

Лекция 4:

Волновая оптика

Голография

Слоистые среды и фотонные кристаллы

Голография.

Голография

hō'lo | gram n.

HOLOS – полный
GRAPH - записывать

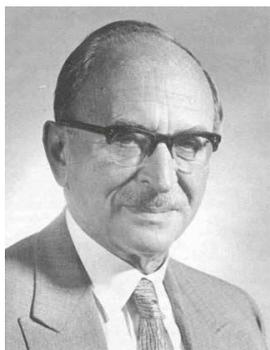
Записывается амплитуда и фаза
волнового фронта (3D)



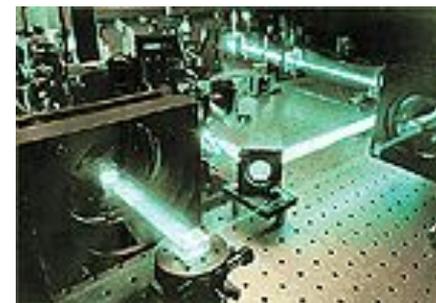
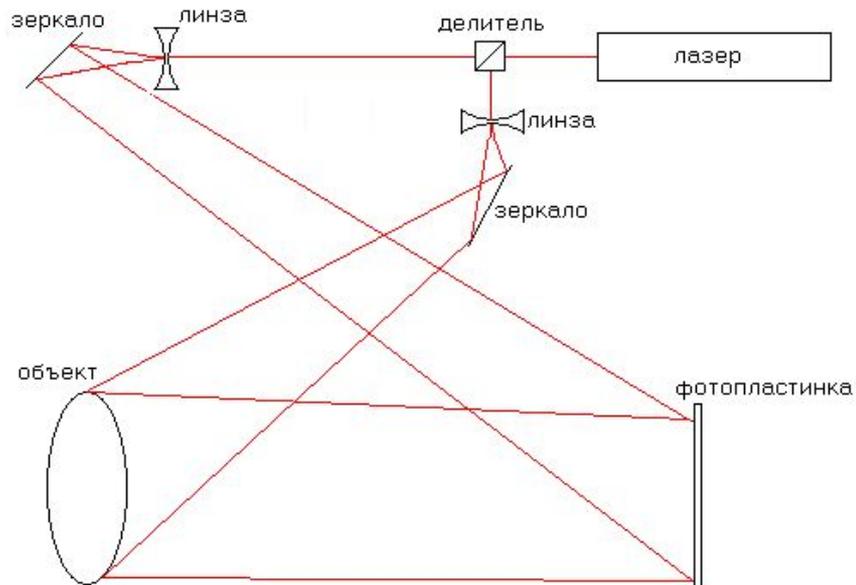
Обычная фотографическая пленка реагирует только на
ИНТЕНСИВНОСТЬ.

Как записать фазу?

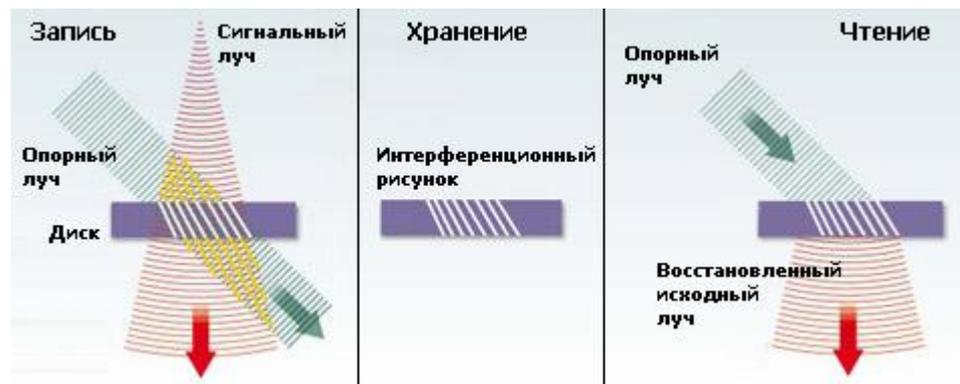
Использовать интерференцию!!! (Д. Габор 1947)



Деннис Габор
Нобелевская премия 1971



Голография



Регистрирующей среде записывается интерференционная картинка опорного и объектного лучей

Пропускание (амплитудная голограмма)

Линейная среда $t \sim I$

$$\begin{aligned}
 t(x, y) &\sim |U_r + U_o(x, y)|^2 = I_r + I_o(x, y) + U_r^* U_o(x, y) + U_r U_o^*(x, y) = \\
 &= I_r + I_o(x, y) + 2\sqrt{I_r \cdot I_o(x, y)} \cos[\arg\{U_r\} - \arg\{U_o(x, y)\}]
 \end{aligned}$$

Считывание производится опорной волной

$$U(x, y) = t(x, y) \cdot U_r \sim I_r + I_o(x, y) + 2\sqrt{I_r} \cdot U_o(x, y) + 2\sqrt{I_r} \cdot U_o^*(x, y)$$

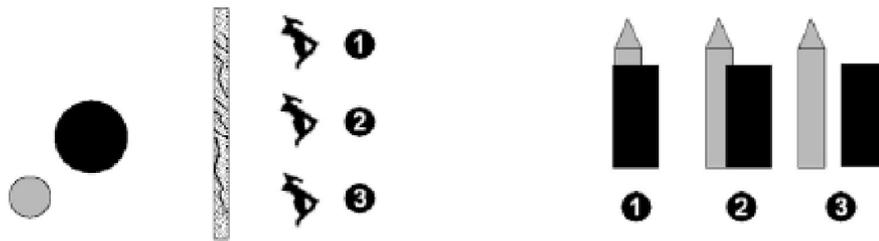
Прошедшая волна

Восстановленная волна

Сопряженная волна

Свойства голограмм

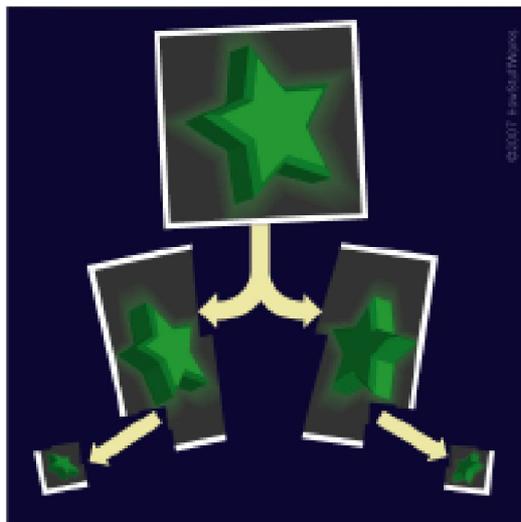
Эффект параллакса (3D)



