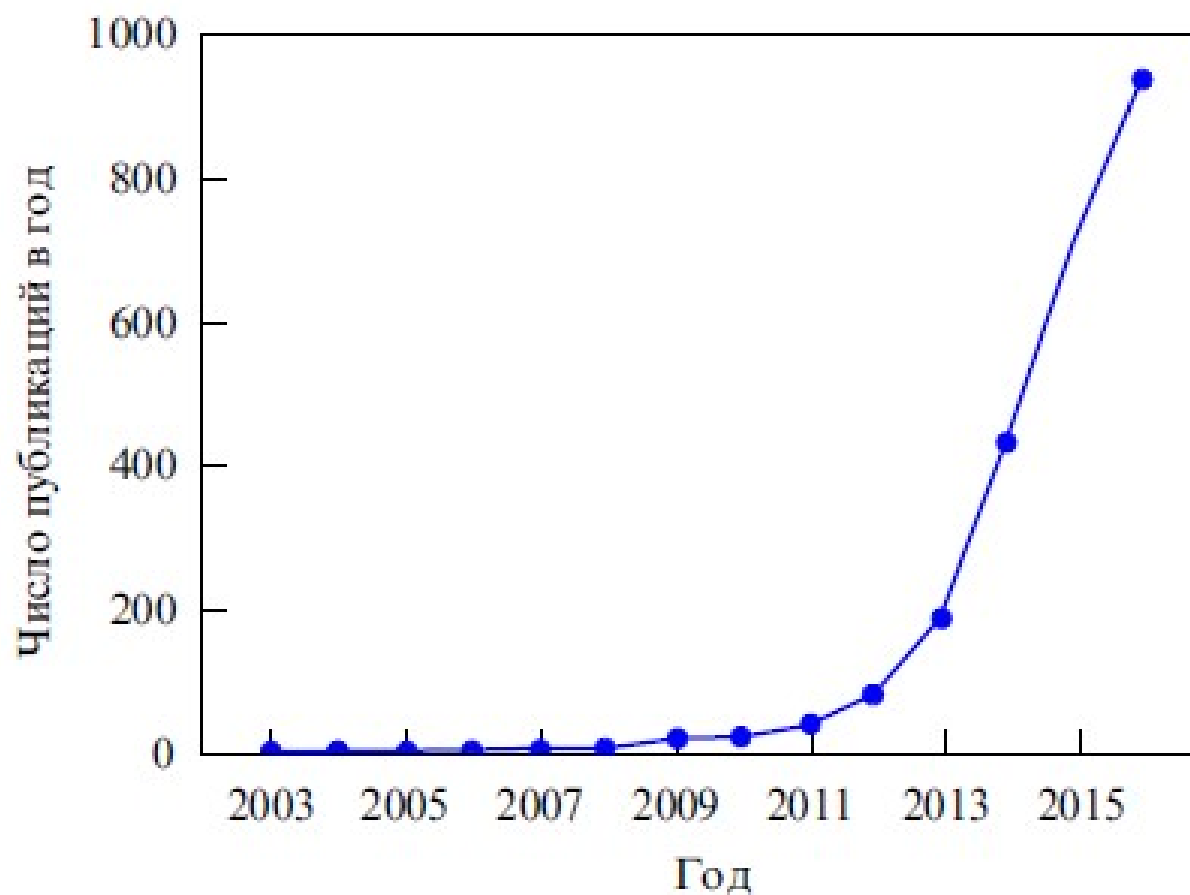


ОПТИКА МЕТАМАТЕРИАЛОВ

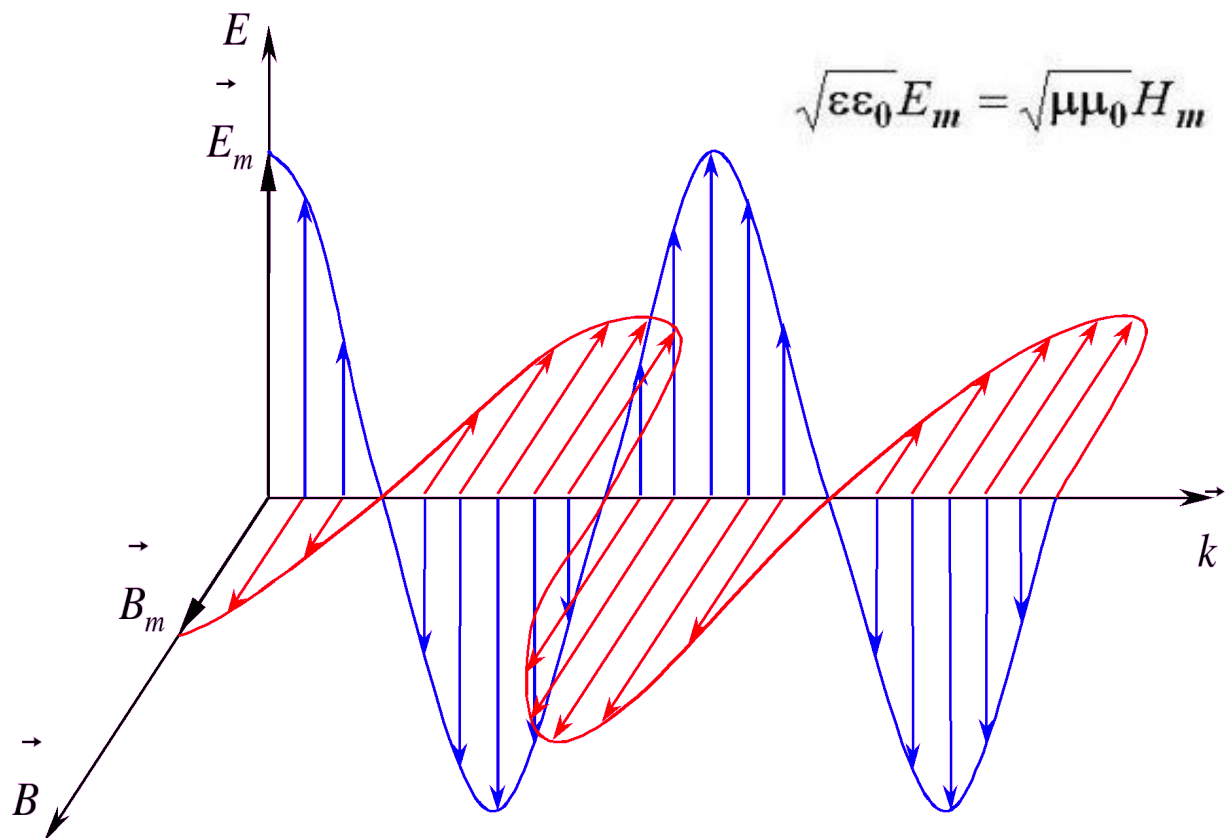
к.ф.-м.н.
доцент кафедры общей физики
Колмычек И.А.

Актуальность



М.П. Ремнев. В.В. Климов, УФН 188 (2), 2018

Электромагнитные волны



$$\sqrt{\epsilon\epsilon_0} E_m = \sqrt{\mu\mu_0} H_m$$

скорость света в вакууме

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ М/с}$$

скорость света в среде

$$v = \frac{c}{n}, \quad v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}, \quad \sqrt{\epsilon\mu} = n$$

n – показатель преломления

v СКОРОСТЬ ВОЛНЫ

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

T ПЕРИОД

$$v = \lambda \cdot \nu$$

λ ДЛИНА ВОЛНЫ

$$\lambda = v \cdot T$$

ν ЧАСТОТА

$$\lambda = \frac{v}{\nu}$$

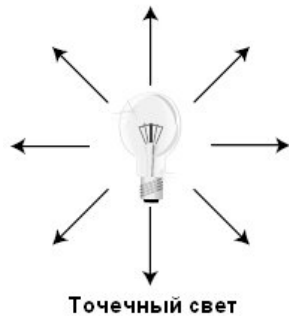
Характеристики оптического излучения

➤ Частота

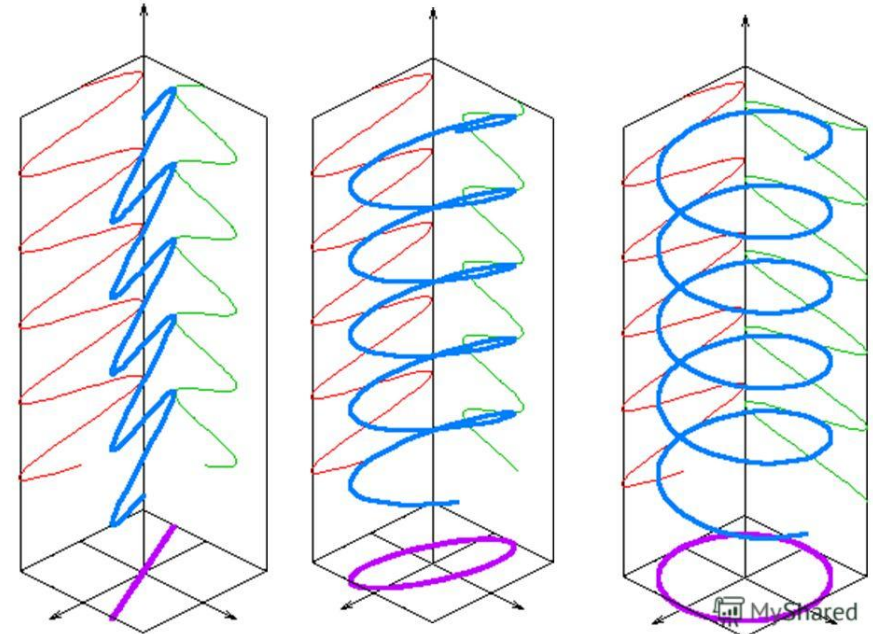
➤ Длина волны

➤ Интенсивность

➤ Направление



➤ Поляризация



линейная

эллиптическая

циркулярная

➤ Фаза

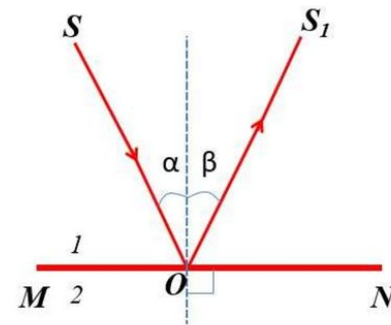
$$E(x,t) = E_0 \cos(\omega t - kx + \phi_0)$$

Управление оптическим излучением

Отражение



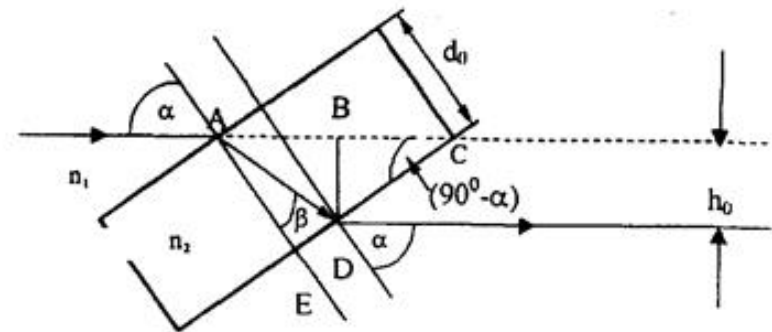
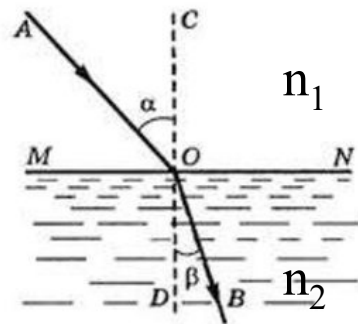
ЗАКОНЫ ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА



- SO – падающий луч
- OS_1 – отраженный луч
- α – угол падения
- β – угол отражения
- MN – граница раздела двух сред

$$\beta = \alpha$$

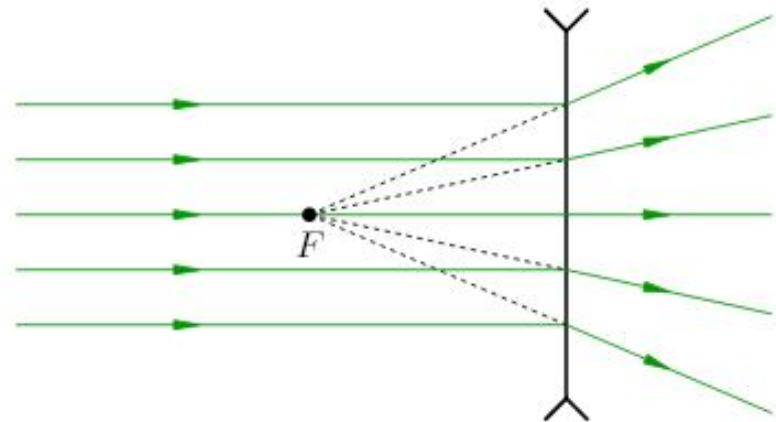
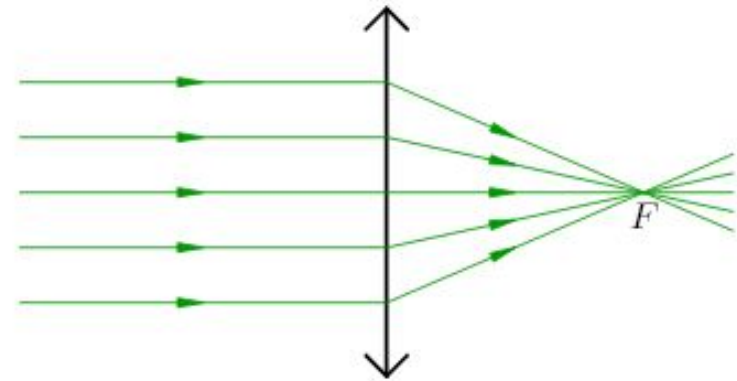
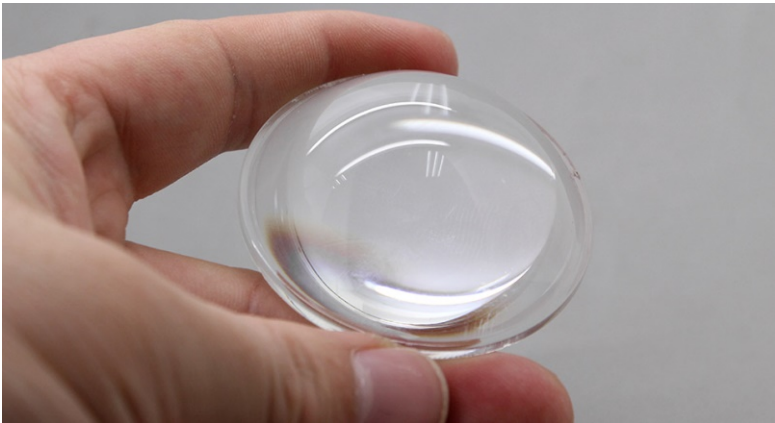
Преломление



Закон Снеллиуса $n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$

Управление оптическим излучением

Фокусировка\дефокусировка

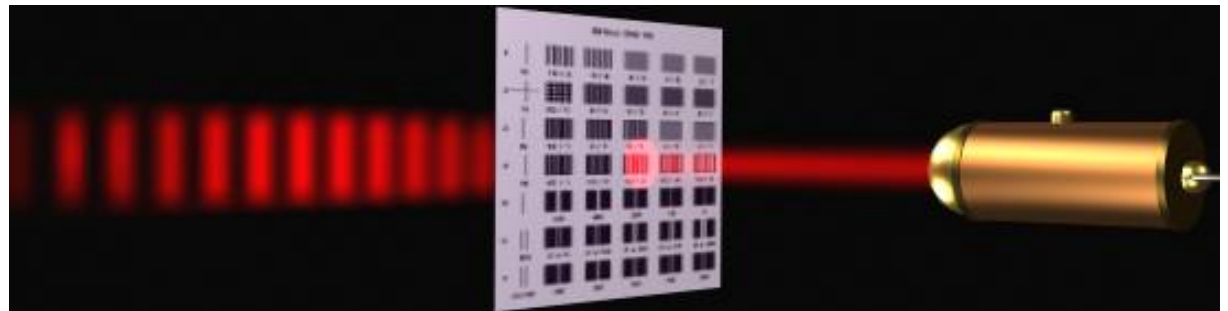
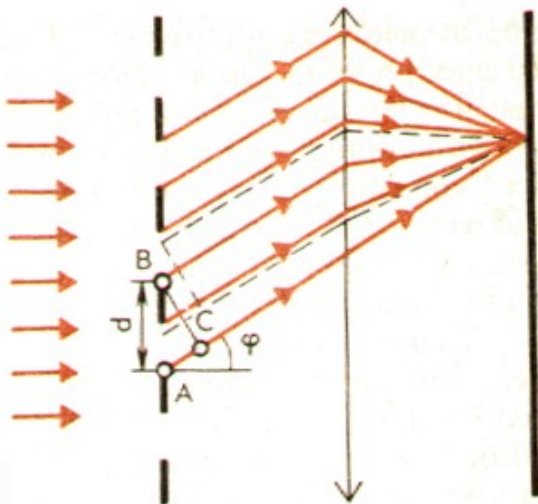
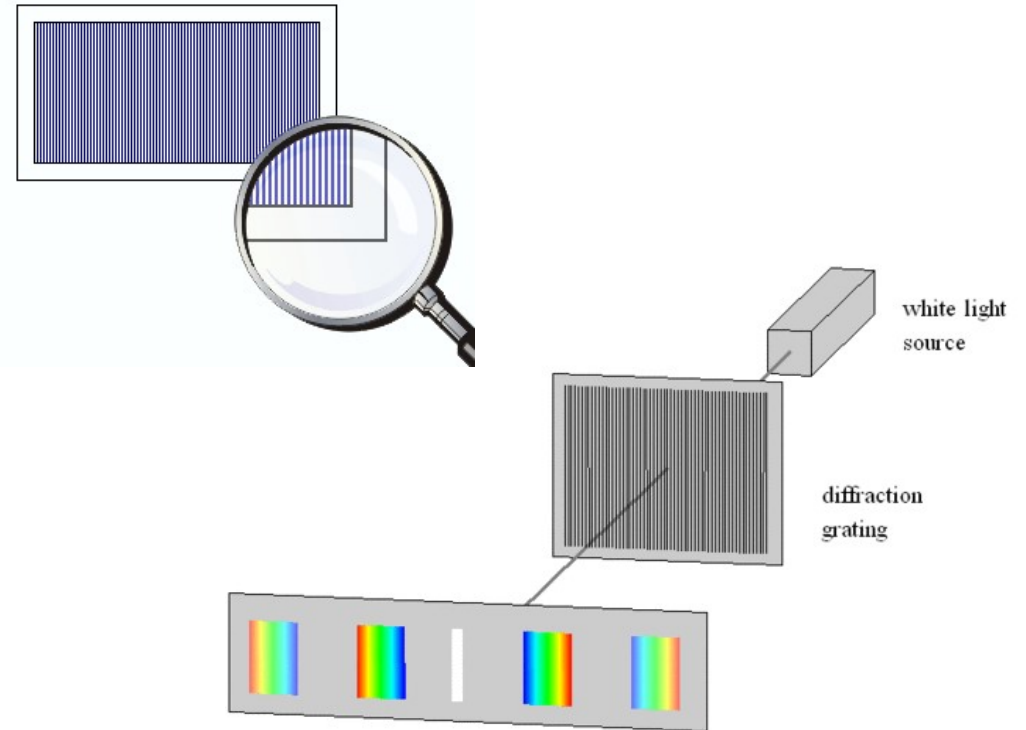
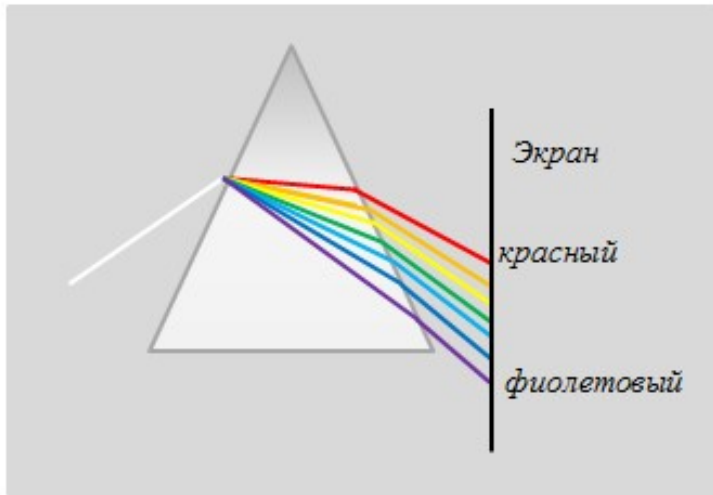


