



НАНОФОТОНИКА NANOPHOTONICS

1.

Базовые понятия.

НАНОФОТОНИКА – ЧТО ЭТО ТАКОЕ?

- Это замена понятия «оптика» в физике наноматериалов.
- Это совершенно новое направление в оптике.
- «Нанопотоника» - с точки зрения физики полный абсурд!



Wiki:

The science of *photonics* includes the generation, emission, transmission, modulation, signal processing, switching, amplification, detection and sensing of light.

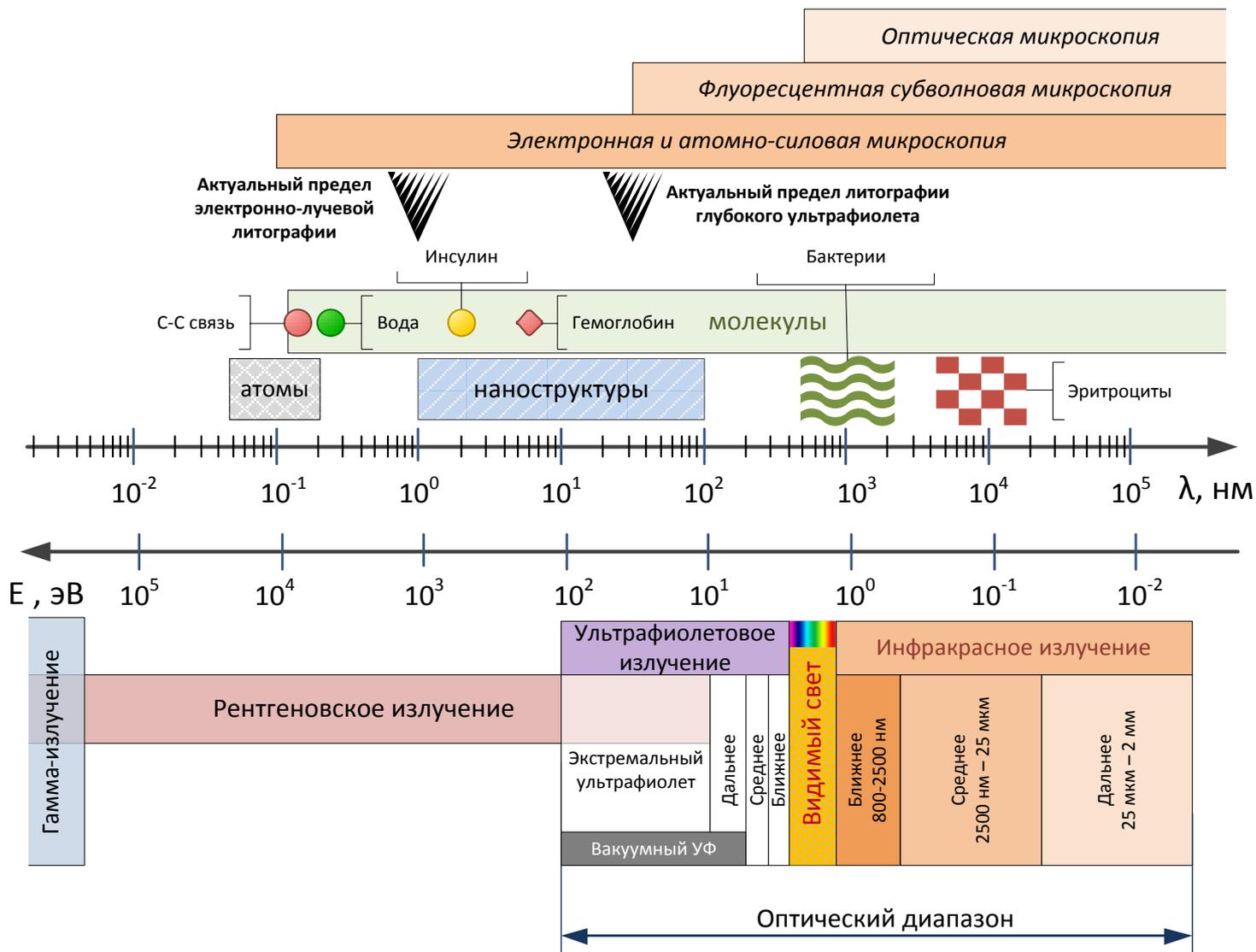
Nanophotonics is the study of the behavior of light on the nanometer scale. It is considered as a branch of optical engineering which deals with optics, or the interaction of light with particles or substances, at deeply subwavelength length scales.

А. Н. Теренин¹:

Фотоника изучает физические процессы превращения энергии и химические реакции, возникающие под действием светового излучения в молекулах сложного строения.

¹ Фотоника молекул красителей и родственных органических соединений / А. Теренин. – Л.: Наука, 1967. – 617 с.

Масштаб характерных объектов микромира



ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Фотоника — наука, изучающая различные формы излучения, поглощения и преобразования света, то есть фактически всё, что связано с понятием *фотон*.

Фотоника полупроводников представляет собой раздел фотоники, связанный с излучением, преобразованием, передачей, детектированием и поглощением света кристаллическими или аморфными полупроводниками.

Нанофотоника представляет собой раздел фотоники, связанный с изучением способности наночастиц и композитных материалов на их основе к генерации оптического излучения и различным видам взаимодействия со светом.

Нанооптика — исследование взаимодействия света с веществом в субволновом приближении.

Оптические проявления свойств наночастиц

- Полупроводниковые нанокластеры. Характерен сдвиг края полосы фундаментального поглощения при изменении размеров частиц, наличие интенсивной видимой люминесценции и зависимость положения максимума люминесцентного сигнала при изменении размеров частиц.
- Металлические наночастицы. Обычно используются для окраски стёкол. При этом размер частиц намного меньше длины волны падающего света. Эффект объясняют резонансным поглощением плазмонов.

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ НАНОЧАСТИЦ: НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ КРЕМНИЙ