Каждый фрагмент содержит информацию об объекте в целом

Делимость

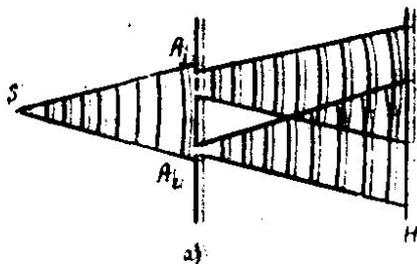
Однако снижается разрешение и параллакс



Широкий диапазон градаций яркости

Способы голографической записи

Осевые голограммы (Д. Габор)
Источник с низкой когерентностью



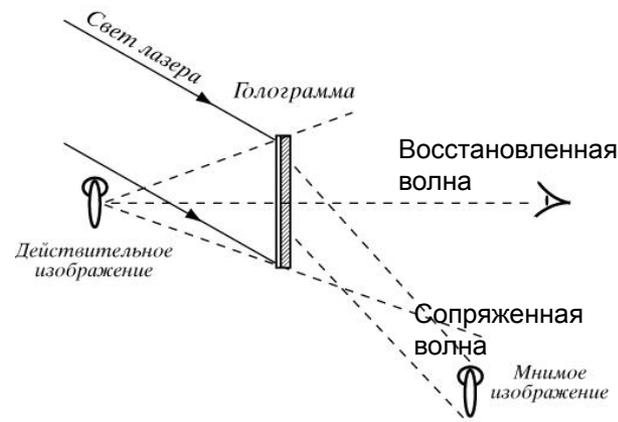
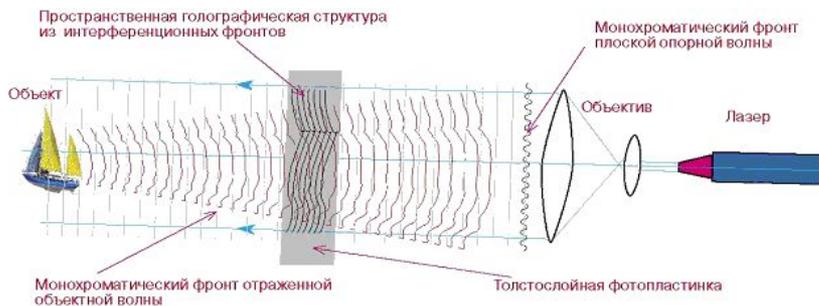
Внеосевые голограммы (Э. Лейт и Ю. Упатниекс)
Лазер

$$U_0(x, y) = f(x, y) \exp(-jkx \sin \theta)$$

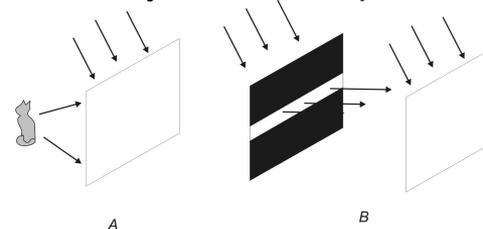
$$U(x, y) = t(x, y) \cdot U_r \sim I_r + |f(x, y)|^2 +$$

$$+ 2\sqrt{I_r} \cdot f(x, y) \exp(-jkx \sin \theta) + 2\sqrt{I_r} \cdot f^*(x, y) \exp(jkx \sin \theta)$$

Отражательные голограммы (Ю.Н. Денисюк)

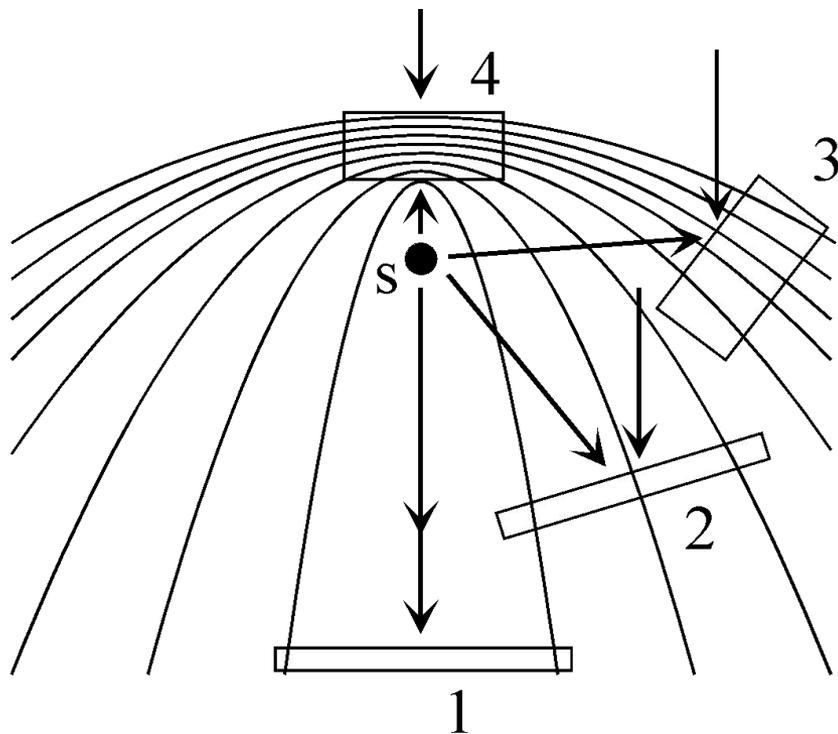


Радужные голограммы (С. Бентон)



Селективные свойства голограмм

Характерные положения регистрирующей среды при разных способах записи



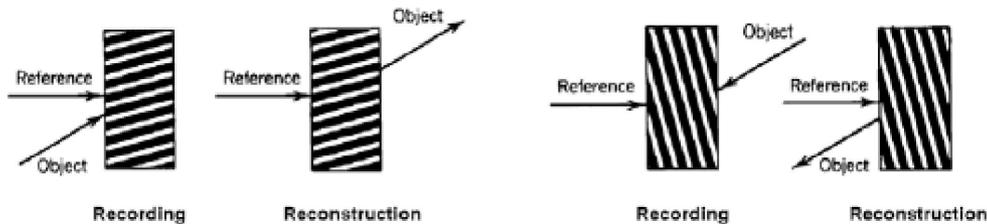
Тонкие голограммы- пренебрегаем дифракционными эффектами внутри голограммы (низкая селективность к углу и длине волны)

Объемные голограммы – нужно учитывать дифракцию (высокая селективность – дифракция Брэгга)

$$Q = \frac{T\lambda}{n\Lambda^2}; \quad Q \ll 1 - \text{тонкая}$$

$$Q \gg 1 - \text{объемная}$$

Мультиплексирование голограмм (запись нескольких голограмм при разных углах или длинах волн)



Пропускающие – высокая угловая селективность

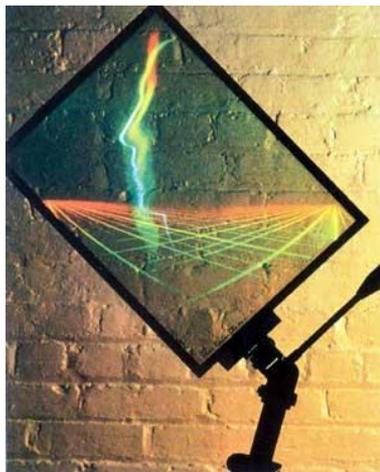
Отражательные – высокая спектральная селективность

Материалы для голографической записи

Технические требования:

- 1) Чувствительность в заданном спектральном диапазоне
- 2) Высокое оптическое качество (рассеяние на дефектах)
- 3) Качество поверхности
- 4) Реверсивность, деградация
- 5) Высокая разрешающая способность.

