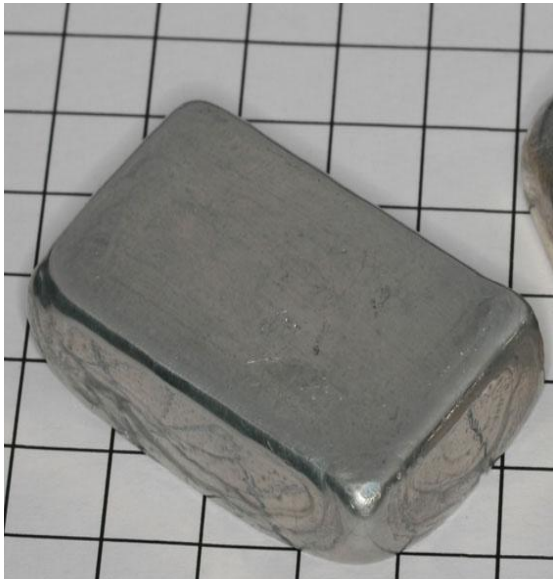


# Необычные оптические НАНОматериалы

Моисеев Сергей Геннадьевич

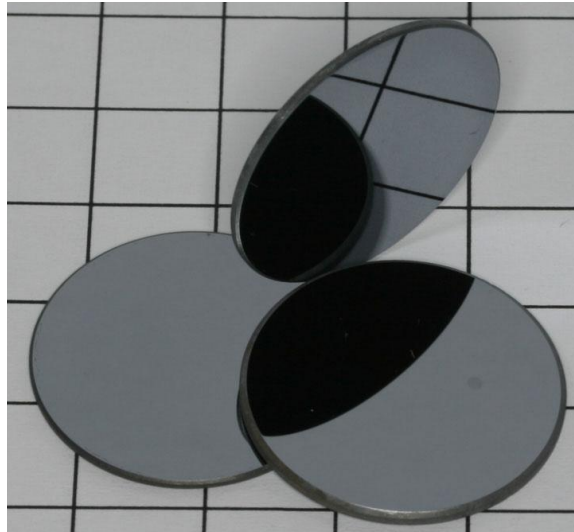
# Природные материалы

Проводники



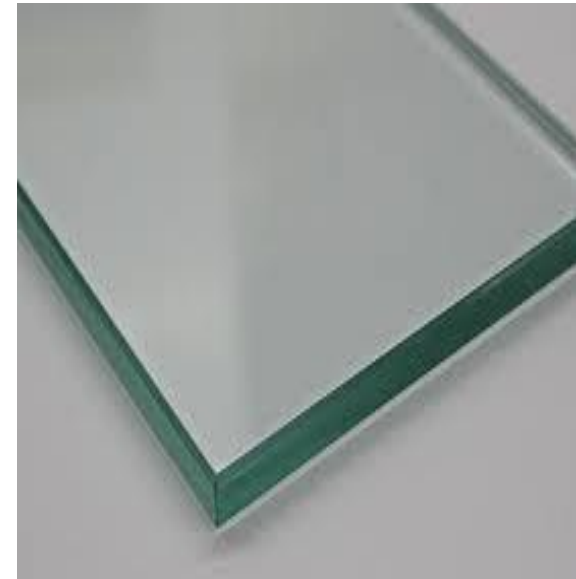
Al, Au, Ag, Fe, ...

Полу-  
проводники



Ge, Si, ...

Диэлектрики



стекло, сапфир, ...

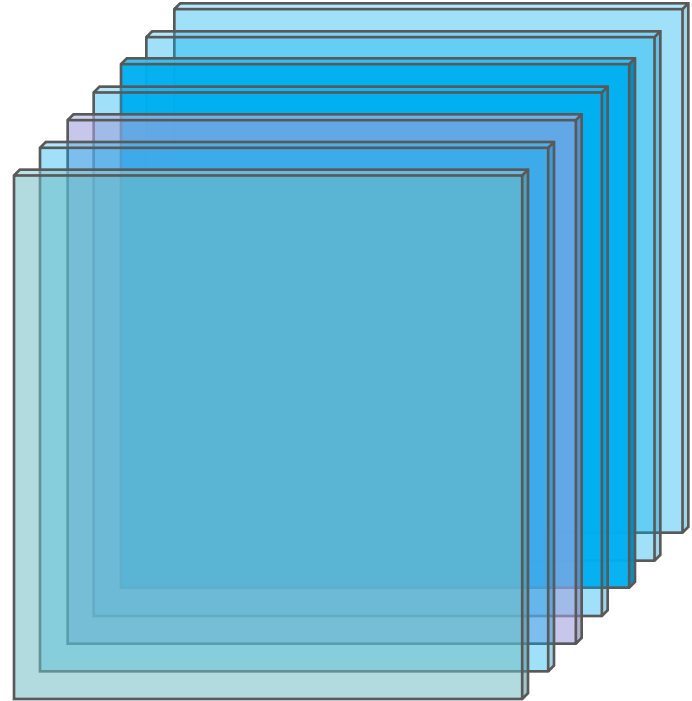
Металлический блеск  .....  Прозрачность

# Природные материалы

**Слоистая структура**

Толщина слоев ~ 100 нм

Новые оптические свойства!