Плоский фронт волны



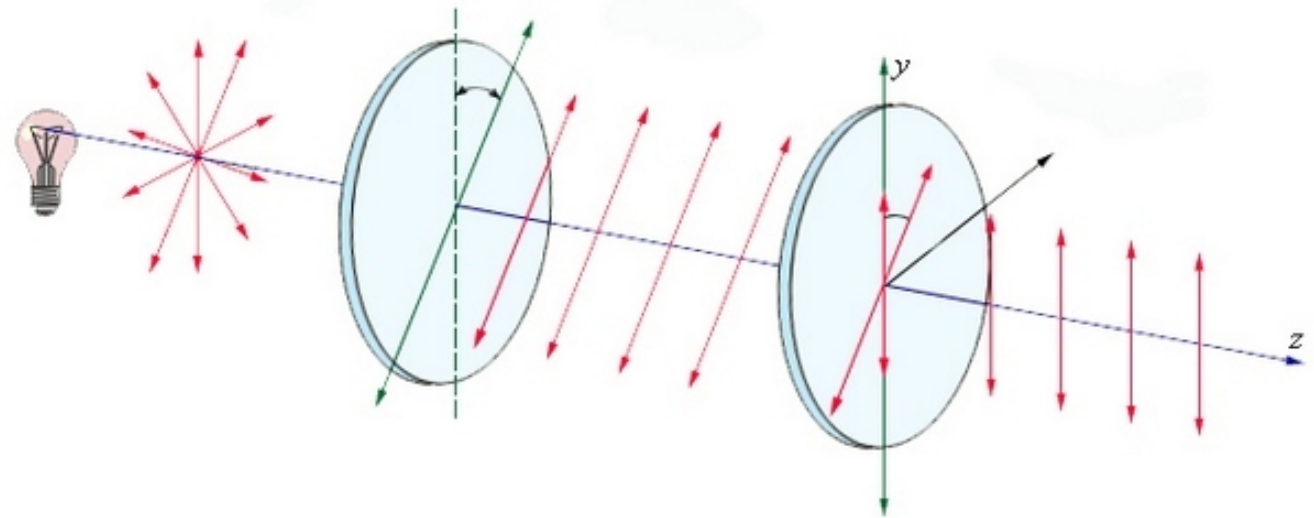
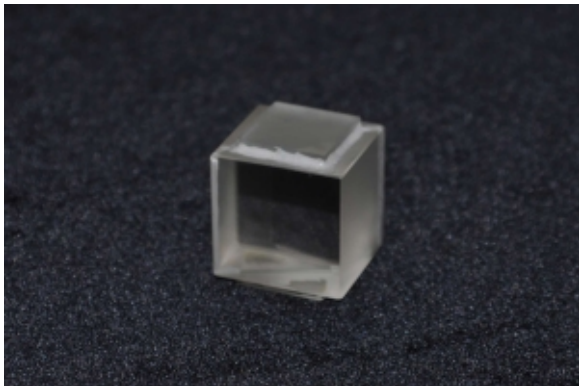
сферический фронт волны

Спектральные приборы



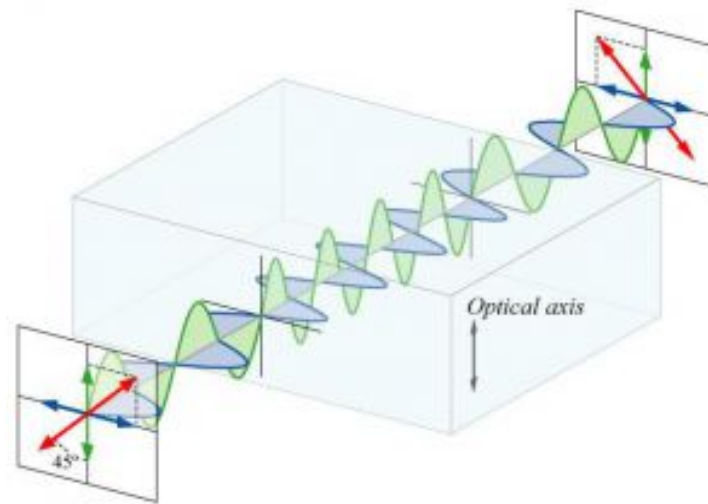
Управление оптическим излучением

Поляризатор



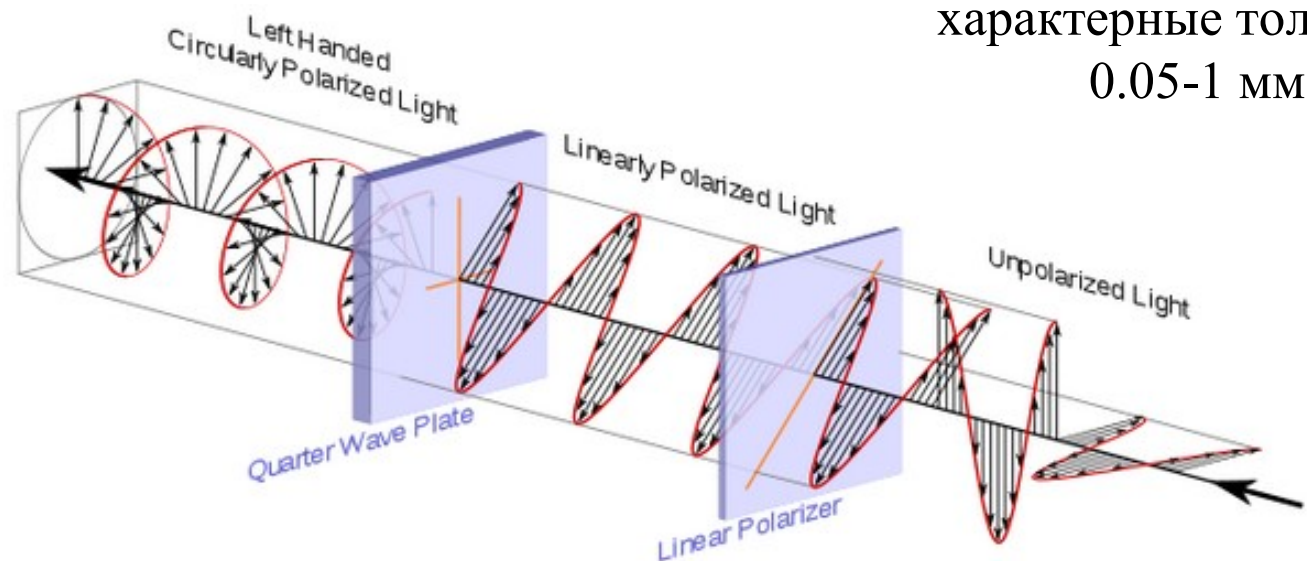
Управление оптическим излучением

Пластинка $\lambda/2$



Принцип действия:
двулучепреломление

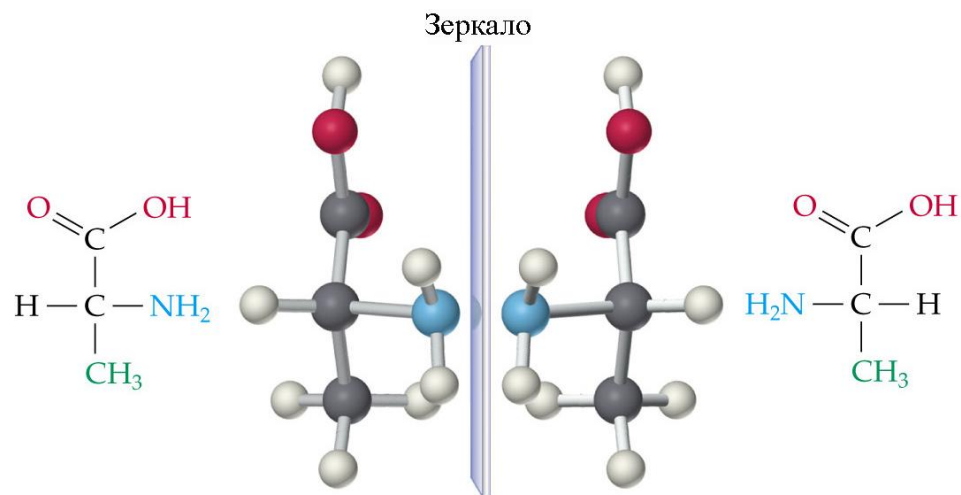
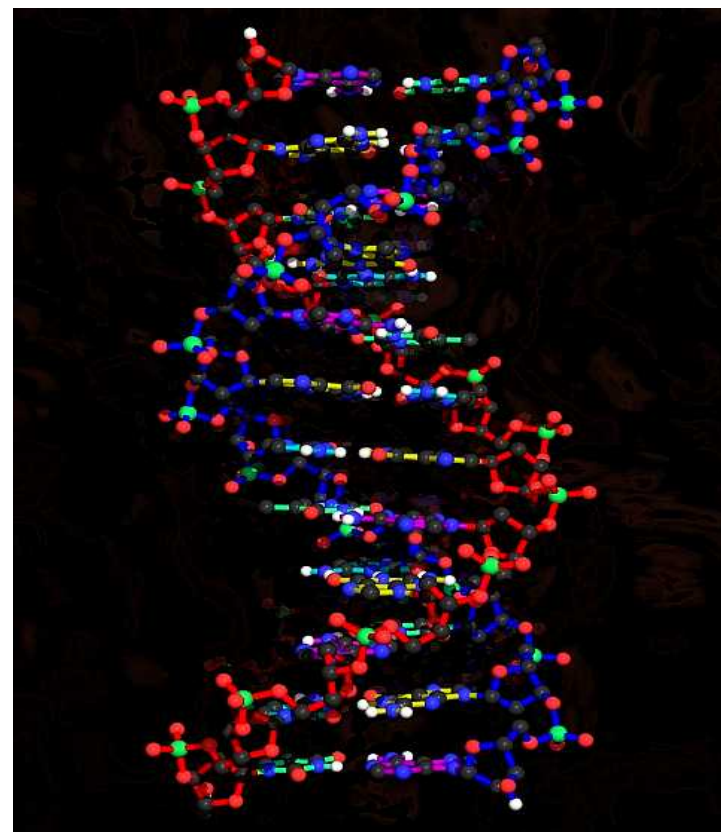
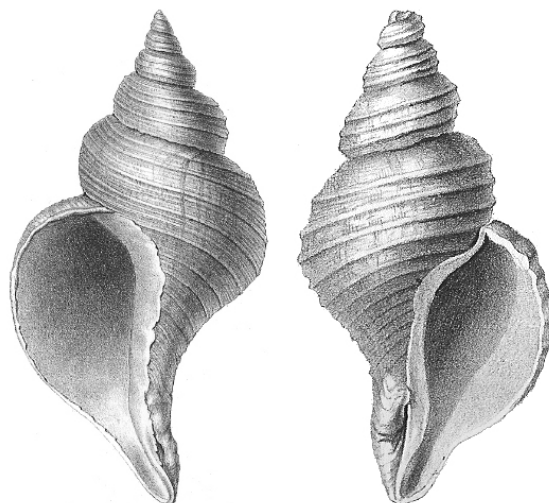
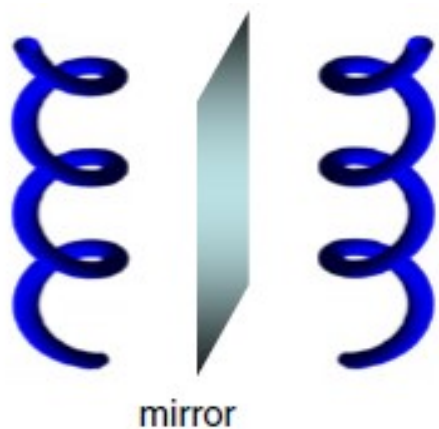
Пластинка $\lambda/4$



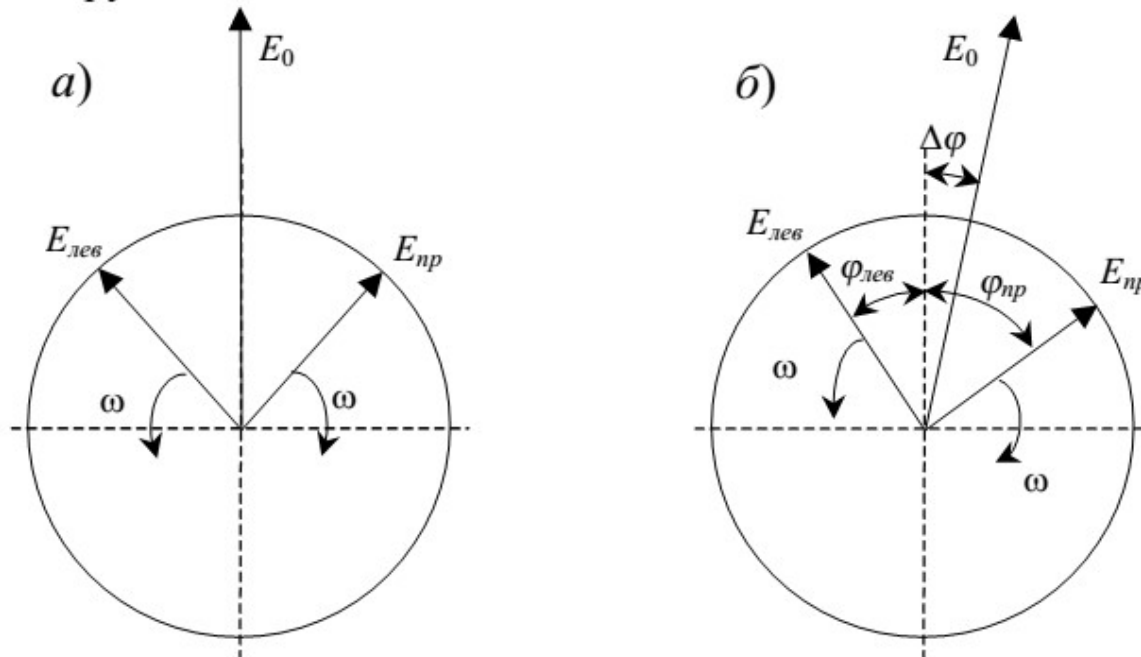
характерные толщины
0.05-1 мм

Управление оптическим излучением: хиральные среды

χειρ (greek) - рука



Управление оптическим излучением: хиральные среды

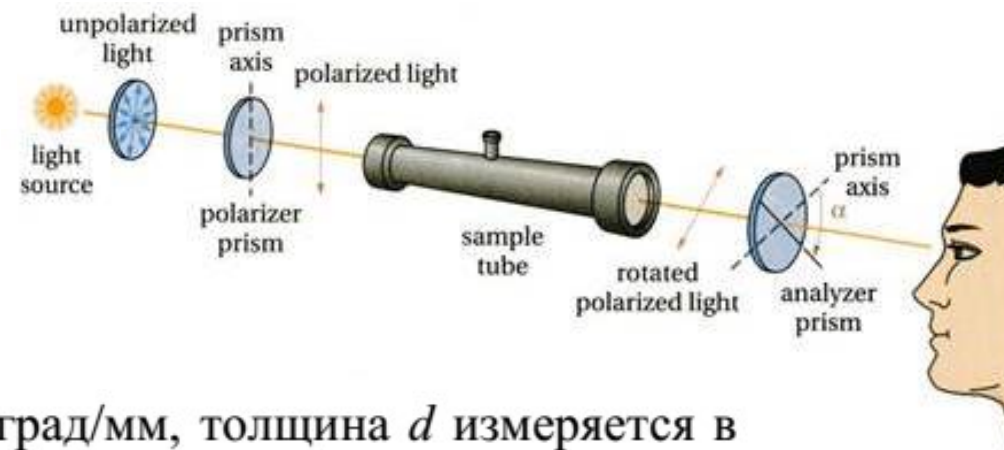


Принцип действия:
разные фазовые скорости для
правой и левой циркулярно
поляризованных волн

Для раствора глюкозы
угол поворота $\phi \sim 10^\circ$ при
длине кюветы 20 см,
концентрации 75 кг/м³

