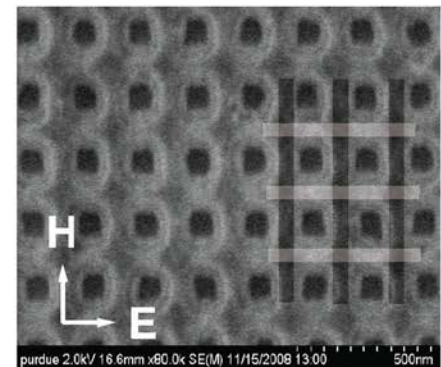
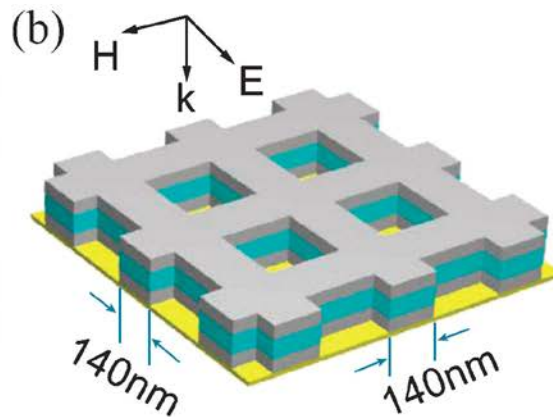
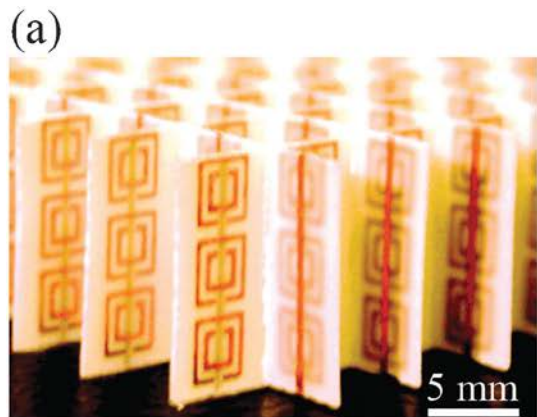
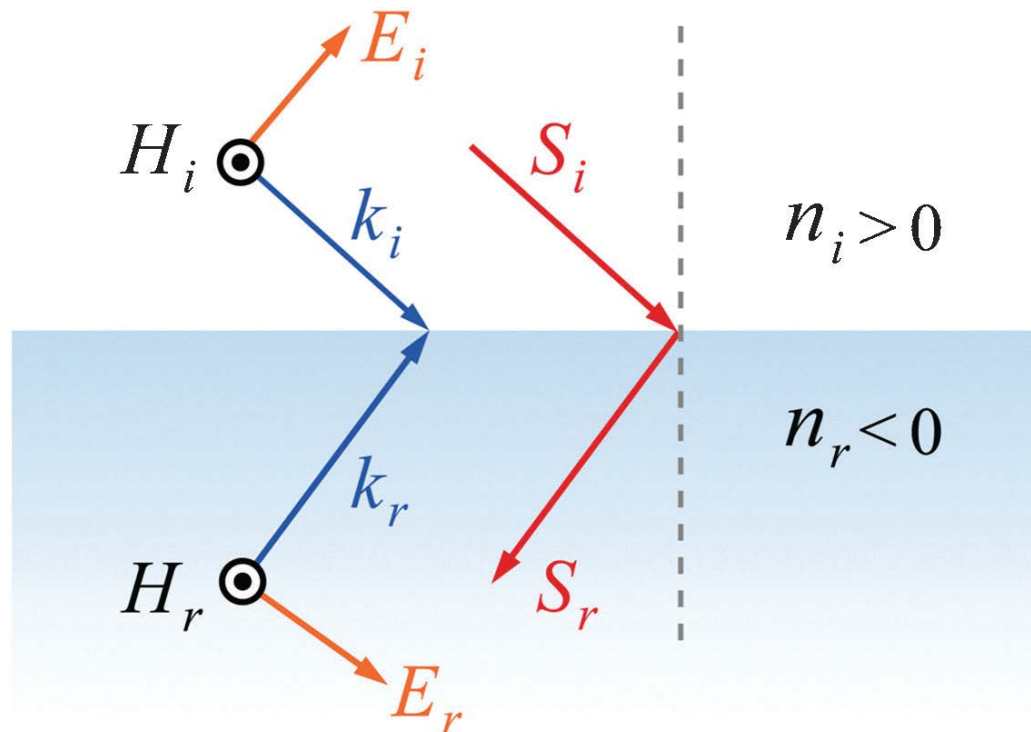


# Метаматериалы



**Метаматериал — это композиционный материал, свойства которого обусловлены не столько свойствами составляющих его элементов, сколько искусственно созданной периодической структурой.**

Особый интерес представляют метаматериалы с отрицательным коэффициентом преломления:

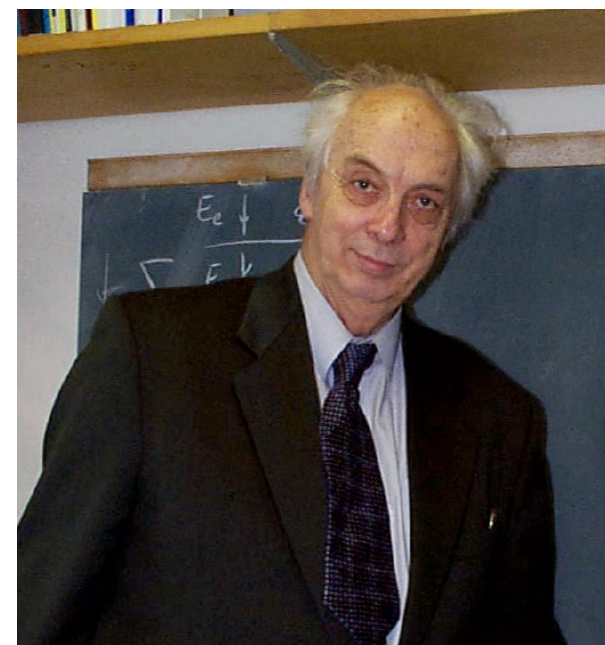


Из уравнений Максвелла следует, что

$$n^2 = \epsilon\mu.$$

Тогда  $n = \pm(\epsilon\mu)^{1/2}$ .

В.Г. Веселаго показал, что  $n = -(\epsilon\mu)^{1/2}$  в том случае, когда одновременно  $\epsilon < 0$  и  $\mu < 0$ .



Виктор Георгиевич Веселаго

# Отрицательный коэффициент преломления $n = -\sqrt{\epsilon\mu}$

$n > 0$

$n < 0$

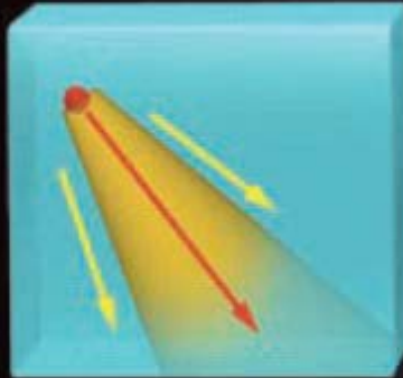
Удаляющийся объект кажется более красным из-за эффекта Доплера



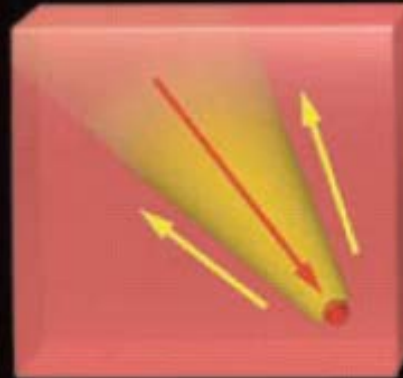
Удаляющийся объект кажется более синим



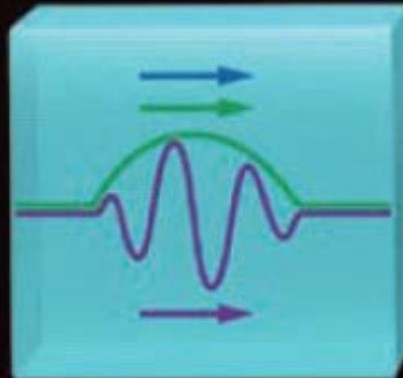
Заряженный объект (красный), движущийся быстрее скорости света, создает конус Черенковского излучения (желтый), направленный вперед