# Природные материалы

## Диэлектрические зеркала

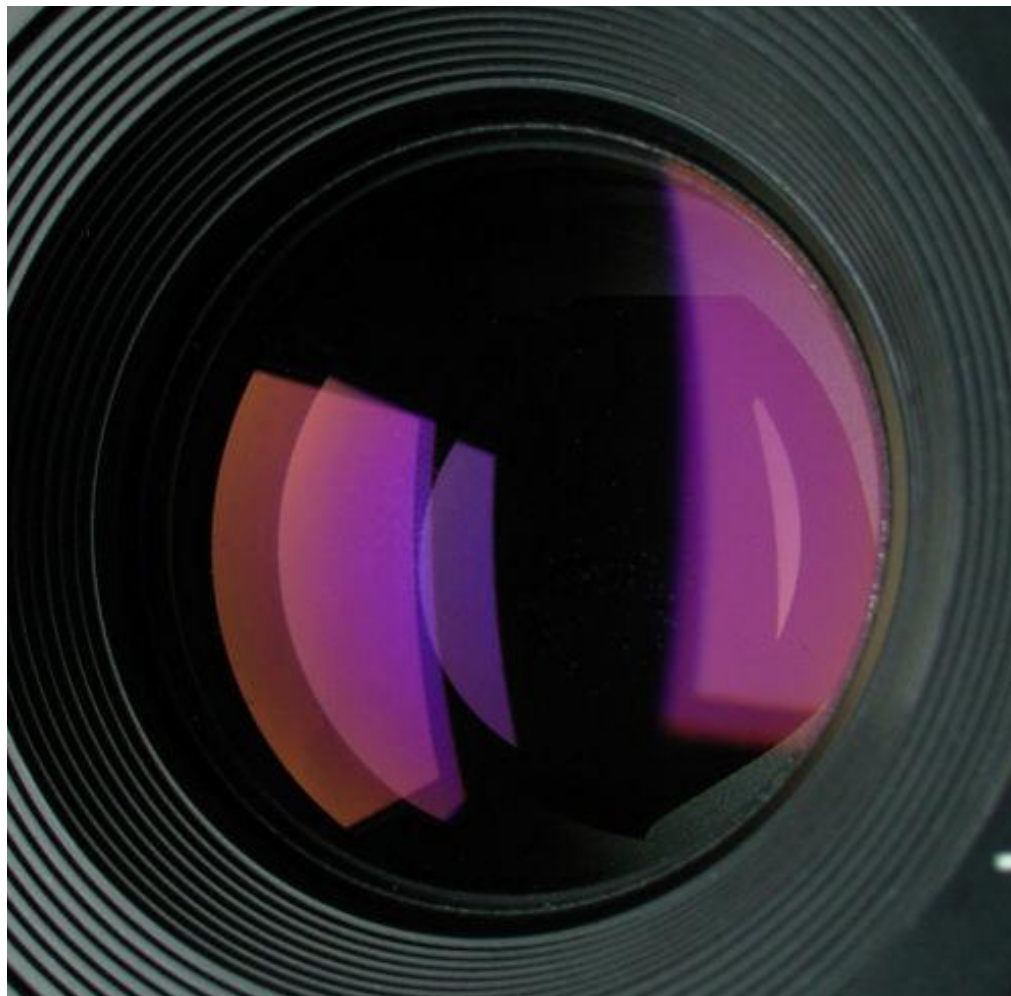
Отражательная  
способность  
близка к **100%**



# Природные материалы

## Просветляющие покрытия

Отражательная  
способность  
близка к **0%**



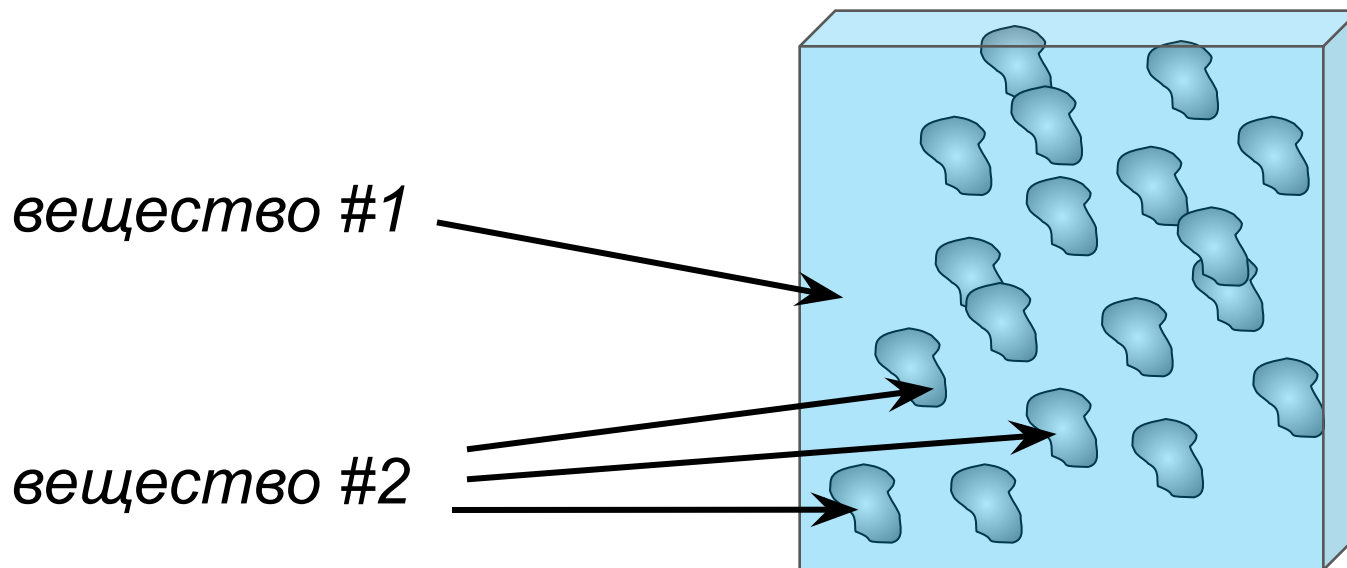
# Природные материалы

Вещество	Показатель преломления
алмаз	$n = 2.4$
стекло	$n = 1.4 - 2.2$
вода, лед	$n = 1.3$
воздух	$n = 1$



# НАНОматериалы

**Метаматериалы** – искусственно созданные материалы, обладающие свойствами, отличающимися от свойств природных материалов



Свойства метаматериалов не только не присущи используемым компонентам, но, в принципе, не могут быть найдены в природе.

# Метаматериалы

## Природные материалы

Вещество	Показатель преломления
алмаз	$n = 2.4$
стекло	$n = 1.4 - 2.2$
вода, лед	$n = 1.3$
воздух	$n = 1$

## Метаматериалы

Показатель преломления	
сверхбольшой	$n \gg 1$
единичный	$n \approx 1$
малый	$0 < n < 1$
отрицательный	$n < 0$



# Среды Веселаго



Пионерские исследования советского физика Виктора Георгиевича Веселаго в 1967-68 гг. (3 статьи в журнале «Успехи физических наук»)

1967 г. Июль

Том 92, вып. 3

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА ВЕЩЕСТВ С ОДНОВРЕМЕННО  
ОТРИЦАТЕЛЬНЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ  $\epsilon$  И  $\mu$

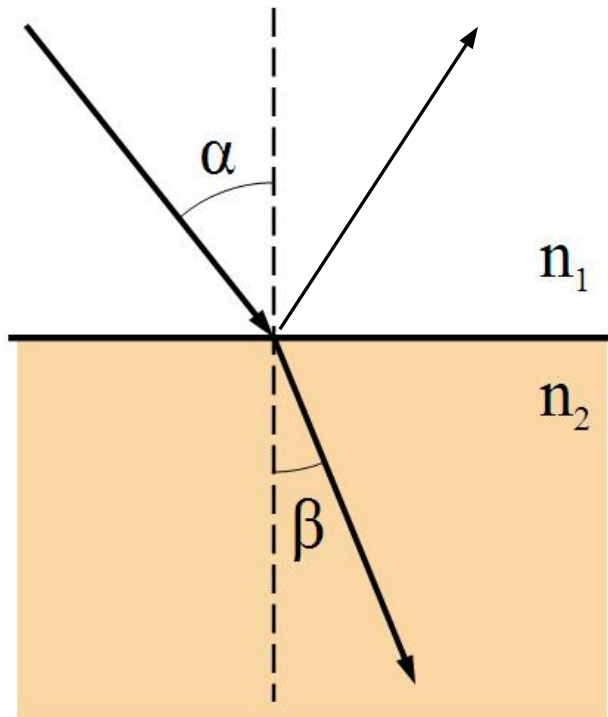
*В. Г. Веселаго*

Экспериментальное подтверждение через >30 лет!

