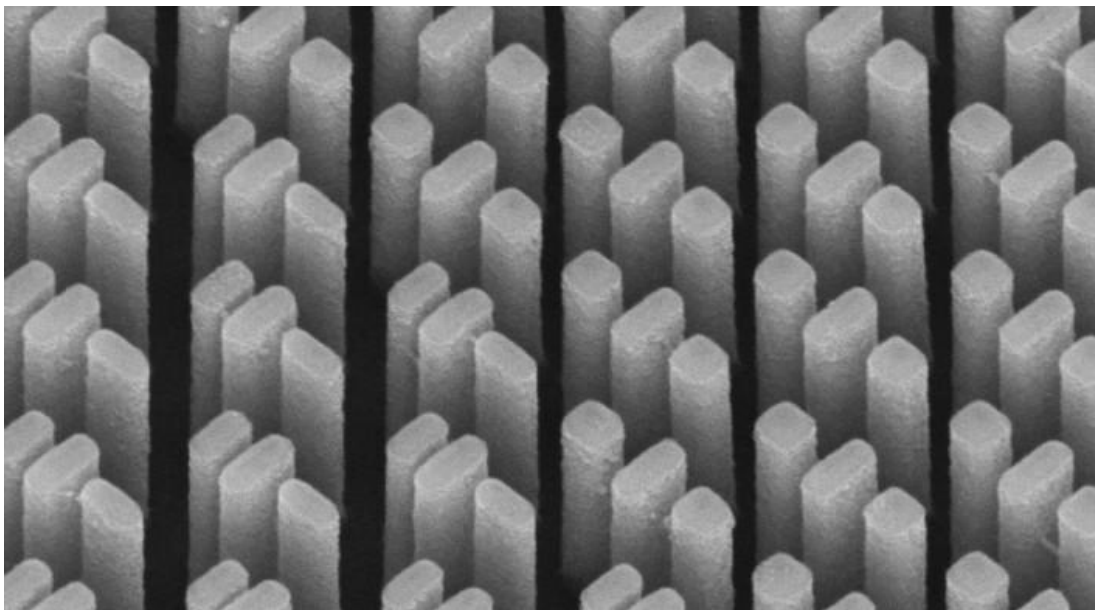




метаповерхности и метаматериалы: тенденции и перспективы

Филатов Сергей Александрович,

Таратын Игорь Александрович, Кернасовский Юрий Михайлович



*Институт тепло-и массообмена имени А.В. Лыкова
НАН Беларуси
Минск*

Метаматериалы ...

- **Метаматериал** —это искусственные структурированные материалы, используемые для контроля и управления светом, звуком и многими другими физическими явлениями.
- Свойства метаматериалов определяются как внутренними свойствами составляющих их материалов, так и геометрическим расположением этих материалов.
- Наиболее распространенными являются метаматериалы в которых структура элементов, размер и расстояние между элементами значительно меньше по сравнению с длиной волны возбуждающего поля. В этом случае результат взаимодействия отдельных элементов приводит к тому что свойства метаматериала обусловлены не столько свойствами составляющих его элементов, сколько искусственно созданной периодической структурой.
- **Метаповерхности** - двумерный аналог метаматериалов¹.
- **Металинзы** - метаповерхности, используемые в качестве оптических элементов. Обычно имеет толщину, не превышающую микрометр, поверхность покрыта наноструктурами в виде выступов или отверстий ...

Ауксетики

- Примерами метаматериалов, обладающими необычными механическими свойствами, являются ауксетики (материалы, имеющие отрицательные значения коэффициента Пуассона), созданные на основе сотовых структур и слоистые материалы, обладающие, при специальном подборе характеристик слоев, отрицательным коэффициентом расширения поперек слоев ...

Метаматериалы: проектирование

- метаматериалы могут быть сконструированы - иногда со свойствами, превосходящими природные, - простым и интуитивно понятным способом. Элементы метаматериала можно рассматривать как молекулы искусственного материала, и они могут быть разработаны с использованием различных численных методов, которые были разработаны на протяжении многих лет. Метаматериалы обеспечивают путь к многомасштабному проектированию, в котором свойства метаматериальных элементов могут быть сначала определены с помощью эквивалентного, гипотетического непрерывного материала, используемого для последующего проектирования системы