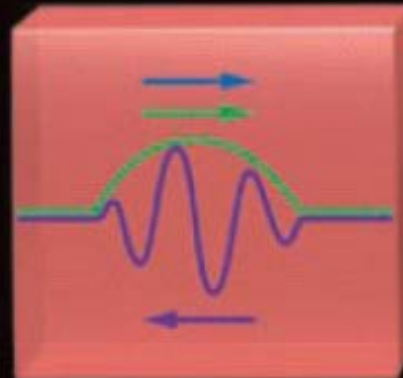
Конус обращен назад

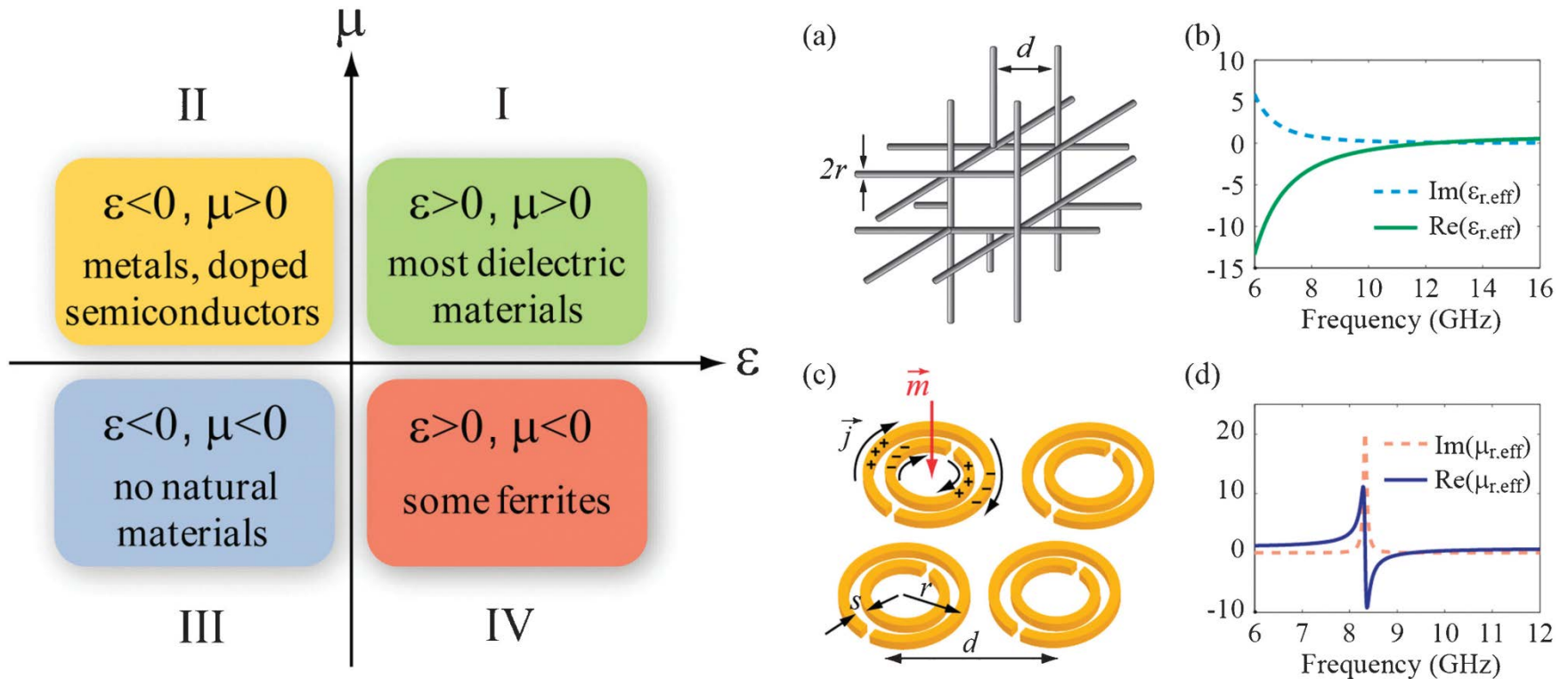


В среде с положительным показателем преломления отдельные максимумы электромагнитного импульса (фиолетовый) движутся в том же направлении, что и огибающая (зеленая) импульса и энергия (синяя)



Отдельные всплески движутся в сторону, противоположную движению огибающей импульса и энергии





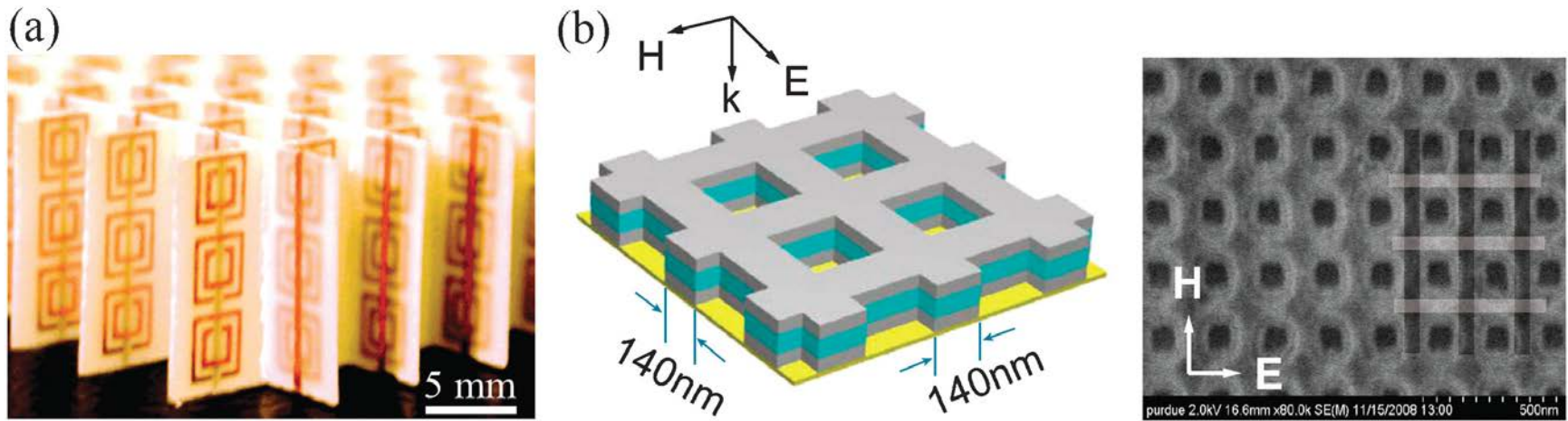
Basic metamaterial structures to implement artificial electric and magnetic responses.

(a) Schematic of periodic wires (with radius  $r$ ) arranged in a simple cubic lattice (with lattice constant  $d$ ).

(b) Effective permittivity of wire media, acting as dilute metals with an extremely low plasma frequency.

(c) Schematic of split ring resonators, with outer radius  $r$  and separation  $s$  between the two rings. A magnetic field penetrating the resonator induces a current ( $\sim j$ ), and thus a magnetic moment ( $\sim m$ ).

(d) Effective permeability of split ring resonators around the resonance frequency.



