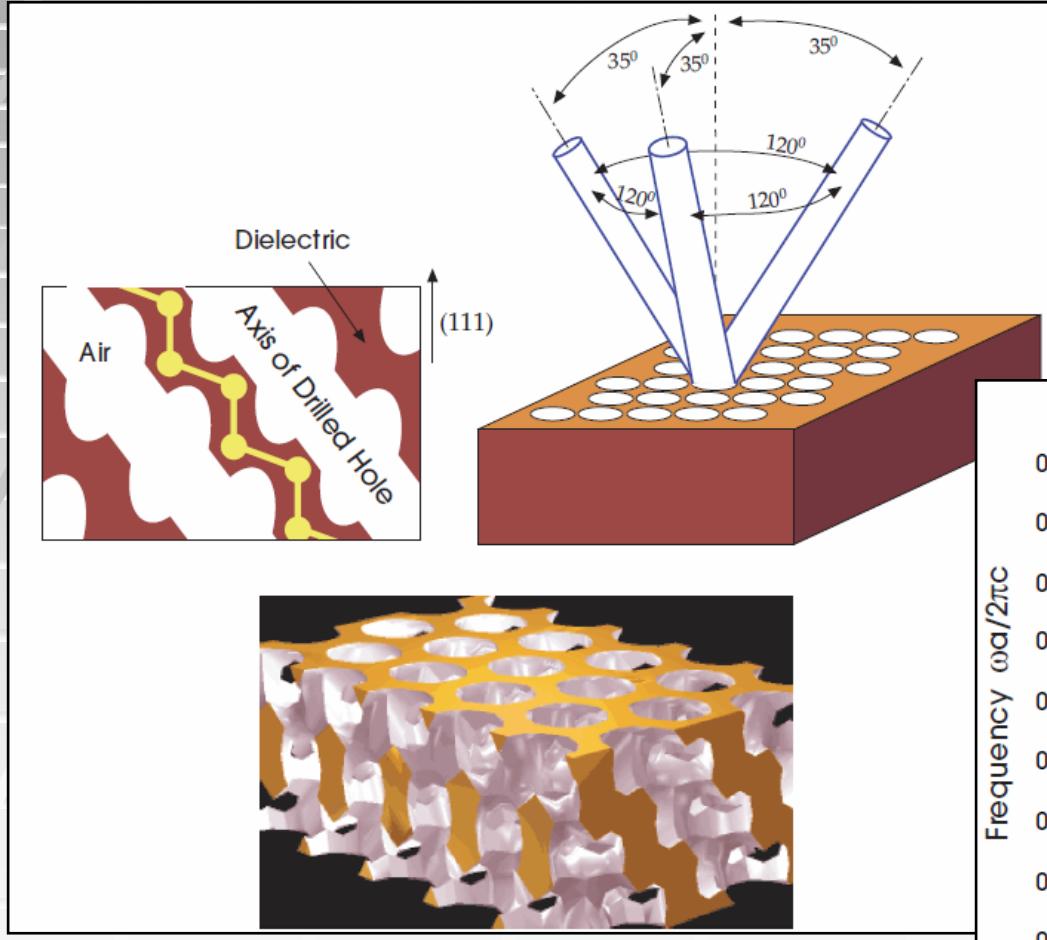
Ho et al., (1990)



Диэлектрик ($\epsilon=13$), из которого вырезаны сферы с центрами в узлах решётки алмаза.

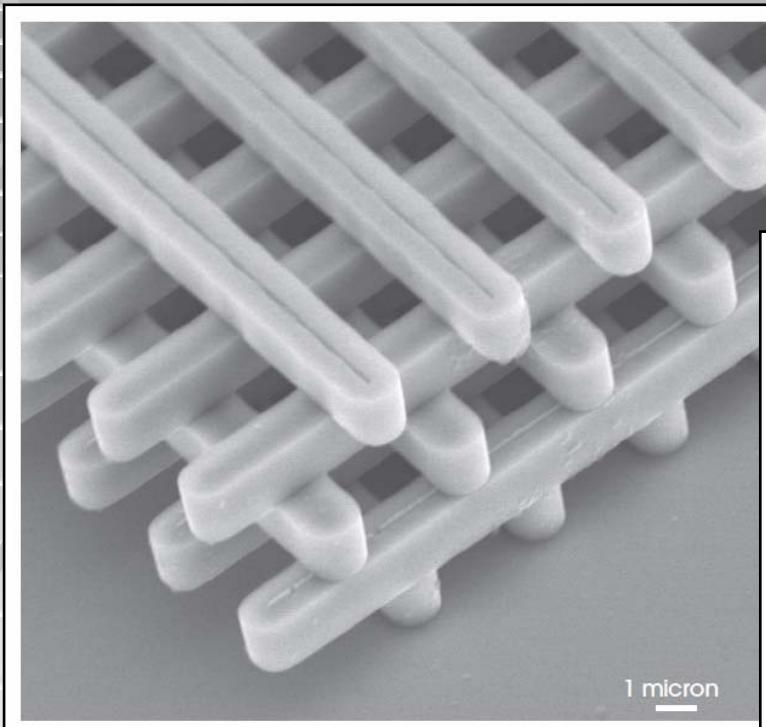
Яблонович

Eli Yablonovitch et al. (1991)