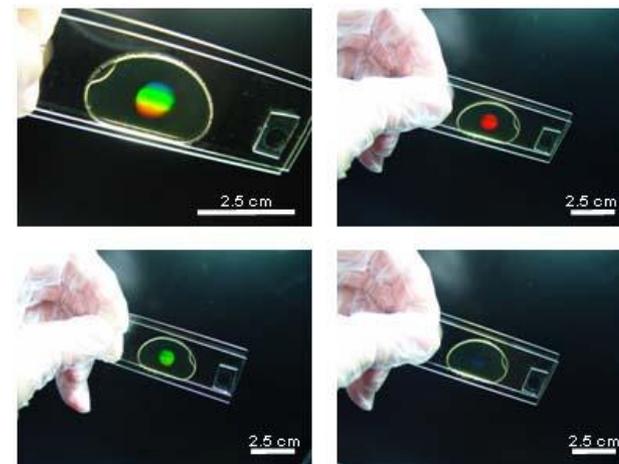
Фотопластинки



Фоторефрактивные кристаллы



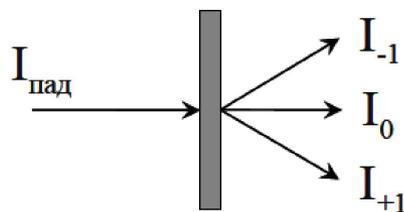
Фотополимеры



Амплитудные и фазовые голограммы

Амплитудная

$$\tau(x, y) = t^2(x, y) \sim \exp(-2\alpha(x, y) \cdot T)$$



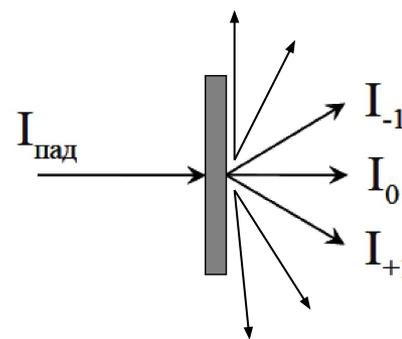
Тип решетки	Двумерная амплитудная голограмма	Трёхмерная амплитудная голограмма	
	Пропускающая	Пропускающая	Отражательная
Синусоидальная	6,25%	3,7%	7,2%
Прямоугольная	10%	25%	60%

Фазовая

$$\tau(x, y) \sim \exp(-j\varphi(x, y))$$

$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi n(x, y)}{\lambda} T$$

$$n(x, y) \sim \cos[\arg\{U_o(x, y)\}]$$



Фазовая голограмма	
Двумерная	Трёхмерная
ДЭ = 33%	ДЭ = 100%

Применения голографии

Изобразительная

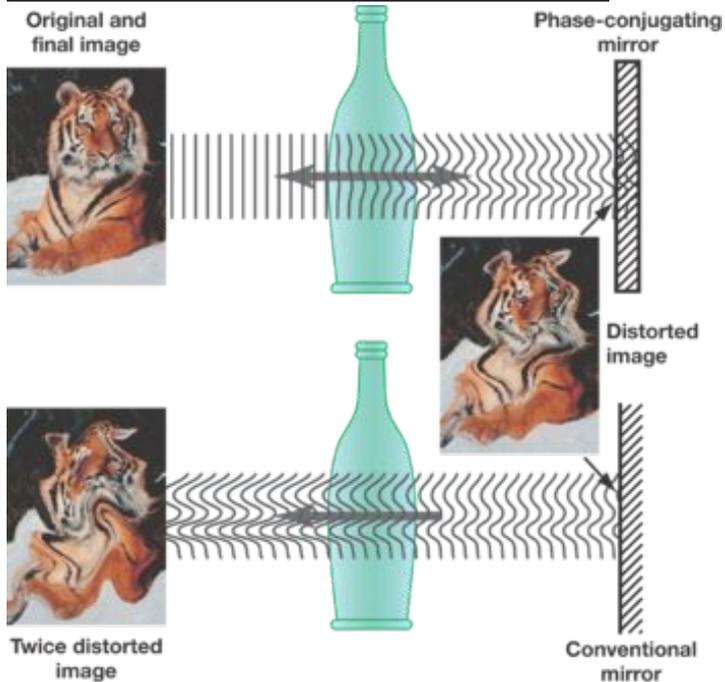
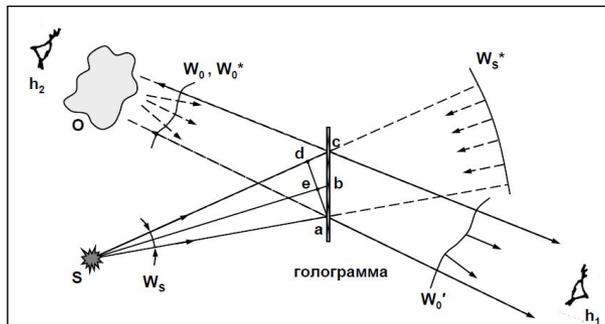


Защитная



Применения голографии

Адаптивная оптика и обращение волнового фронта

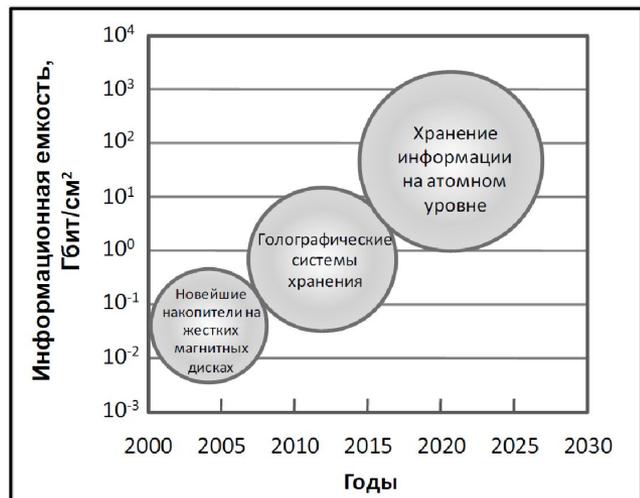


Голографическая интерферометрия



Применения голографии

Голографическая память



Сильные стороны:

Высокая емкость $\sim V/\lambda^3$

Параллельный доступ

Ассоциативность (похоже на работу мозга)

Слабые стороны

Время записи (чувствительность материала)

Несовместима с современной архитектурой компьютера.

Далеко от теоретического предела по емкости (динамический диапазон материала)



OPTWARE

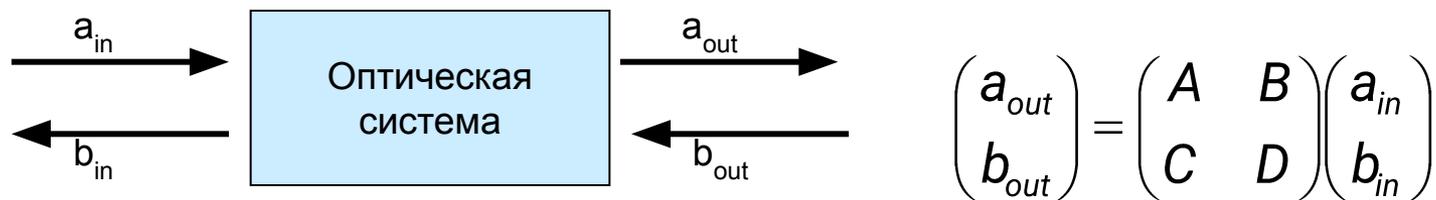


Тип голографического диска		HVD	HVC	Tapestry
Емкость носителя	сейчас	200 Гб	30 Гб	300 Гб
	ожидается	4000 Гб	150 Гб	1600 Гб
Скорость записи (однократно записываемых дисков)	сейчас	270 Мбит/с	40 Мбит/с	235 Мбит/с
	ожидается	1 Гбит/с	160 Мбит/с	1,2 Гбит/с

Реальные системы используют голограммы для адресации битов (1бит – 1 голограмма)

Слоистые среды и фотонные кристаллы.