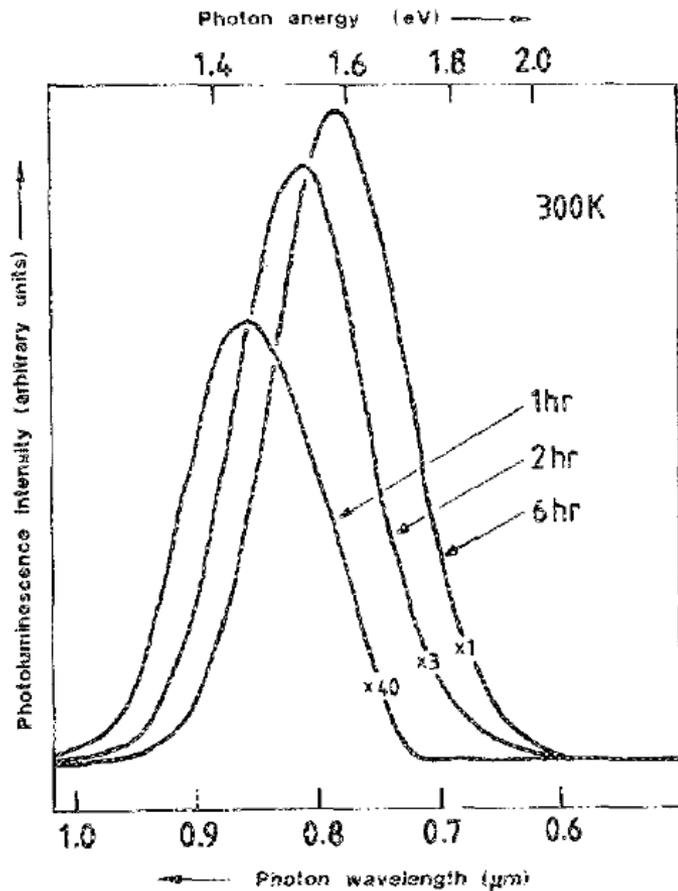
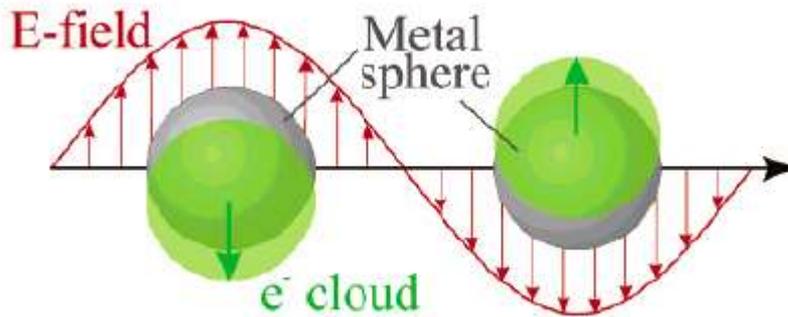
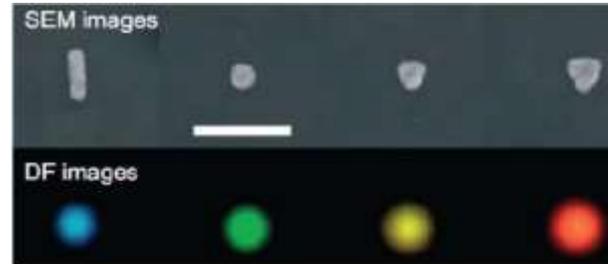
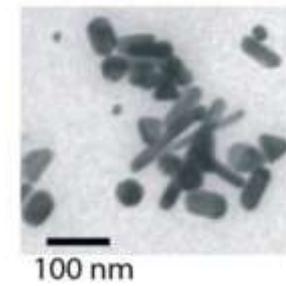
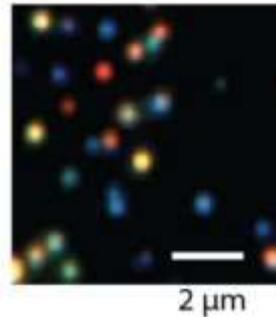
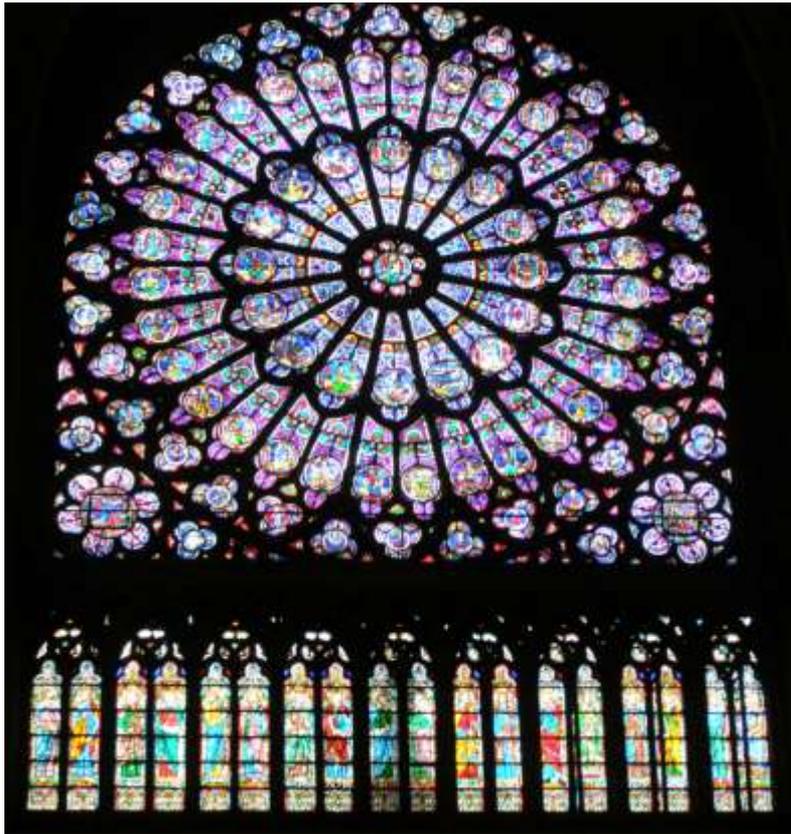


FIG. 3. Room-temperature photoluminescence from the anodized *p* wafer of Fig. 2 after immersion in 40% aqueous HF for the times indicated. Spectra were taken with 200 mW unfocused 5145 Å excitation incident on the sample in air and amplified by the relative gains indicated.



Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers / L.T. Canham // Applied Physics Letters. – 1990. – Vol. 57, No. 10. – P. 1046-1048.

НАНОПЛАЗМОНИКА



When illuminated from outside, it appears green. However, when illuminated from within the cup, it glows red. Red color is due to very small amounts of gold powder (about 40 parts per million)

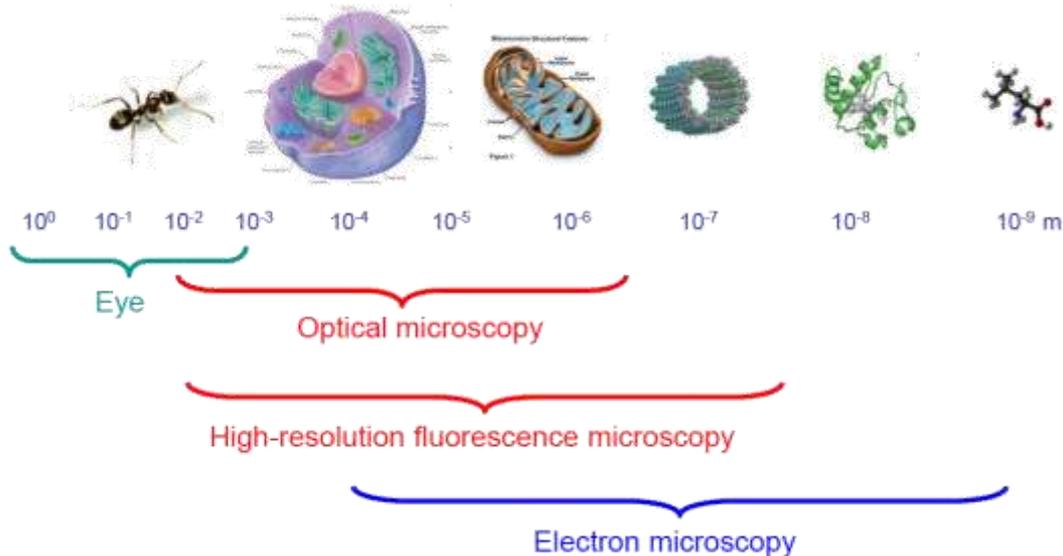
The Lycurgus Cup (glass, 4th century A.D.)



nano-optics

При подготовке курса использованы материалы:

- Lukas Novotny. Strongly focused light and energy transfer.
- Martin Wegener. Metamaterials & Transformation Optics: Optics Starts Walking on Two Feet.
- Baldassare Di Bartolo. Introduction to fluorescence spectroscopy with applications to biological systems.
- Mark Stockmann. Optical properties of plasmonic nanosystems.

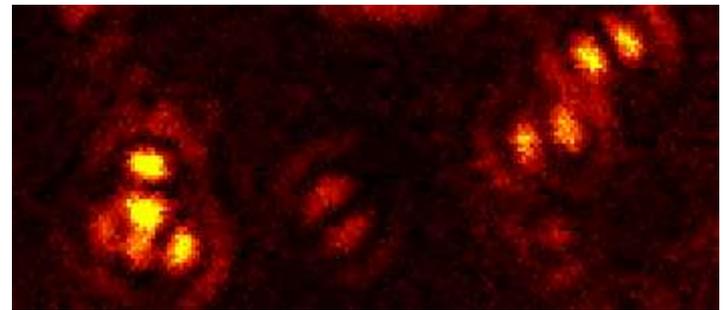


БОРЬБА ЗА ОПТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ



Оптика ближнего поля (или субволновая оптика) имеет дело с полями на расстояниях от источника излучения меньших и много меньших длины волны излучаемого света. В некотором смысле понятия *оптика ближнего поля* и *нанооптика* являются синонимами, поскольку решают одну парадоксальную задачу – показать объекты, которые по законам классической оптики невозможно увидеть.