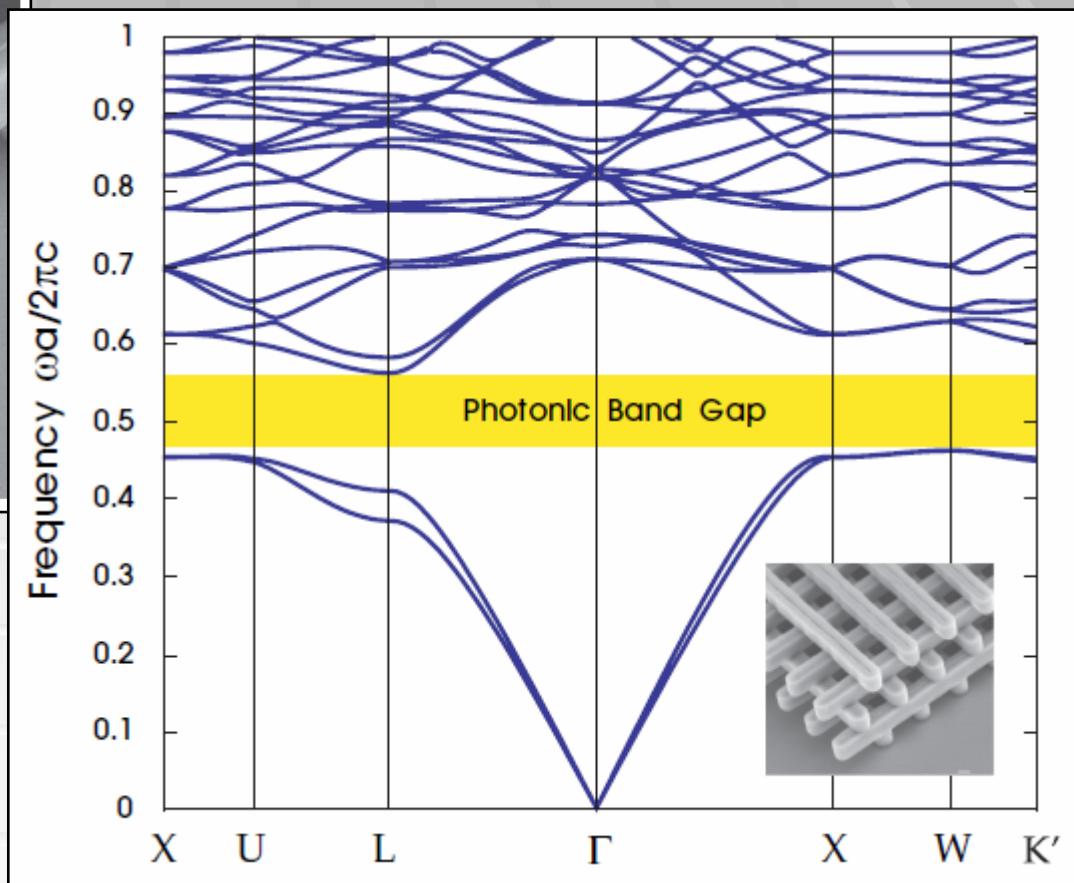
Woodpile crystal

Lin et al., 1998



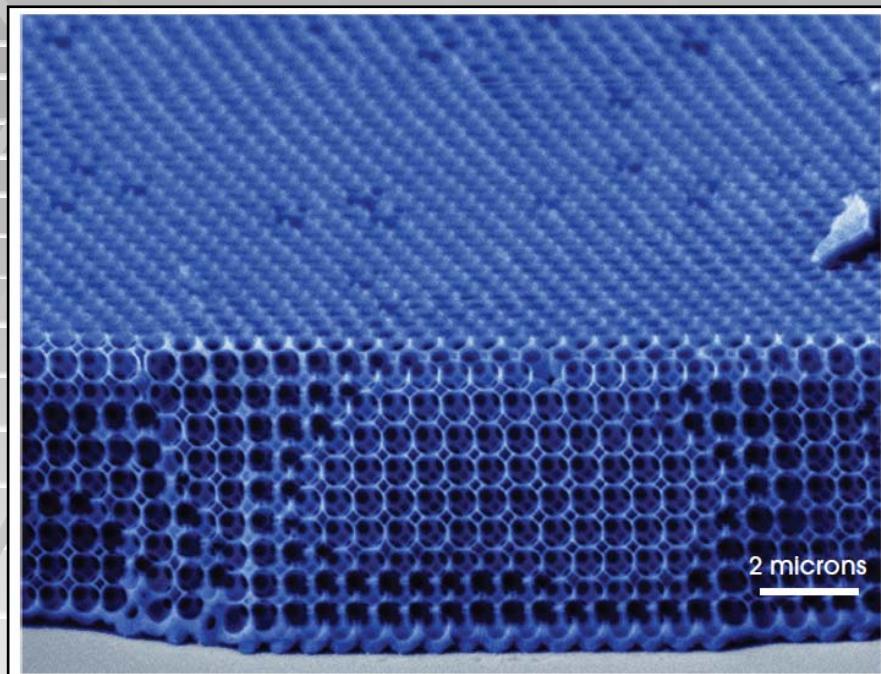
$$\lambda_c = 12 \mu\text{m}$$

В 1999 г. получили $\lambda_c = 1.6 \mu\text{m}$

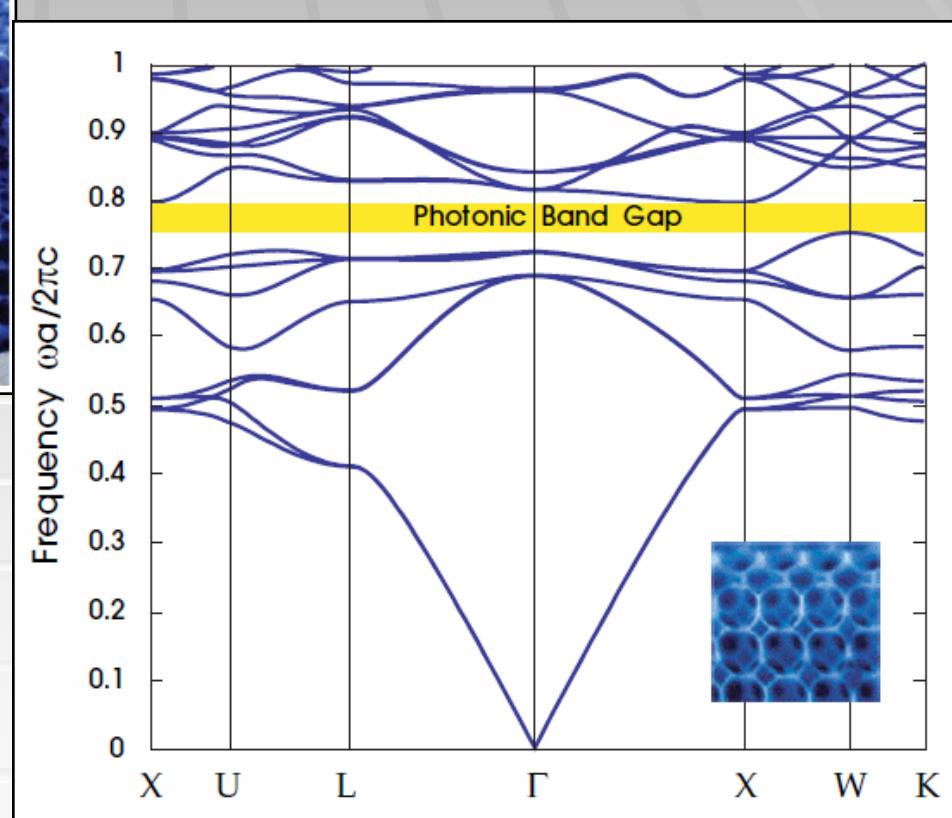


Обратный опал