Матрицы переноса



$AD - BC = 1$, поскольку и вход и выход эквивалентны и представляют собой свободное пространство

$$r = \frac{b_{in}}{a_{in}} = -\frac{C}{D}; \quad R = \left(\left| \frac{C}{D} \right| \right)^2$$

$$t = \frac{a_{out}}{a_{in}} = \frac{1}{D}; \quad T = \left(\left| \frac{1}{D} \right| \right)^2$$

Примеры матриц переноса

$$\begin{pmatrix} \exp(j \frac{2\pi}{\lambda} nl) & 0 \\ 0 & \exp(j \frac{2\pi}{\lambda} nl) \end{pmatrix}$$

Среда с показателем преломления n

$$\begin{pmatrix} \frac{n_1 + n_2}{2n_1} & \frac{n_1 - n_2}{2n_1} \\ \frac{n_1 - n_2}{2n_2} & \frac{n_1 + n_2}{2n_2} \end{pmatrix}$$

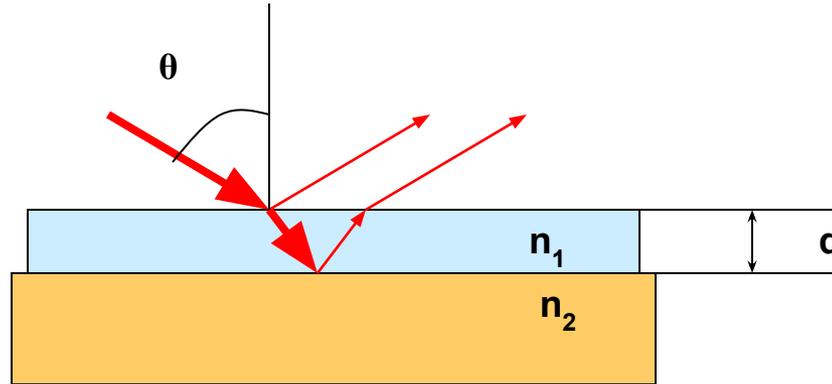
Нормальное падение
на границу раздела
двух сред



Антиотражающее (просветляющее) покрытие

Однослойное

Зависимость от
длины волны и
от угла падения



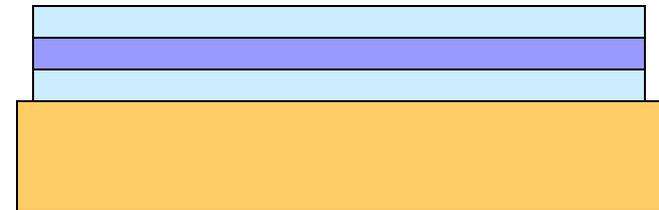
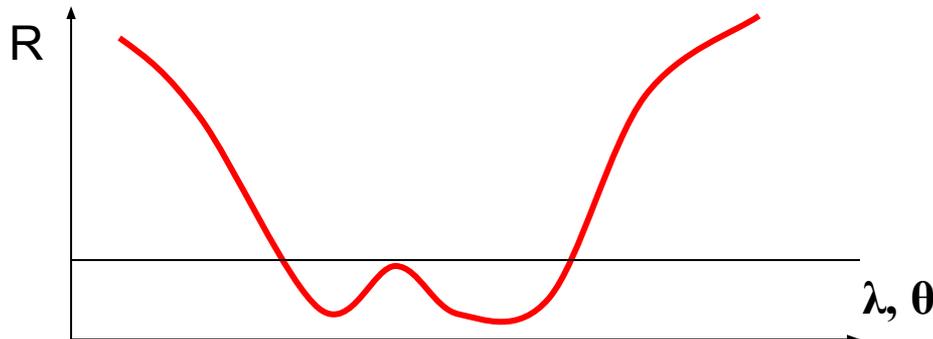
$$n_1 = \sqrt{n_2}$$
$$d = \frac{\lambda}{4n}$$
$$\theta = 0$$

Многослойные

(обычно 3 или 4 слоя)

Существует диапазон углов и длин волн

Применения: объективы, солнечные батареи



Периодическая слоистая структура

В линейных средах общая матрица получается перемножением матриц отдельных участков (слоев)

$$\begin{pmatrix} a_0 \\ b_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}^N \begin{pmatrix} a_N \\ b_N \end{pmatrix}.$$

A, B, C и D - функции λ, θ , поляризации

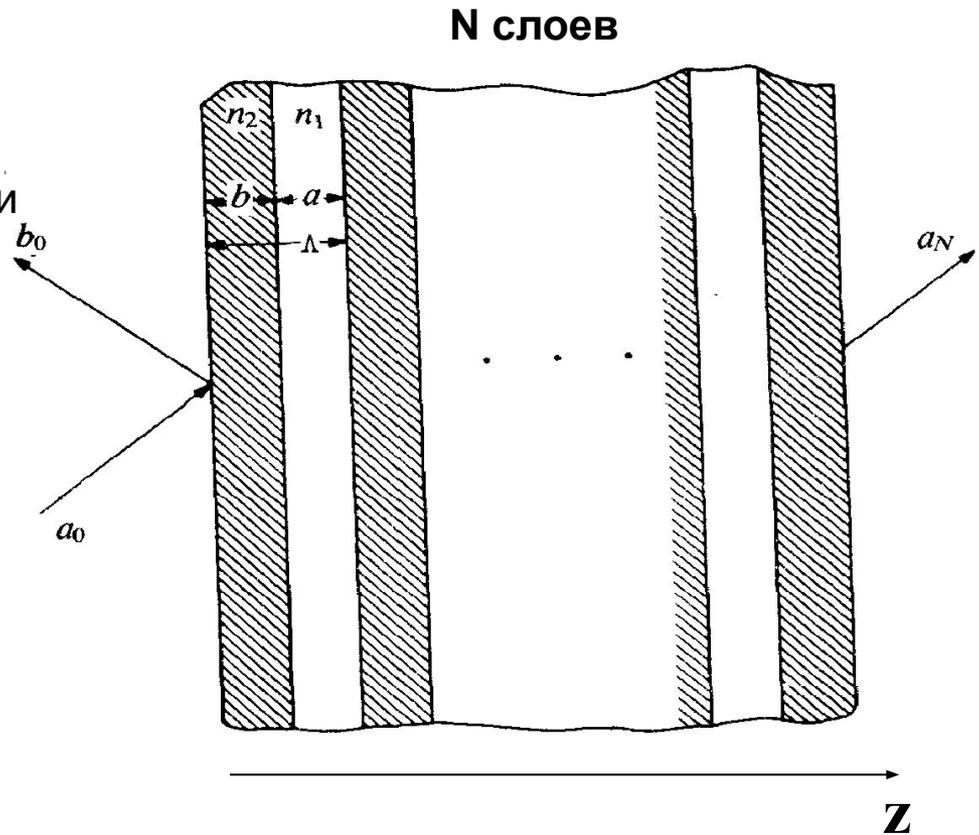
Для унимодулярной матрицы

$$A = e^{ik_{1z}a} \left[\cos k_{2z}b + \frac{1}{2}i \left(\frac{k_{2z}}{k_{1z}} + \frac{k_{1z}}{k_{2z}} \right) \sin k_{2z}b \right],$$