ДИФРАКЦИОННЫЙ ПРЕДЕЛ



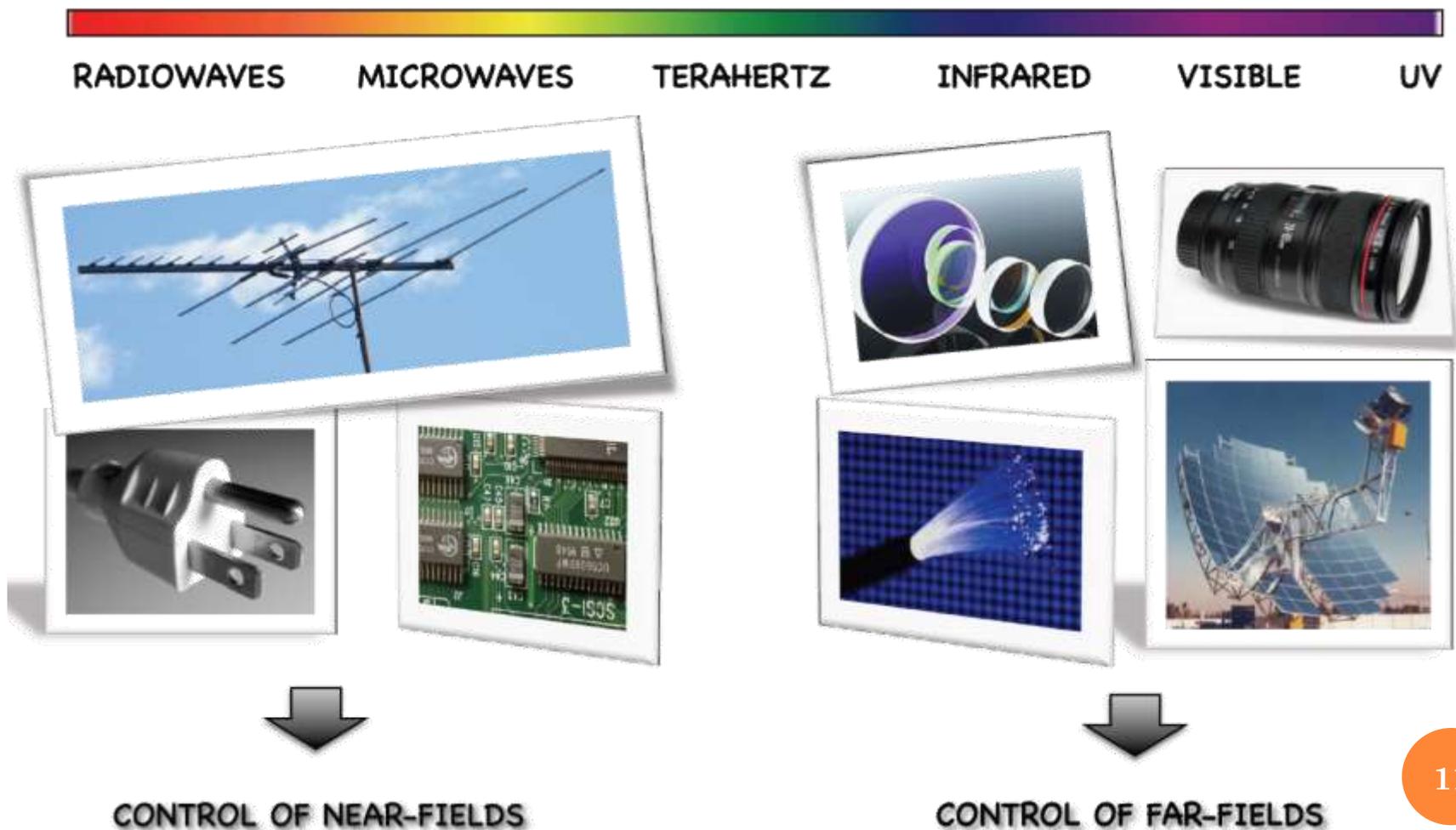
Это минимально возможный размер светового пятна, которое можно получить, фокусируя электромагнитное излучение (свет) с длиной волны λ в среде с некоторым показателем преломления n :

$$d_{min} = \frac{\lambda}{2n}$$

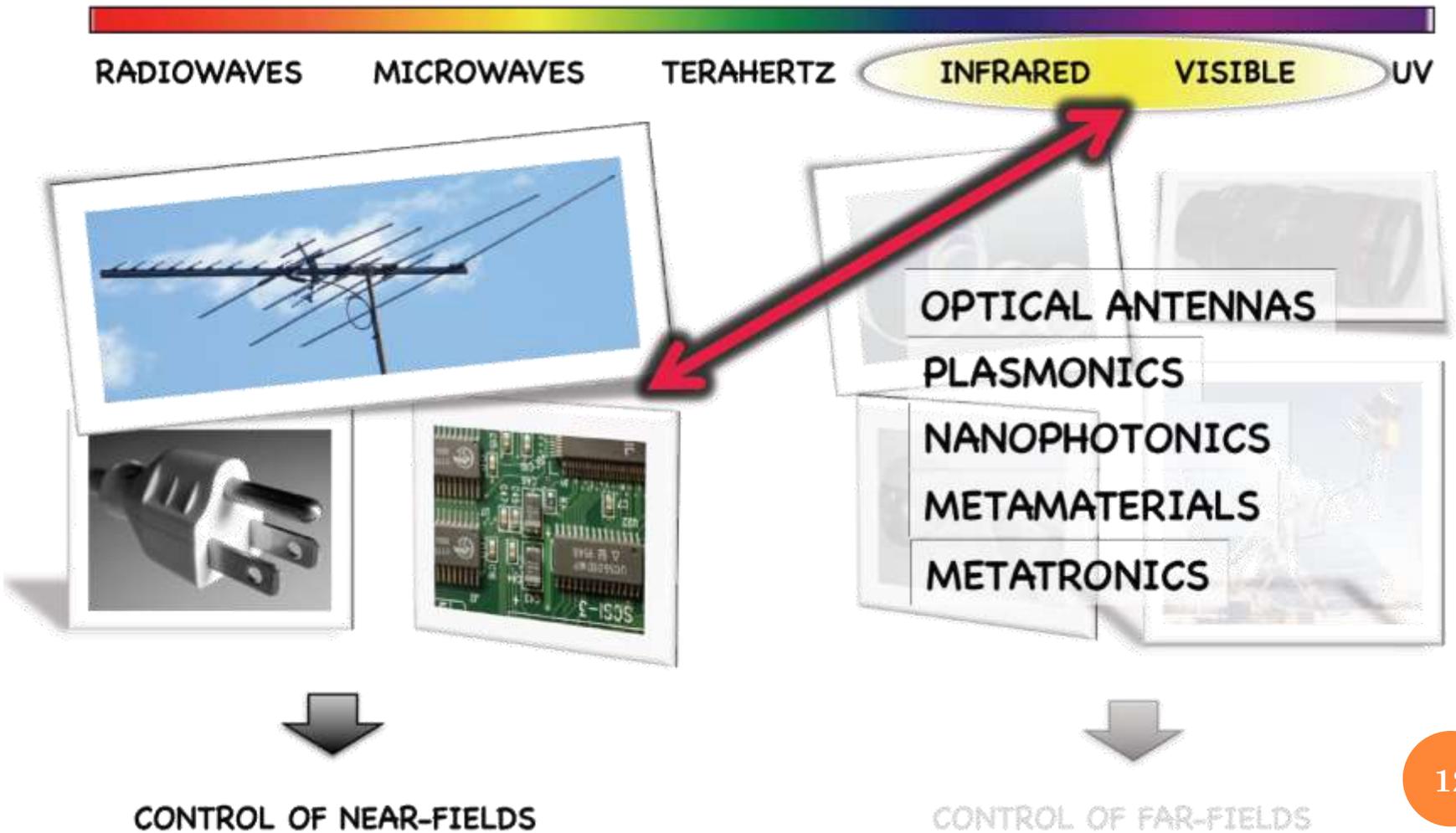
1873 год, Э. Аббе

Этим определяется ограничение на минимальный размер объекта, который можно уверенно разрешить с помощью оптического микроскопа. Теоретический предел разрешения для оптической микроскопии ~ 200 нм.

ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ВОЛНАМИ



ПРИНЦИПЫ НАНОФОТОНИКИ



ЧТО ТАКОЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ?

- *Метаматериалами* обычно называют искусственно созданные регулярные структуры, свойства которых отличаются от свойств составляющих их материалов, и являются уникальными, т.е. не характерными ни для каких объектов, встречающихся в природе.
- Понятие метаматериалов в первую очередь связывают с обоснованием в работе [Веселаго, В. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ // Успехи физических наук. – 1967. – Т. 92, № 3. – С. 517-526.] идеи о свойствах среды с одновременно отрицательными значениями коэффициентов диэлектрической и магнитной проницаемости. Такие материалы называют материалами с *отрицательным коэффициентом преломления*.

СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ МАКСВЕЛЛА

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = 4\pi\rho$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$$

$$\mathbf{D} = \hat{\epsilon} \mathbf{E}$$

$$\mathbf{B} = \hat{\mu} \mathbf{H}$$

$$\mathbf{j} = \hat{\sigma} \mathbf{E}$$

в системе СИ, в дифференциальной форме

ИДЕОЛОГИЯ

Рассмотрим среду при отсутствии в ней поглощения электромагнитного излучения. Тогда для электромагнитной волны, распространяющейся в изотропном веществе, можно записать

1. Уравнение электромагнитной волны:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}$$

$$|\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v}$$

2. Дисперсионное уравнение изотропной среды:

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} n^2$$

Поскольку $n^2 = \epsilon\mu$, то одновременная смена знаков диэлектрической и магнитной проницаемости не отразится на дисперсионном уравнении, и не изменит вид решения уравнений Максвелла. То есть, в среде с $\epsilon < 0$ и $\mu < 0$ смогут распространяться плоские незатухающие волны, как и в среде с положительными проницаемостями.

СВОЙСТВА (МЕТАФИЗИЧЕСКИЕ)

1. В случае плоской монохроматической волны из материальных уравнений следует, что если $\varepsilon < 0$ и $\mu < 0$, то векторы \vec{E} , \vec{H} и \vec{k} образуют левую тройку векторов. В этой связи такие гипотетические материалы называют *левыми* (left-handed materials, LHM). Поскольку поток энергии, переносимой волной, определяется вектором Пойнтинга $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$, то в случае LHM векторы \vec{S} и \vec{k} противоположно направлены.



**$n < 0$: “Left-Handed“
Materials (LHM)**

СВОЙСТВА (МЕТАФИЗИЧЕСКИЕ)

2. Объёмную плотность энергии электромагнитного поля в линейной изотропной среде можно представить в виде

$$w = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}^2 + \frac{1}{2} \mu \mu_0 \vec{H}^2$$

Поскольку в нашем случае оба слагаемых будут отрицательными, возникает предположение об отрицательной энергии поля, что явно не согласуется с фундаментальными физическими представлениями.

СВОЙСТВА (ФИЗИЧЕСКИЕ)

1. Для ЛНМ групповая скорость распространения волны (т.е. скорость движения фазовых возмущений) по направлению противоположна фазовой. Примеры таких систем достаточно хорошо известны в электронике.
2. Если предположить, что в рассматриваемой среде значения диэлектрической и магнитной проницаемости будут зависеть от частоты, то можно использовать уравнение для плотности энергии электромагнитной волны в среде с дисперсией:

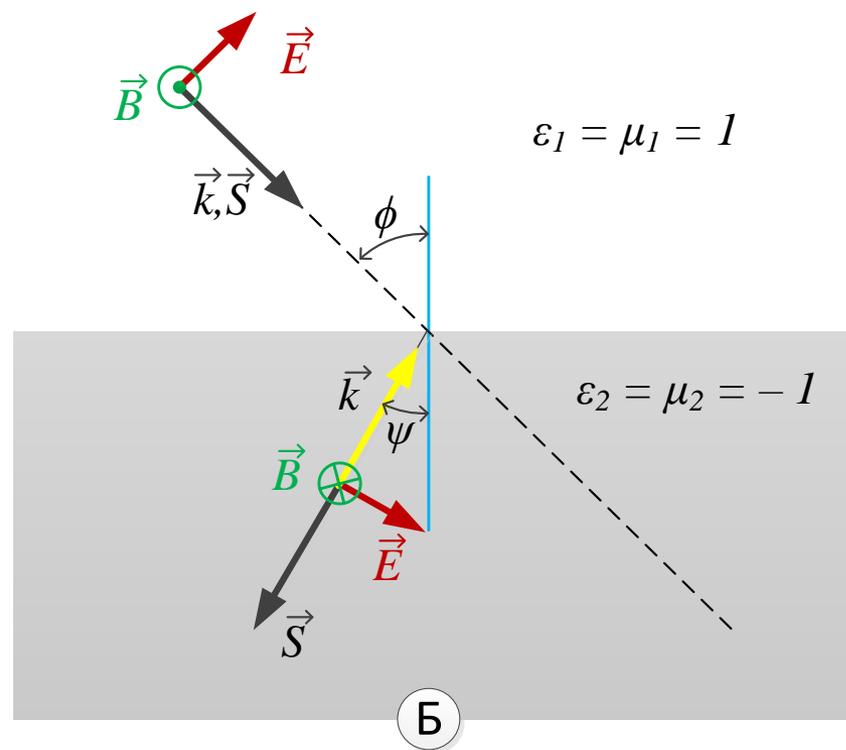
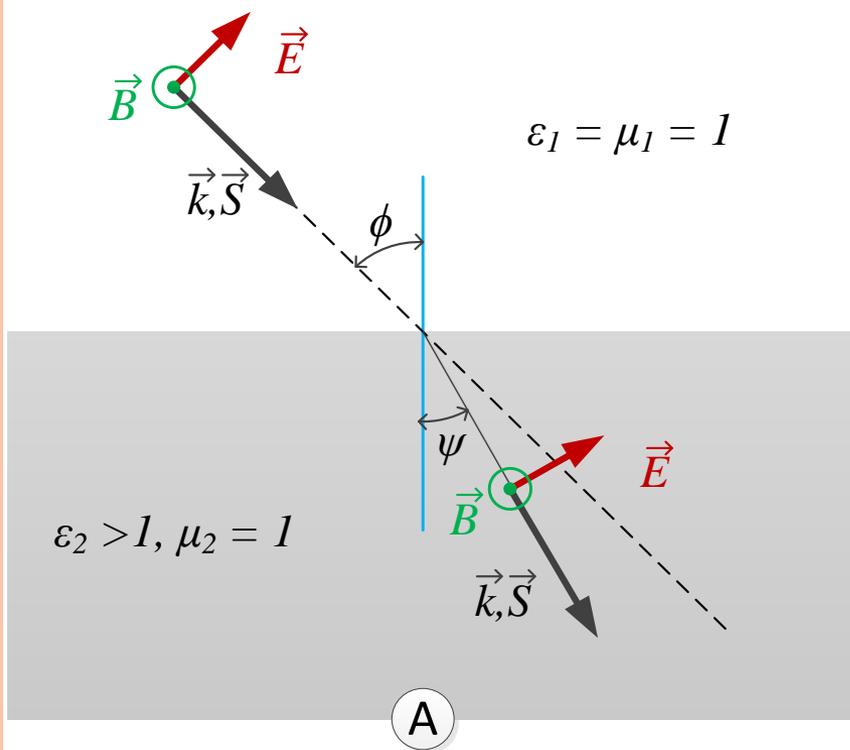
$$w = \frac{\varepsilon_0}{2} \frac{\partial(\omega \cdot \varepsilon(\omega))}{\partial \omega} \vec{E}^2 + \frac{\mu_0}{2} \frac{\partial(\omega \cdot \mu(\omega))}{\partial \omega} \vec{H}^2$$