Vlasov et al., 2001

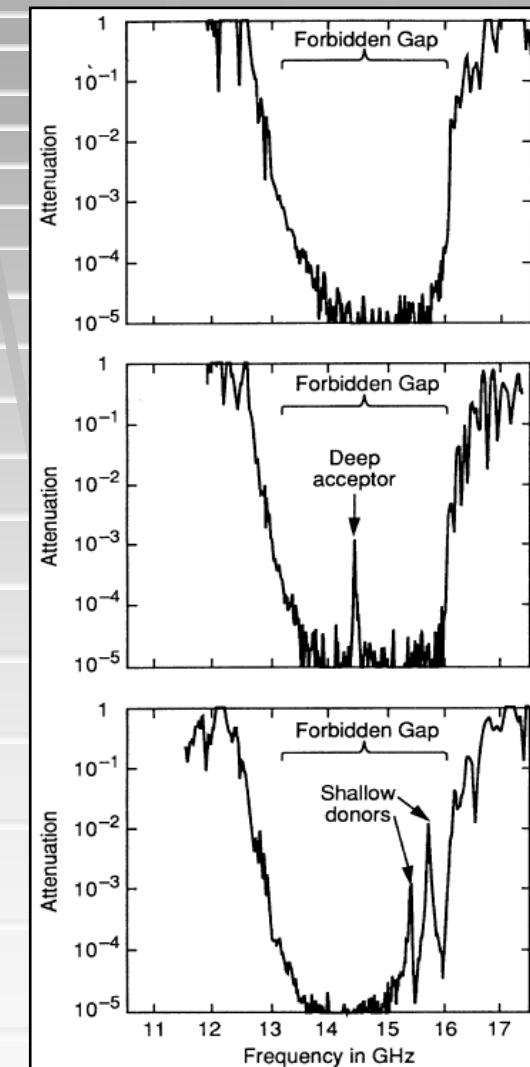
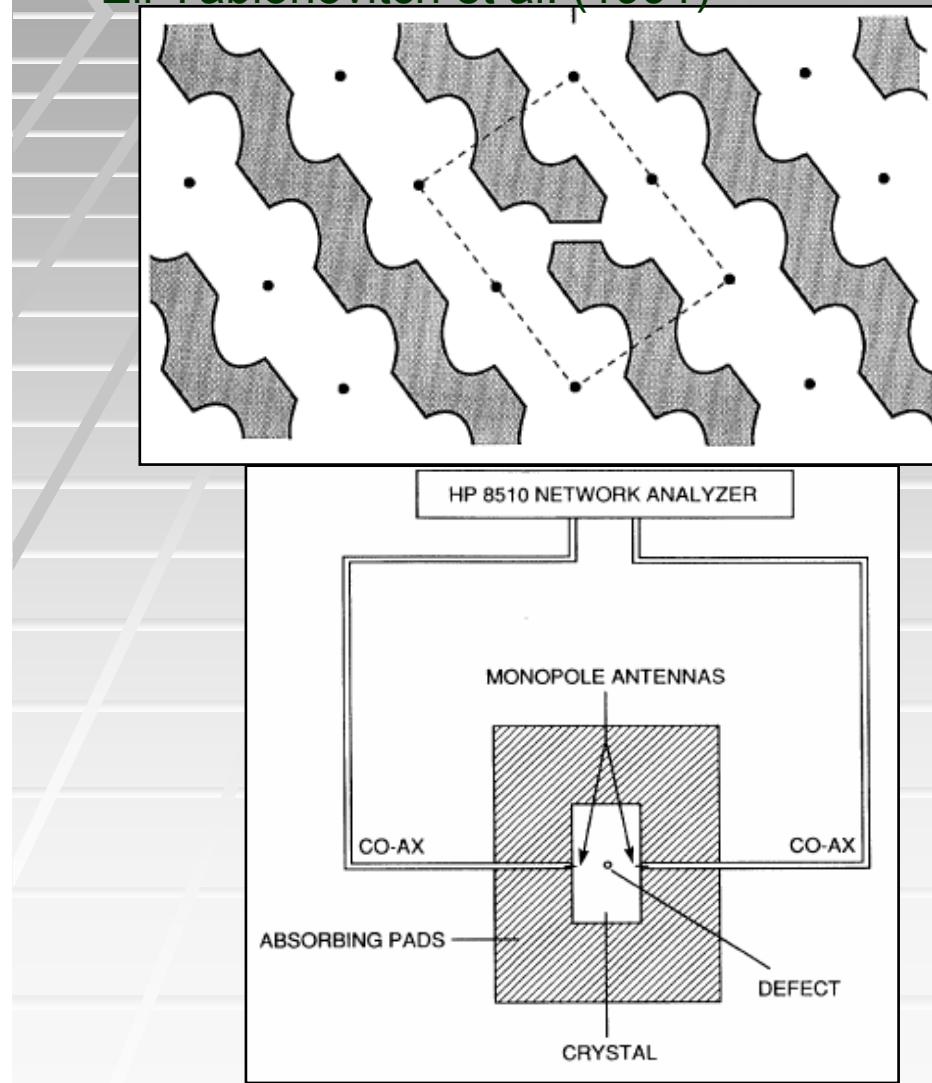


$$\lambda_c = 1.3 \mu\text{m}$$

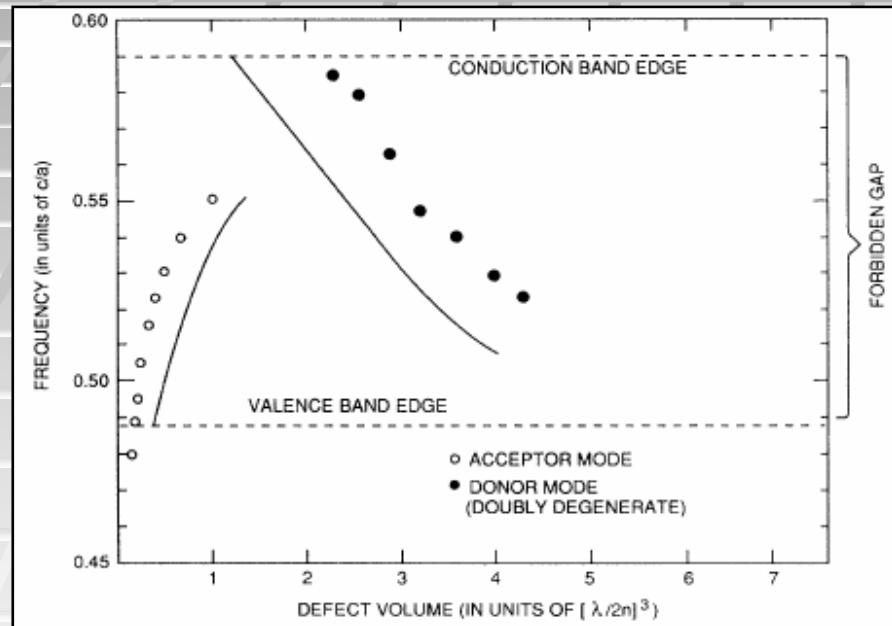


Наблюдение локализованных мод в Яблоновите

Eli Yablonovitch et al. (1991)