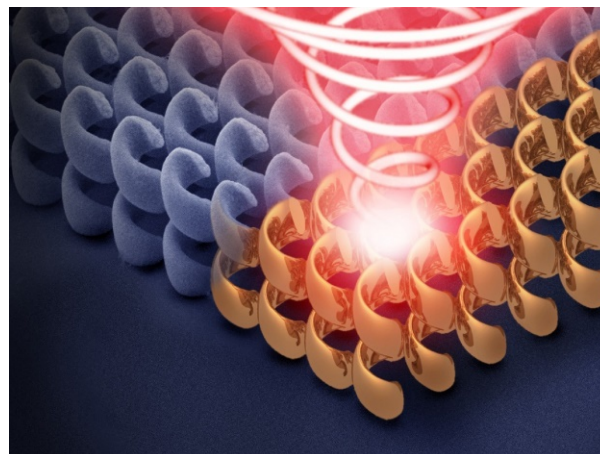
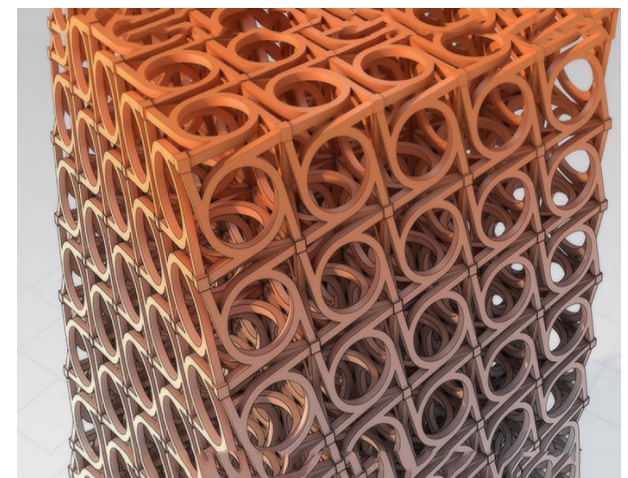
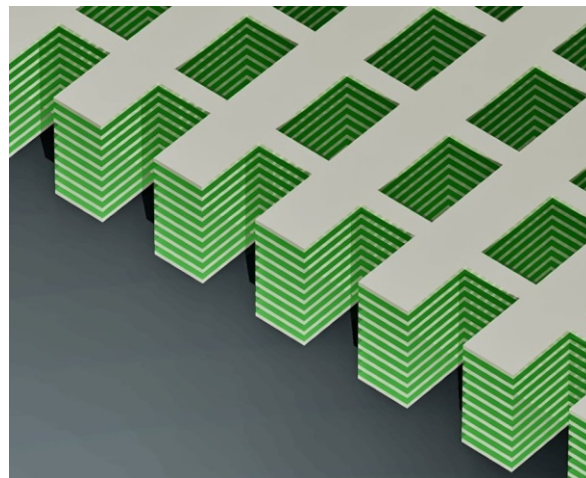
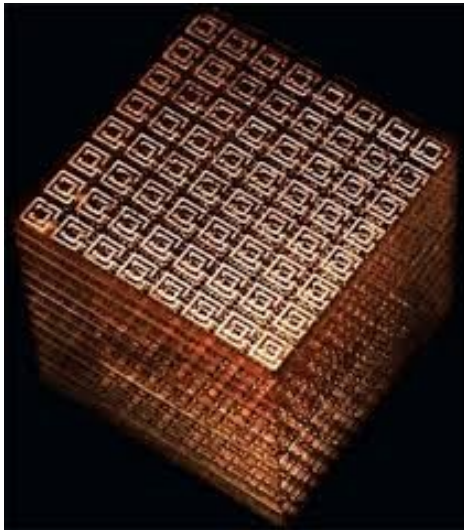
$$\varphi_{np} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \cdot (n_{np} - 1) \text{ и } \varphi_{лев} = -\frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \cdot (n_{лев} - 1)$$

$$\Delta\varphi = \frac{\varphi_{np} + \varphi_{лев}}{2} = \frac{\pi}{\lambda} \cdot d \cdot (n_{np} - n_{лев})$$



где α – удельное вращение, измеряемое в град/мм, толщина d измеряется в миллиметрах, угол вращения φ – в градусах.

Метаматериалы – рационально сконструированные искусственные материалы, позволяющие проектировать их физические свойства в соответствии с требованиями физических задач, часто далеко выходя за пределы, достижимые для «естественных» материалов. Сам термин метаматериалы был предложен руководителем Центра электромагнитных материалов и устройств в Остине (штат Техас, США) Роджером Уолсером в 2000 году. Элементарная ячейка – «мета-атом».

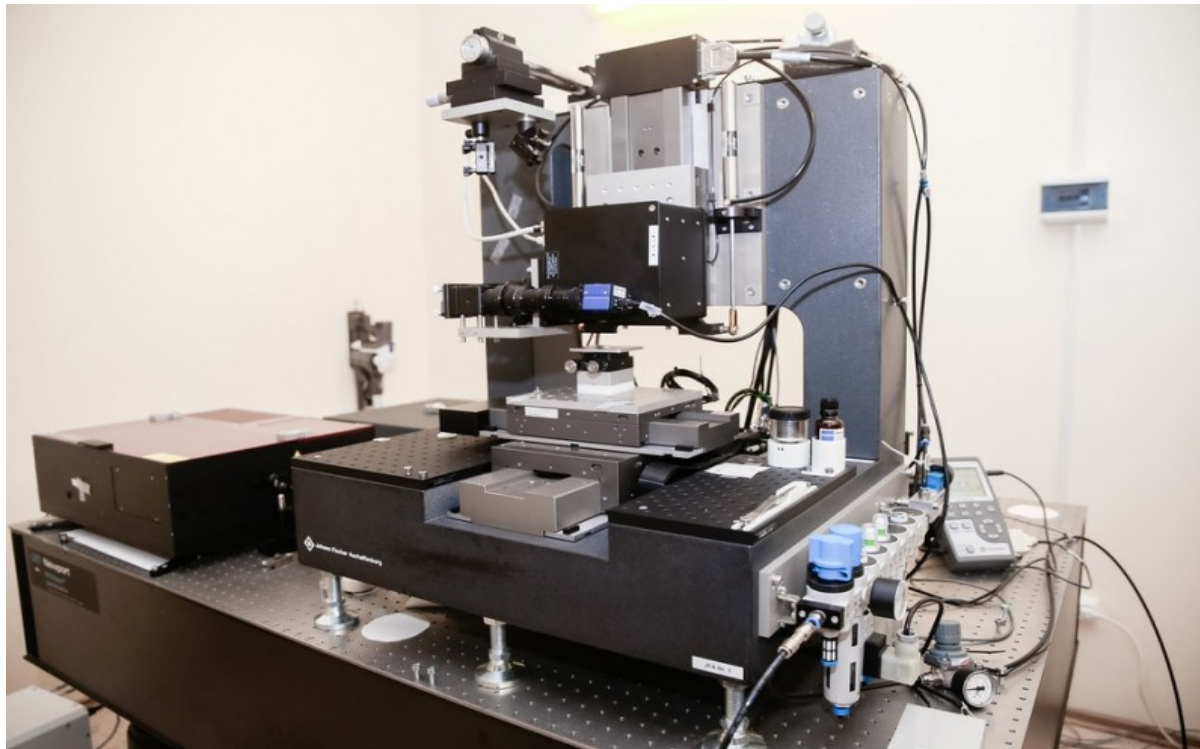


Оптические метаматериалы – «работают» в оптическом диапазоне длин волн.

Основные преимущества:

- Малые размеры (десятки-сотни нанометров)
- Быстродействие
- Контролируемые свойства
- Большая эффективность
- Принципиально новые эффекты, ненаблюдаемые в обычных средах

Применение: управление параметрами оптического излучения, датчики, сенсоры, системы хранения, обработки и передачи информации.

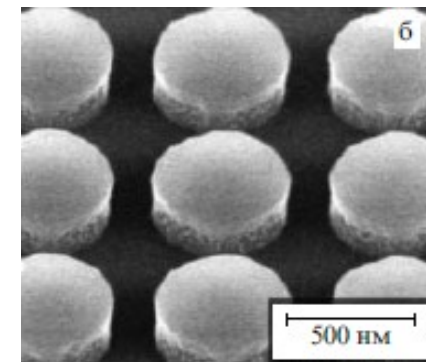
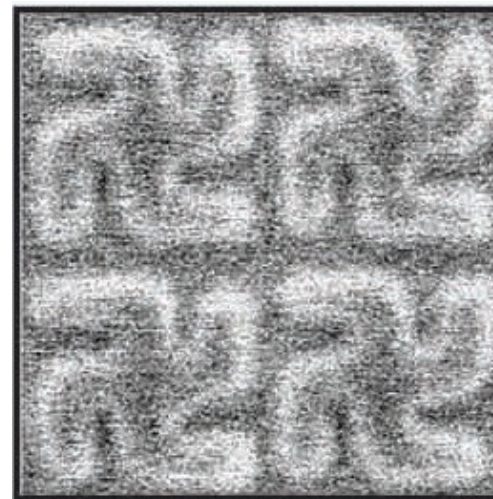
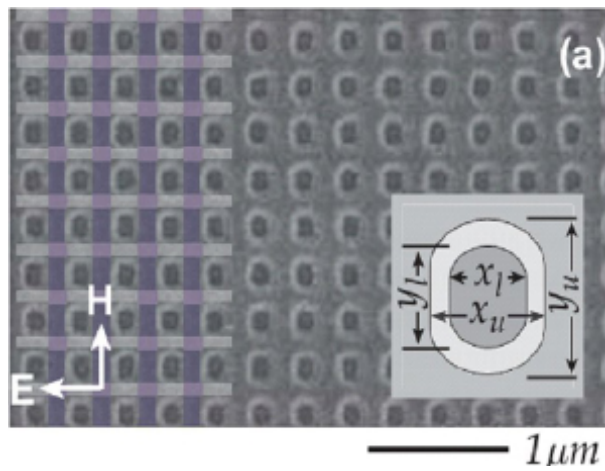
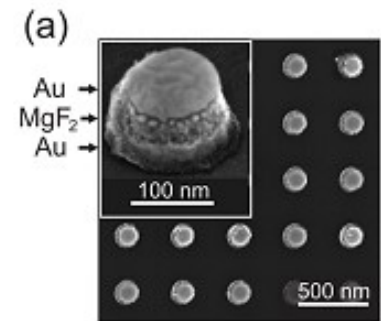
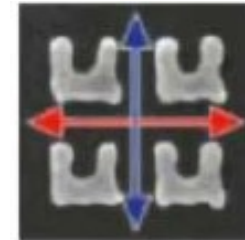
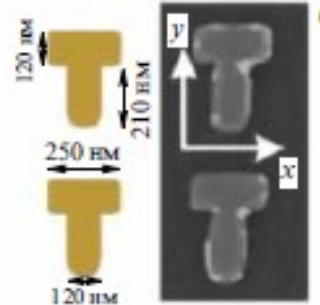
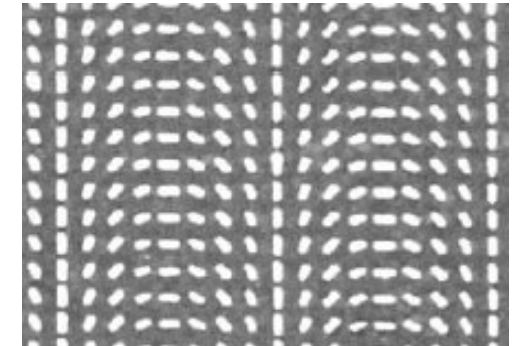


Метаповерхности

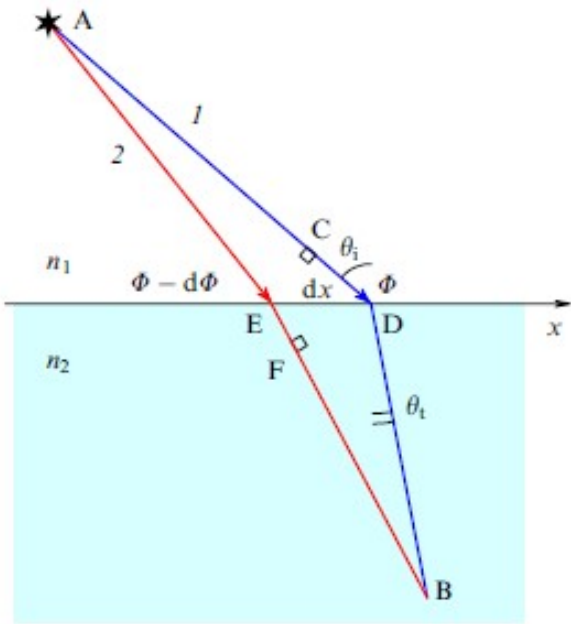
Двумерные метаматериалы – метаповерхности.

Преимущества:

- Проще в изготовлении
- Меньшее поглощение



Обобщенный закон Снеллиуса



$$n_2 \sin \theta_t - n_1 \sin \theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{\Delta\Phi}{\Delta x}$$

Аналогично для отражения

$$\sin \theta_r - \sin \theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi n_1} \frac{\Delta\Phi}{\Delta x}$$

Нужно реализовать скачки фазы на поверхности!!

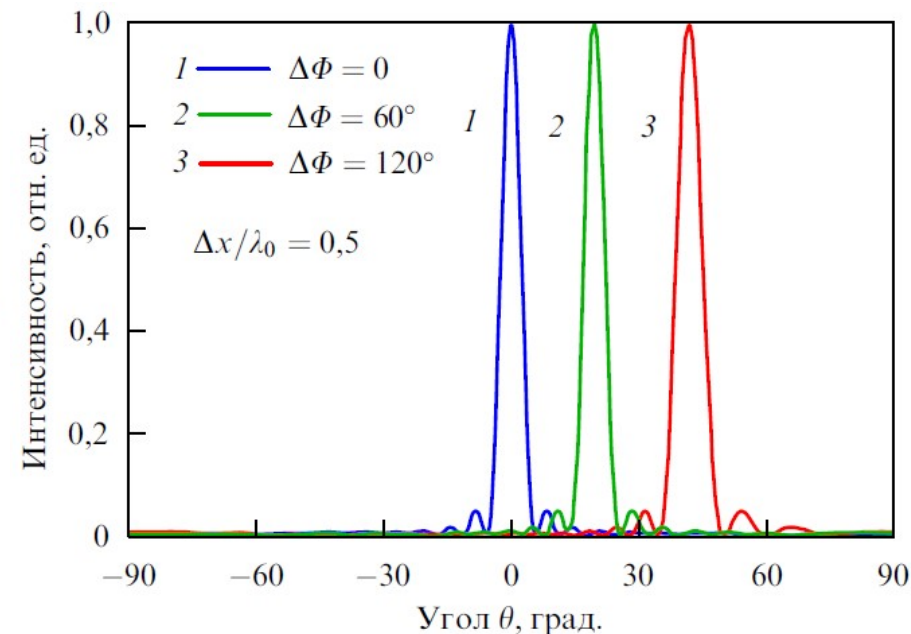
Обобщенный закон Снеллиуса



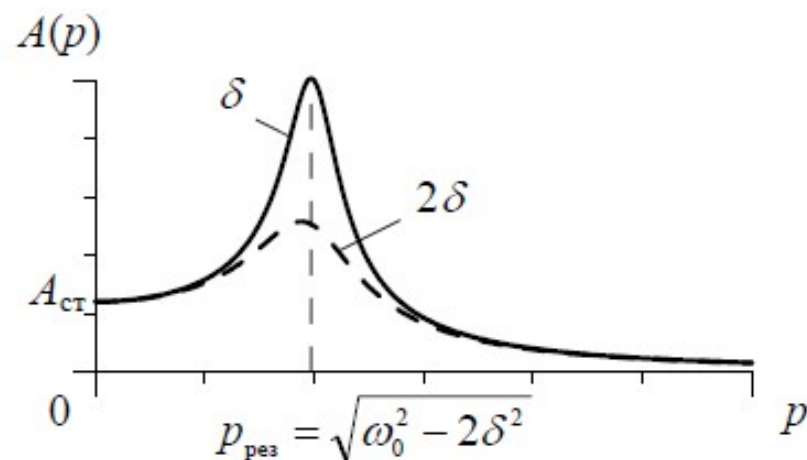
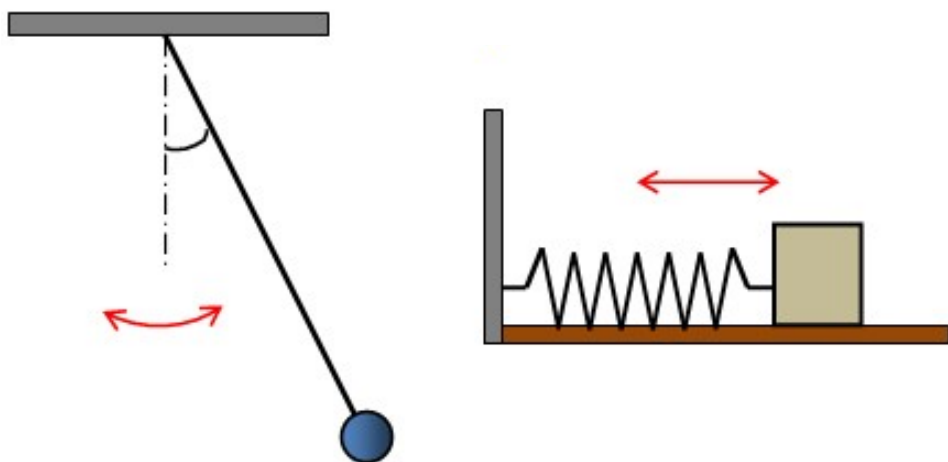
$$n_2 \sin \theta_t - n_1 \sin \theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{\Delta\Phi}{\Delta x}$$

если $n_2=1.5$, $\Delta x=\lambda_0/4$, $\theta_i=0$, то $\theta_t=26^\circ$

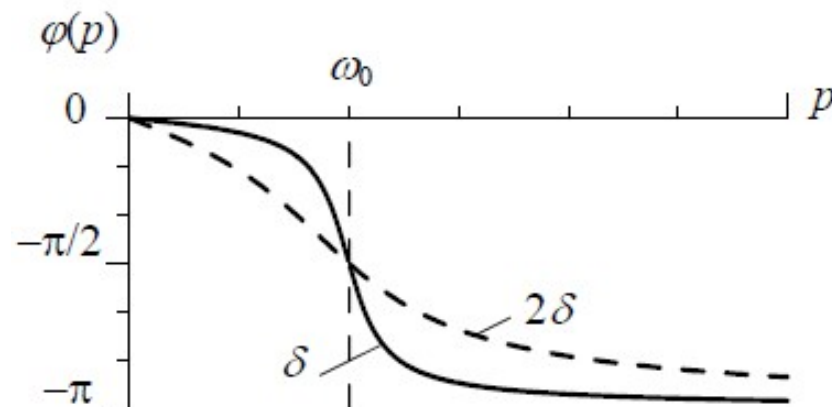
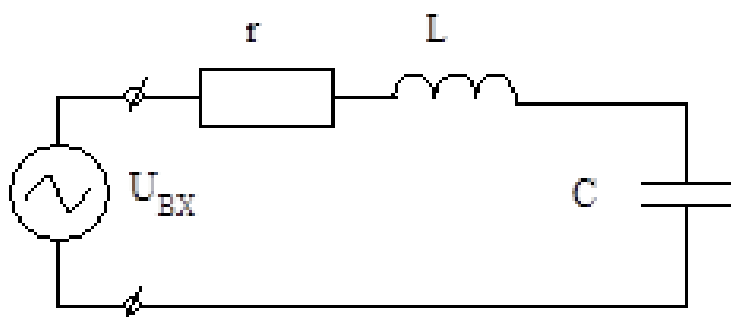
если расстояние между мета-атомами $\Delta x < \lambda_0$,
то будет только один максимум



Как можно контролировать фазу?