В этом случае для сохранения положительного знака энергии производные должны быть положительны, а сами значения функций ε и μ – отрицательны на заданном частотном интервале. Это возможно, если соответствующие функции имеют, например, следующий вид:

$$\mu(\omega) = 1 - \frac{A_m^2}{\omega^2}$$
$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{A_e^2}{\omega^2}$$

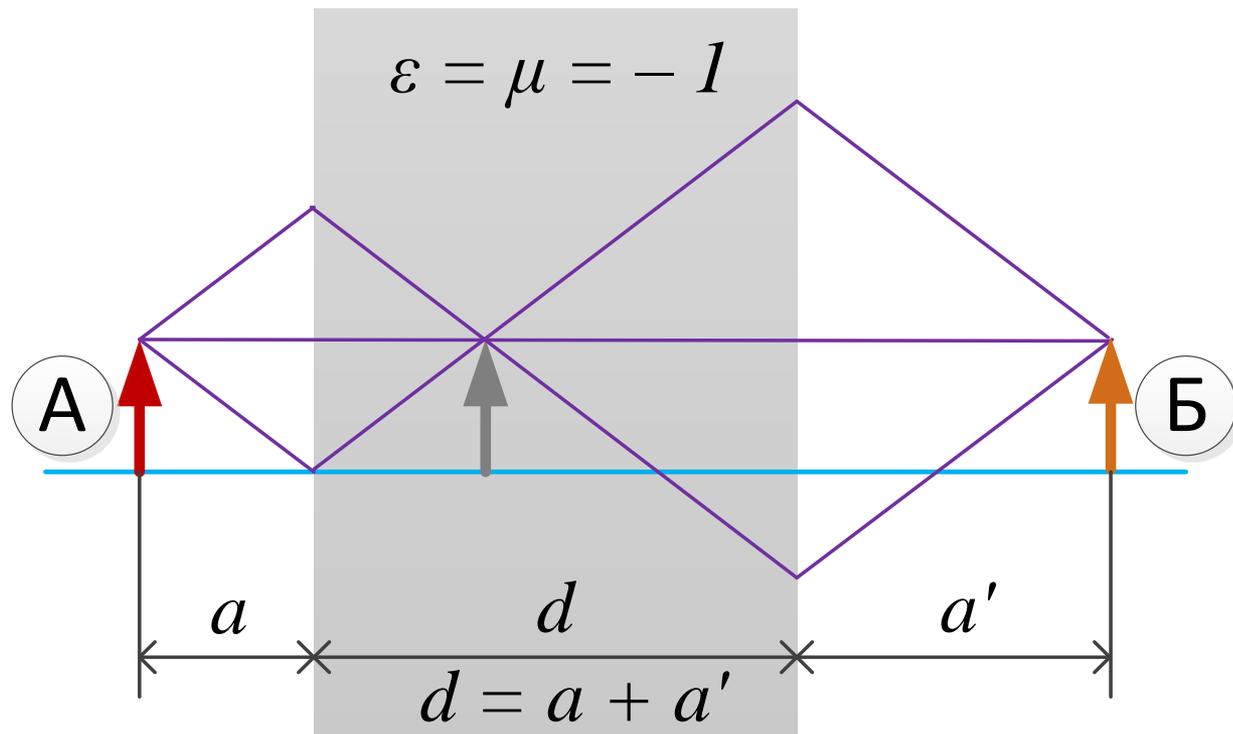
причём $A_m^2 = A_e^2 > \omega^2$

СВОЙСТВА (ОПТИЧЕСКИЕ)



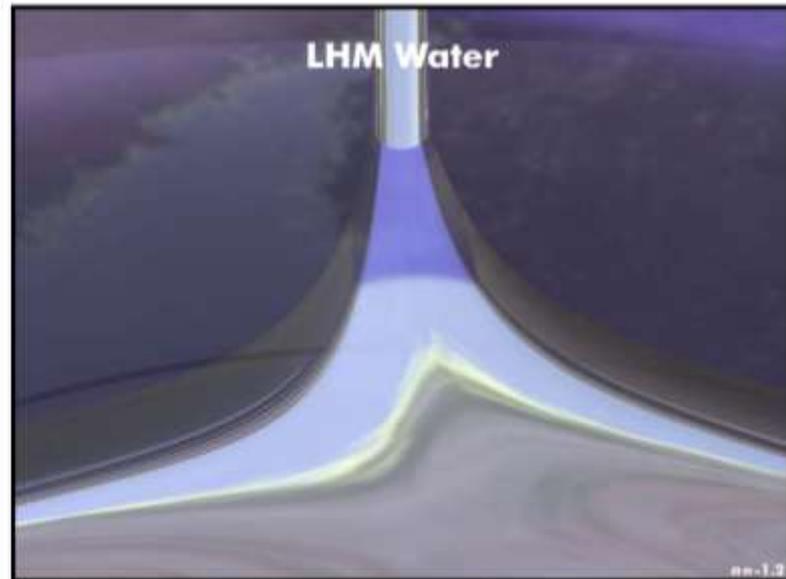
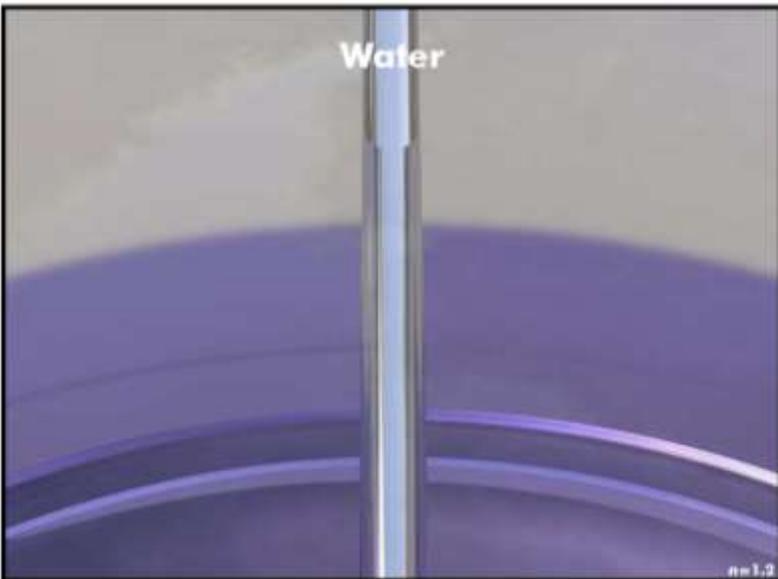
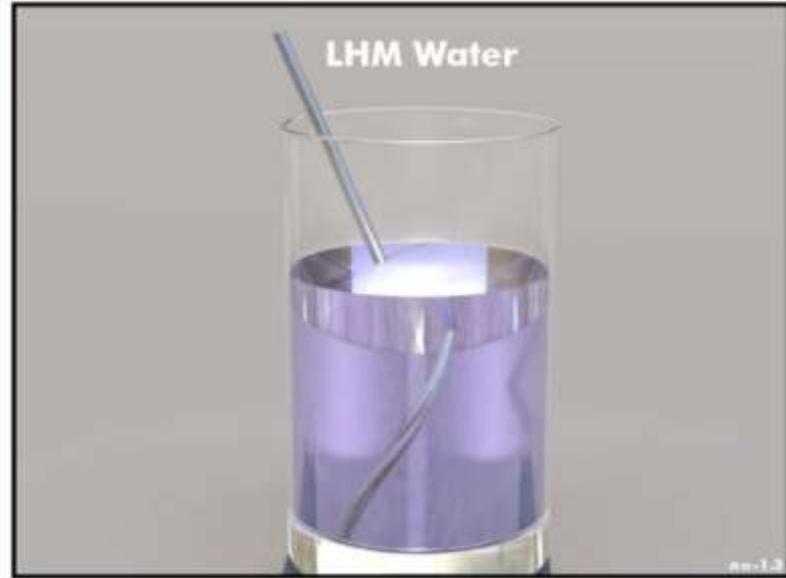
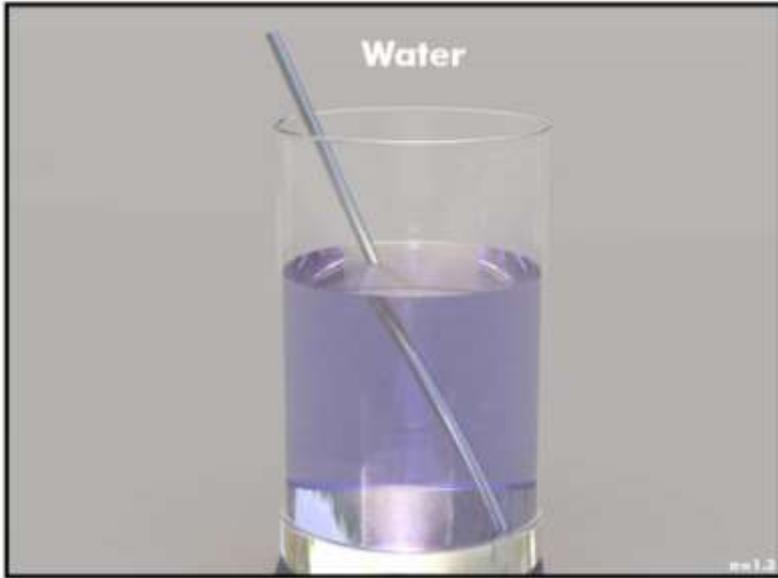
$$\frac{\sin \phi}{\sin \psi} = \sqrt{\frac{\epsilon_2 \mu_2}{\epsilon_1 \mu_1}}$$