Наблюдение локализованных мод в Яблоновите

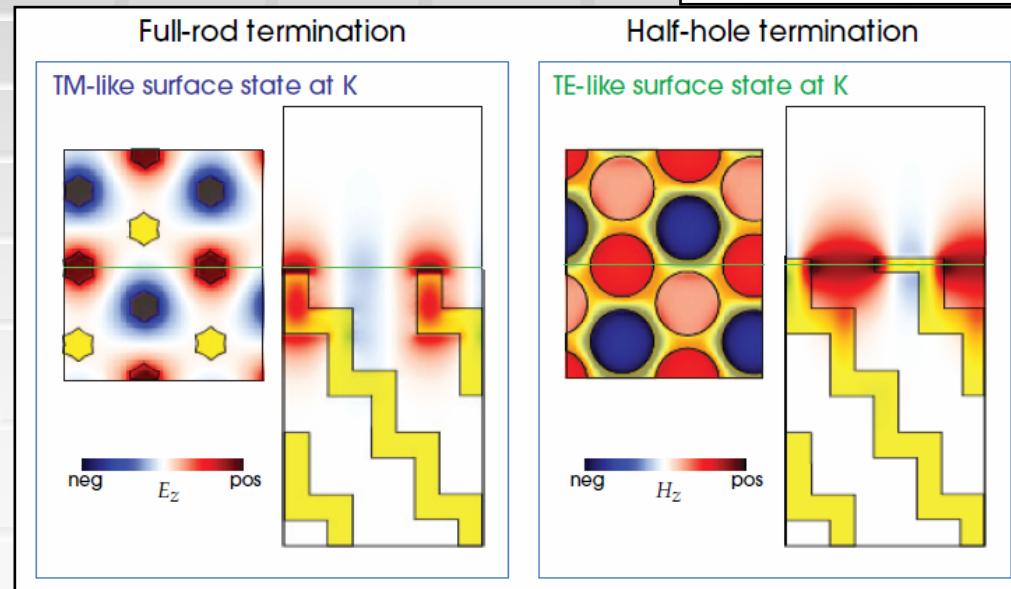
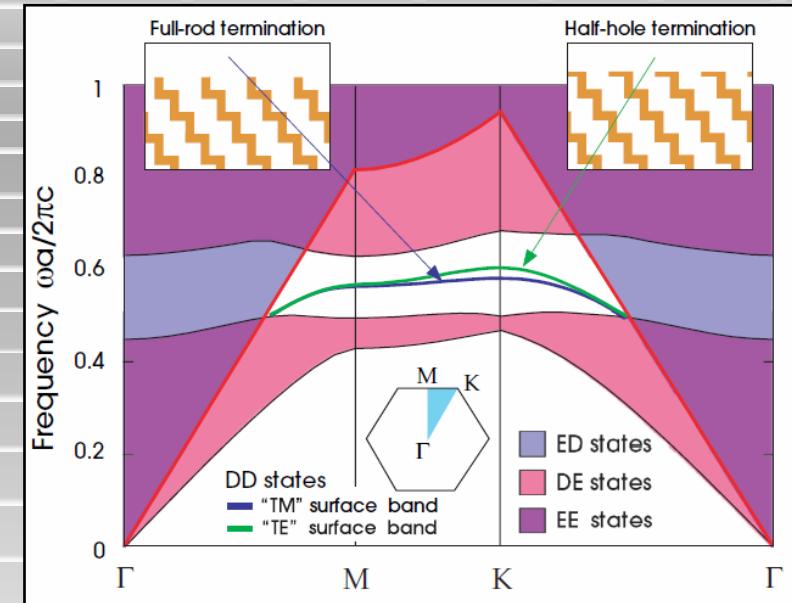
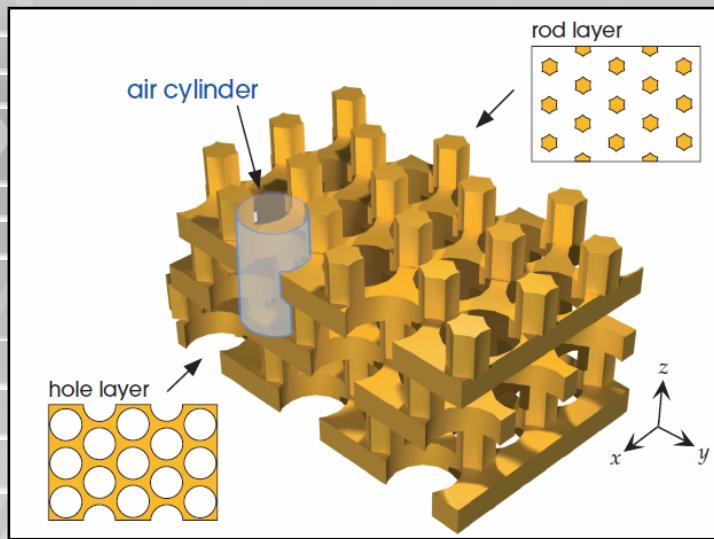


$$\frac{\omega^2}{c^2} = \frac{\int \varepsilon^{-1}(\mathbf{r}) |\operatorname{rot} \mathbf{H}|^2 d^3 r}{\int |\mathbf{H}|^2 d^3 r}$$

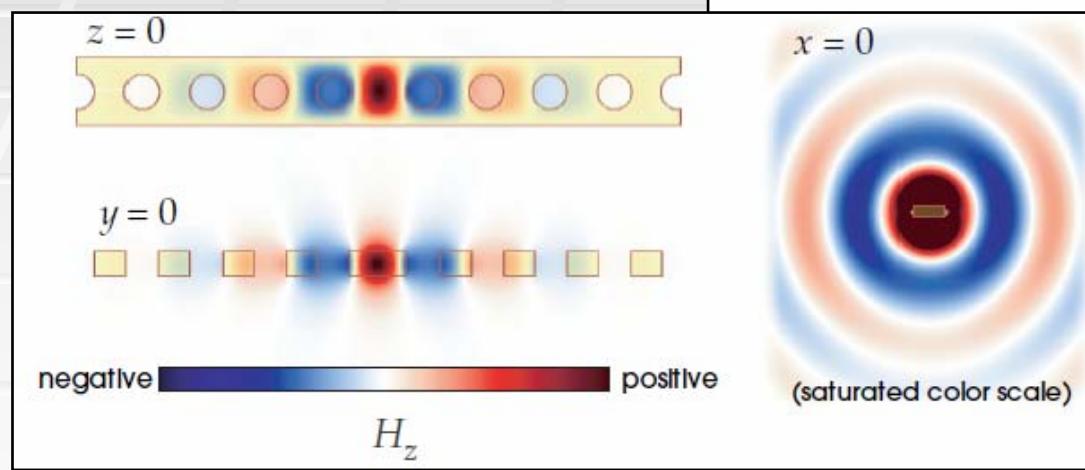
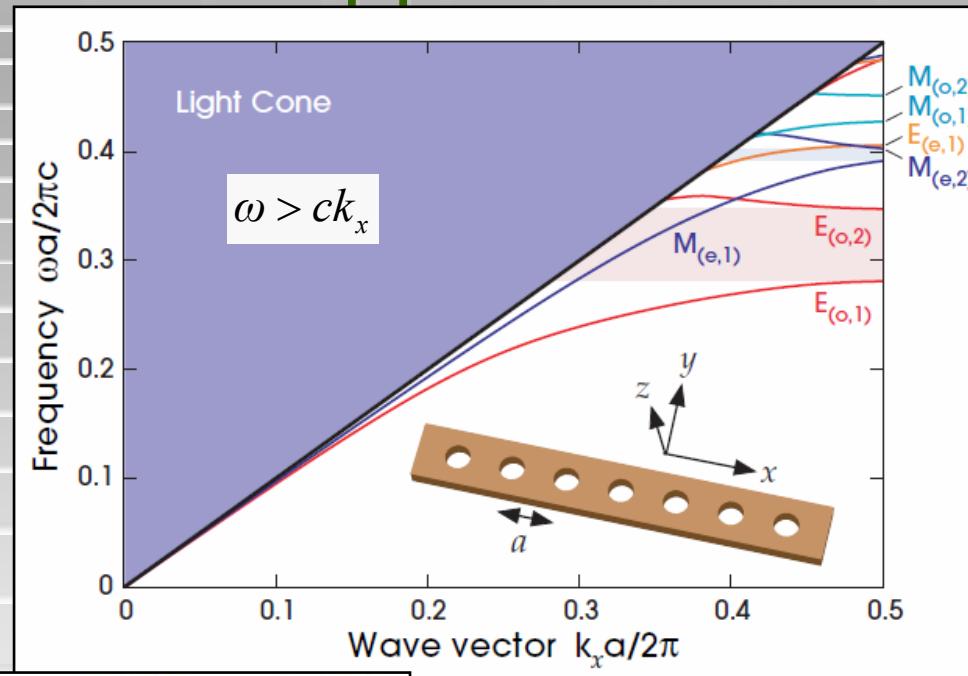
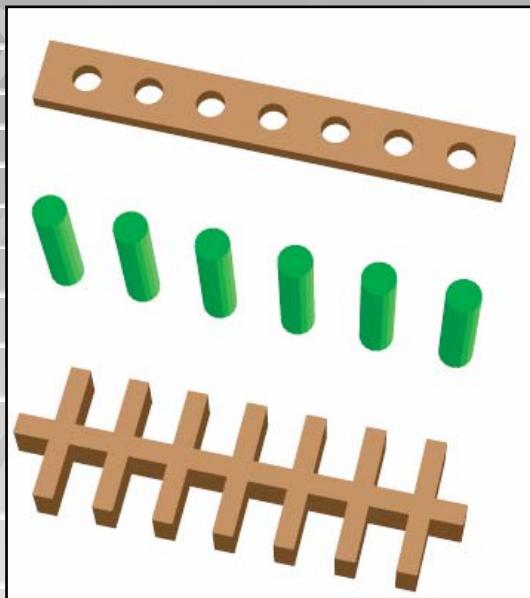
$$\Delta \frac{\omega^2}{c^2} = - \frac{\int \Delta \varepsilon(\mathbf{r}) \varepsilon^{-2}(\mathbf{r}) |\operatorname{rot} \mathbf{H}|^2 d^3 r}{\int |\mathbf{H}|^2 d^3 r}$$

$$\Delta \varepsilon > 0 \Rightarrow \Delta \omega < 0, \quad \Delta \varepsilon < 0 \Rightarrow \Delta \omega > 0$$