$$B = e^{-ik_{1z}a} \left[\frac{1}{2}i \left(\frac{k_{2z}}{k_{1z}} - \frac{k_{1z}}{k_{2z}} \right) \sin k_{2z}b \right],$$

$$C = e^{ik_{1z}a} \left[-\frac{1}{2}i \left(\frac{k_{2z}}{k_{1z}} - \frac{k_{1z}}{k_{2z}} \right) \sin k_{2z}b \right],$$

$$D = e^{-ik_{1z}a} \left[\cos k_{2z}b - \frac{1}{2}i \left(\frac{k_{2z}}{k_{1z}} + \frac{k_{1z}}{k_{2z}} \right) \sin k_{2z}b \right].$$



Периодическая слоистая структура

$$E = E_K(z) e^{-iKz_e + i(\omega t - k_y y)}$$

Поле световой волны в периодической среде представляем в виде функций Блоха

$$E_K(z) = E_K(z + \Lambda)$$

Для унимодулярной матрицы

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}^N = \begin{pmatrix} AU_{N-1} - U_{N-2} & BU_{N-1} \\ CU_{N-1} & DU_{N-1} - U_{N-2} \end{pmatrix},$$

$$U_N = \frac{\sin(N+1)K\Lambda}{\sin K\Lambda}, \quad K = \frac{1}{\Lambda} \arccos\left(\frac{1}{2}(A+D)\right) \quad \text{Параметр функции Блоха}$$

$$R = |r_N|^2 = \frac{|C|^2}{|C|^2 + \left(\frac{\sin K\Lambda}{\sin N K\Lambda}\right)^2}.$$

Отражение от единичной ячейки (периода)

Быстро меняющаяся функция K, или λ , θ .

$$K\Lambda = m\pi,$$

$$\lambda = 2n_{av}(a, b, n_1, n_2)\Lambda \cos\vartheta$$

Закон Брэгга

$$|r_N|^2 = \frac{|C|^2}{|C|^2 + (1/N)^2}.$$

для малого значения коэффициента отражения (разности показателей преломления) и $m = 1$

Брэгговское отражение

Закон Брэгга для нормального падения

$$\lambda_0 = 2\Lambda n$$

$$|r_N|^2 = \frac{|C|^2}{|C|^2 + (1/N)^2}$$

$$|r_N| \approx 2N \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$$

$$N \approx \frac{\sqrt{|r_N|^2}}{\Delta n}$$

Глубина проникновения

$$L_{eff} = N\Lambda$$

Селективность

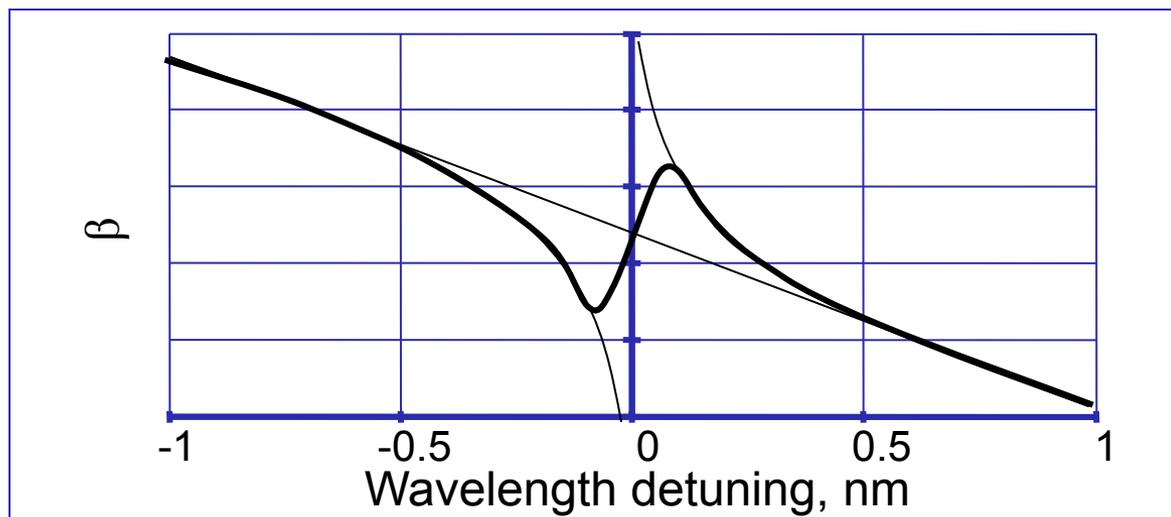
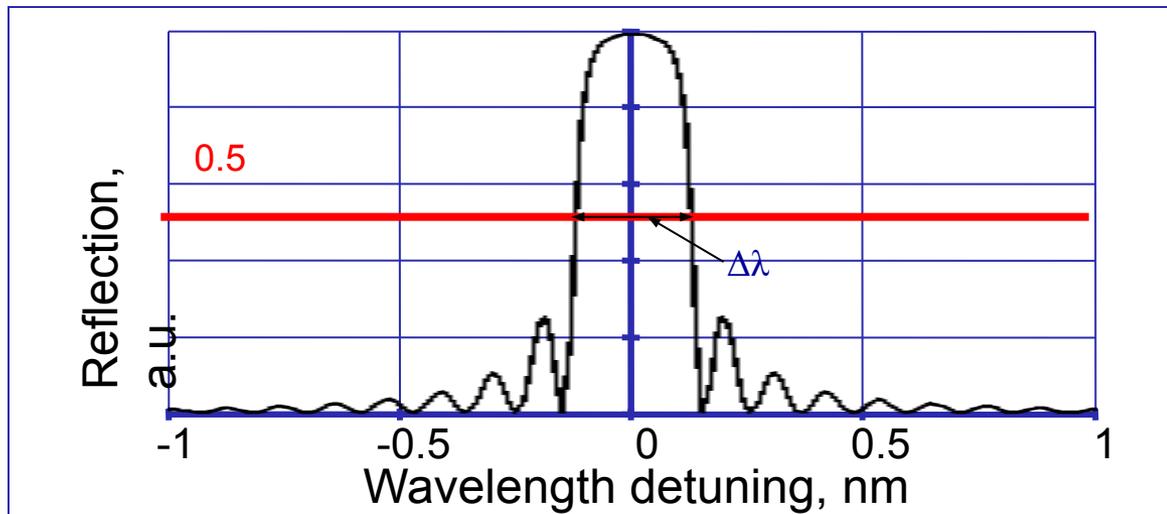
$$K = \frac{2\pi}{\lambda + \Delta\lambda} n \approx \frac{2\pi}{\lambda} \left(1 - \frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right);$$

$$\Delta K = \frac{2\pi\Delta\lambda}{\lambda^2}$$

$$N\Delta K\Lambda = \pi$$

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2n}$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{1}{N} = \frac{\Lambda}{L_{eff}}$$