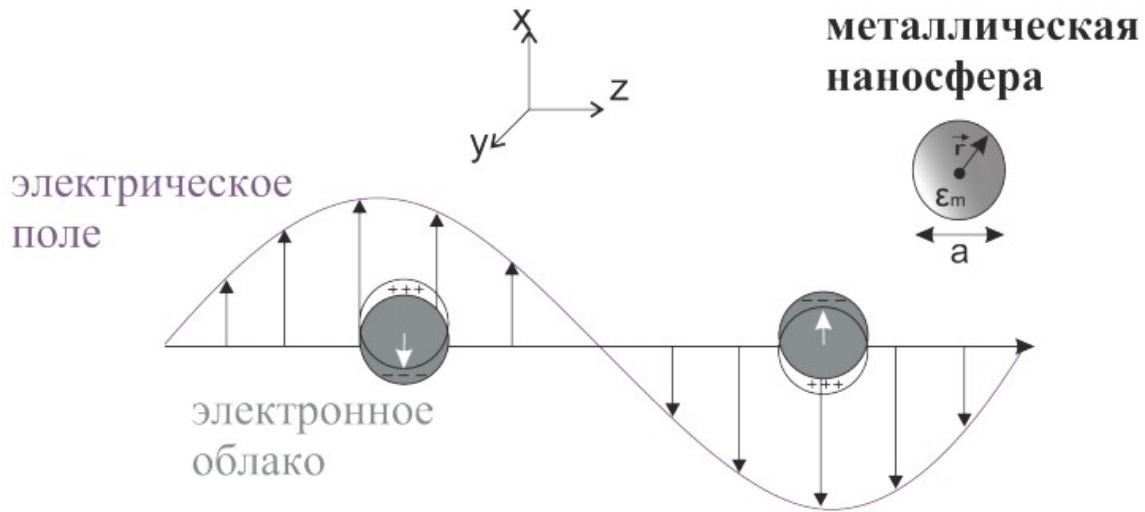
Зависимость амплитуды вынужденных колебаний $A(p)$ от частоты p при различных коэффициентах затухания δ



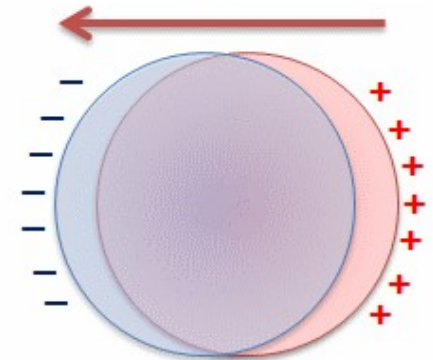
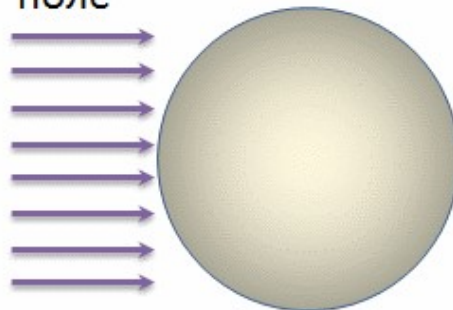
Зависимость начальной фазы вынужденных колебаний $\varphi(p)$ от частоты p при различных коэффициентах затухания δ

Как можно контролировать фазу?

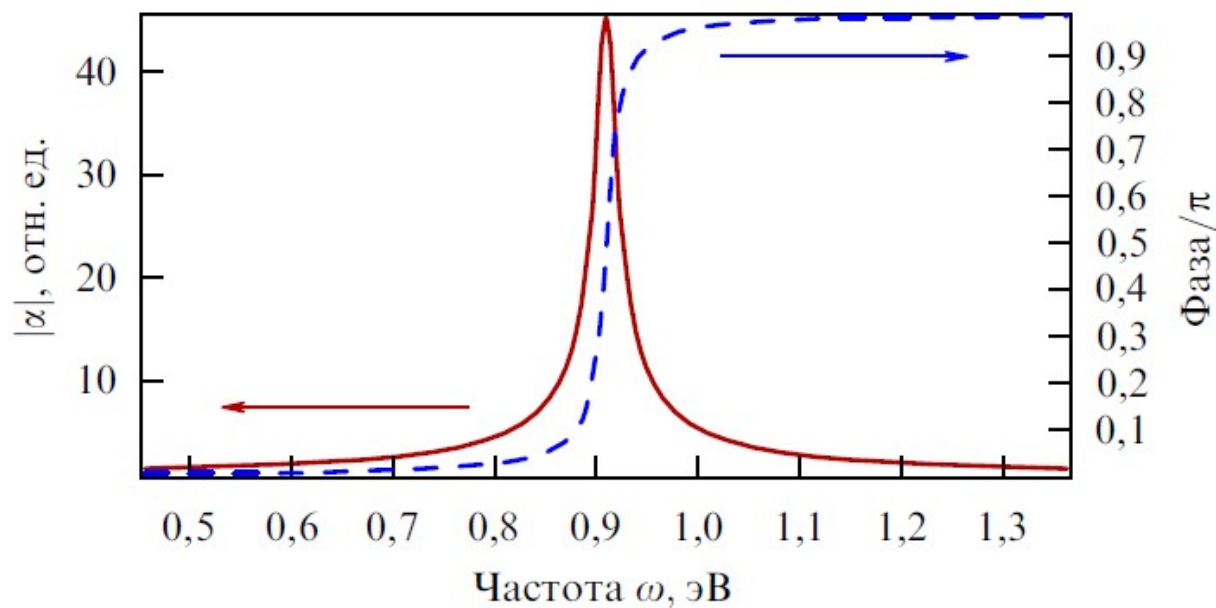
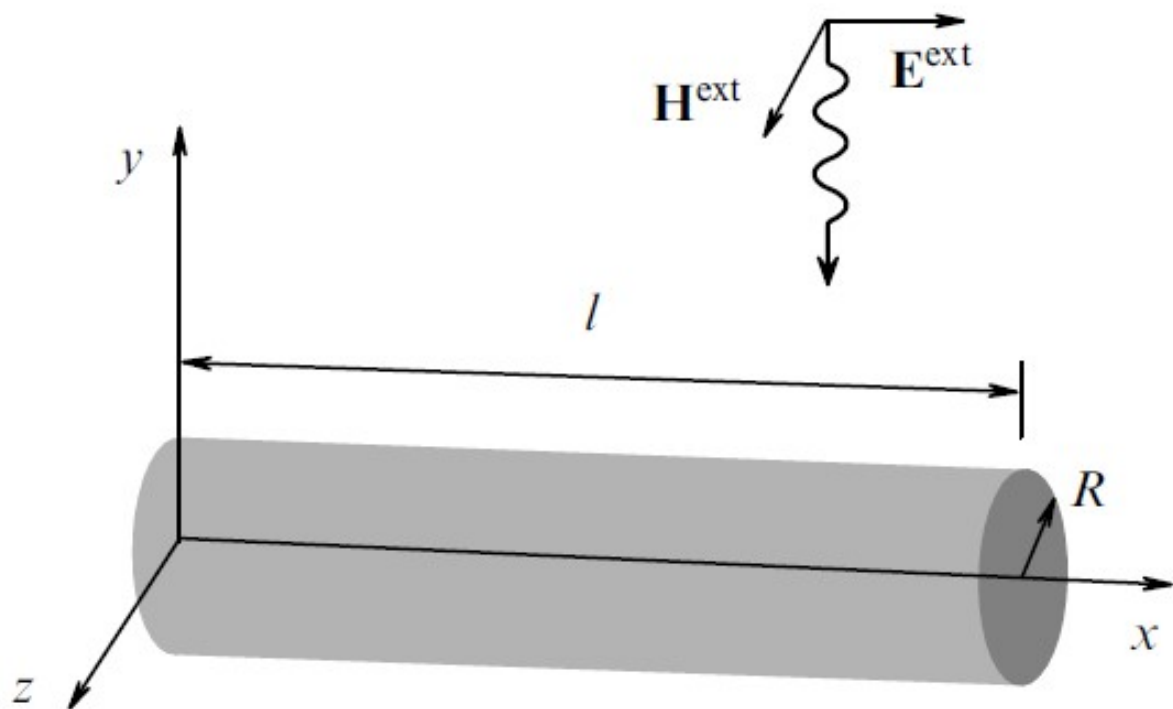
Металл: плазмонный резонанс - связанные колебания электромагнитного поля и электронов проводимости.



Внешнее электрическое поле



Как можно контролировать фазу?



Как можно контролировать фазу?

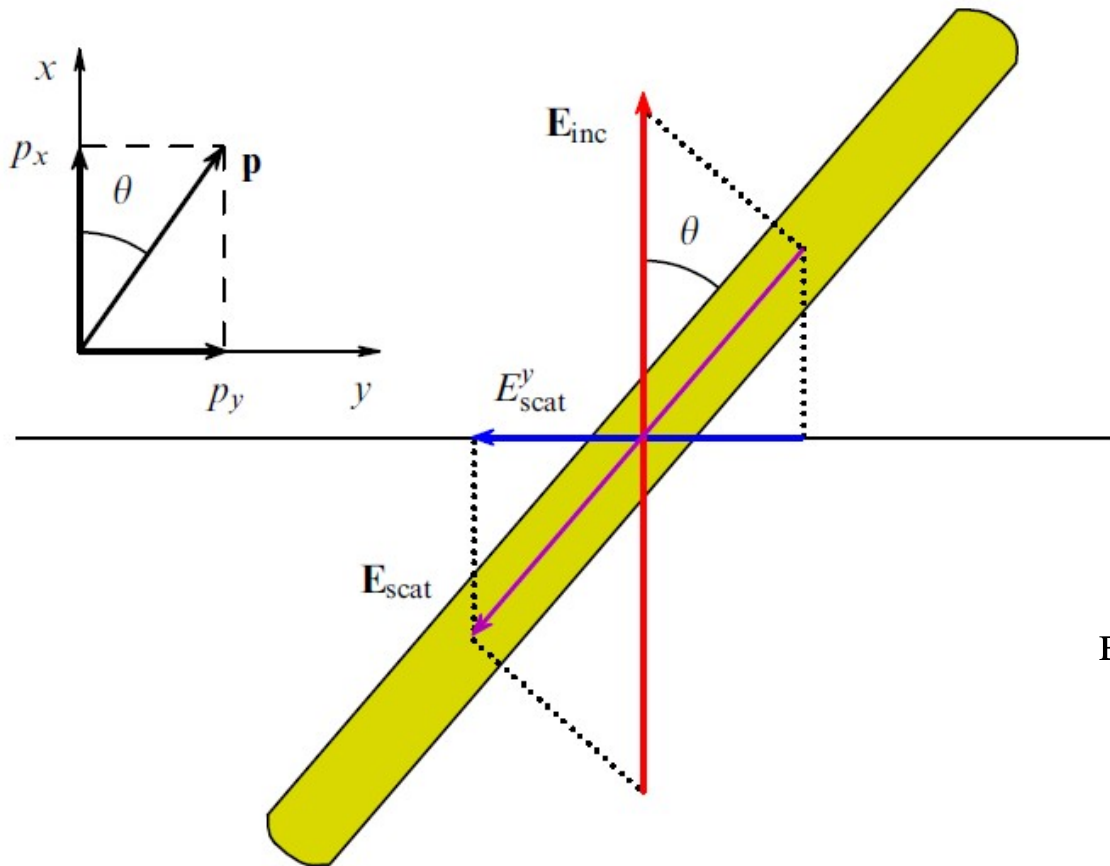


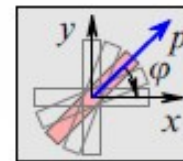
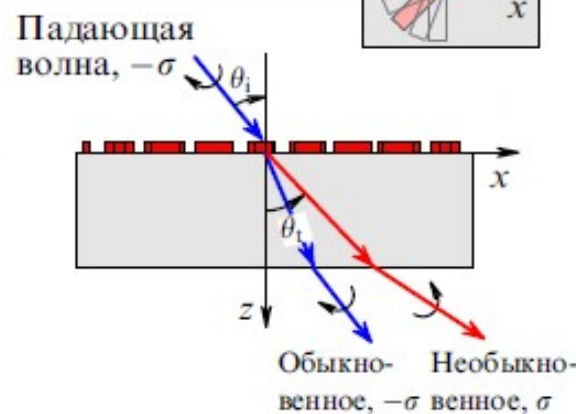
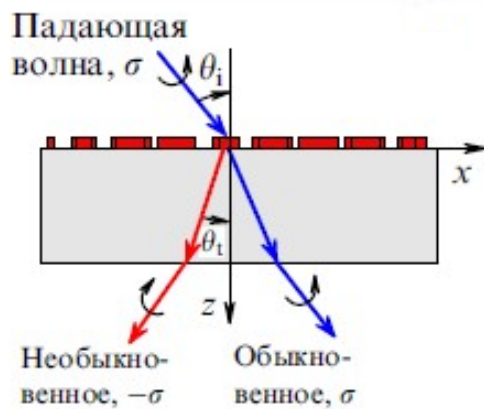
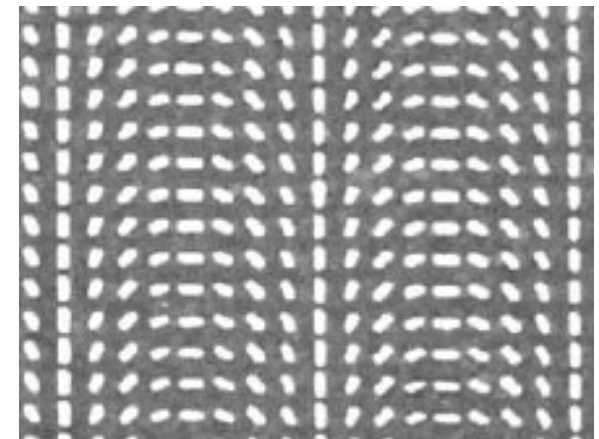
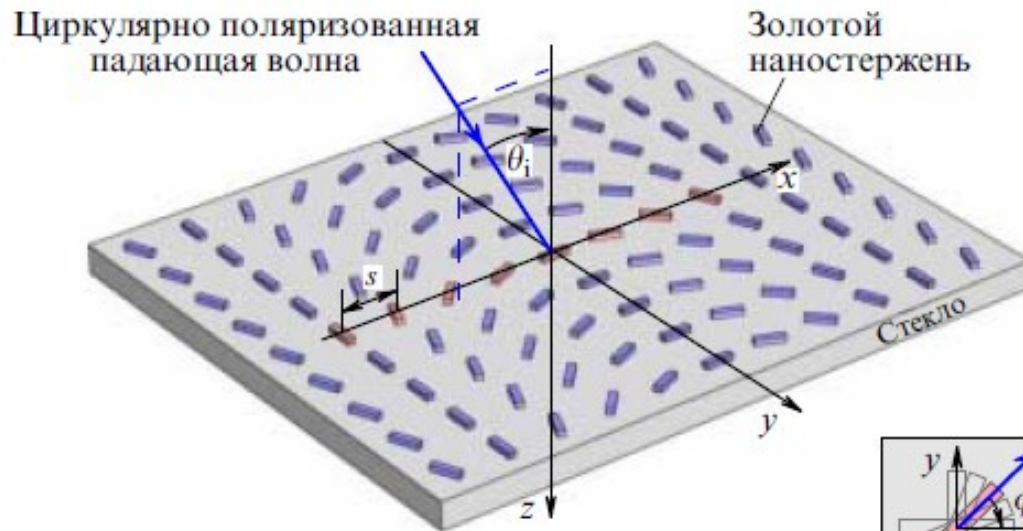
схема с кросс-поляризацией
позволяет варьировать фазу
от 0 до 2π