СВОЙСТВА (ОПТИЧЕСКИЕ)



«Идеальная линза» - плоскопараллельная пластина, выполненная из материала с отрицательным показателем преломления. Такая пластина может фокусировать в точку излучение, выходящее из точечного источника, находящегося по другую сторону пластины на относительно небольшом расстоянии от неё (соизмеримым с толщиной пластины). Однако, в отличие от обычной линзы, пластина не может фокусировать параллельные пучки лучей.

МОДЕЛЬ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ



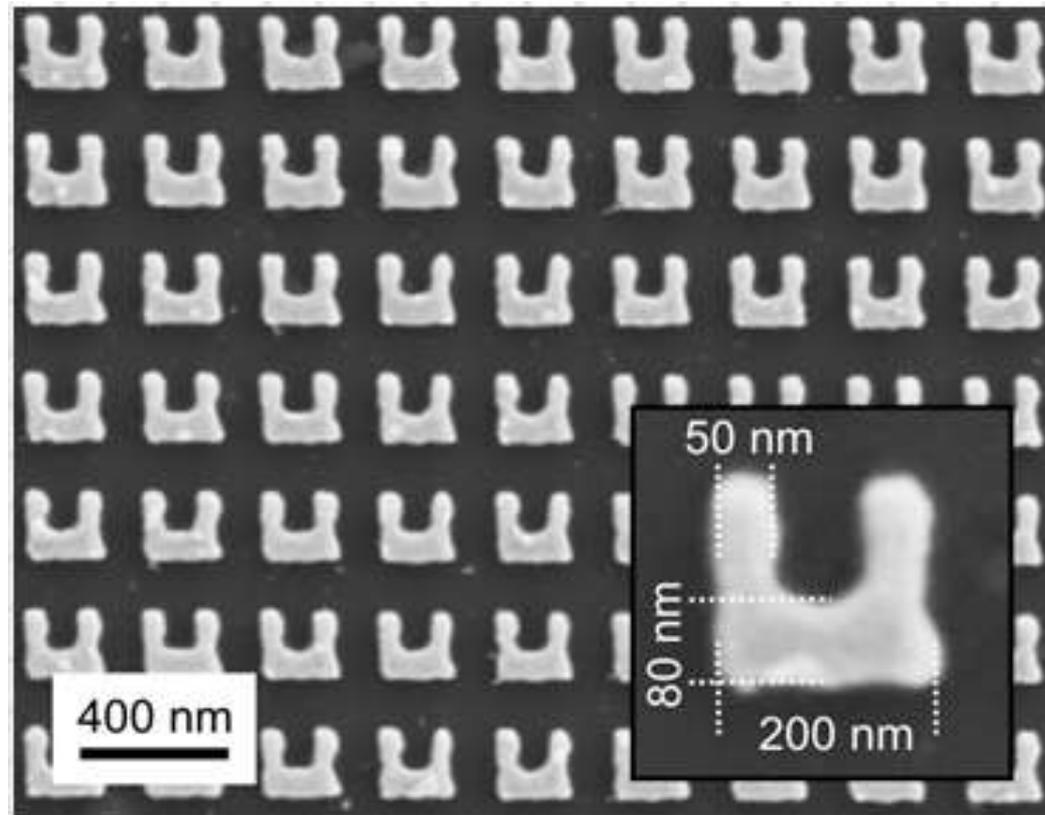
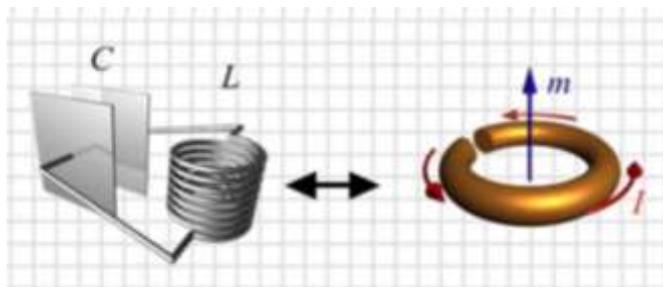
КАК ИЗГОТОВИТЬ МЕТАМАТЕРИАЛ?

- Порознь отрицательные значения диэлектрической и магнитной проницаемости имеет плазма в магнитном поле, хотя в ней упомянутые величины имеют тензорный вид вследствие анизотропии свойств в различных направлениях распространения волны.
- В основе создания оптических сред с отрицательным показателем преломления и дисперсией диэлектрической и магнитной проницаемости в настоящее время лежит принцип искусственного формирования упорядоченной трёхмерной или двумерной (в частном случае) структуры, аналогичной фотонному кристаллу, однако по масштабам элементов сдвинутой в область размеров, меньших чем длина волны падающего излучения. Такая структура будет изотропной с точки зрения такой волны, но форма и состав её отдельных элементов подбираются для обеспечения условий $\epsilon < 0$ и $\mu < 0$ для заданного диапазона частот.

КАК ИЗГОТОВИТЬ МЕТАМАТЕРИАЛ?