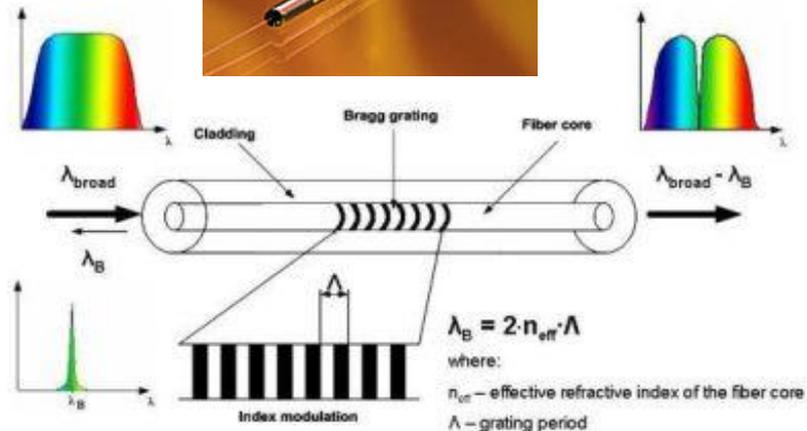
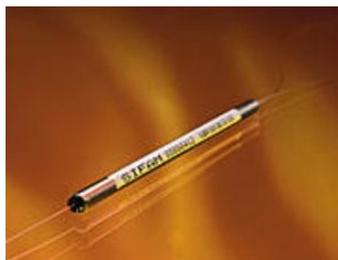


Применения

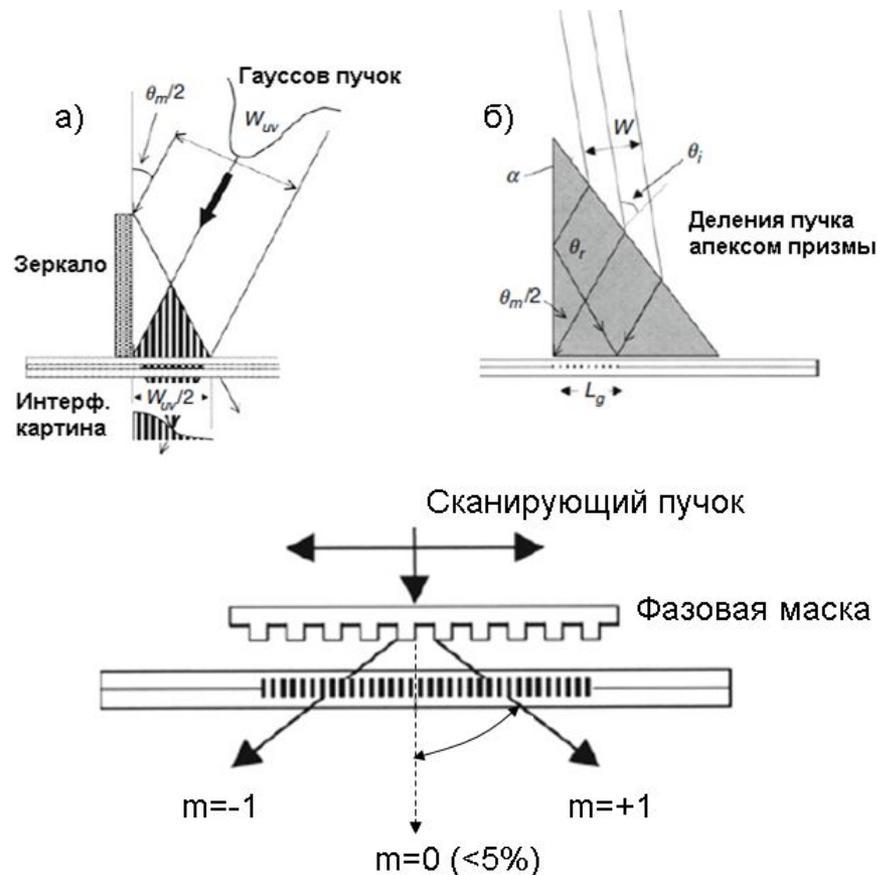
Интерференционные фильтры



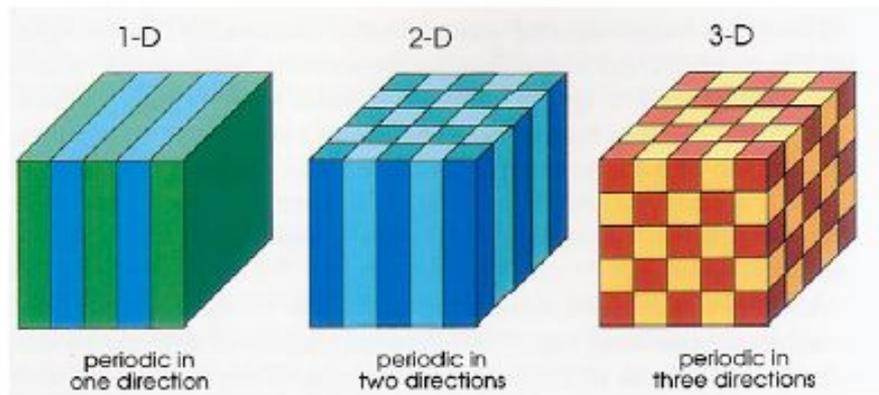
Волоконные Брэгговские решетки



© Pawel Gasior's Web Side



Фотонные кристаллы



Периодические структуры с периодом сопоставимым с длиной волны света



E. Yablonovitch

“Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics”

Physical Review Letters, vol. 58, pp. 2059, 1987



S. John

“Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices”