варьируем наклон и длину наностержня

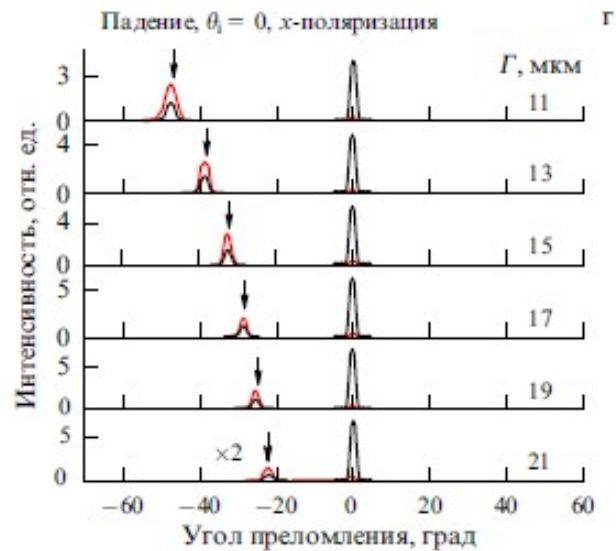
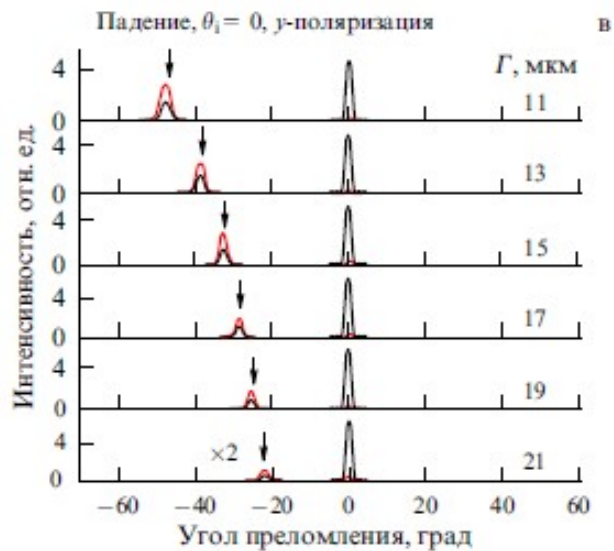
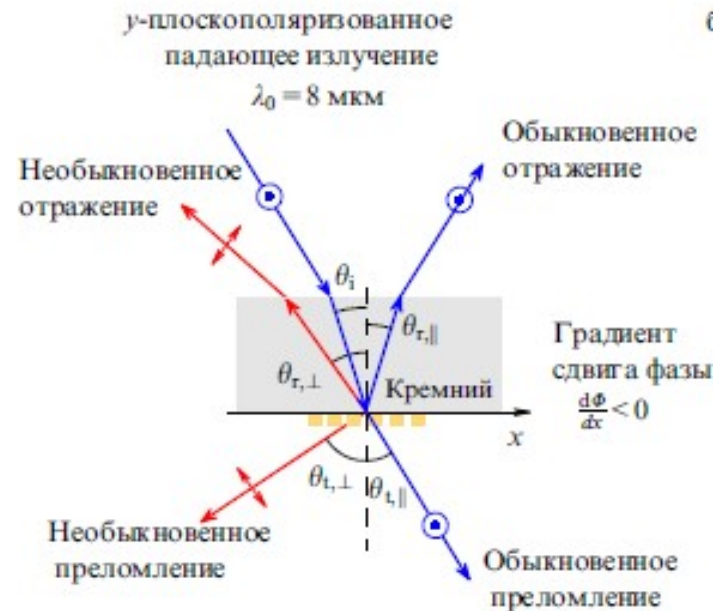
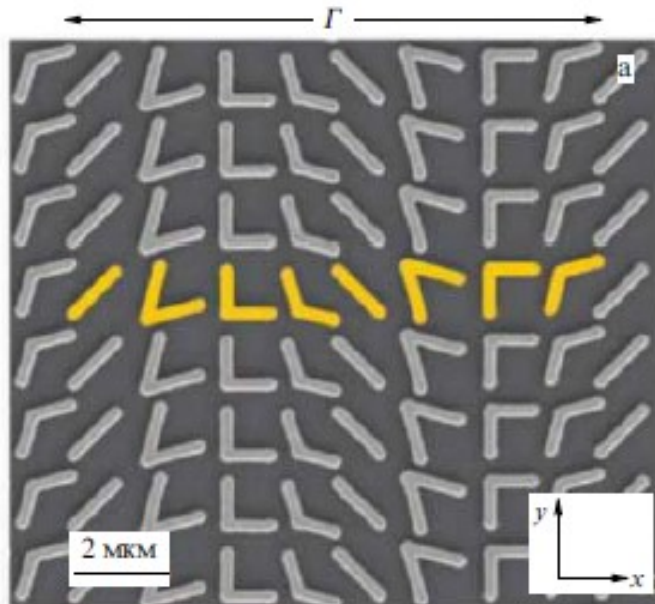
Недостаток – узкий резонанс, т.е.
малый рабочий спектральный
диапазон

$$\alpha_j(\omega) = \frac{8V}{j^2\pi^2} \frac{\omega_p^2}{\Omega_j^2 - \omega^2 - i\omega/\tau}$$

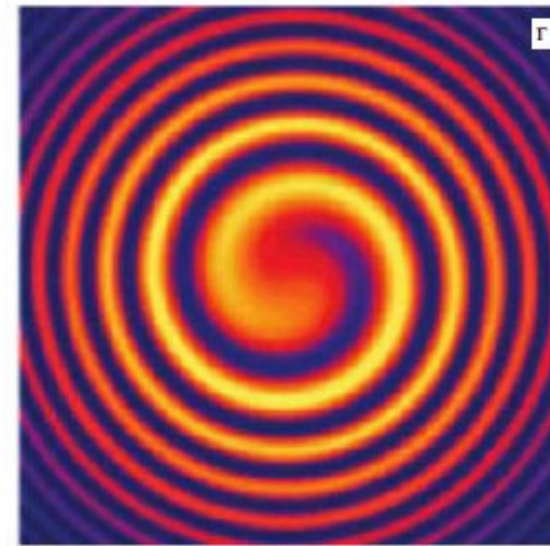
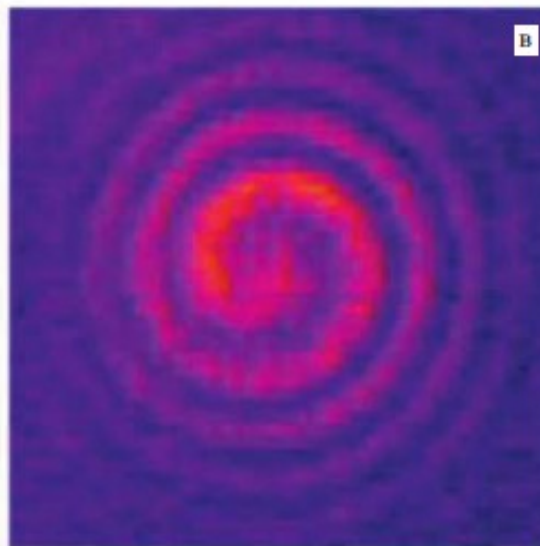
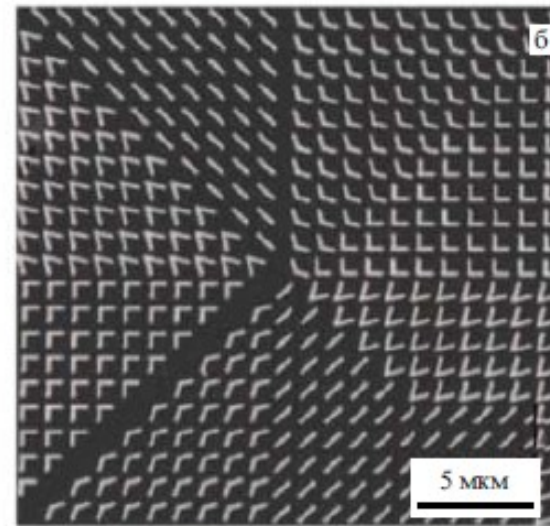
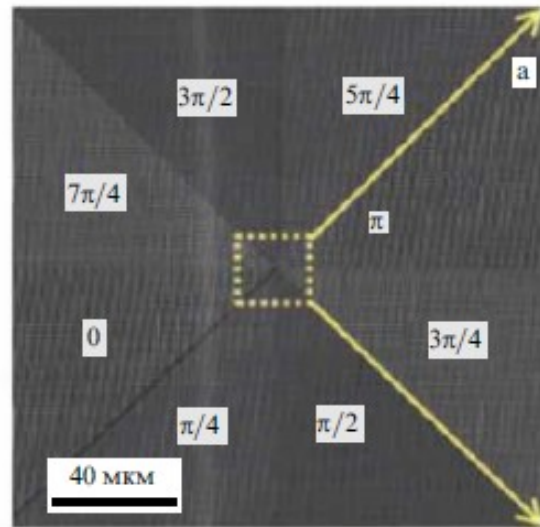
Необычное преломление



Необычное преломление и отражение



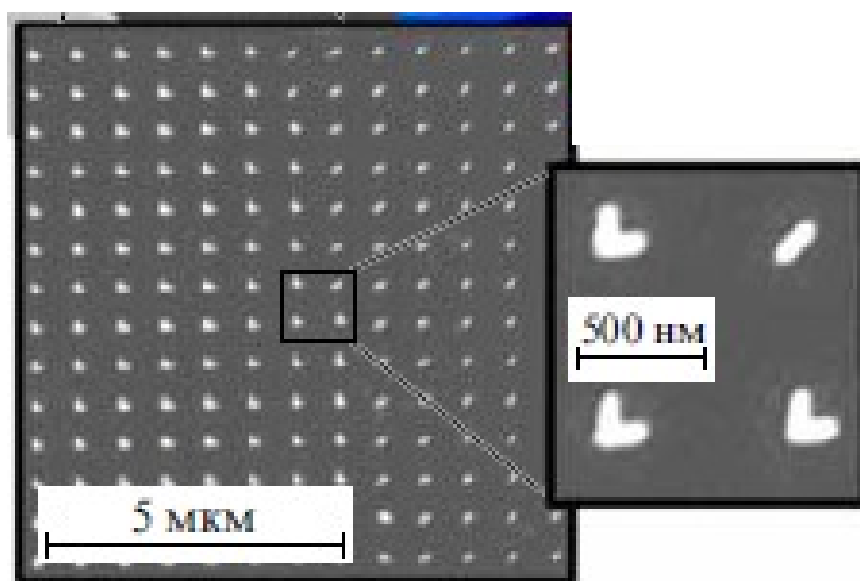
Необычное преломление и отражение



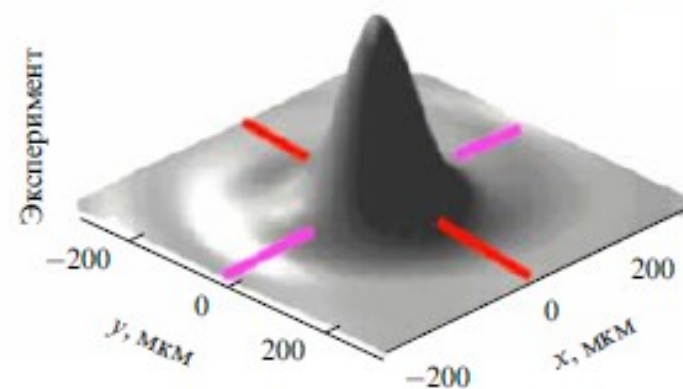
эксперимент

расчет

Фокусировка

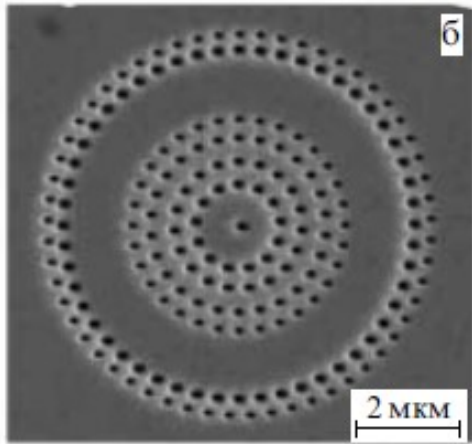


Толщина 50 мкм

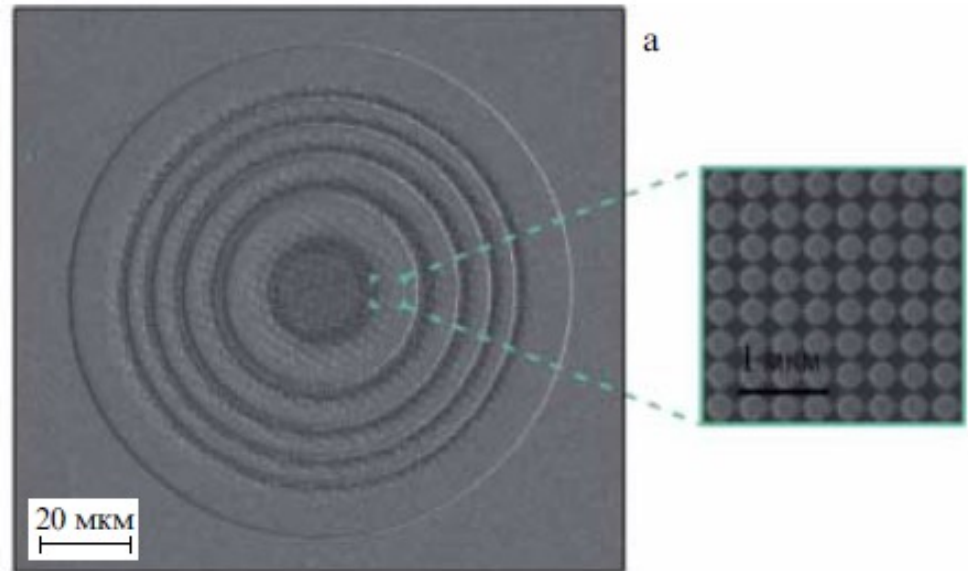


Фокусировка

$$\varphi_L(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{(x^2 + y^2) + f^2} - f \right)$$



золотая пленка
толщиной 380 нм с
наноотверстиями

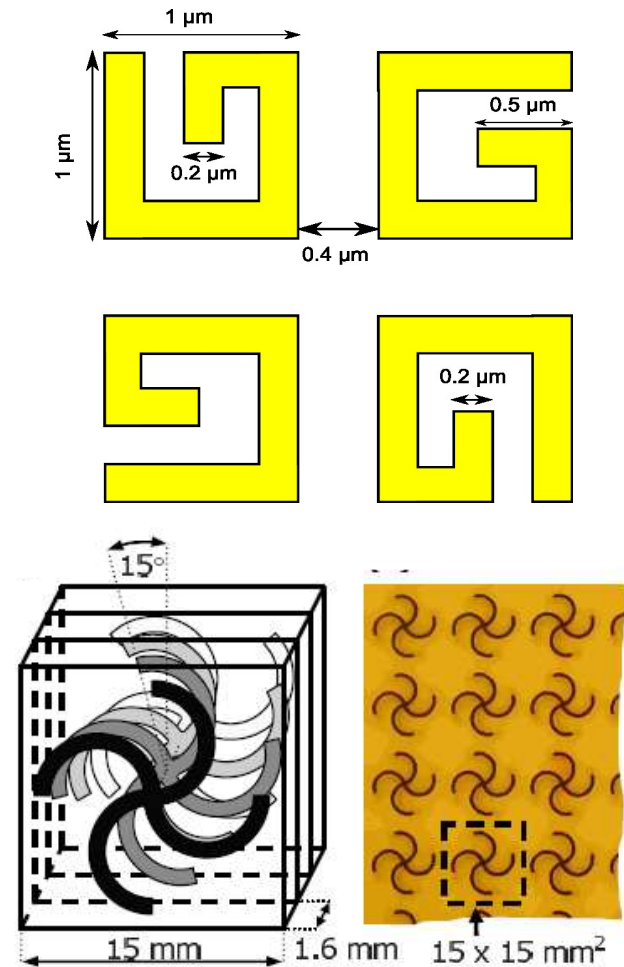
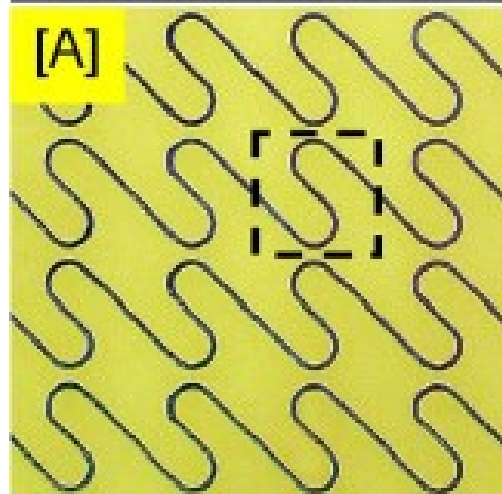
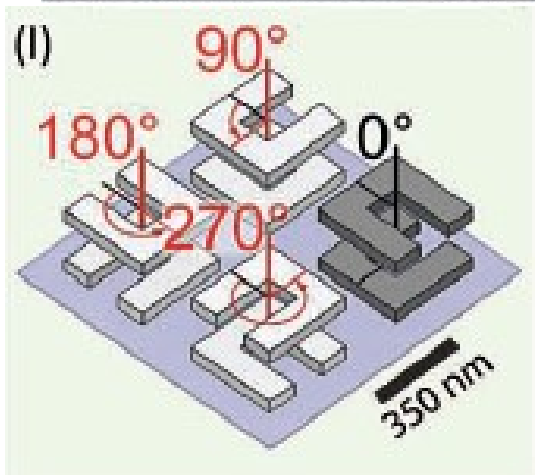
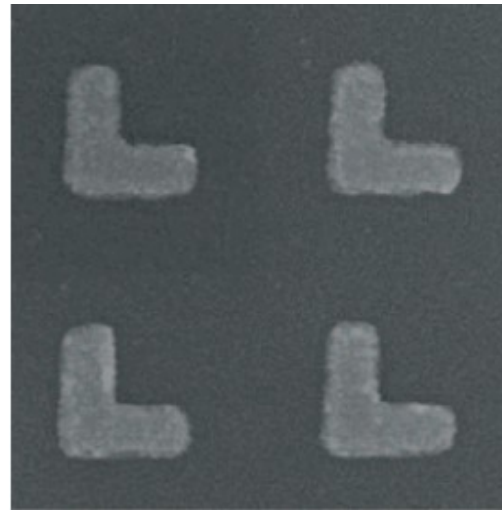
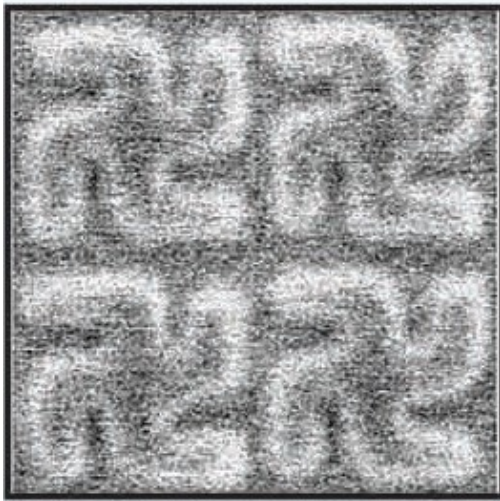


Мета-атомы линзы – цилиндры высотой
600 нм и диаметром около 100 нм

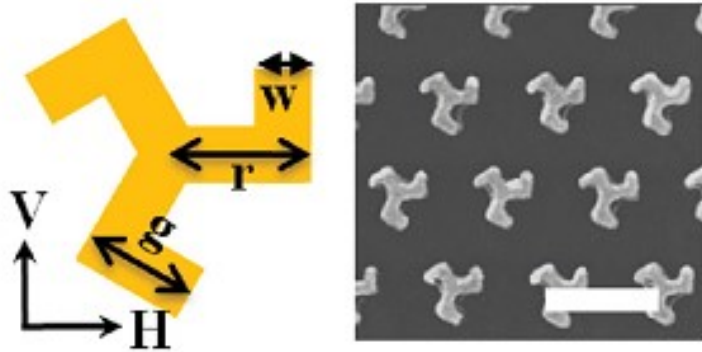
Фокусное расстояние – десятки мкм

Вращение плоскости поляризации: хиральные метаповерхности

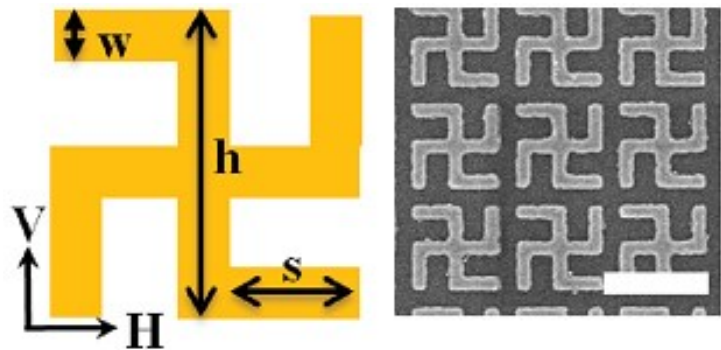
Двумерный объект называется хиральным, если у него нет осей симметрии в плоскости объекта.