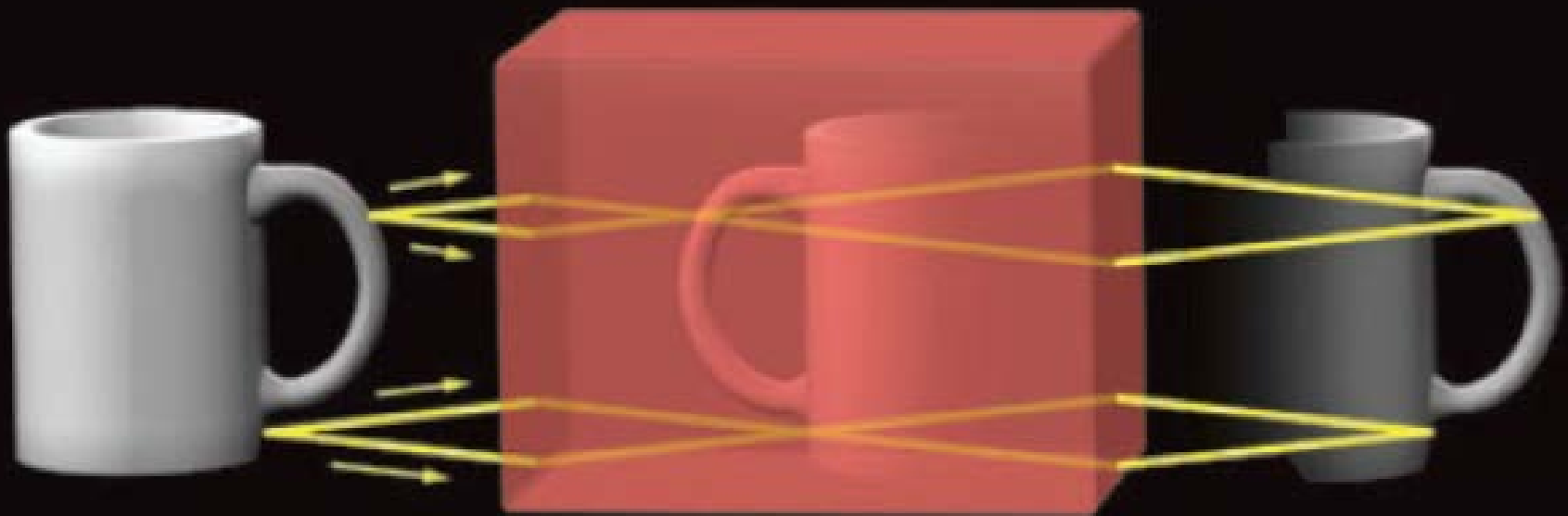
(a) NIMs working at microwave frequencies, which consist of copper SRRs and wires deposited lithographically on standard circuit boards. The size of the unit cell is 5 mm. Reprinted from ref. 15 with permission.

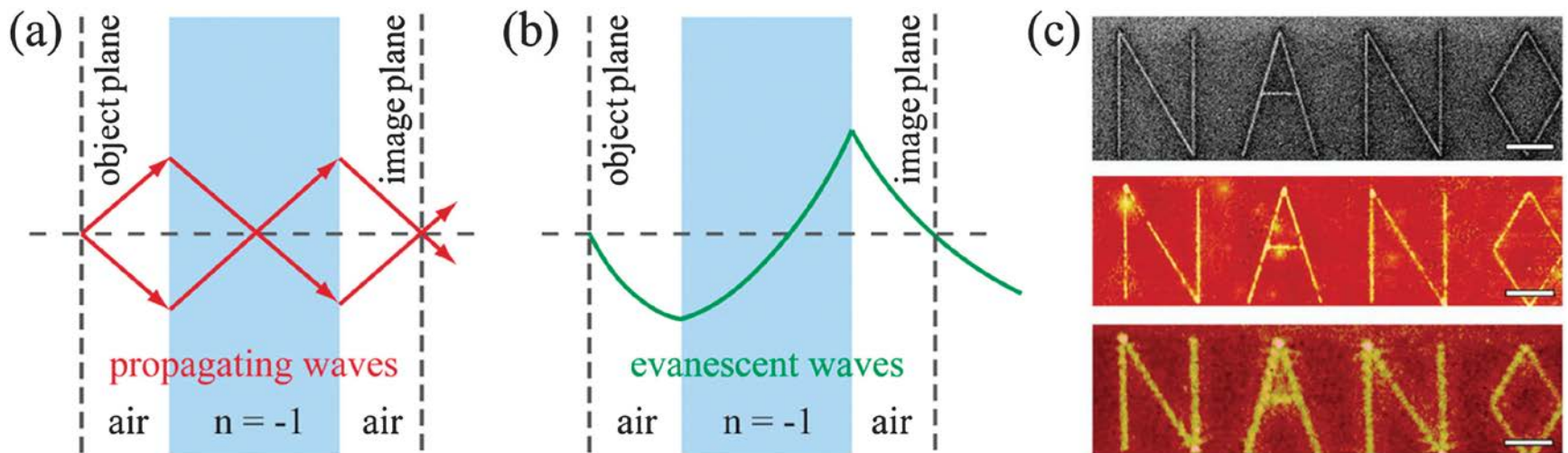
(b) Fishnet structure as NIMs in the visible region (yellow light). The left panel is the schematic of the fishnet structure, in which two layers of metal meshes (gray) are separated by a dielectric layer (cyan). The right panel is the scanning electron microscope (SEM) image of the sample fabricated by electron beam lithography (EBL).