Волна интереса к метаматериалам в 21 веке.

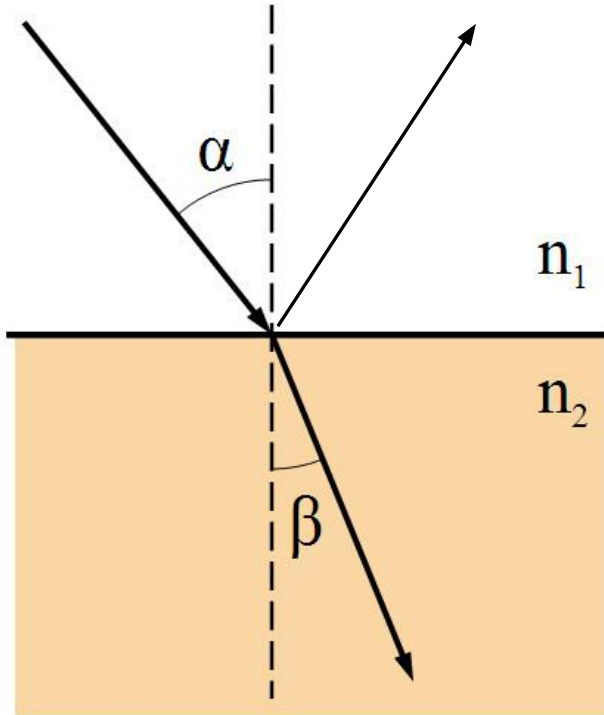
# Среды Веселаго

случай  $n_2 > 0$



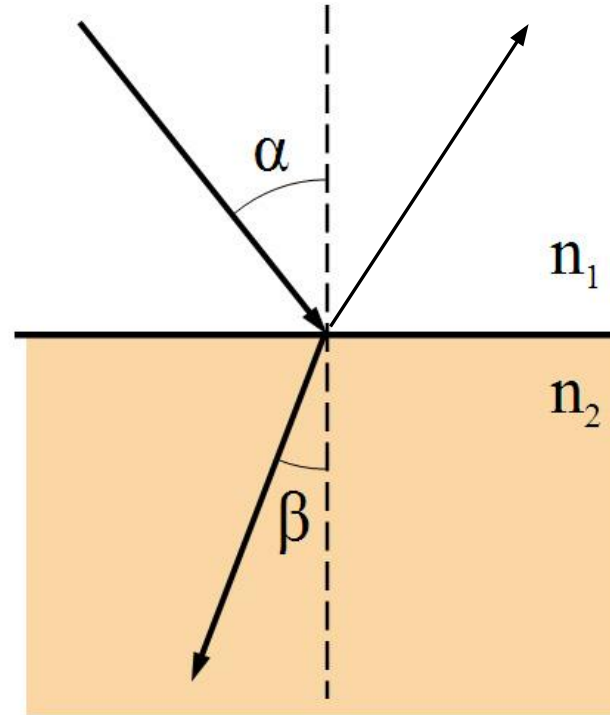
# Среды Веселаго

случай  $n_2 > 0$



случай  $n_2 < 0$

свет преломляется в ином направлении («отрицательном»)



ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ  
ПРЕЛОМЛЕНИЕ

# Среды Веселаго

## СТРАННОСТИ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ПРЕЛОМЛЕНИЯ

СРЕДА  
С ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ  
ПОКАЗАТЕЛЕМ  
ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Карандаш в воде кажется  
изогнутым из-за более высо-  
кого показателя преломле-  
ния воды



# Среды Веселаго

## СТРАННОСТИ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ПРЕЛОМЛЕНИЯ

В среде с отрицательным показателем преломления свет (и все другие виды электромагнитного излучения) ведет себя не так, как в обычных материалах с положительным преломлением, причем во многих отношениях это поведение противоречит интуиции

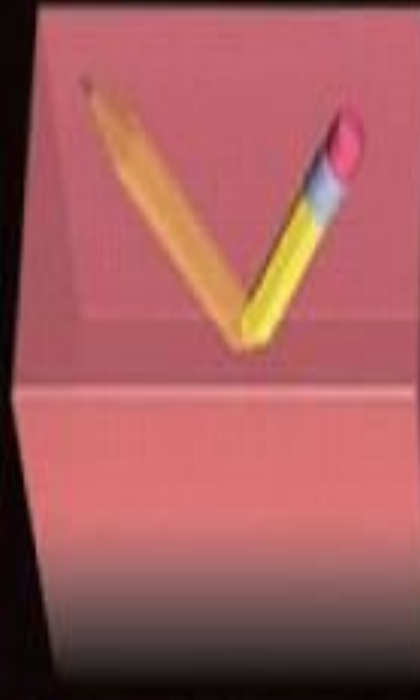
**СРЕДА  
С ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ  
ПОКАЗАТЕЛЕМ  
ПРЕЛОМЛЕНИЯ**

Карандаш в воде кажется изогнутым из-за более высокого показателя преломления воды

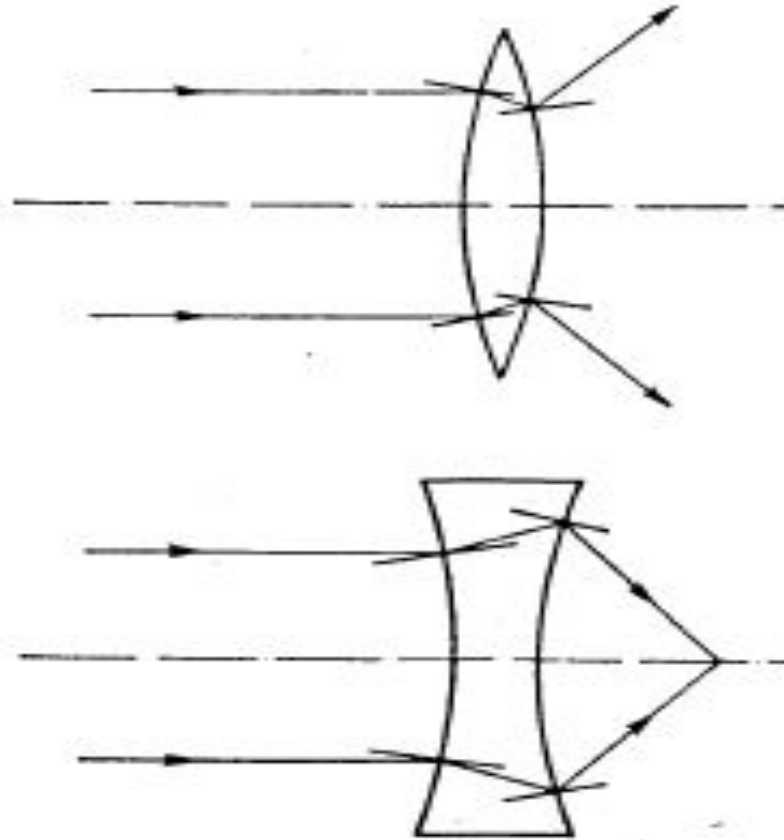


**СРЕДА  
С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ  
ПОКАЗАТЕЛЕМ  
ПРЕЛОМЛЕНИЯ**

Карандаш, погруженный в среду с отрицательным преломлением, будет казаться изогнутым наружу