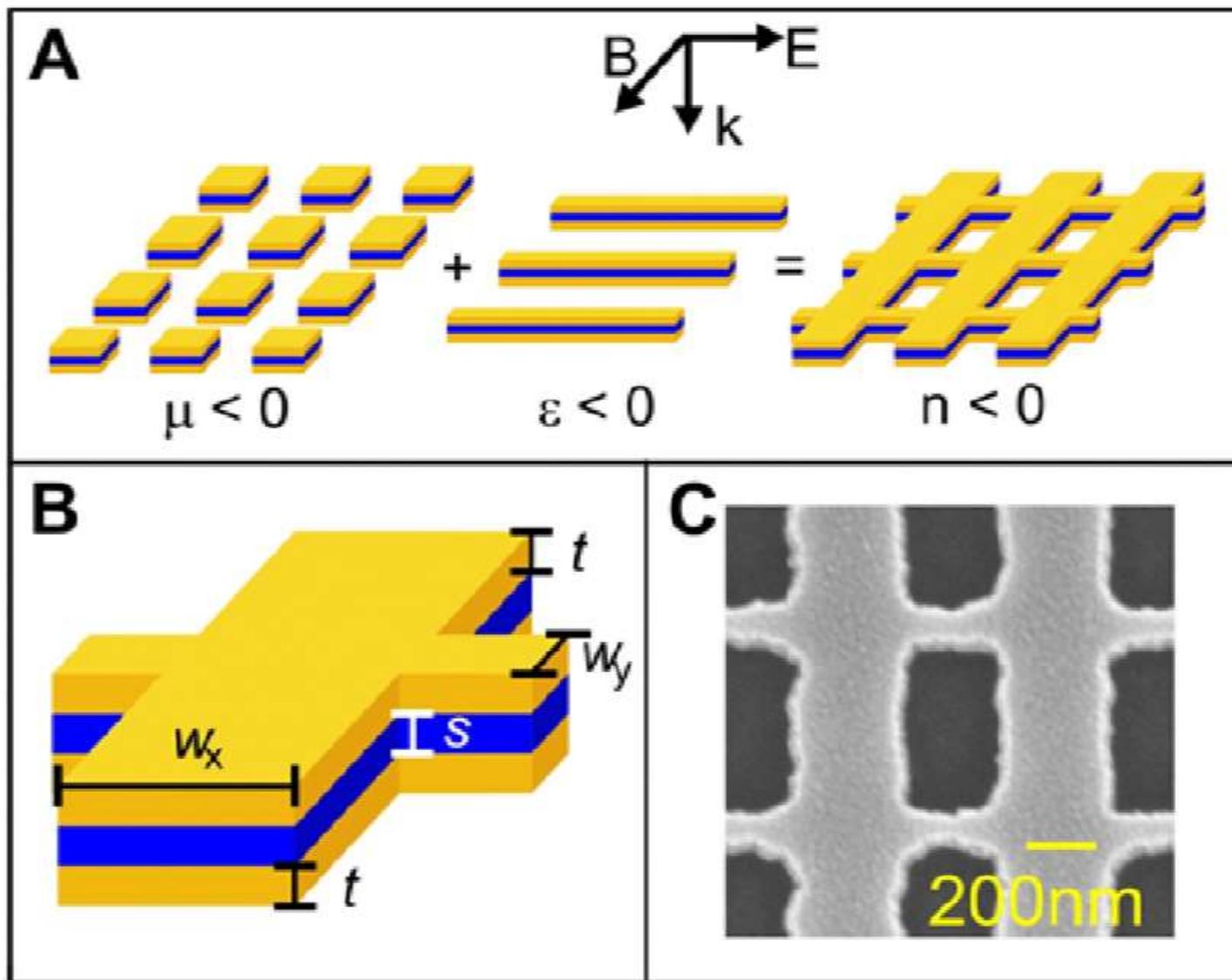
В самом общем случае можно представить соответствующий материал как свехрешётку из чередующихся резонаторов для электрического и магнитного полей. Резонатор для электрического поля представляет собой решётку из проводящих электрических стержней.

Резонатор для магнитного поля в случае использования планарных технологий изготовления материала представляет собой массив проводящих «колец» с разрезом на каждом кольце.



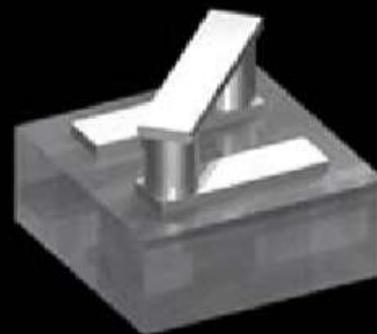
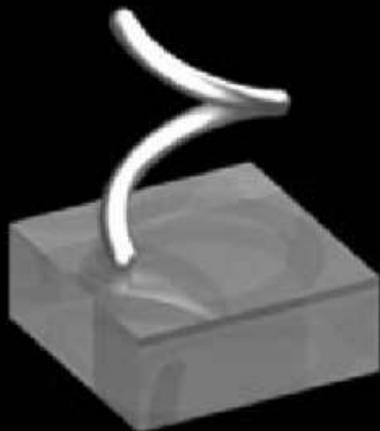
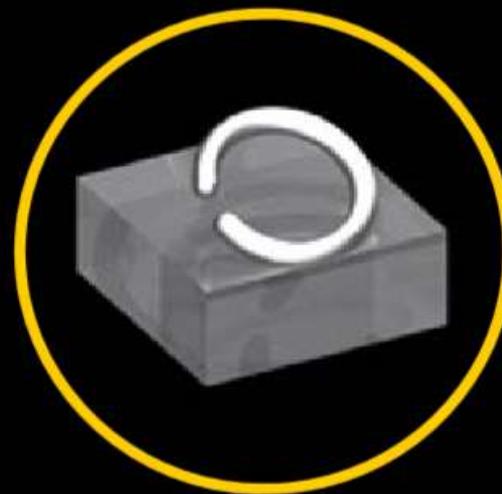
В случае, если частота внешнего поля будет превышать собственную частоту колебаний соответствующих резонаторов, будет реализована аномальная частотная дисперсия и, соответственно, отрицательное значение магнитной проницаемости.

А ЕЩЁ КАК?



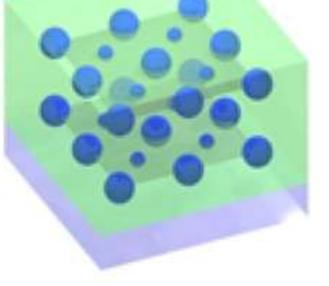
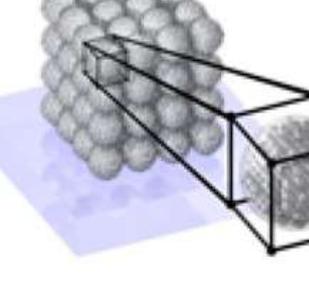
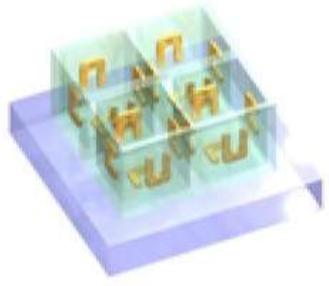
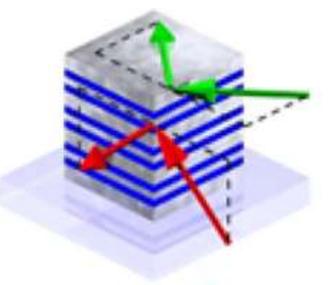
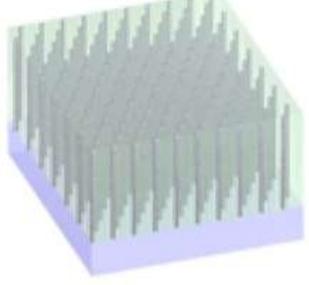
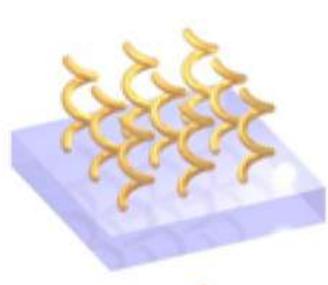
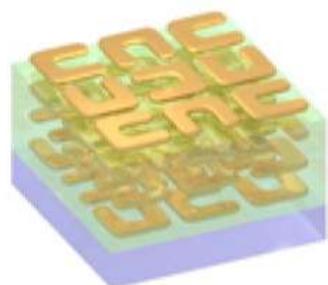
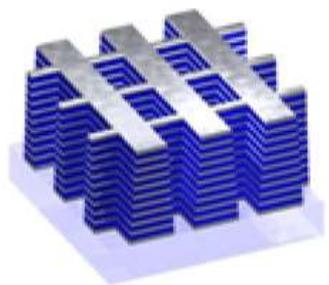
БОЛЕЕ ТРЁХМЕРНО