# Применения метаматериалов

## 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





- (a) A flat NIM slab can focus all the light rays from a point source, arising from the negative refraction.
- (b) The NIM slab can also amplify evanescent waves, leading to perfect imaging at the image plane.
- (c) Experimental demonstration of an optical silver superlens. Top: focused ion-beam (FIB) image of the “NANO” object. The linewidth of the object was 40 nm. Middle: atomic force microscopy (AFM) of the developed image on photoresist with a silver superlens. The linewidth is 89 nm. Bottom: AFM of the developed image without a silver superlens. The line width is 321 nm. The scale bars indicate 2  $\mu\text{m}$ .

N. Fang et al. *Science* 2005, **308**, 534.



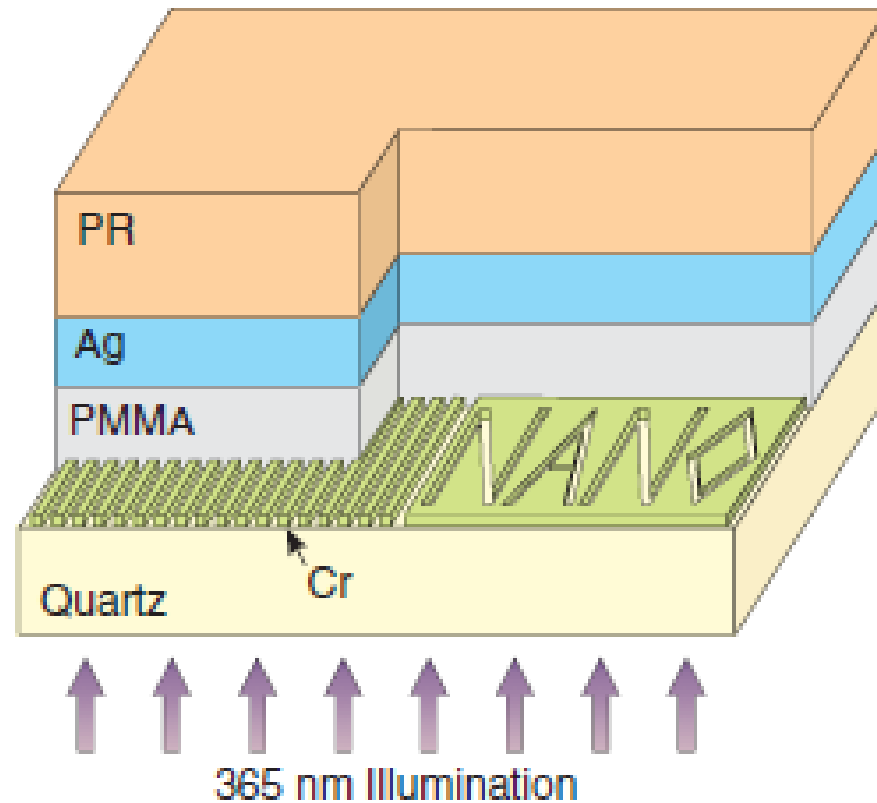
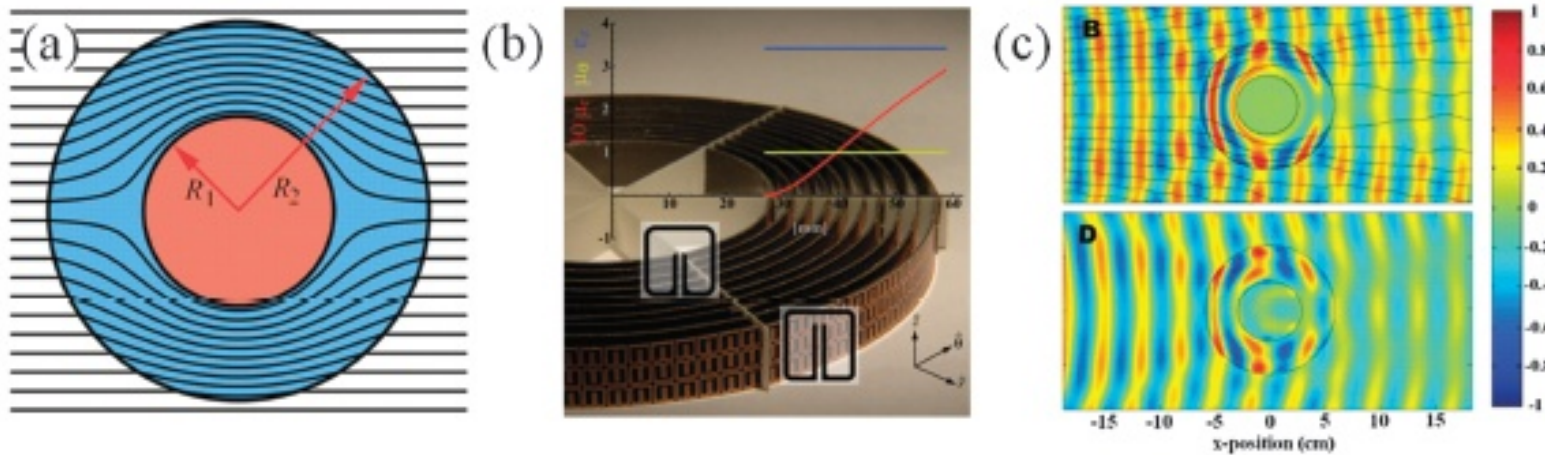
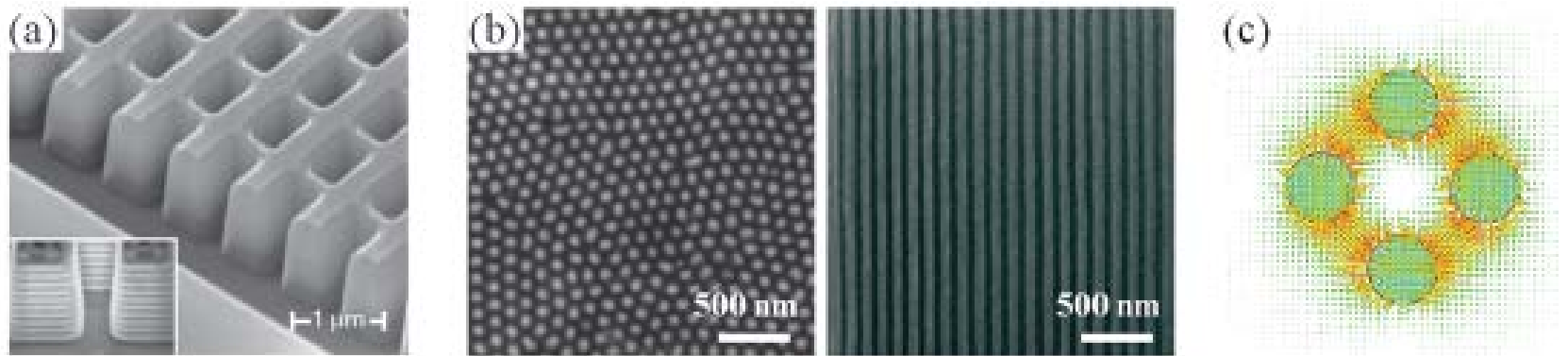