# Среды Веселаго

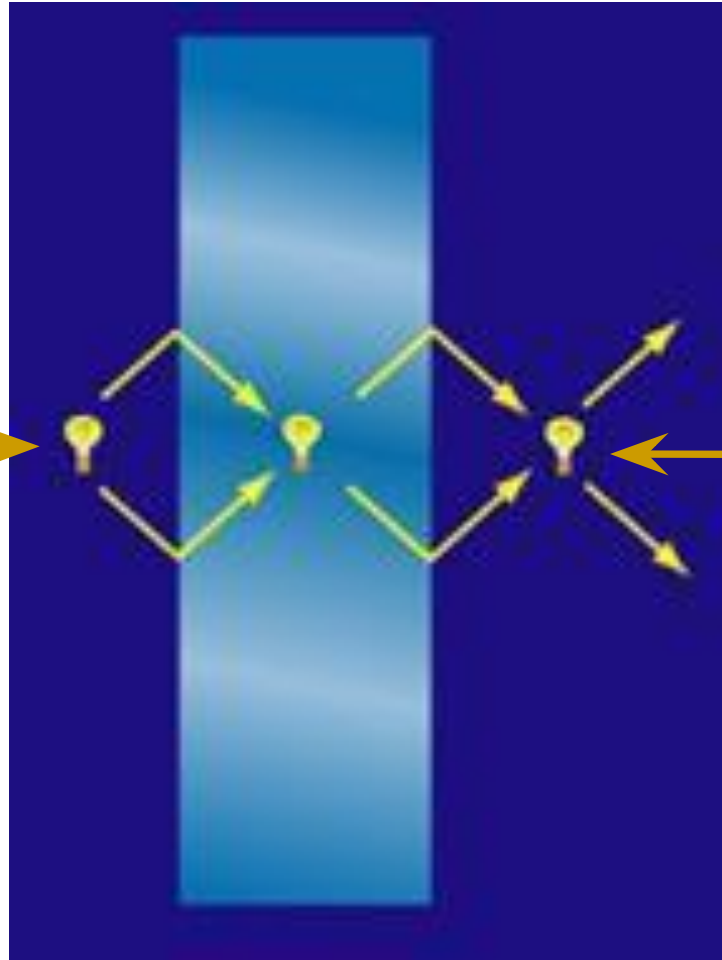


**«Рассеивающая» и «собирающая» линзы**

# Среды Веселаго

«Линза  
Веселаго»

*Источник света* →



← *Изображение*

Это устройство фокусирует в точку излучение точечного источника, но не фокусирует в точку параллельный пучок лучей.