Вращение плоскости поляризации: хиральные метаповерхности

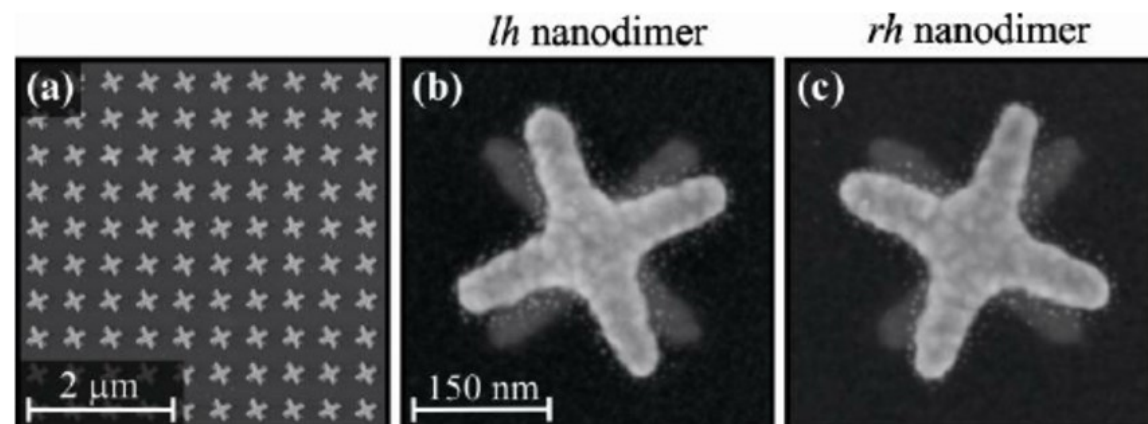


«trisceli»



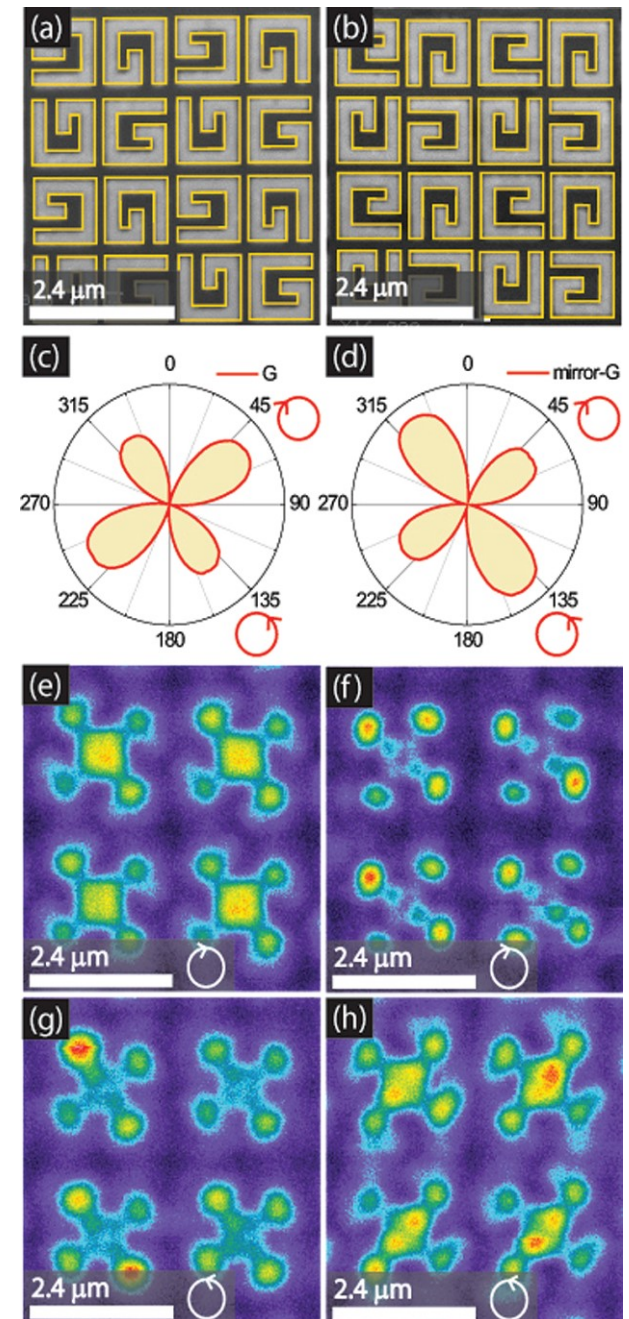
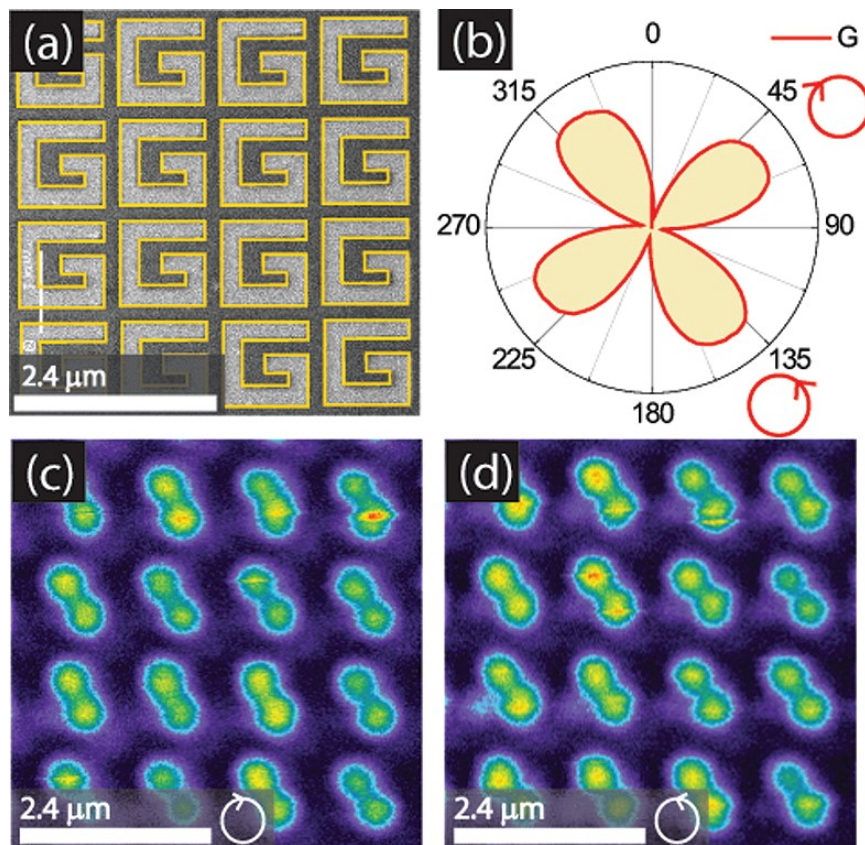
gammadion

twisted-cross
double-layer nano-
dimers

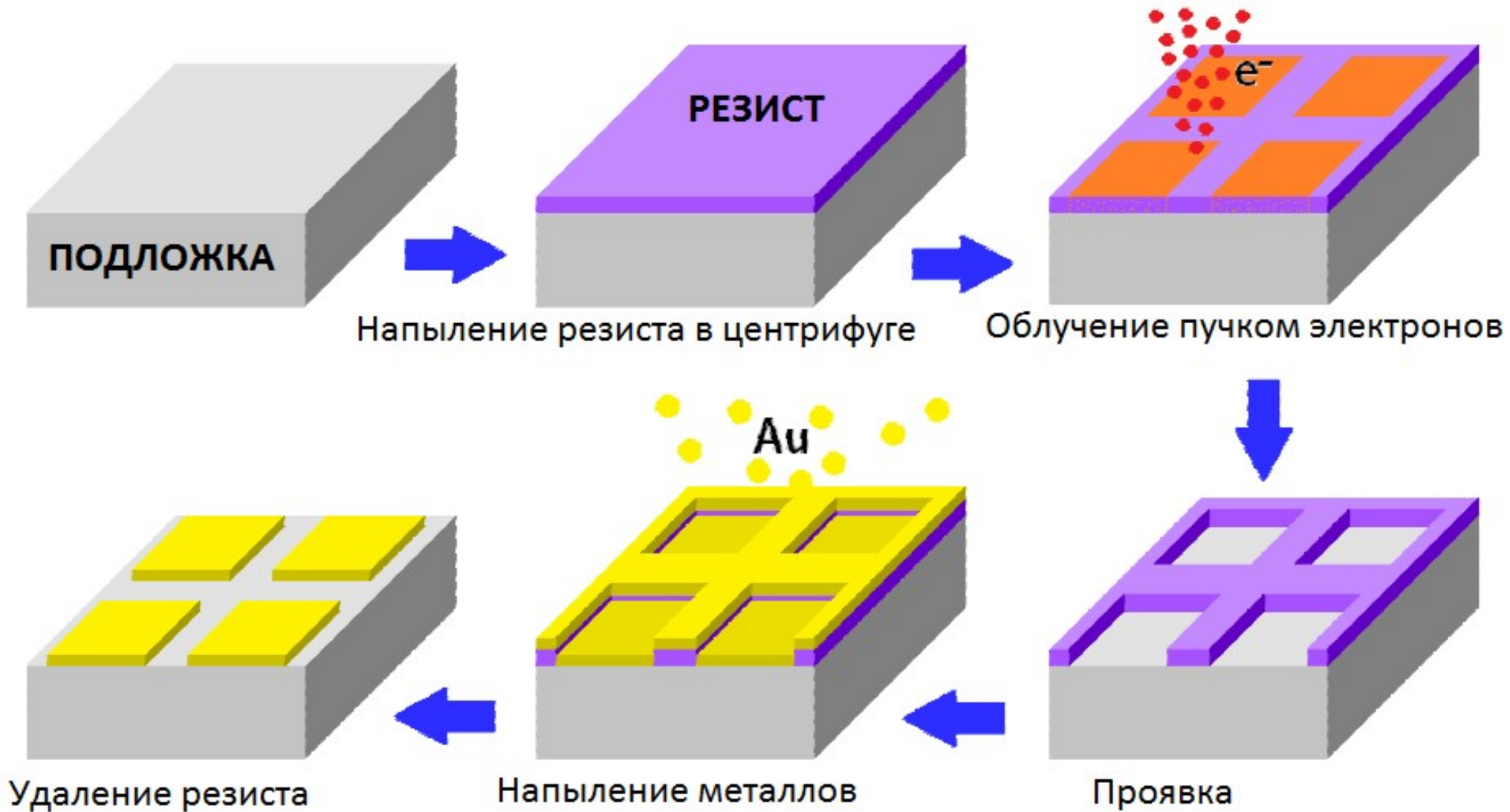


Вращение плоскости поляризации: хиральные метаповерхности

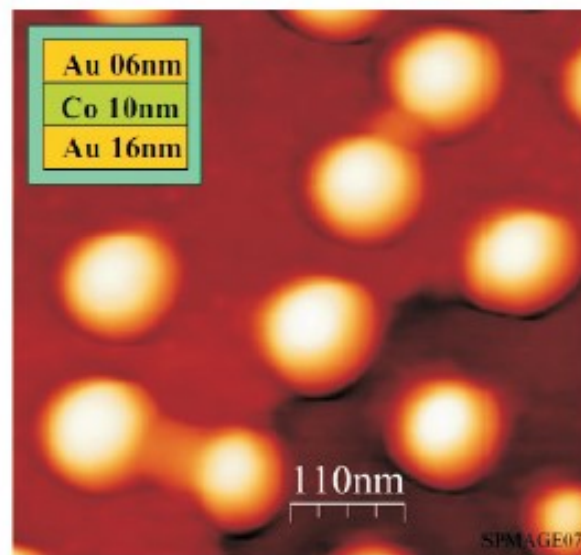
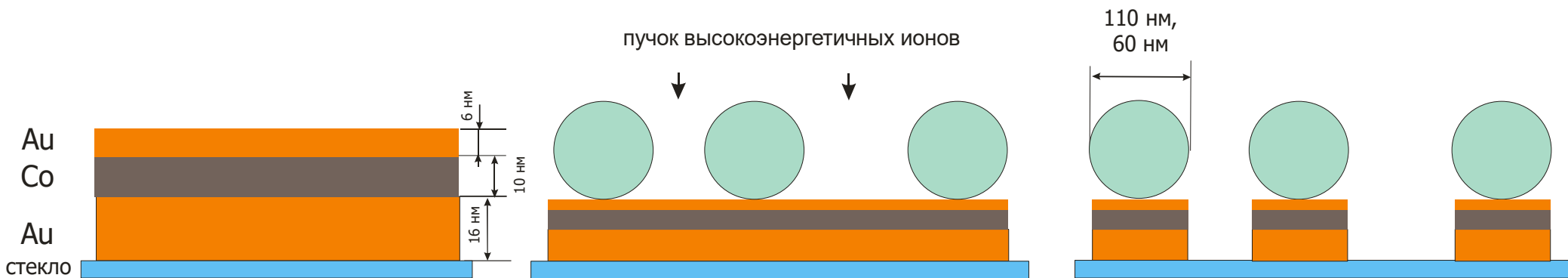
Принцип действия – разная локализация поля
левой и правой циркулярно поляризованной волны



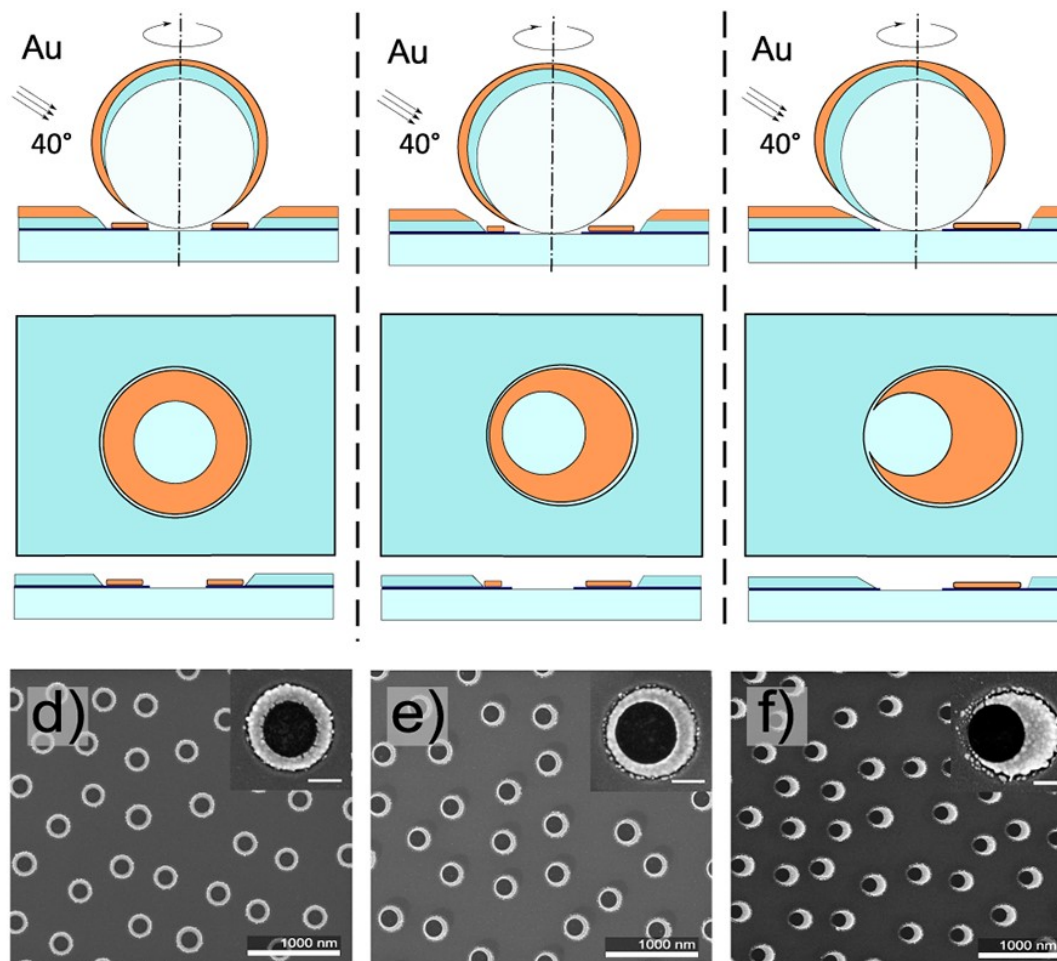
Методы изготовления: lift-off литография



Методы изготовления: коллоидная литография



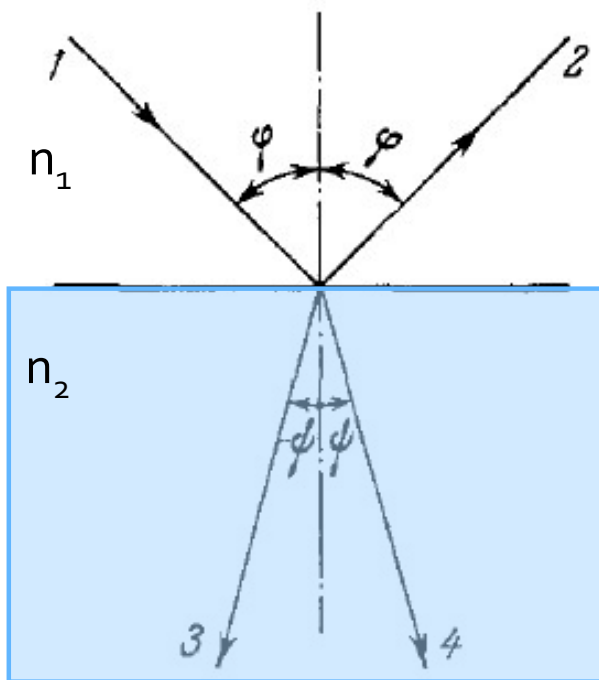
Методы изготовления: коллоидная литография