Fig. 1. Optical superlensing experiment. The embedded objects are inscribed onto the 50-nm-thick chrome (Cr); at left is an array of 60-nm-wide slots of 120 nm pitch, separated from the 35-nm-thick silver film by a 40-nm PMMA spacer layer. The image of the object is recorded by the photoresist on the other side of the silver superlens.

N. Fang et al. *Science* 2005, **308**, 534.



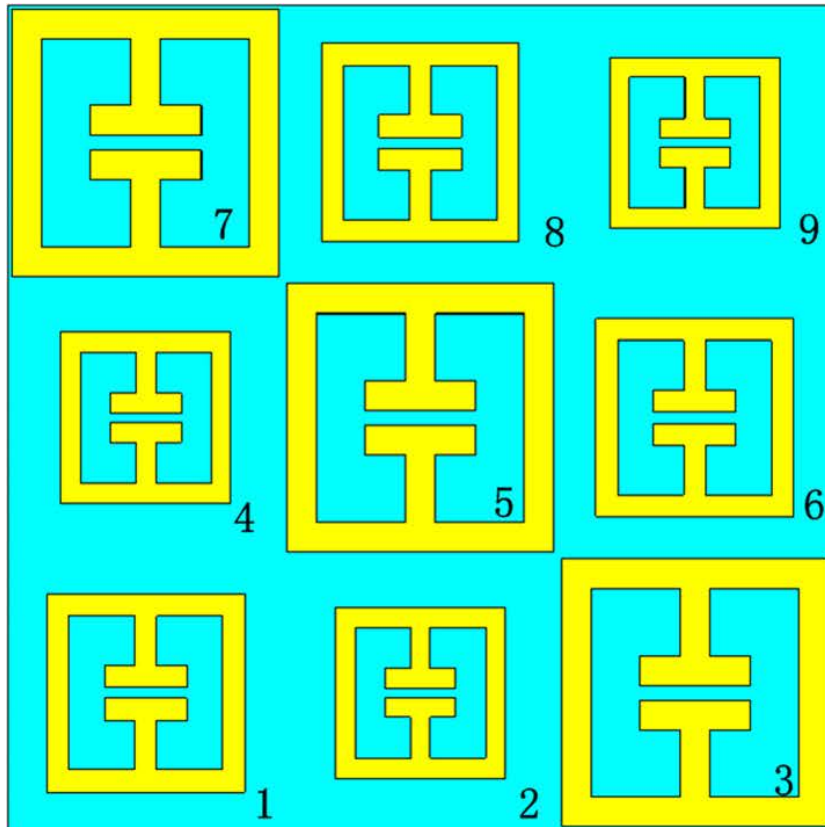
Принцип реализации «плаща-невидимки».