Поверхностные состояния

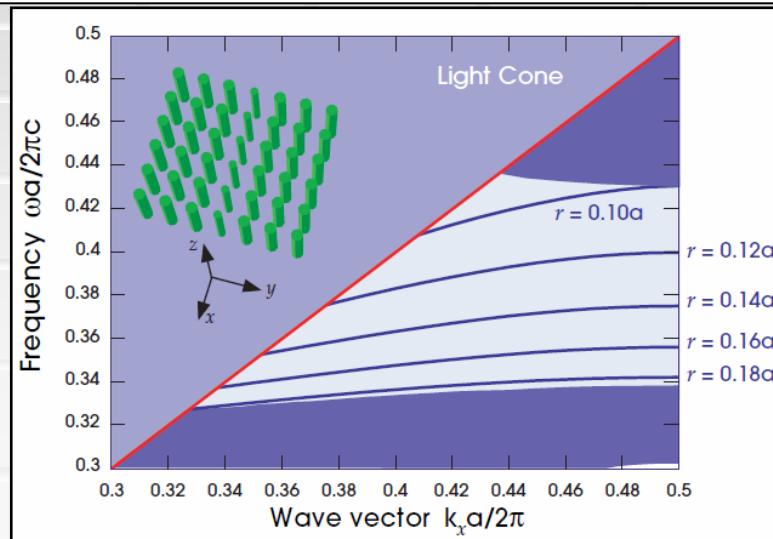
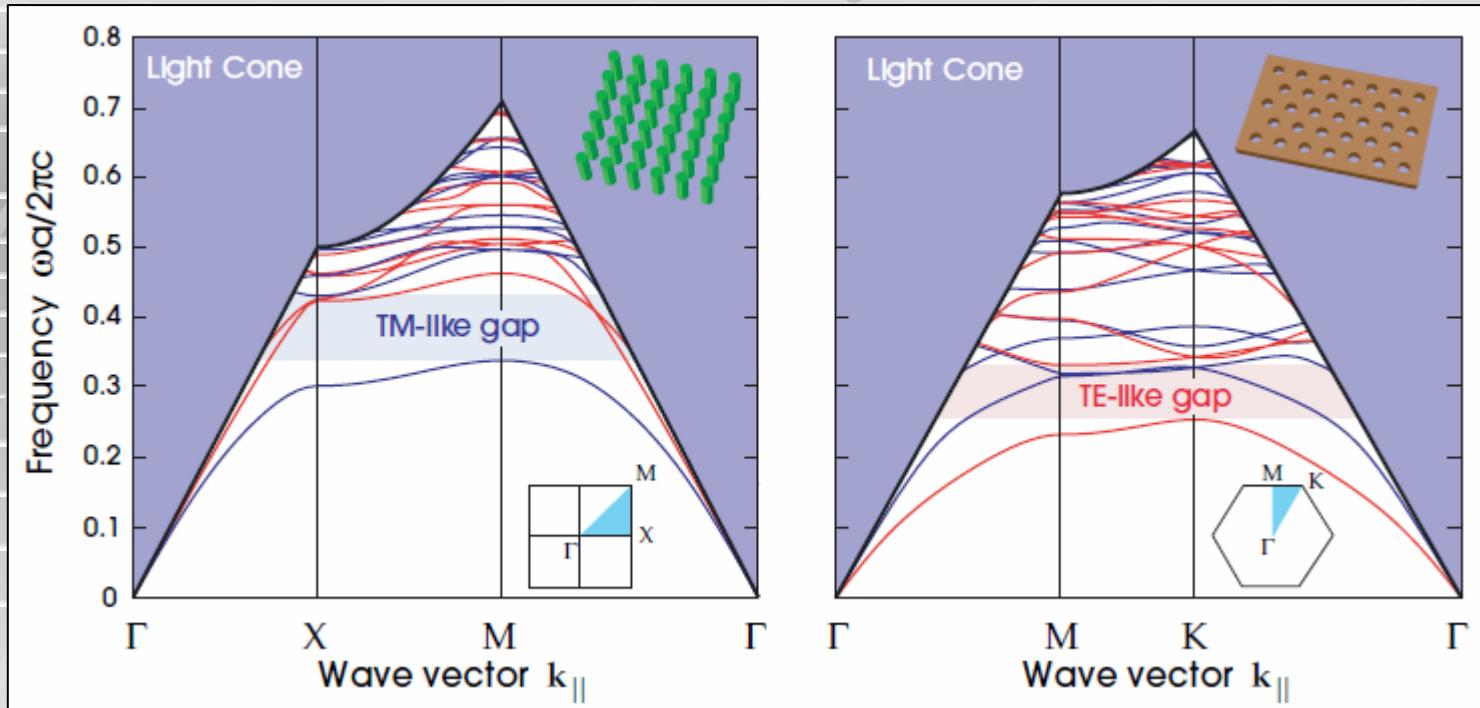


Периодические диэлектрические волноводы

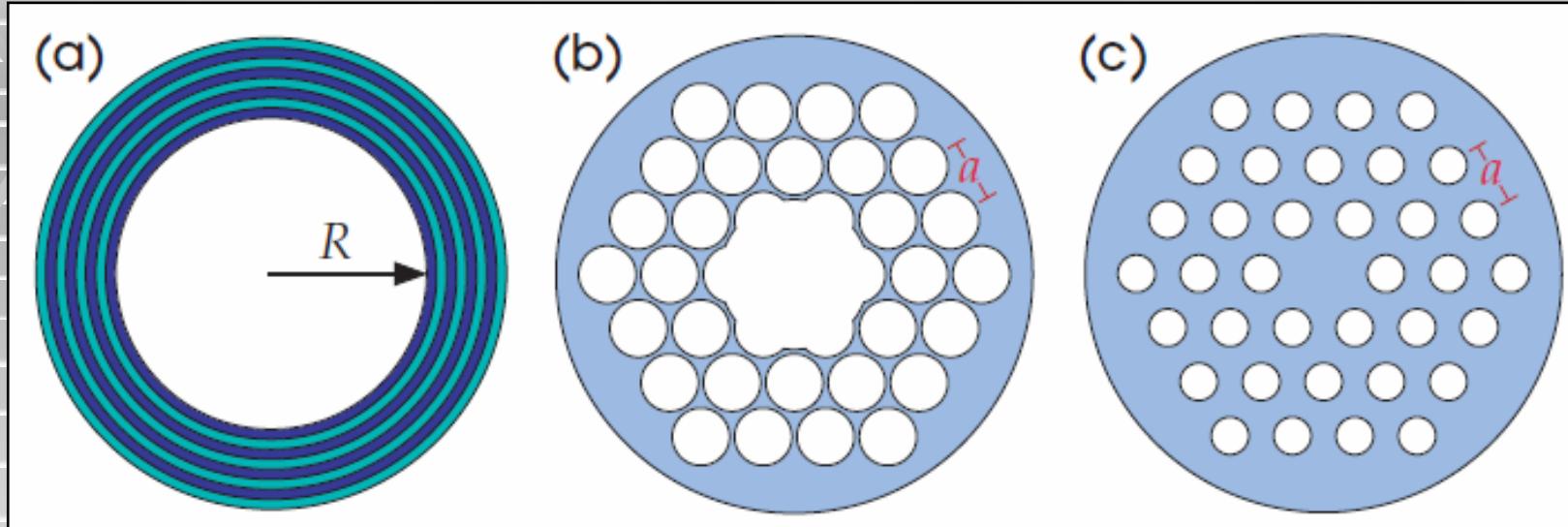


“Leaky mode”