# Метаматериалы



**Общий принцип «невидимости» - огибание светом препятствия**



# Метаматериалы

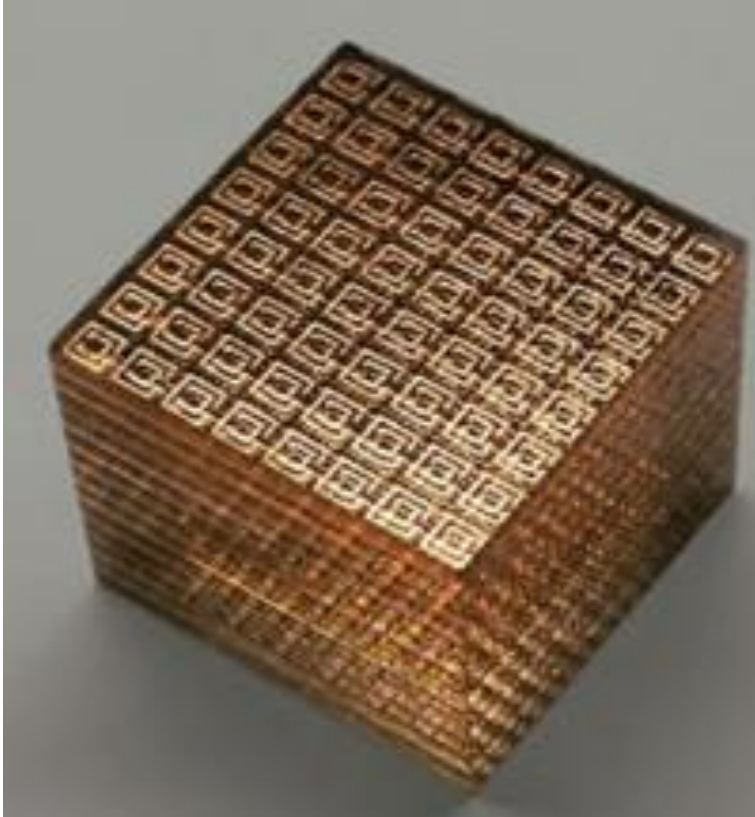


# Метаматериалы

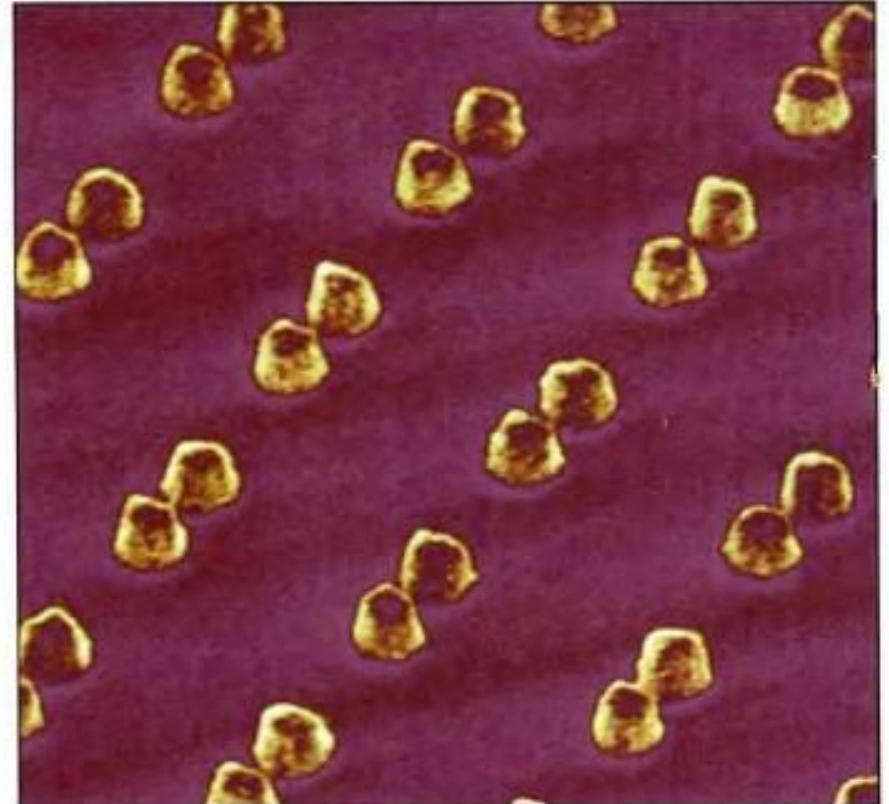


Фотография метаматериала с отрицательным показателем преломления

# Метаматериалы

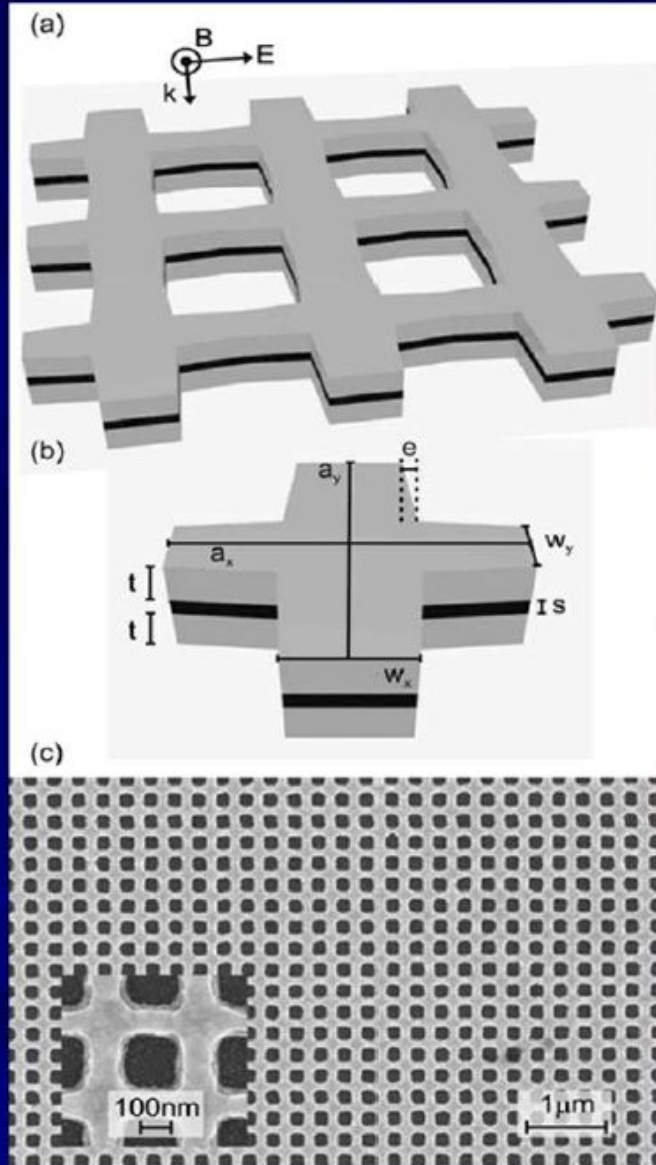


радиодиапазон



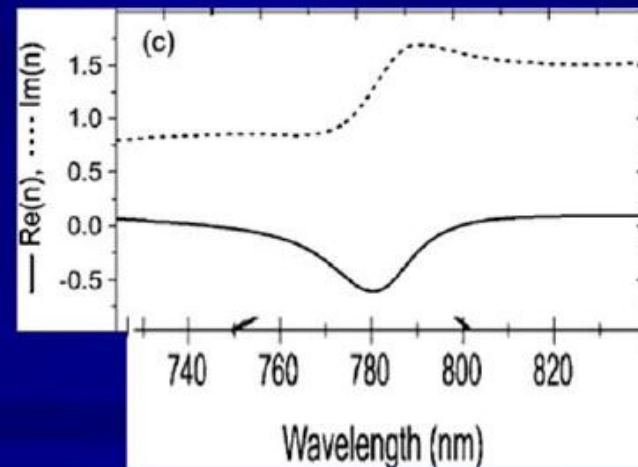
видимая область

# Метаматериалы



Периодическая структура из трех слоев МДМ (Ag–MgF<sub>2</sub>–Ag,  $n=1.38$ ) толщиной на стекле с размерами:  $a=300\text{nm}$ ,  $W_x=102\text{nm}$ ,  $W_y=68\text{nm}$ ,  $e=8\text{nm}$ ,  $t=40\text{nm}$

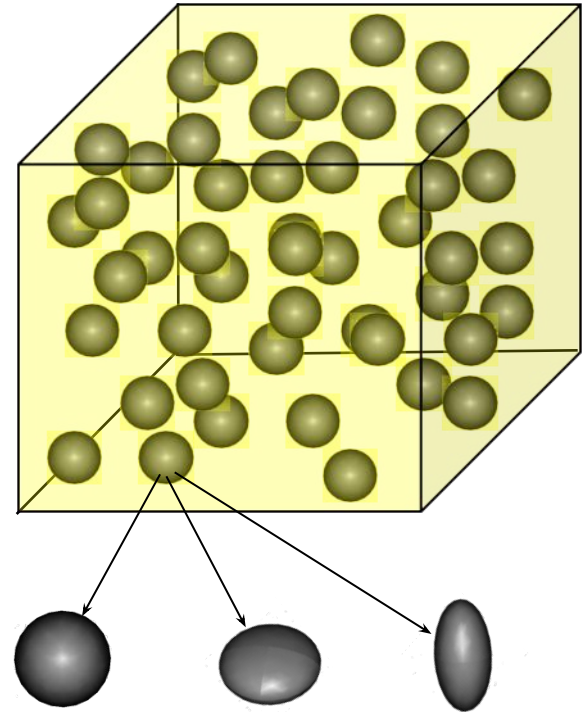
Реальная часть показателя преломления на длине волны  $780\text{nm}$  (край видимого спектра) равна  $(-0.6)$