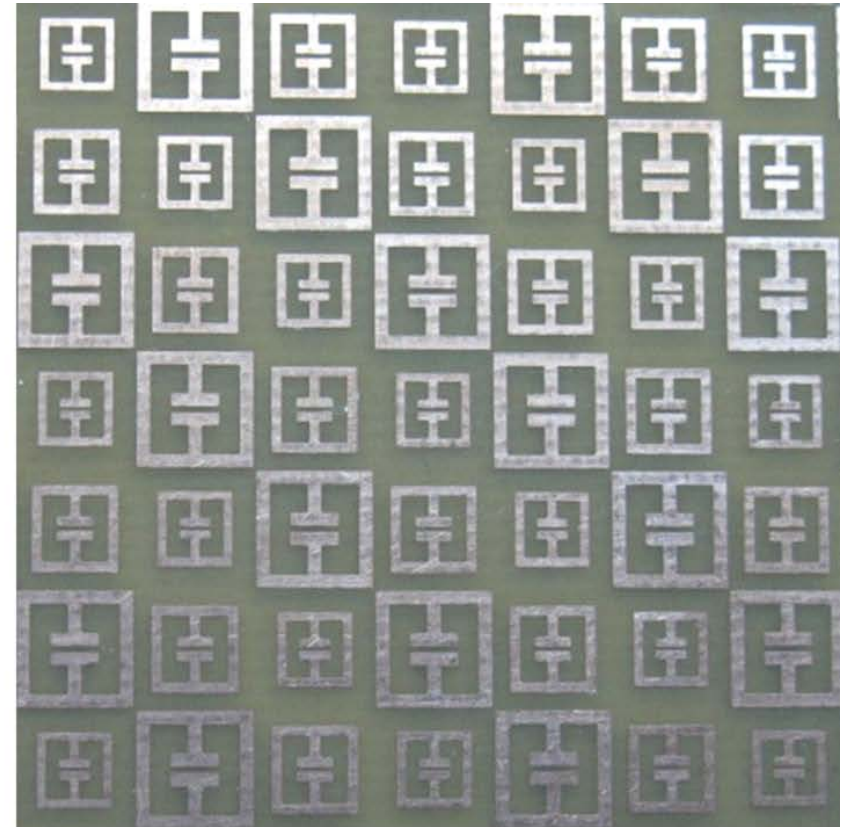
- (a) A 3D fishnet NIM structure fabricated by the top-down method (FIB), which consists of 21 total layers of alternating silver (30 nm) and MgF<sub>2</sub> (50 nm) films. The inset shows the cross-section view.
- (b) Silver nanowire metamaterials fabricated by the bottom-up technique. Left and right SEM images show the top and cross-section view, respectively.
- (c) Magnetic resonators composed of four metallic nanospheres. The structure may be synthesized from the self-assembly method.

# Ultrathin multiband gigahertz metamaterial absorbers

(Hui Li et al., J. Appl. Phys. **110** (2011) 014909)



(a)

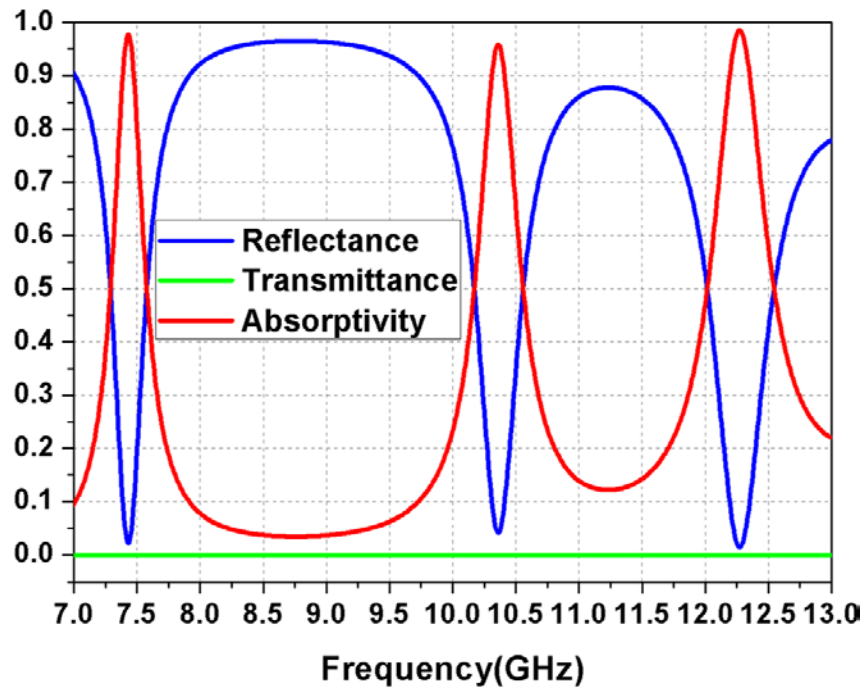
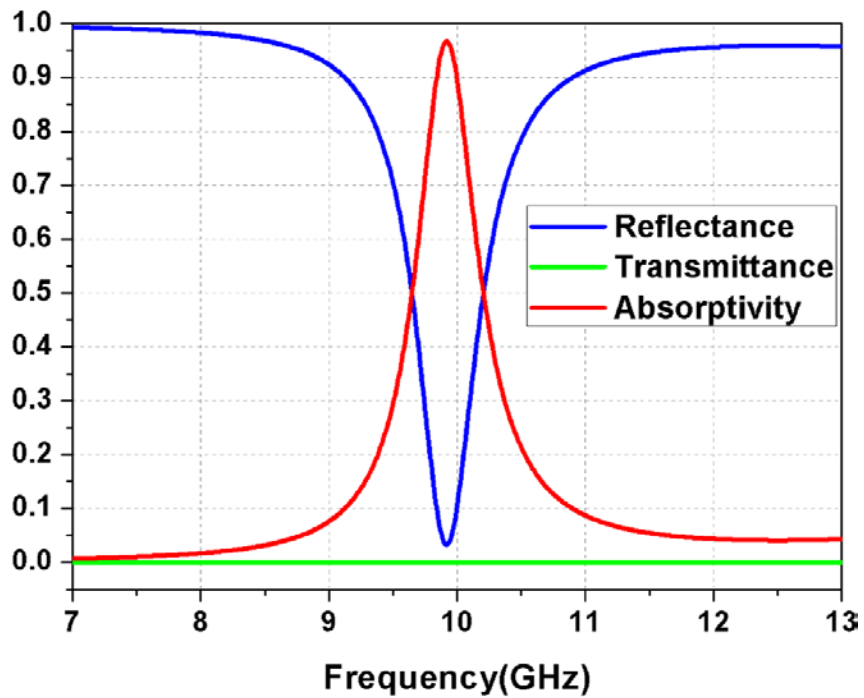