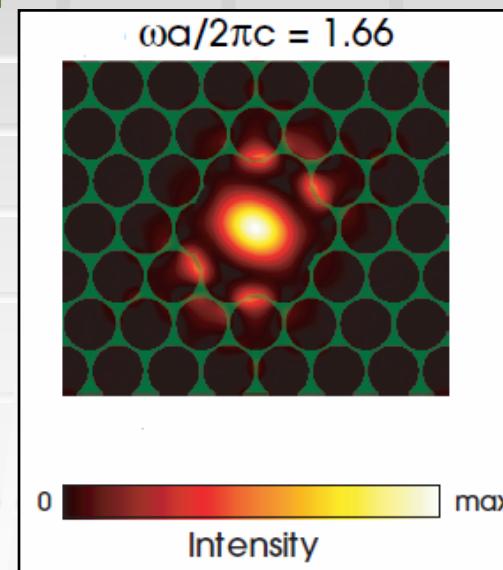
Photonic-crystal slabs



Фотонно-кристаллическое оптическое волокно



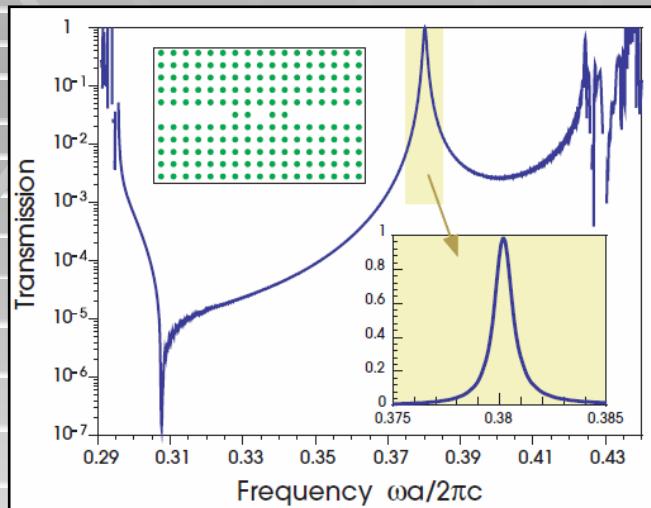
- Транспорт на большие расстояния с малыми потерями.



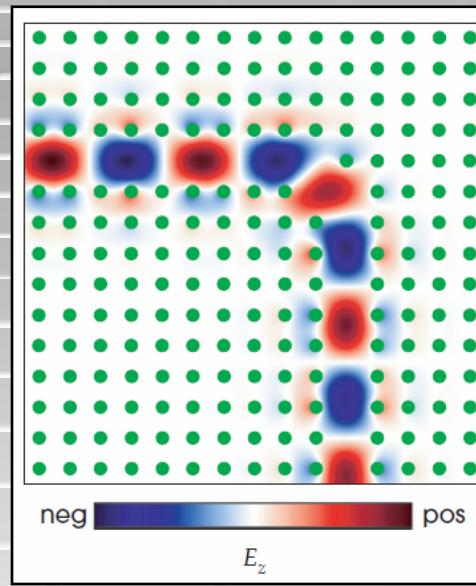
- Нелинейные эффекты:
солитоны;
генерация
суперконтинуума.

Другие “устройства”