# Метаматериалы

## Наноккомпозитные материалы

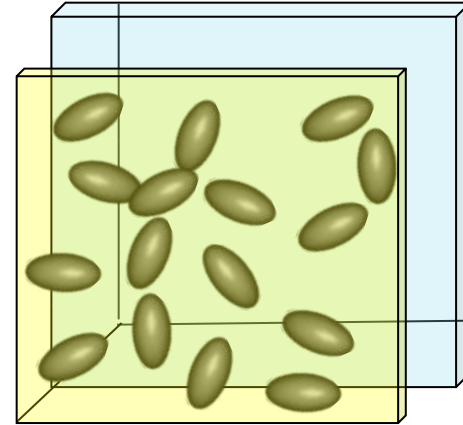
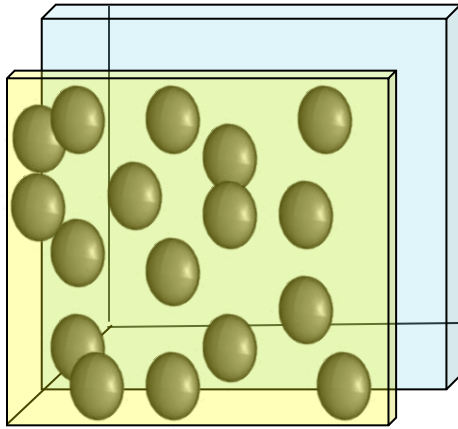
Наноразмерные металлические  
частицы (Au, Ag, ...)  
в прозрачной среде (стекло,  
поликарбонат, ...)



Металлический блеск □ .. □ Прозрачность

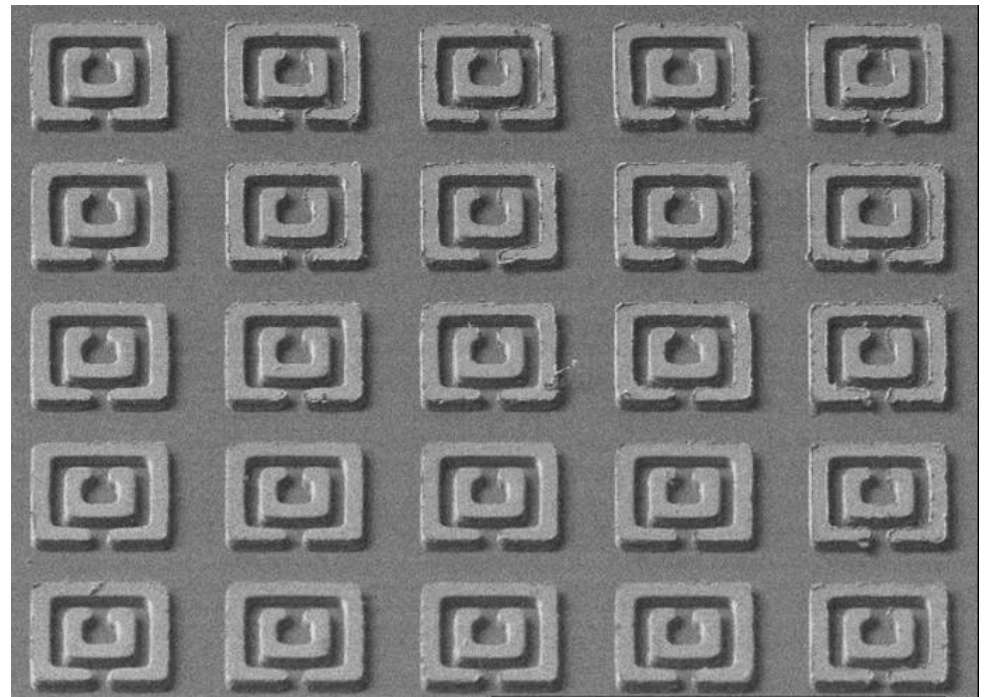
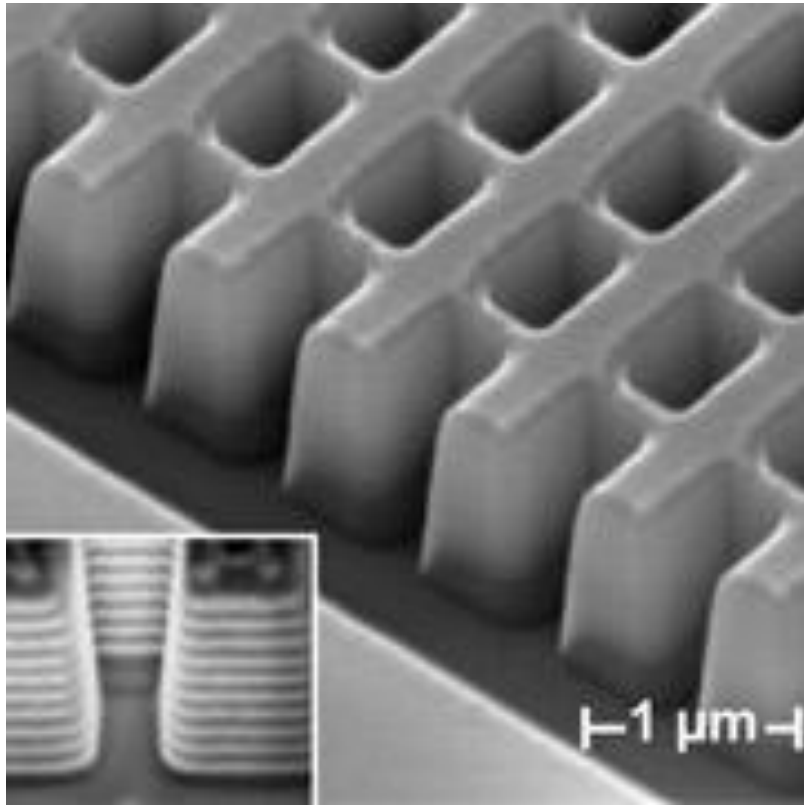
# Метаматериалы