3D Chiral Building Blocks

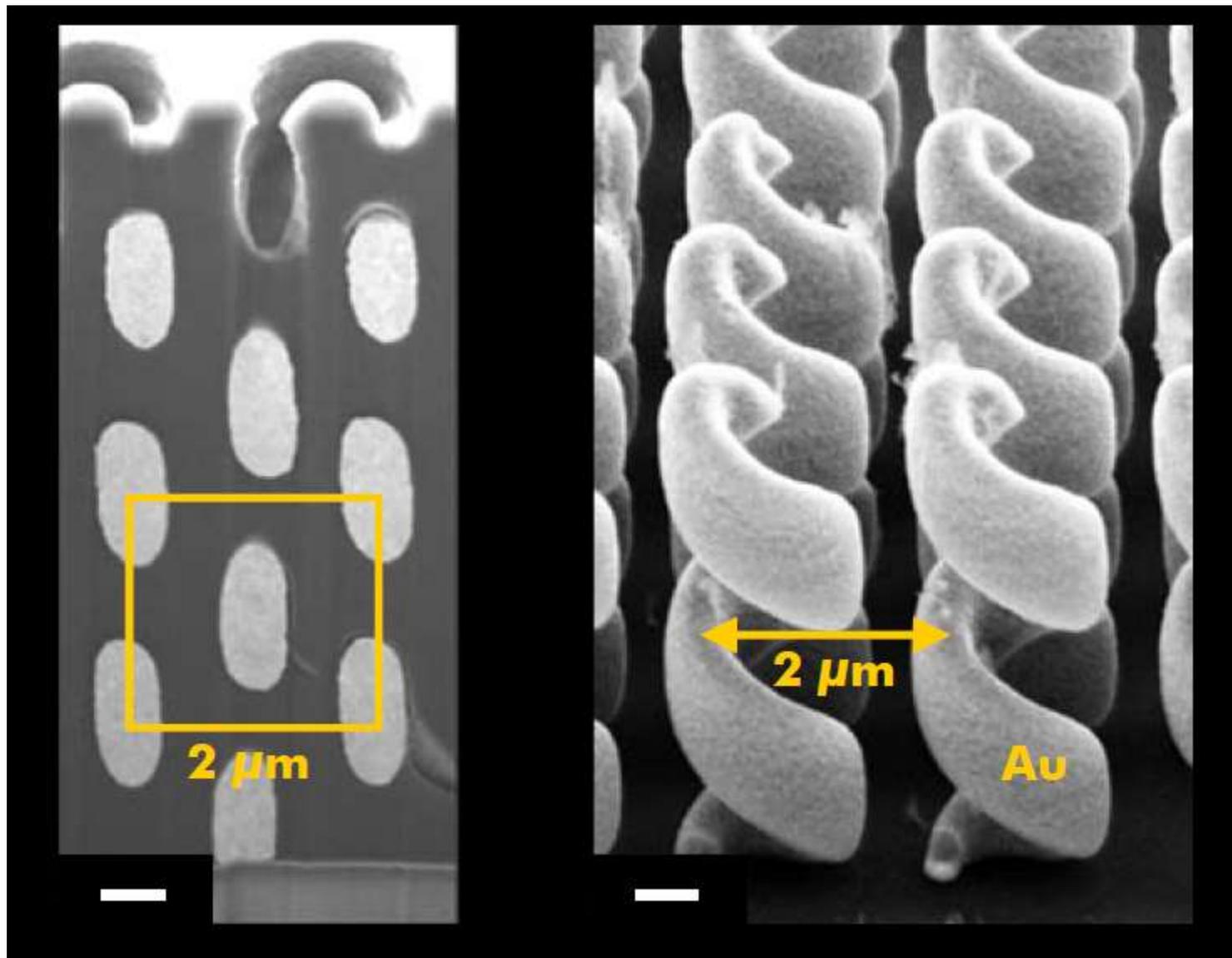


ИДЕИ СОЗДАНИЯ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

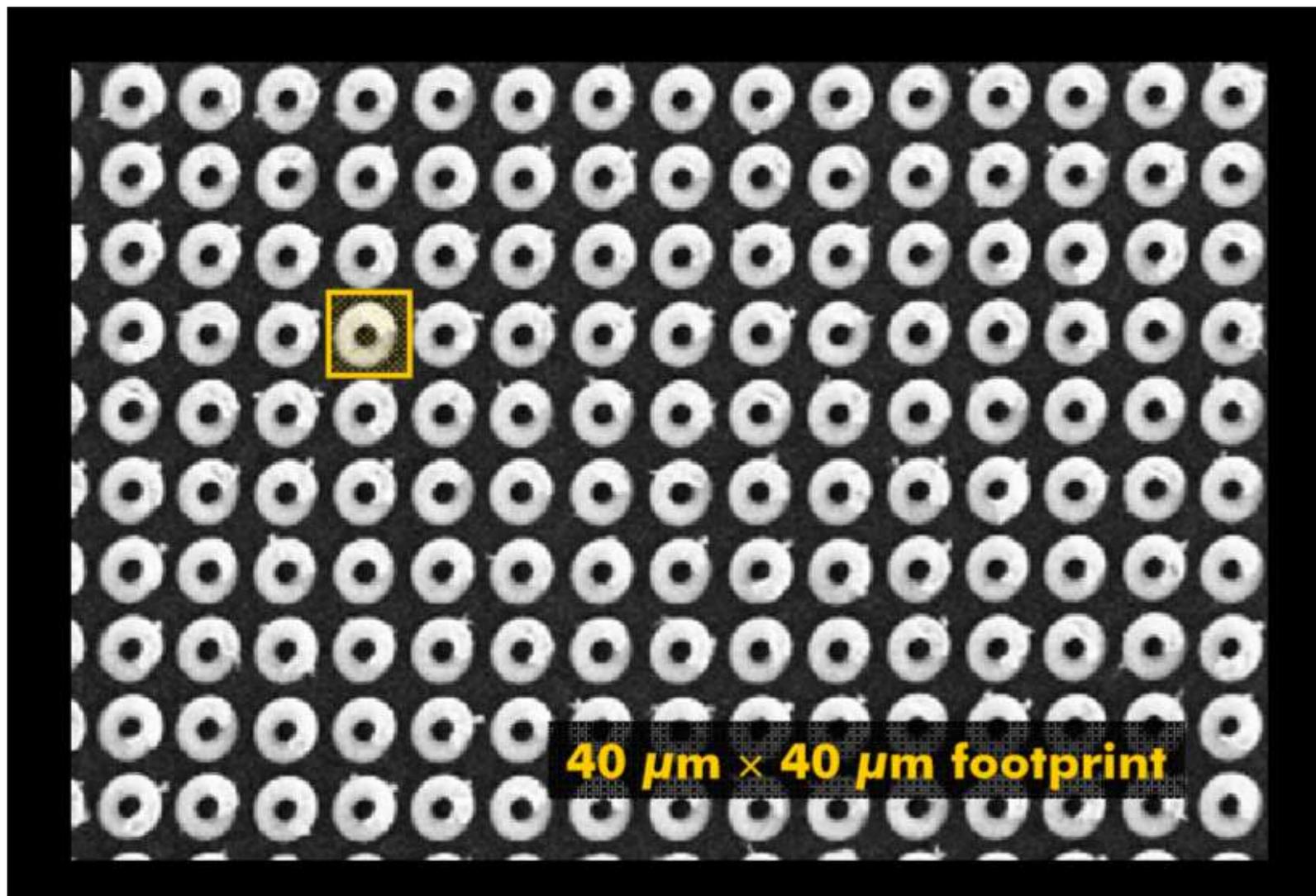
 Au  Ag  Dielectrics



И ЧТО, ПОЛУЧАЕТСЯ?



ПОЛУЧАЕТСЯ!



aspire invent achieve