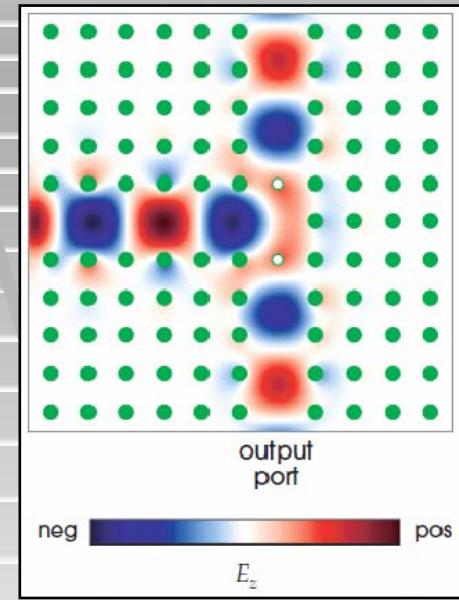
Частотный фильтр



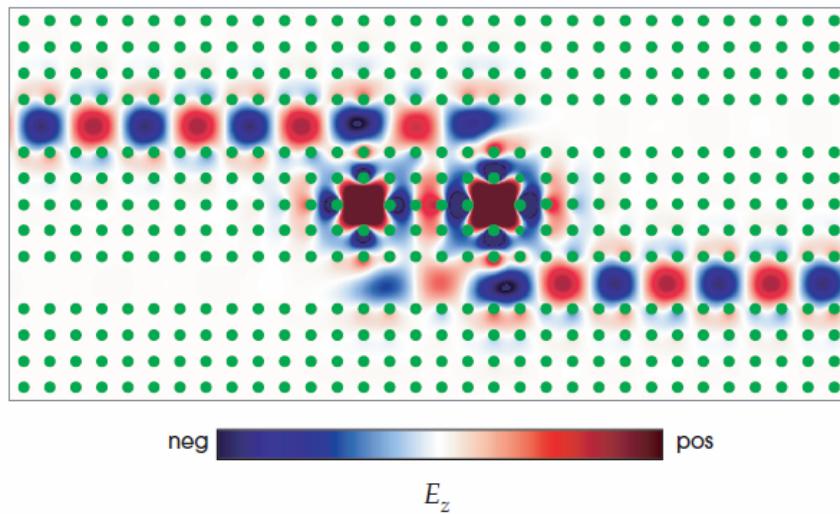
Изгиб волновода



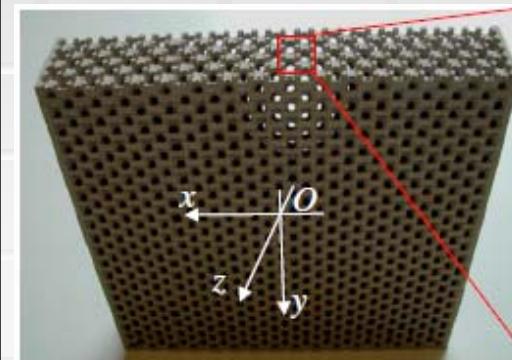
Делитель мощности



Channel-drop filter

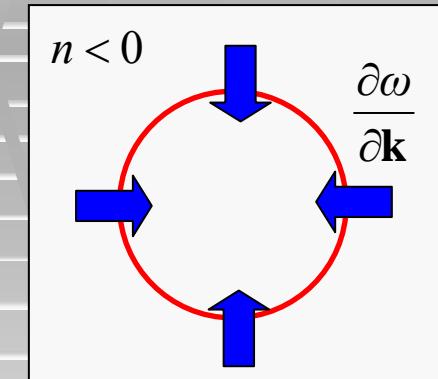
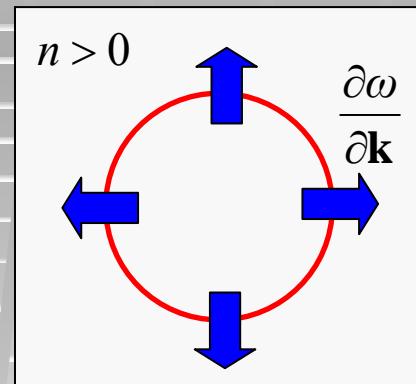
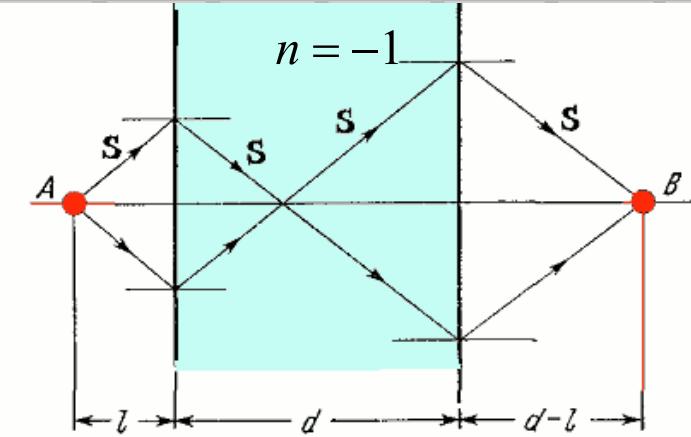


Плоская линза



и др.

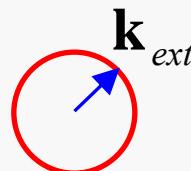
Отрицательный показатель преломления в фотонных кристаллах



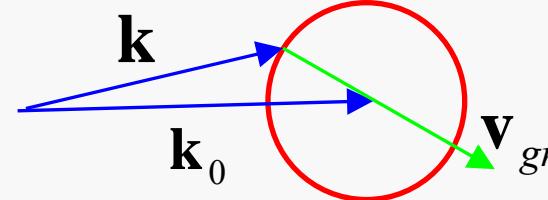
Вблизи потолка зоны

$$\omega \approx \omega(\mathbf{k}_0) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial k_i \partial k_j} \Delta k_i \Delta k_j.$$

Вакуум

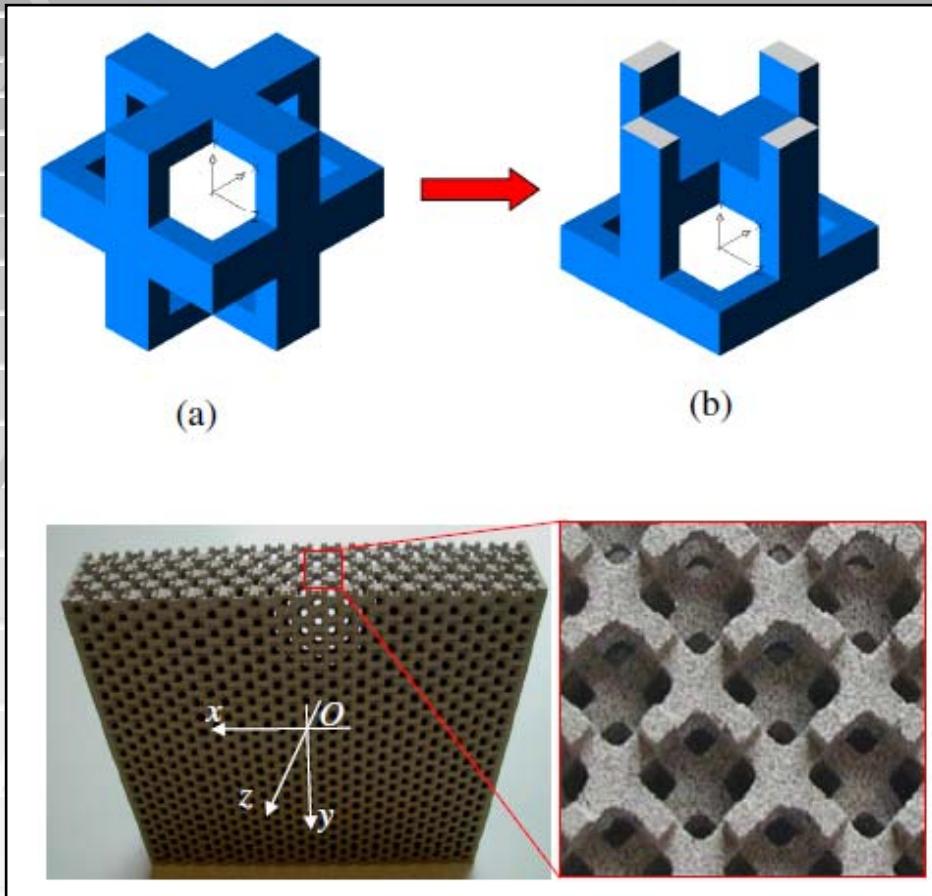


Кристалл

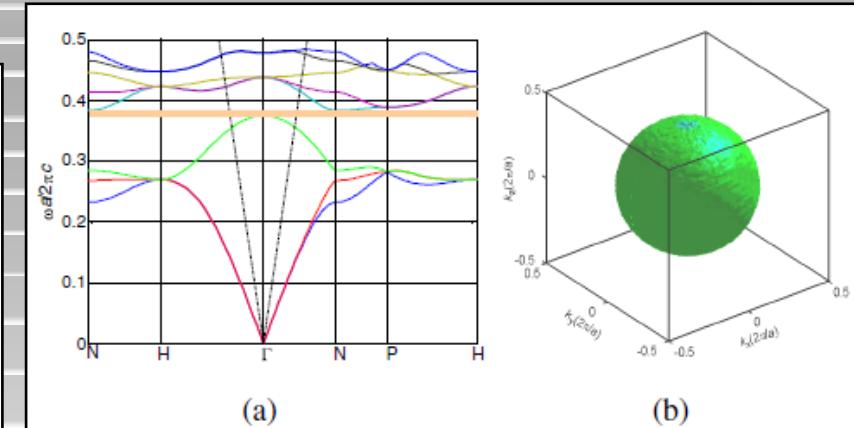


Отрицательный показатель преломления: экспериментальные реализации

Zhaolin Lu et al. (PRL, 2005)



Фотонный кристалл: $a=6.35\text{mm}$, $\epsilon=25$.
Размер $25\text{mm} \times 140\text{mm} \times 127\text{mm}$.



Зонная структура и дисперсионная поверхность.