## Наноккомпозитные материалы



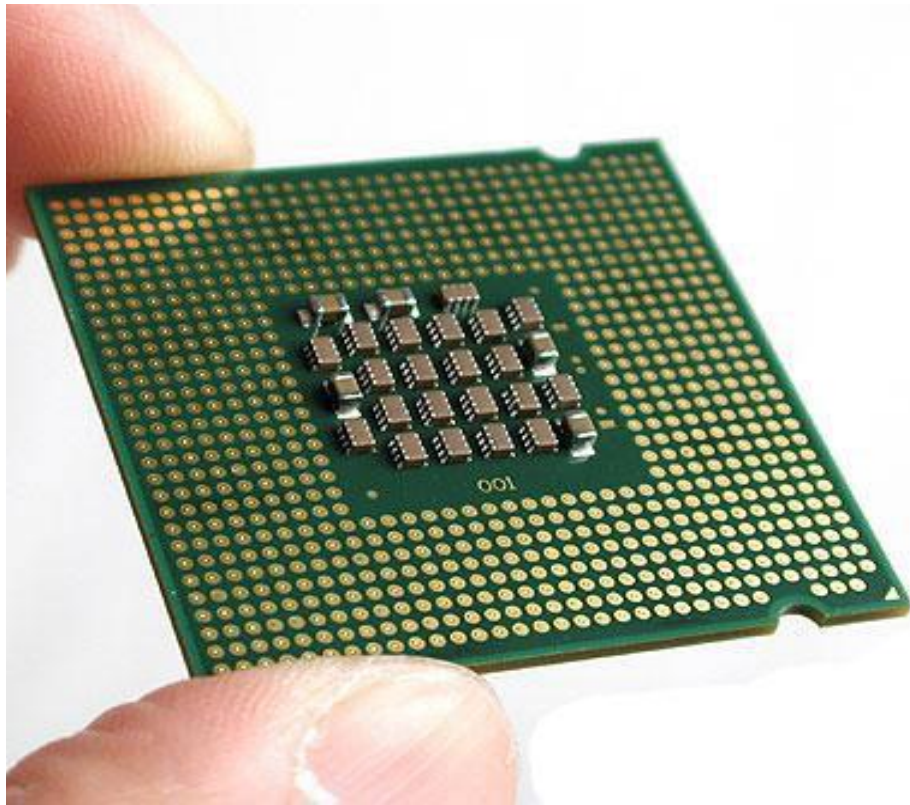
**Спасибо за внимание**

# Метаматериалы

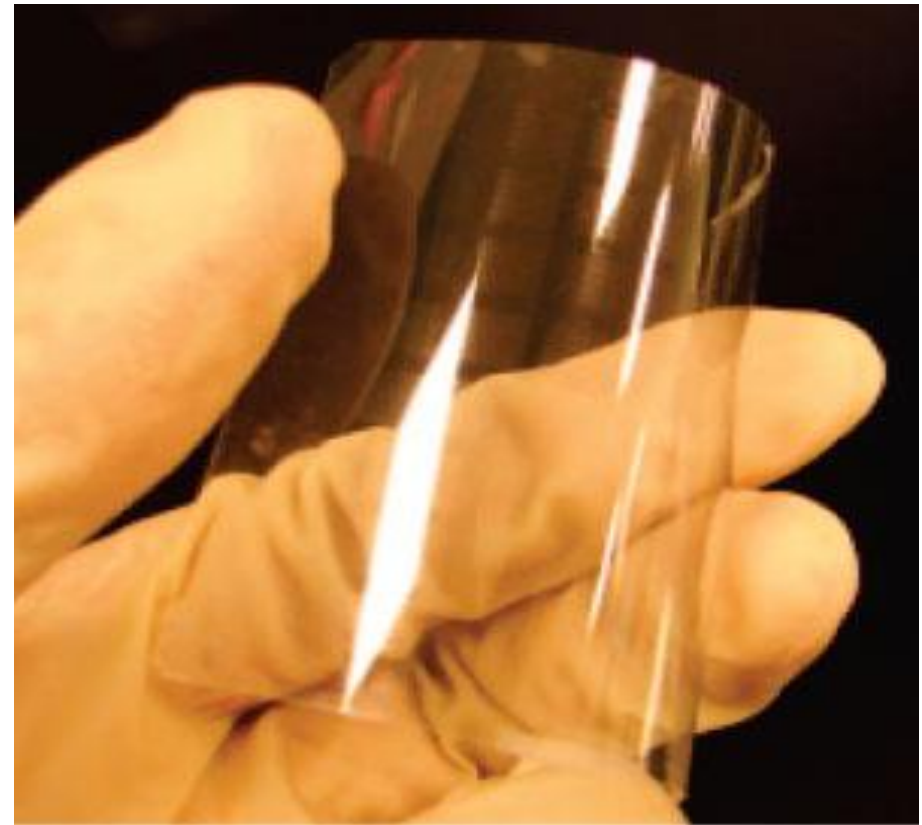




# Современный процессор



Нанотрубочные  
транзисторы на  
гибкой полимерной  
основе

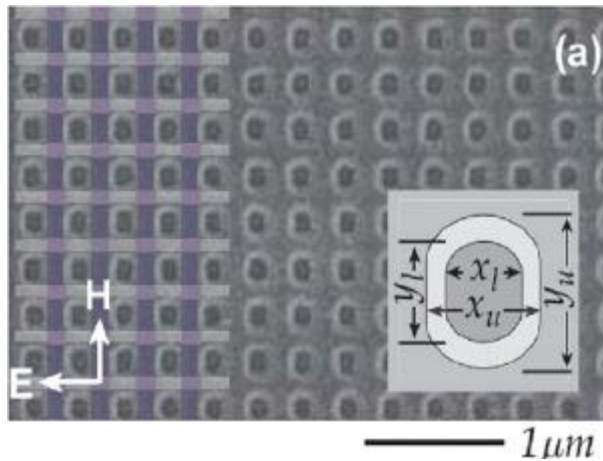




гибкий дисплей на основе проводящего полимера

# Метаматериалы

## ЛЕВОРУКИЕ СРЕДЫ



Оптически прозрачный материал, обладающий отрицательным показателем преломления в инфракрасной области непосредственно вблизи границы видимого света. Его сконструировали ученые из Университета Пердью (Purdue University), возглавляемые профессором Владимиром Шалаевым (Vladimir M. Shalaev) в 2007 г.

Метаматериал группы Шалаева представляет из себя сандвич из двух листов серебра, разделенных тонким слоем окиси алюминия. В нём прорезаны отверстия поперечником около 120 нанометров, лежащие на расстоянии 300 нанометров друг от друга. Эта дырчатая структура обладает показателем преломления  $-1,1$  при длинах волн инфракрасного света, лежащих в промежутке 818-799 нм.

Однако подобные структуры довольно сильно поглощают свет и потому не годятся для изготовления оптических фокусирующих устройств типа так называемой суперлинзы Веселаго. Эту проблему еще предстоит решить. Однако Владимир Шалаев надеется, что с их помощью можно будет изготавливать так называемые гиперлинзы - оптические приборы, разрешающая способность которых не будет ограничена длиной световой волны (то, что в оптике называется дифракционным пределом).