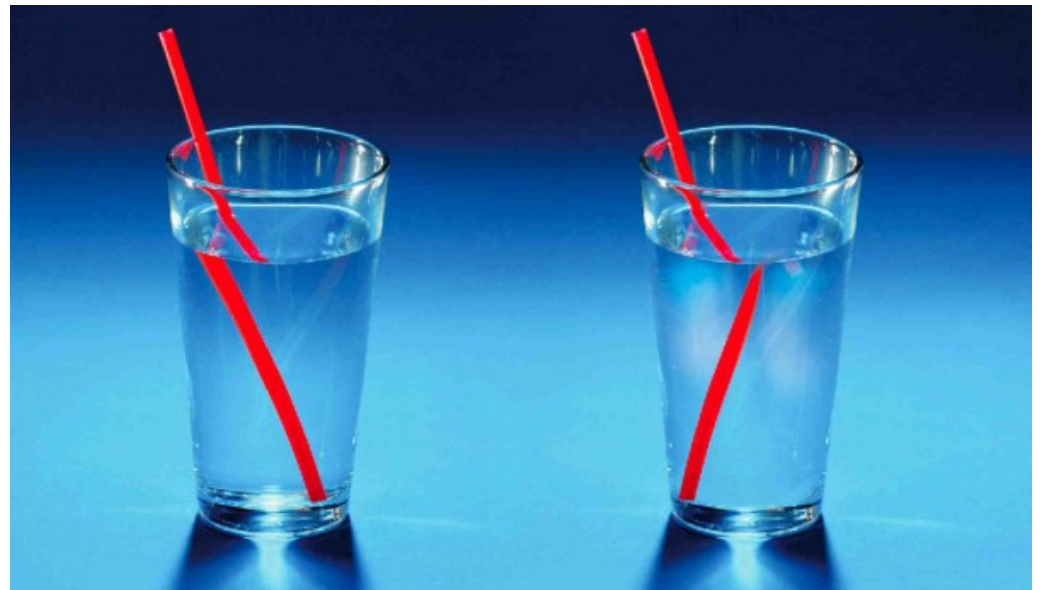
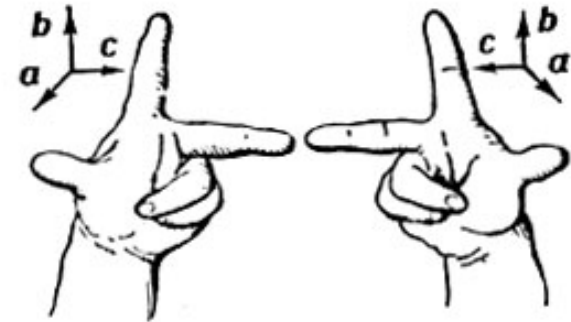
3D метаматериалы: Отрицательная рефракция

$$\varepsilon(\omega) < 0; \mu(\omega) < 0$$

$\varepsilon < 0; \mu < 0$ **E, H, k** **Левая тройка векторов**



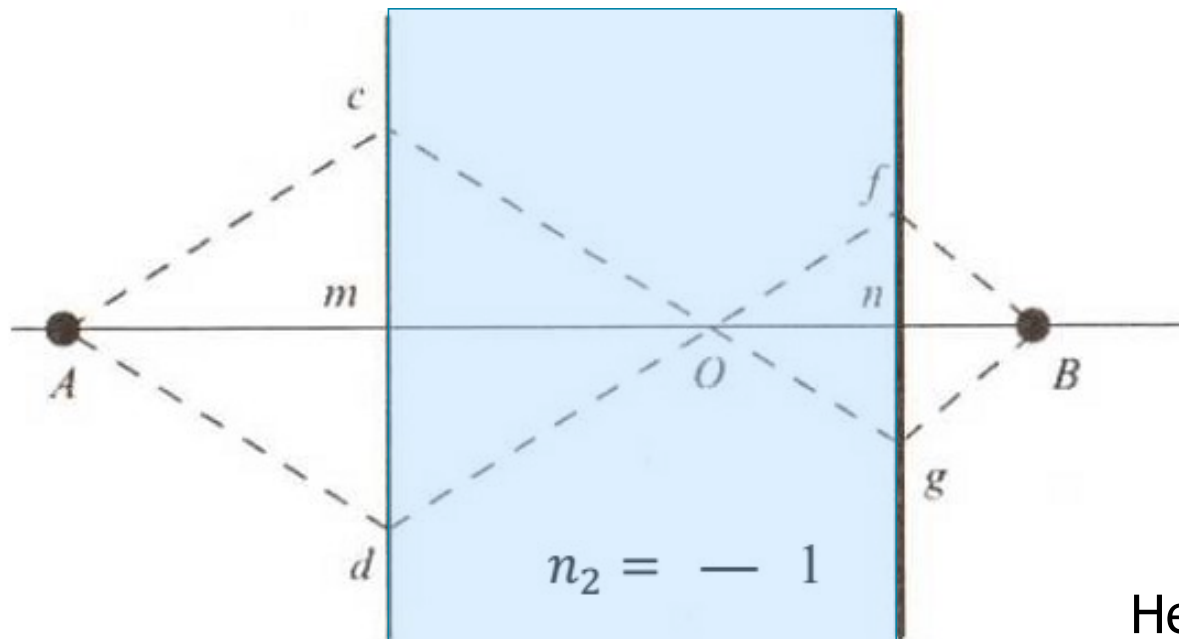
$$\frac{\sin \psi}{\sin \varphi} = \frac{n_1}{n_2}$$



1-3 аномальная рефракция

Отрицательная рефракция

Линза Веселаго



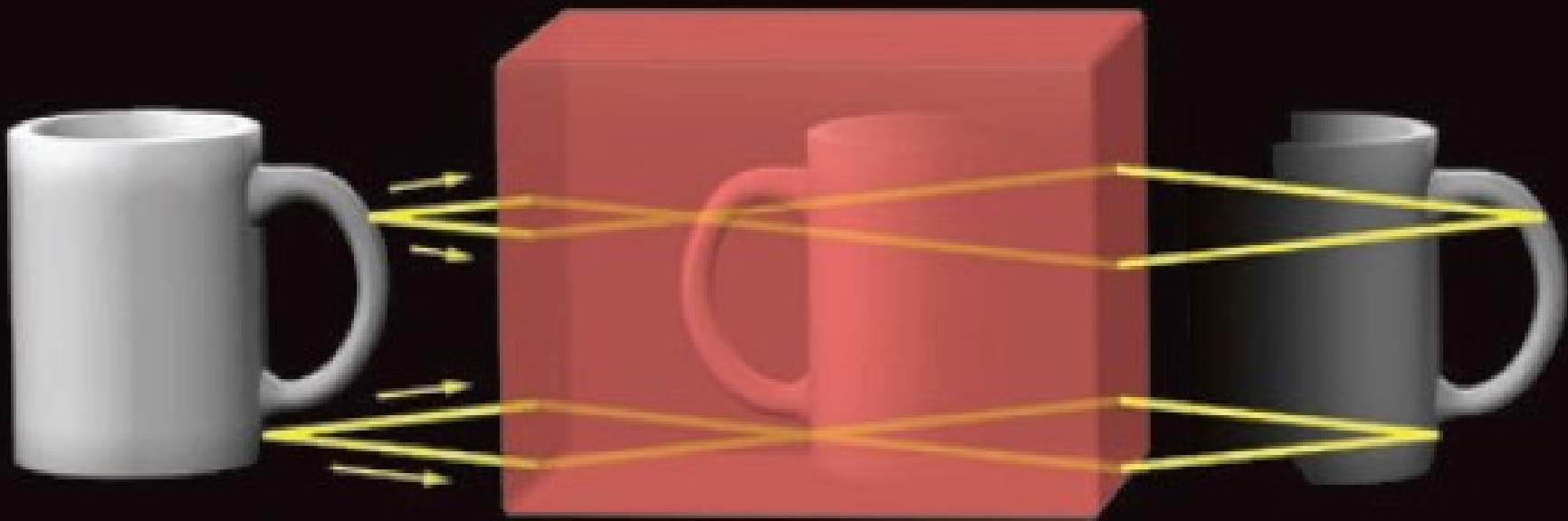
$$Am < mn$$

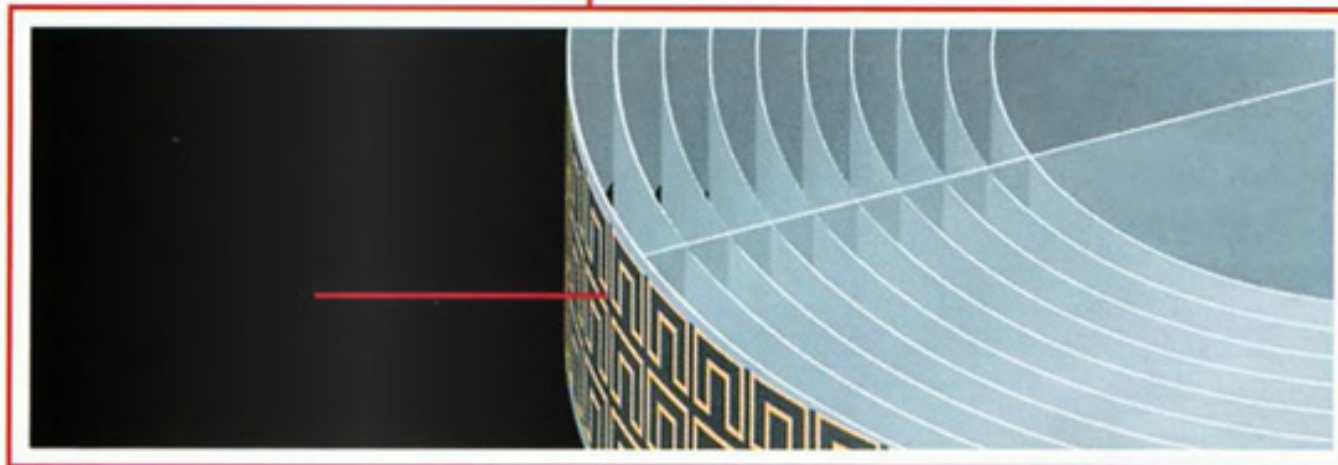
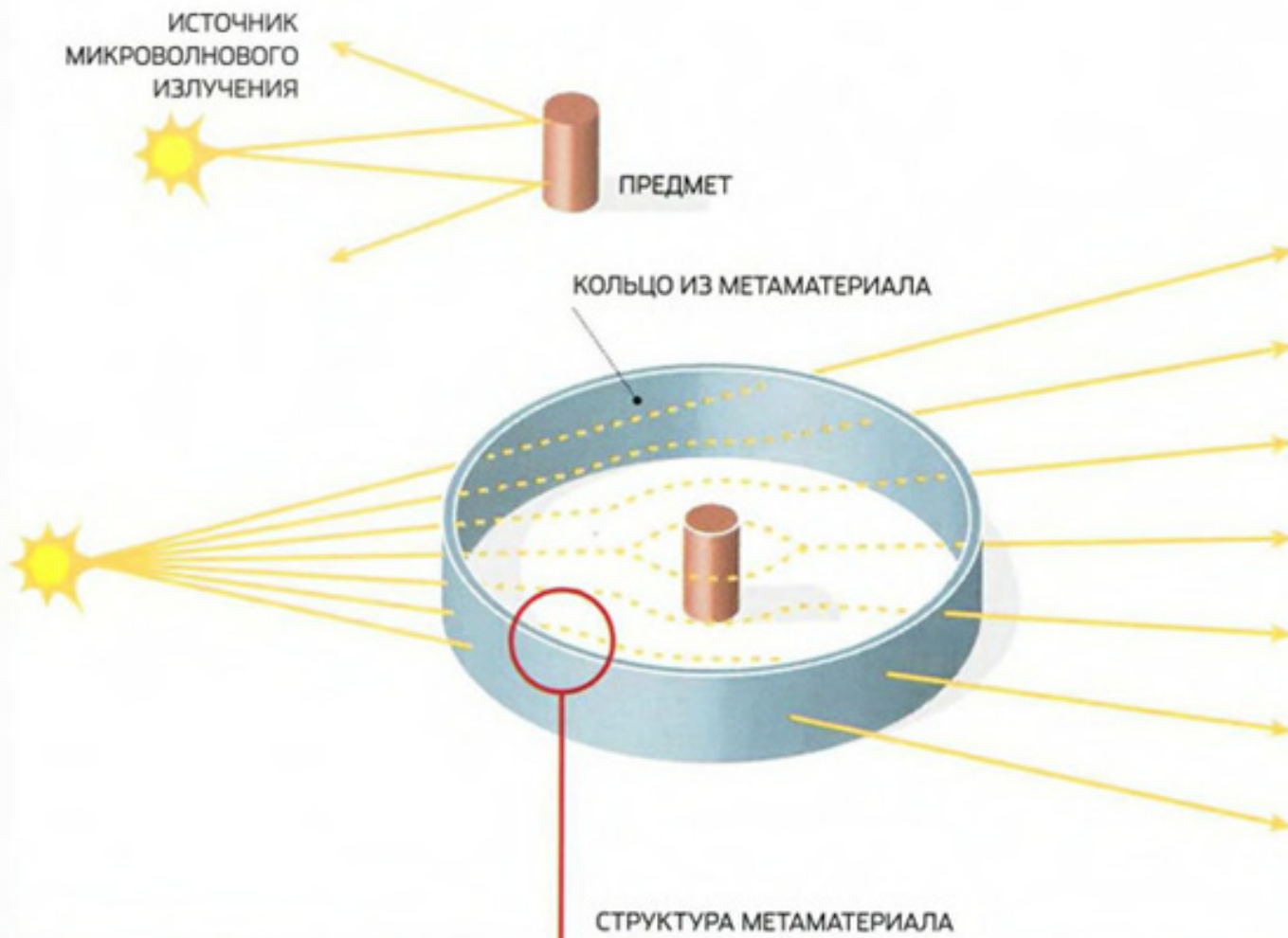
Не работает как обычная линза – не собирает плоскопараллельный пучок света в точку!!

Отрицательная рефракция

СУПЕРЛИНЗА

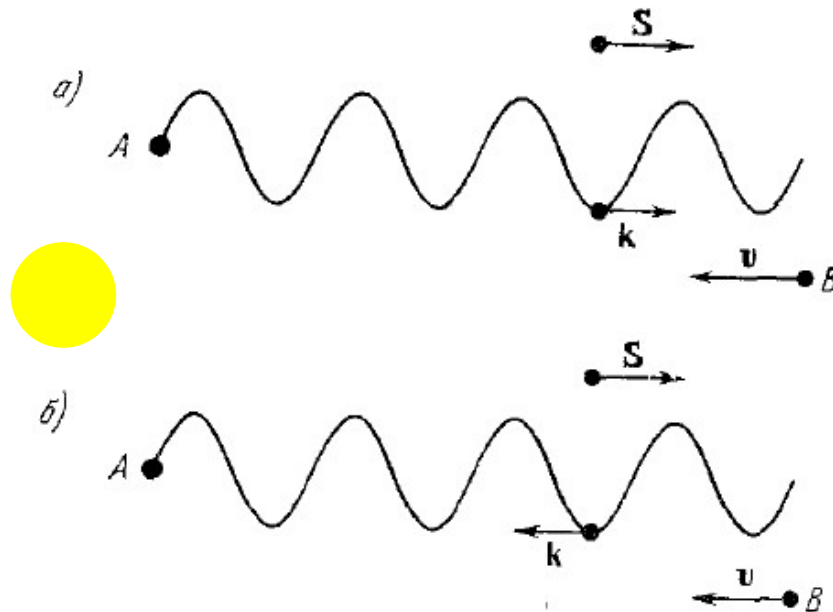
Прямоугольный брусок из материала с отрицательным показателем преломления образует суперлинзу. Свет (желтые линии) от объекта (слева) преломляется на поверхности линзы и снова сходится, формируя перевернутое изображение внутри бруска. Выходя из него, свет преломляется снова и создает второе изображение (справа). Для некоторых метаматериалов изображение содержит детали, более мелкие, чем длина волны используемого света, что невозможно для линз с положительным преломлением





Отрицательная рефракция

Эффект Доплера



обычная среда,
источник и приемник
движутся навстречу
друг другу – увеличение
частоты



среда с отрицательным
показателем
преломления, источник
и приемник движутся
навстречу друг другу –
уменьшение частоты

Суперлинзы

Критерий Аббе: $\Delta x \geq 0.61 \frac{\lambda}{NA}$

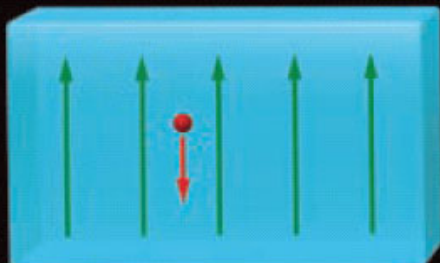
где Δx - разрешаемое расстояние, λ - длина волны излучения, $NA = n \sin\theta$ - числовая апертура, равная примерно 1.3-1.4 для современных объективов, n - показатель преломления среды, в которой находится анализируемый объект, θ - половина угла раствора конуса, образованного крайними сходящимися/расходящимися лучами оптической системы.

Построенная из метаматериала с удивительными оптическими свойствами, суперлинза может создавать изображения с деталями меньше длины волны используемого света.