(b)

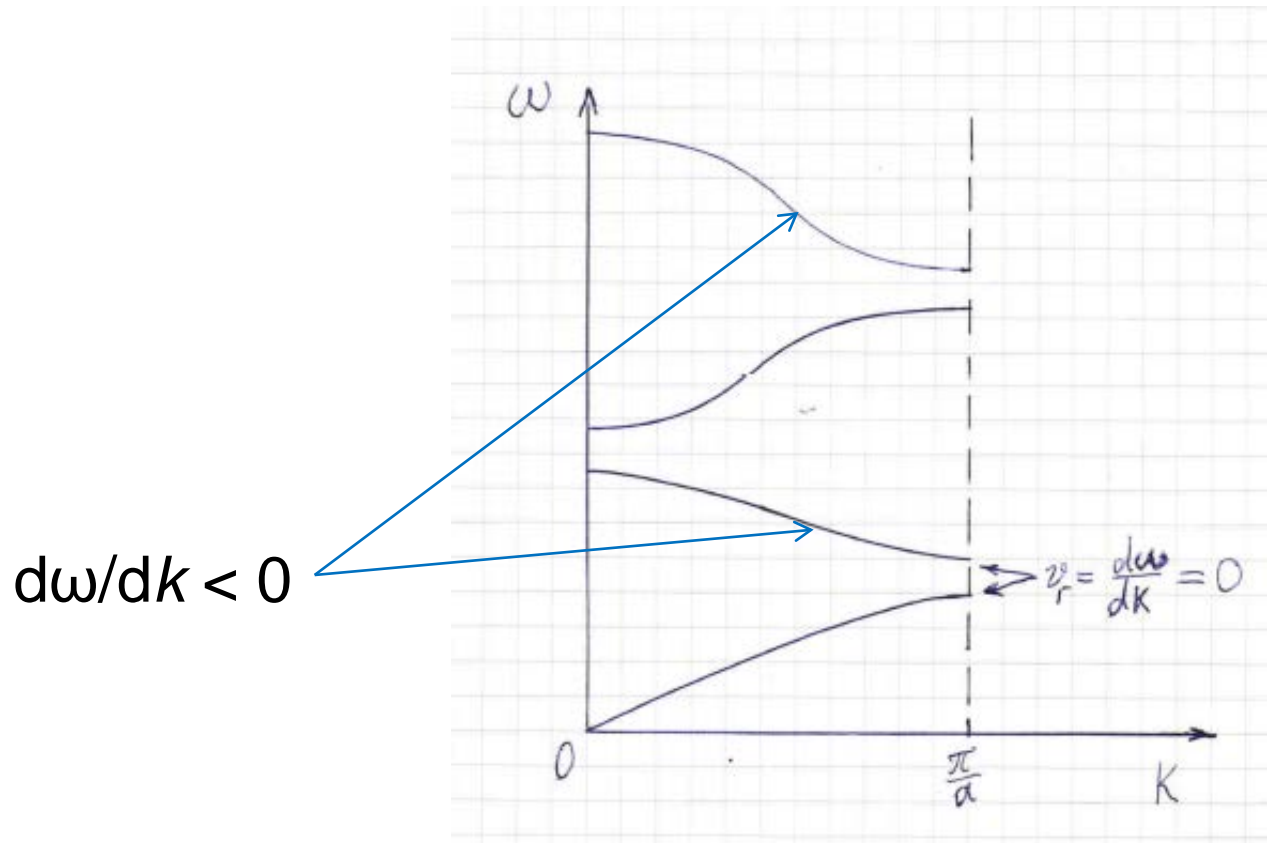
The triple-band MMA.

(a) The front view of a unit cell.

(b) The fabricated structure.



# Отрицательный коэффициент преломления



Отрицательный коэффициент преломления в фотонных кристаллах