Physical Review Letters, vol. 58, pp. 2486, 1987

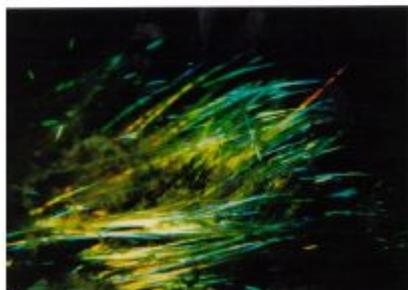
Фотонные кристаллы

Довольно часто встречаются в природе

Неживая: Опалы, асбесты,

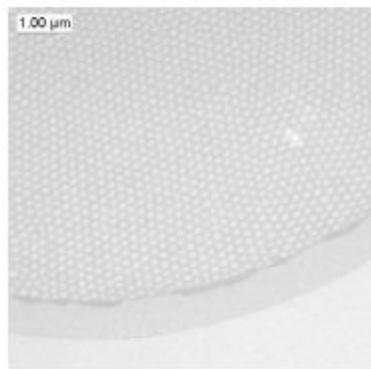
Живая

Sea Mouse

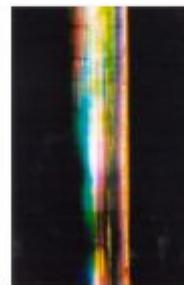


20cm

and its hair



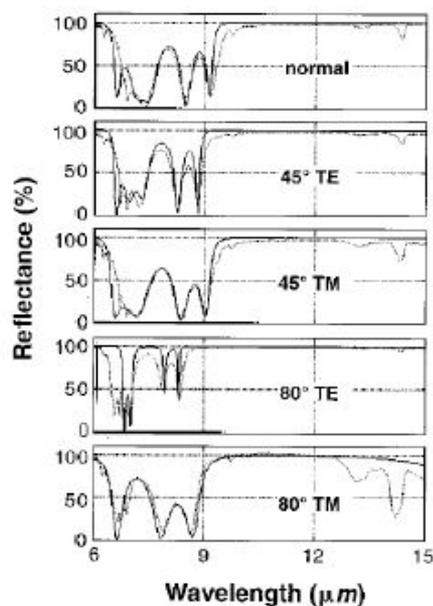
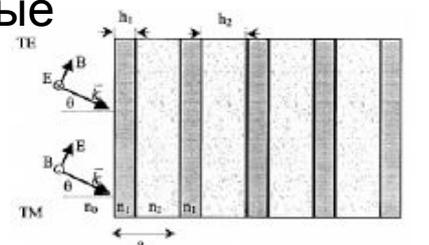
Normal incident light



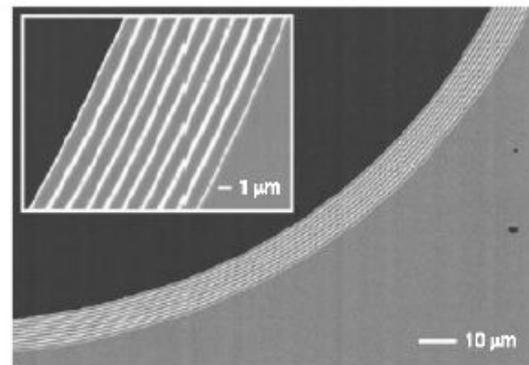
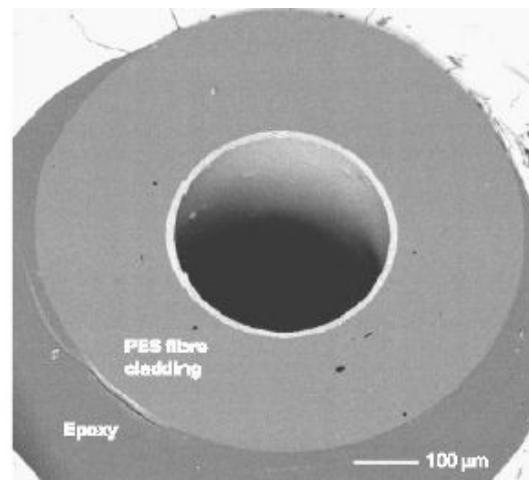
Off-Normal incident light

Фотонные кристаллы

Одномерные



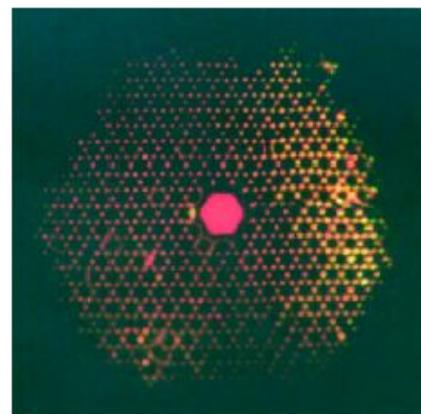
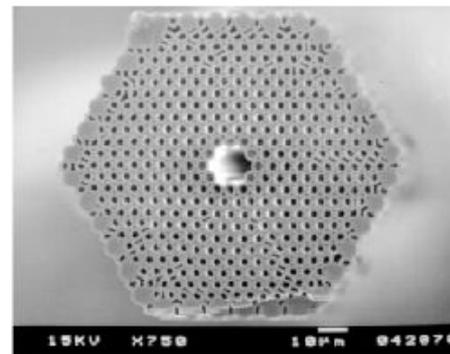
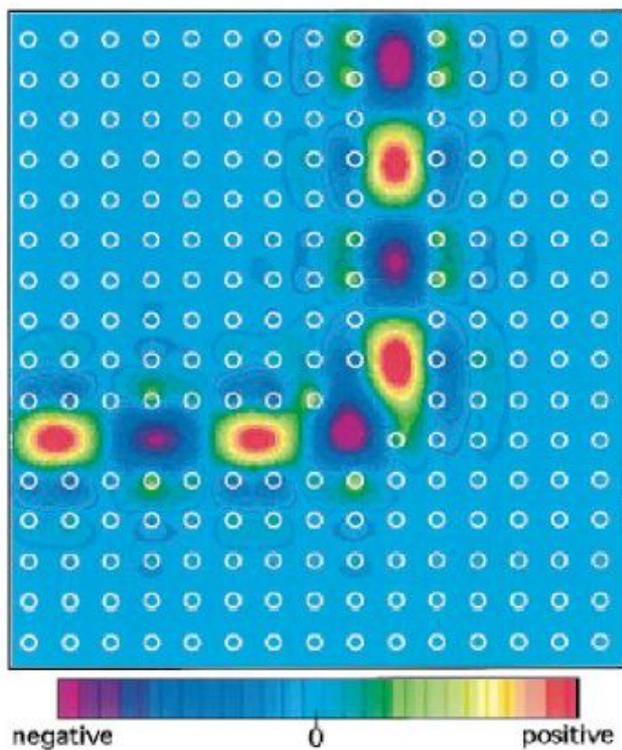
Y. Fink, et al, Science, vol.282, p.1679 (1998)