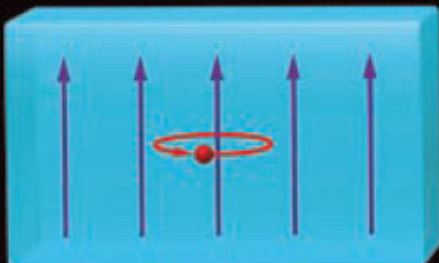
КОНСТРУИРОВАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА

Ключ к созданию метаматериала — разработка материала с нужной реакцией на электрические и магнитные поля

В ОБЫЧНОМ МАТЕРИАЛЕ

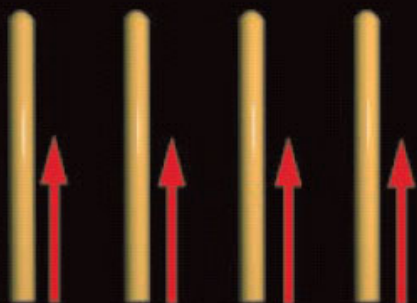


Электрическое поле (зеленое) вызывает линейное движение электронов (красные)



Магнитное поле (фиолетовое) вызывает круговое движение электронов

В МЕТАМАТЕРИАЛЕ

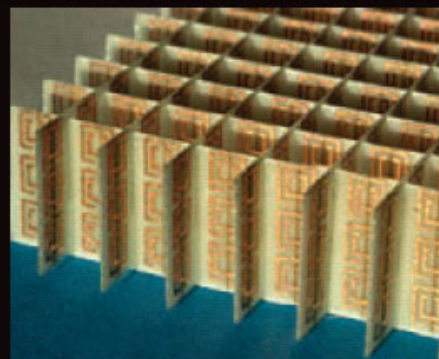


В матрице проводников текут линейные токи (красные стрелки)



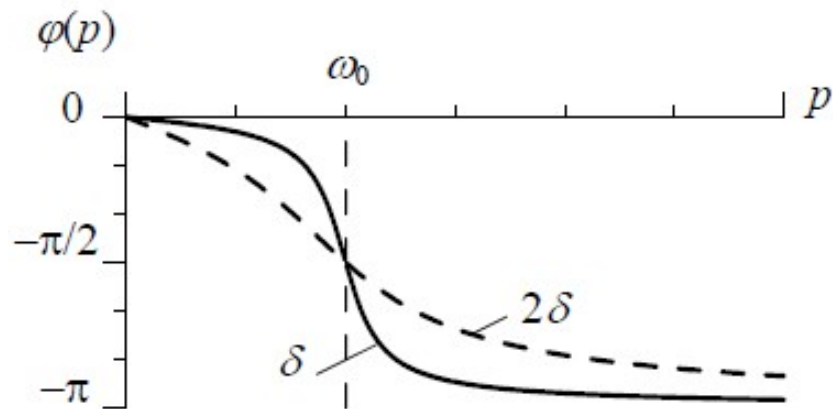
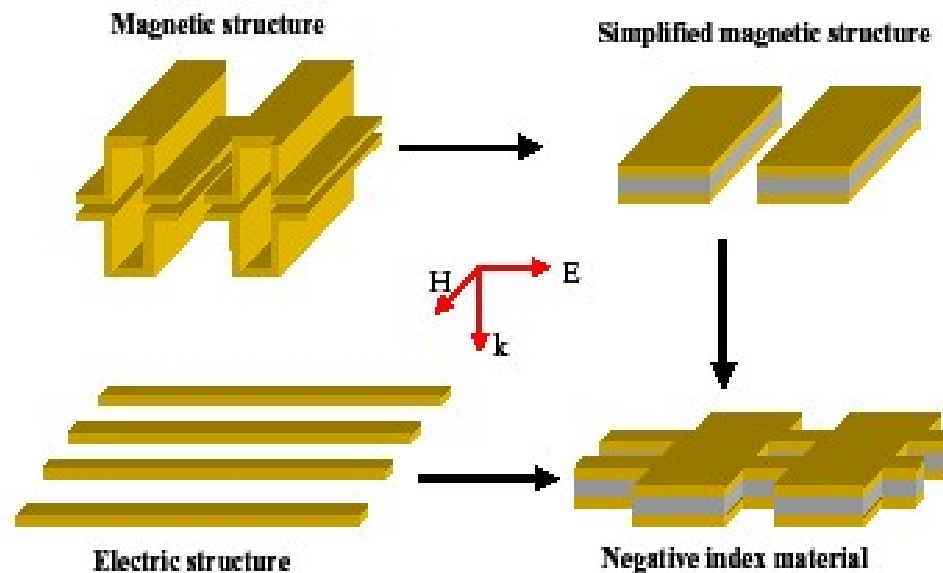
В кольцах с разрезами (резонаторах) текут круговые токи

СТРУКТУРА МЕТАМАТЕРИАЛА



Метаматериал построен из матрицы проводников и колец с разрезом, размеры которых меньше, чем длина электромагнитных волн, для которых предполагается использовать материал

Реализация суперлинзы



$$\mu_{eff}(\omega) = 1 + \frac{f\omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2}$$

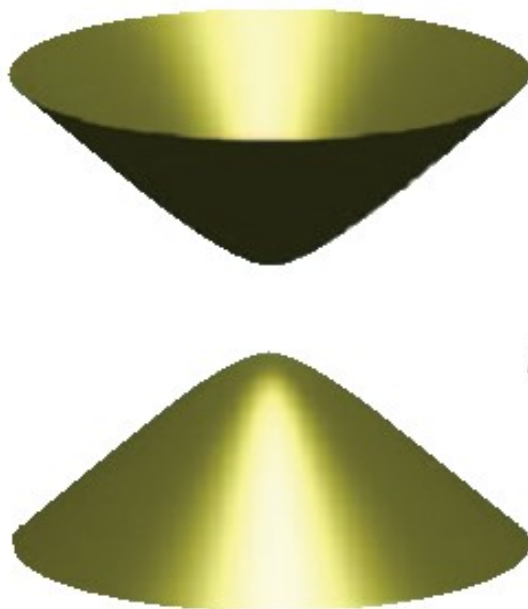
Гиперболические метаматериалы

$$\hat{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{\perp} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{\parallel} \end{pmatrix} \quad - \text{одноосный кристалл}$$

$$\vec{k} = [k_x, k_y, k_z] \quad \frac{k_x^2 + k_y^2}{\varepsilon_{\parallel}} + \frac{k_z^2}{\varepsilon_{\perp}} = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2$$

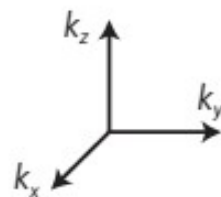
a

$$\varepsilon_{\perp} > 0, \varepsilon_{\parallel} < 0$$

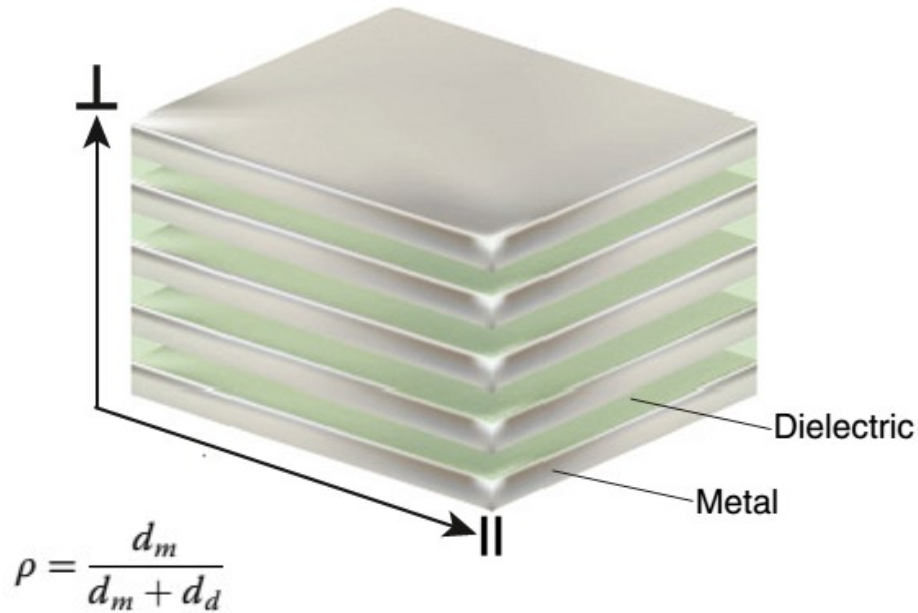


b

$$\varepsilon_{\parallel} > 0, \varepsilon_{\perp} < 0$$



Гиперболические метаматериалы



Epsilon-
Near-Zero!

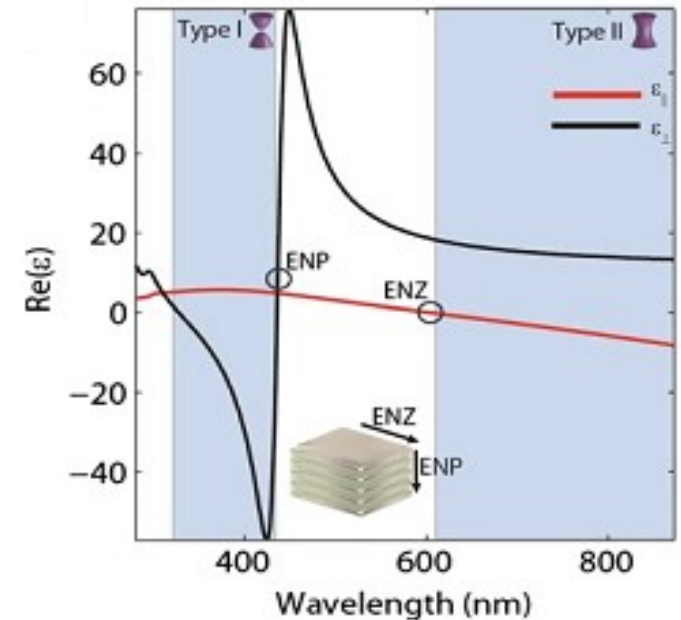
$$\epsilon_{\parallel} = \rho \epsilon_m + (1 - \rho) \epsilon_d$$

< 0 > 0

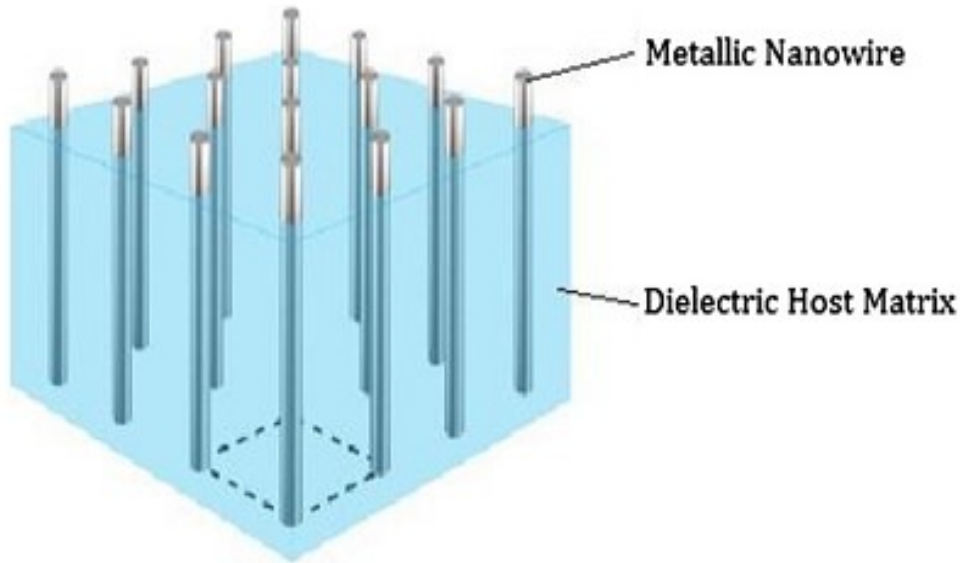
$$\epsilon_{\perp} = \frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\rho \epsilon_d + (1 - \rho) \epsilon_m}$$

Epsilon-
Near-
Pole!

> 0 < 0



Гиперболические метаматериалы



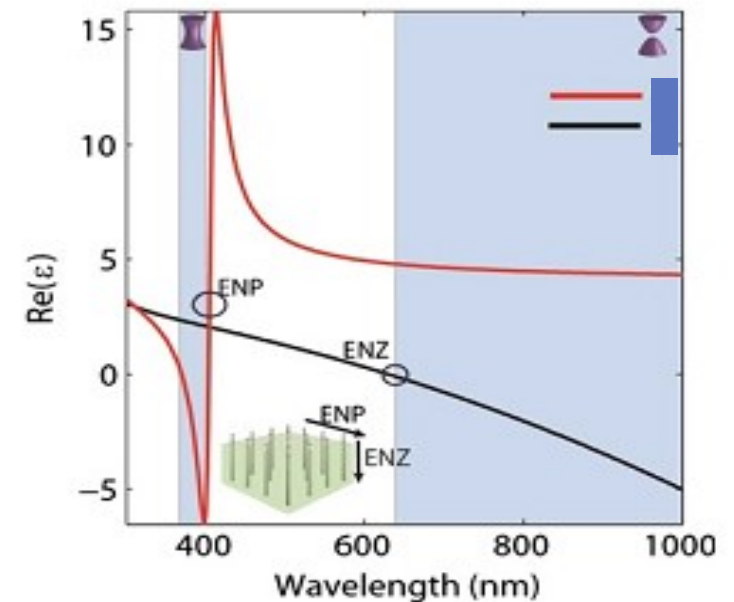
$$\rho = \frac{\text{nanowire area}}{\text{unit cell area}} = \frac{a}{A}$$

$$\epsilon_{\parallel} = \frac{(1 + \rho)\epsilon_m\epsilon_d + (1 - \rho)\epsilon_d^2}{(1 + \rho)\epsilon_d + (1 - \rho)\epsilon_m}$$

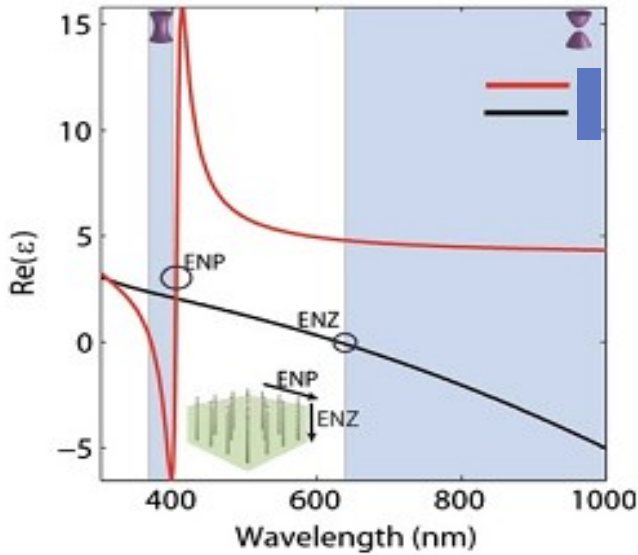
Epsilon-
Near-
Pole!

$$\epsilon_{\perp} = \rho\epsilon_m + (1 - \rho)\epsilon_d$$

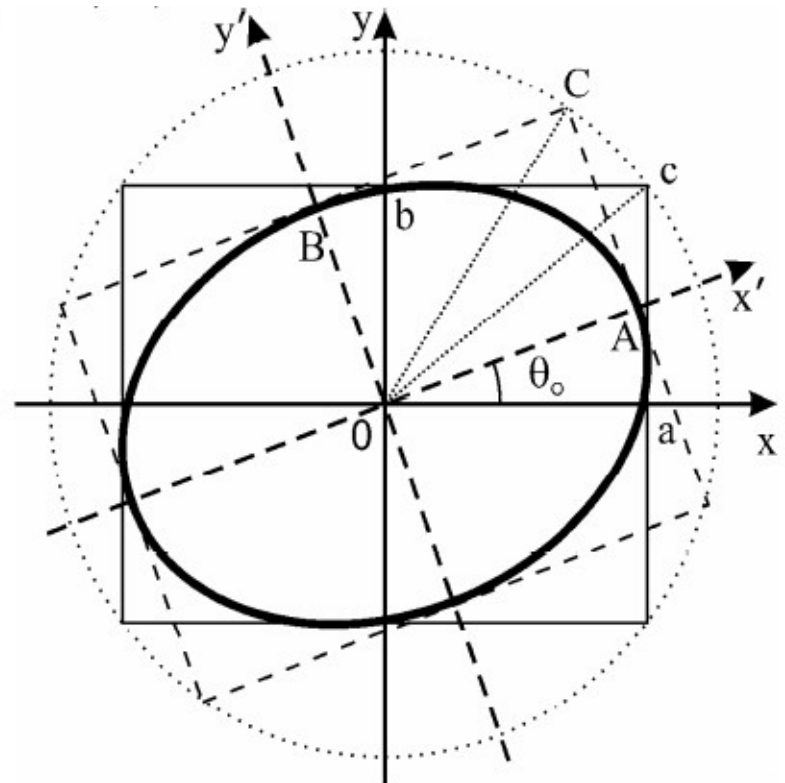
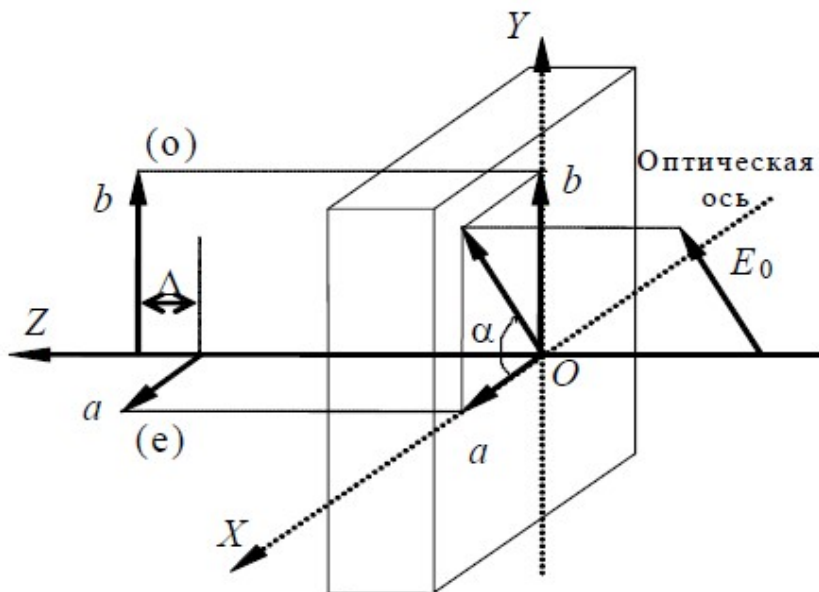
Epsilon-
Near-Zero!



Гиперболические метаматериалы: двулучепреломление



$$v_0 = \frac{c}{n_0} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{\perp}}} \quad v_e(\varphi) = c \sqrt{\frac{\sin^2 \varphi}{\epsilon_{\parallel}} + \frac{\cos^2 \varphi}{\epsilon_{\perp}}}$$



Перспективы:

- Новые дизайны
- Переход от металлов к полупроводникам (кремния, арсенид галлия)
- Внешнее управление (с помощью статического магнитного поля, all-optical switching)
- Разработка готовых приборов

Спасибо за внимание!!