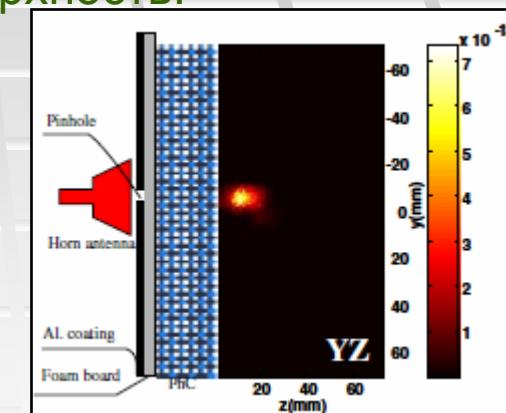
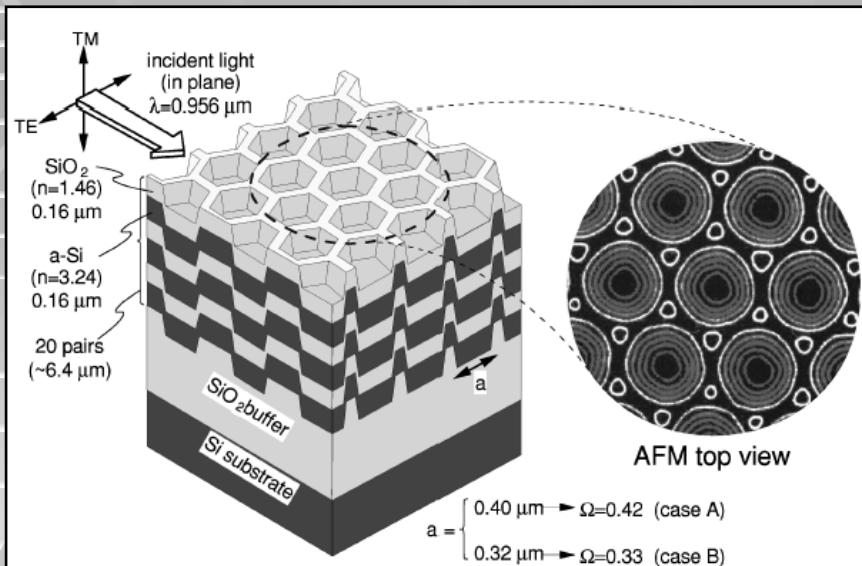


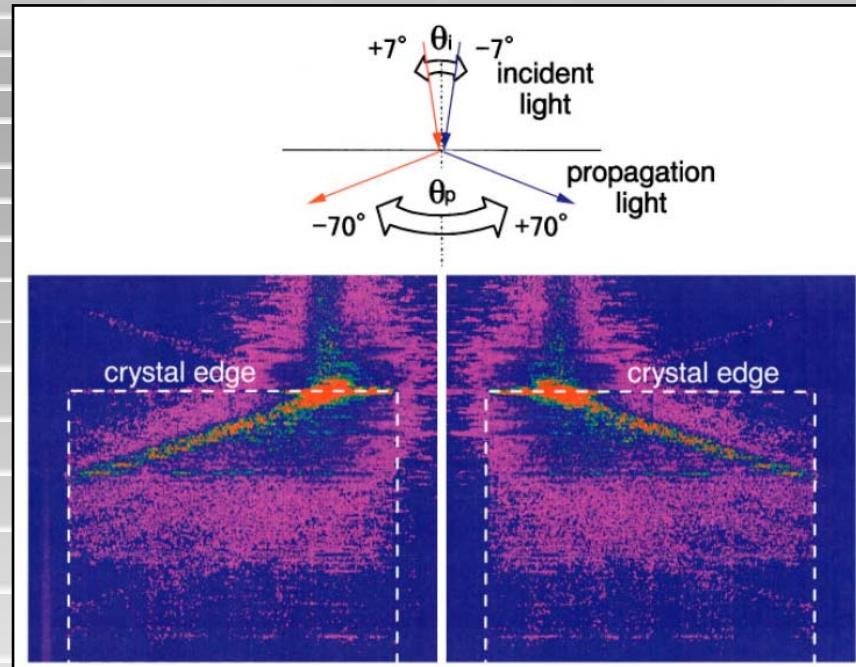
Схема установки и распределение интенсивности. Размер предмета – 3mm, размер изображения – 8mm.

Эффект суперпризмы

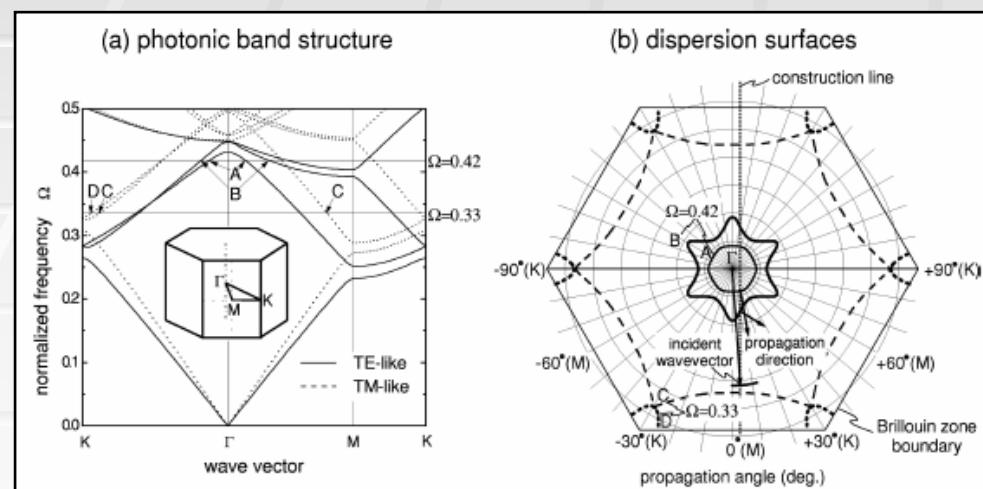
Hideo Kosaka et al. (PRB, 1998)



Слоистая Si/SiO_2 структура.

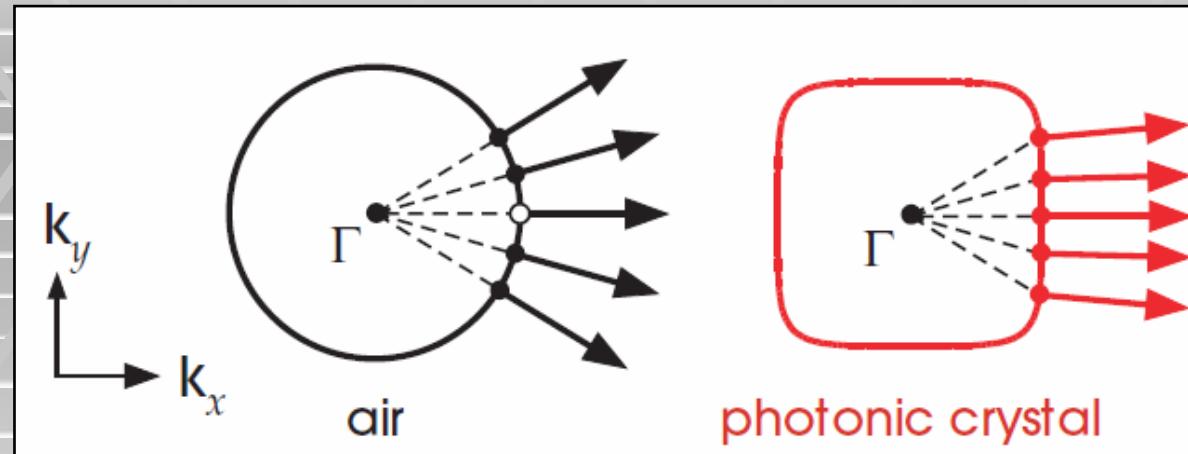


Преломление луча в фотонном кристалле. $\lambda=0.956 \mu\text{m}$.



Спектр и дисперсионные поверхности фотонного кристалла.

Линейная само коллимация



Hideo Kosaka et al.
(APL, 1999)