B. Temelkuran et al, Nature, vol.420, p.650-3 (2002)

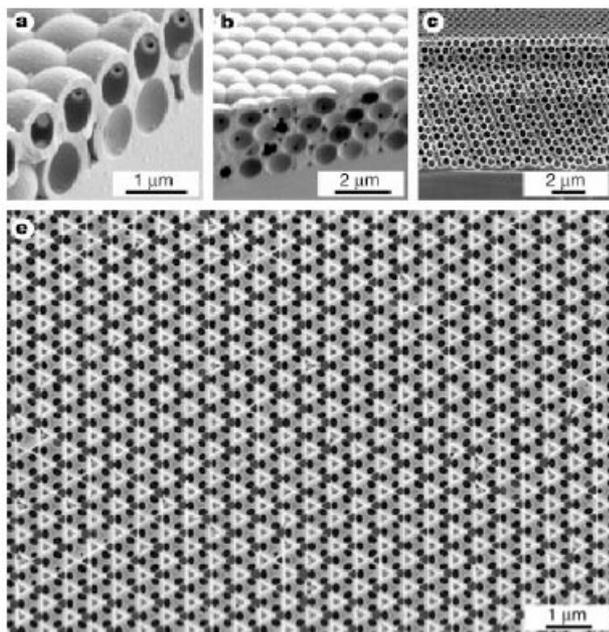
Фотонные кристаллы

Двумерные

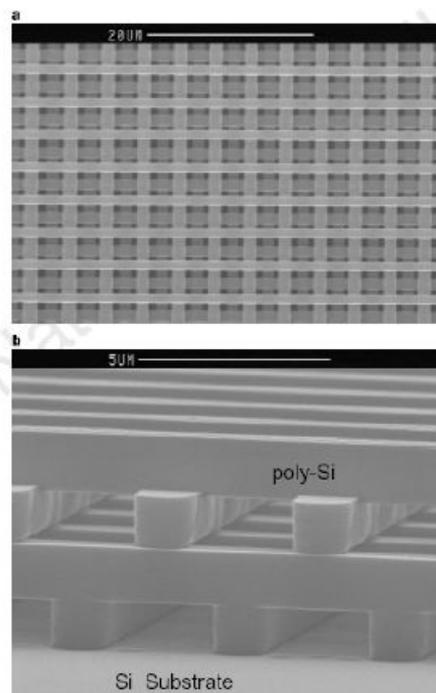


Фотонные кристаллы

Трехмерные



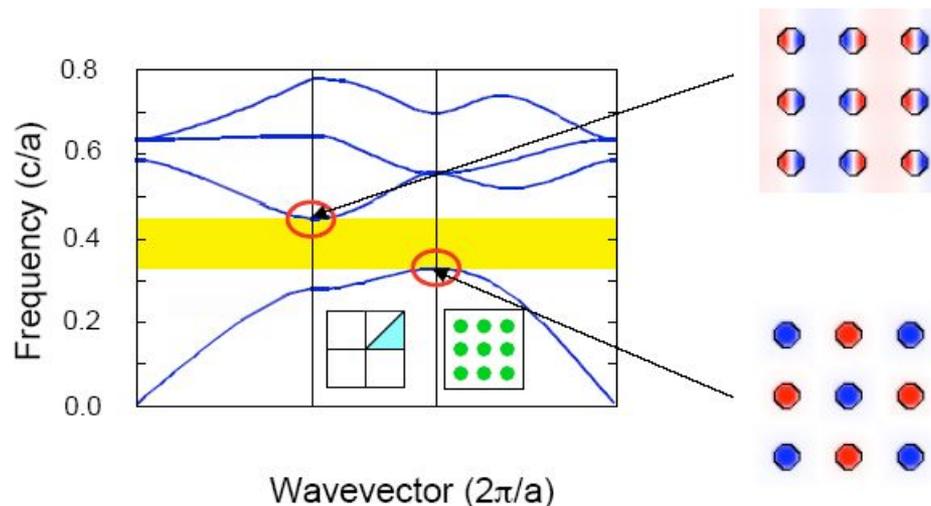
Y. A. Vlasov, Nature, vol.414, p.289-93 (2001)



S. Lin et al, Nature, vol. 394, p. 251-3, (1998)

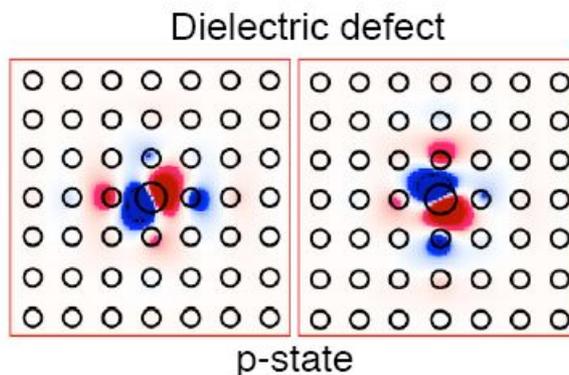
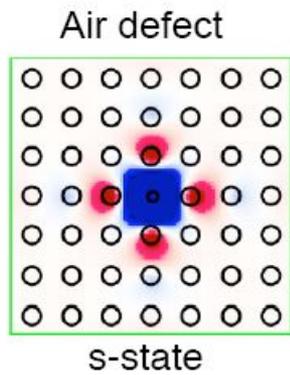
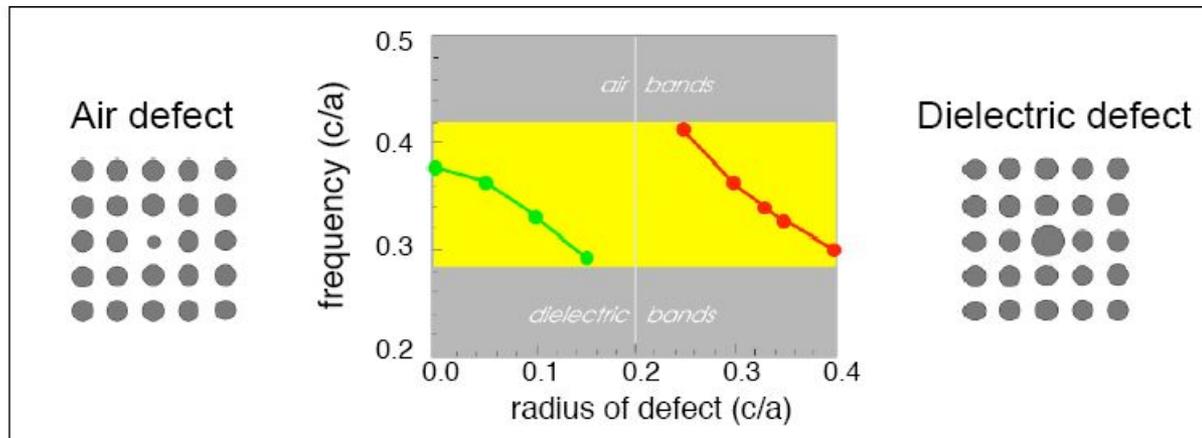
Фотонные кристаллы

- Большая разность показателей преломления и прогресс в технологии дает возможность наблюдать новые явления
 - Медленный свет, отрицательный показатель преломления
 - Обычное волокно $\delta n \sim 10^{-3}$; фотонно-кристаллическое $\delta n \sim 1$
- Новая концепция в оптике
 - Зонная структура
 - Теория переноса фотонов
Моды с заданными дисперсионными соотношениями
 - Полупроводники для света

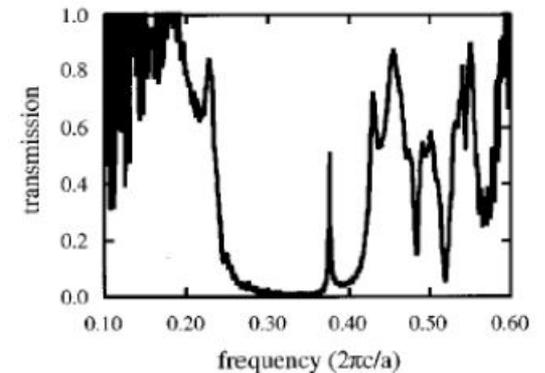
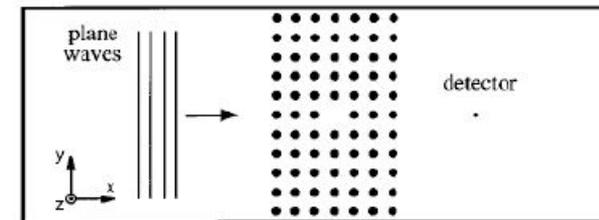


Фотонные кристаллы

- Дефекты в кристаллической структуре



Резонансное туннелирование



P. R. Villeneuve, S. Fan, and J. D. Joannopoulos, *Phys. Rev. B* 54, 7837 (1996)

Фотонные кристаллы

- Линейные дефекты (волноводы)