# Метаматериалы

# Удивительные свойства наноматериалов

эффект невидимости

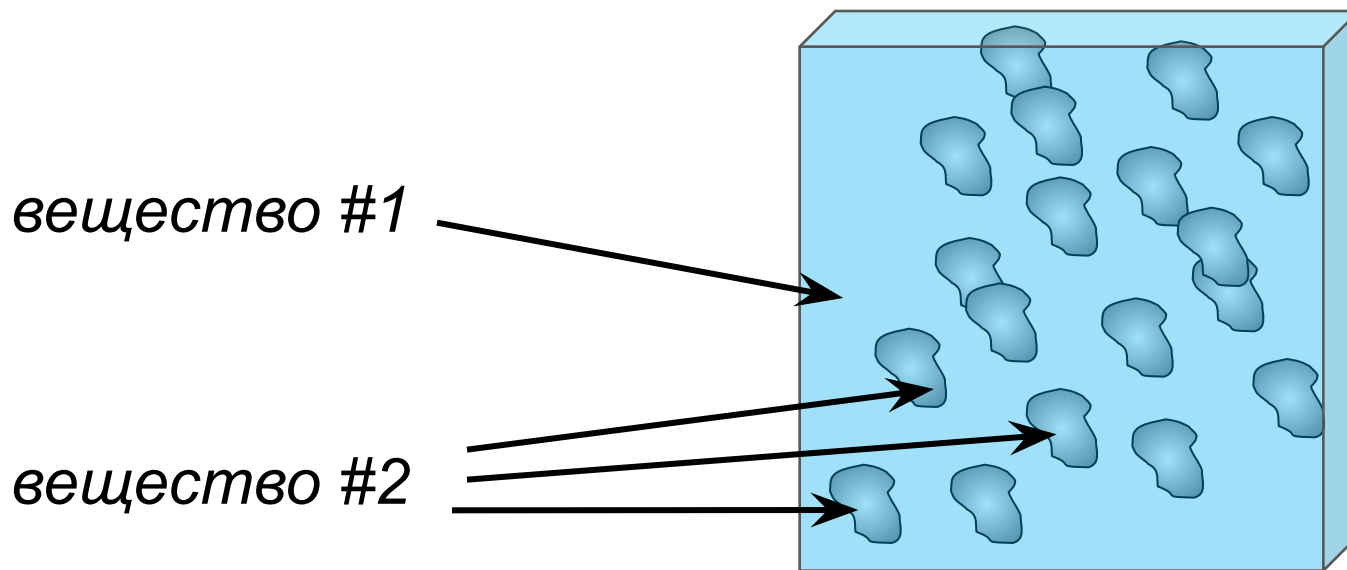


# НАНОматериалы

*Как они выглядят?*

# НАОматериалы

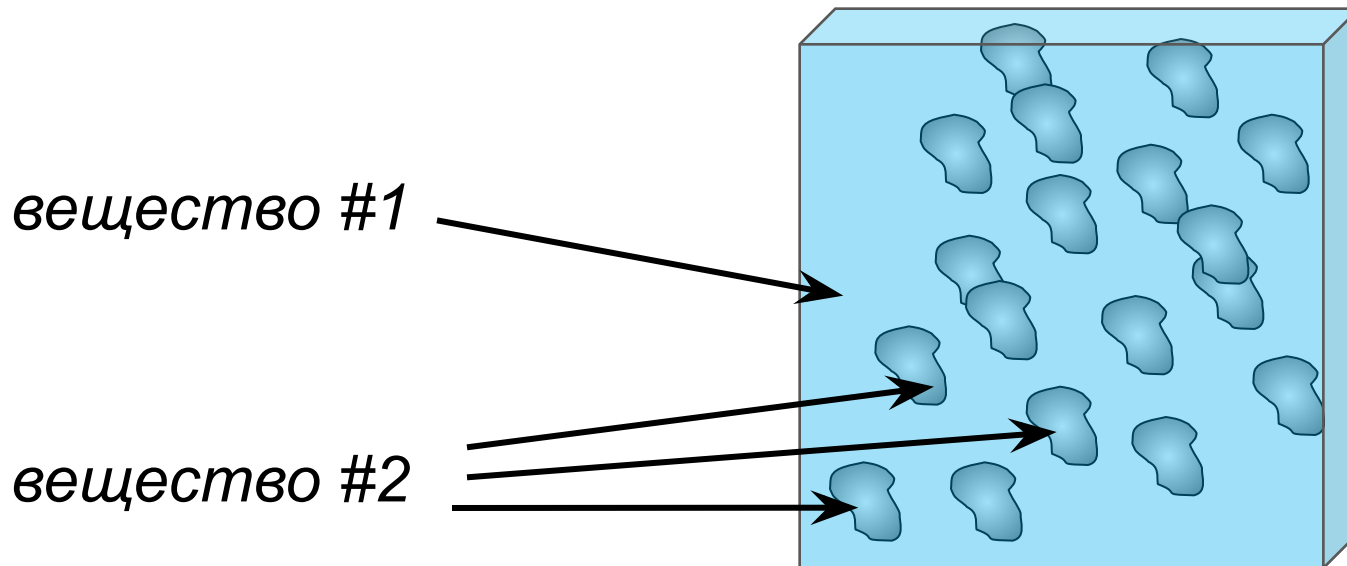
*Искусственные  
наноструктурированные  
материалы* = **Метаматериалы**



**Метаматериалы выделены в отдельный класс материалов, так как их свойства зависят не от химического состава компонент, а от микроструктуры, упорядоченной особым образом.**

# НАНОматериалы

*Искусственные  
наноструктурированные  
материалы* = ***Метаматериалы***



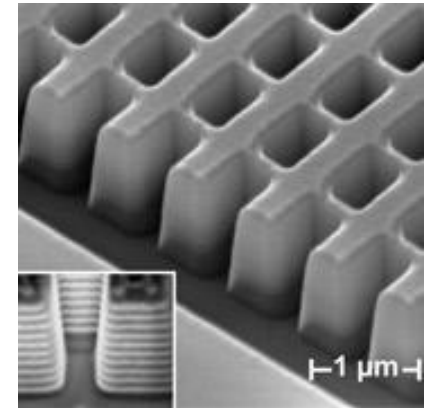
***Метаматериалы*** — искусственно созданные материалы, обладающие свойствами, отличающимися от свойств природных материалов.

Свойства метаматериалов не только не присущи используемым компонентам, но, в принципе, не могут быть найдены в природе.

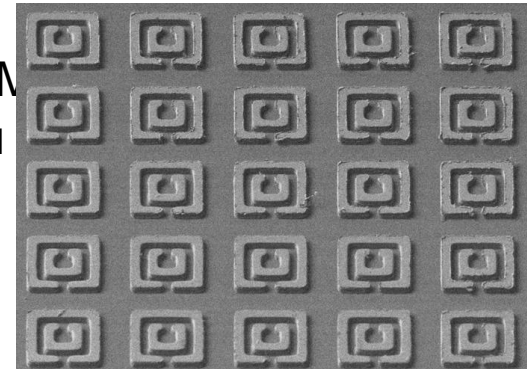


# Метаматериалы

*Метаматериалы (ММ)* – искусственно созданные материалы, обладающие свойствами, отличающимися от свойств природных материалов. Свойства ММ не только не присущи используемым компонентам, но, в принципе, не могут быть найдены в природе.



ММ – структурированная композитная среда. Характерный размер внутренней структуры ММ меньше или порядка длины электромагнитной волны.



Метаматериалы выделены в отдельный класс материалов, так как их свойства зависят не от их химического состава, а от микроструктуры, упорядоченной особым образом.

# Удивительные свойства наноматериалов

эффект невидимости



объект не будет виден, если...