История создания метаматериалов

- Первые работы в этом направлении относятся ещё к XIX веку. В 1898 году Джагадис Чандра Бозе провёл первый микроволновый эксперимент по исследованию поляризационных свойств созданных им структур искривлённой конфигурации. В 1914 году Линдман воздействовал на искусственные среды, представлявшие собой множество беспорядочно ориентированных маленьких проводов, скрученных в спираль и вложенных в фиксирующую их среду. В 1946–1948 гг. Уинстон Е. Кок впервые создал микроволновые линзы, используя проводящие сферы, диски и периодически расположенные металлические полоски, фактически образовавшие искусственную среду со специфичным по величине эффективным индексом преломления. Детальное описание истории вопроса можно найти в работе В. М. Аграновича и Ю. Н. Гартштейна, а также в публикациях Вадима Слюсаря. В ряде работ признаны пионерские работы советского физика Виктора Веселаго (1967).

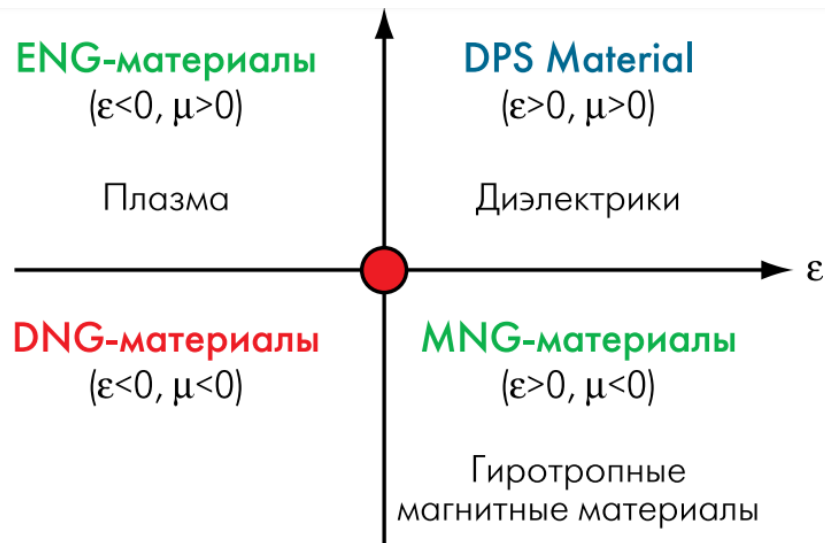
Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ . – Успехи физических наук, 1967, т.92, №7, с. 517– 526



- В 2000 году была осуществлена демонстрация первого искусственно структурированного материала с отрицательным индексом, иногда называемого материалом Веселаго. Наша группа (тогда в UCSD) продемонстрировала первый метаматериал с отрицательным индексом коэффициента преломления, доказав одну из гипотез Веселаго. До этих экспериментов понятие отрицательной рефракции в течение нескольких лет вызывали ожесточенные споры

метаматериалы, основанные на проводящих элементах напоминают маленькие электрические схемы, и фактически могут быть легко проанализированы и поняты с помощью базовой теории цепей.

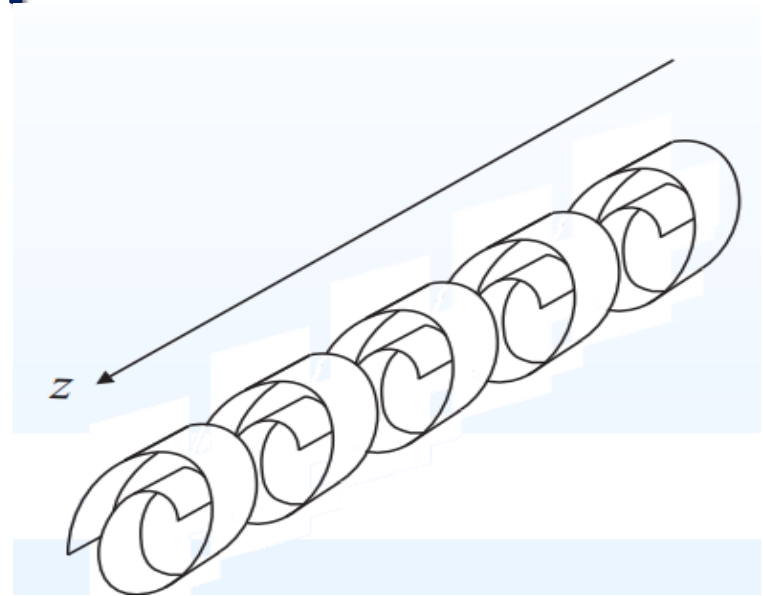
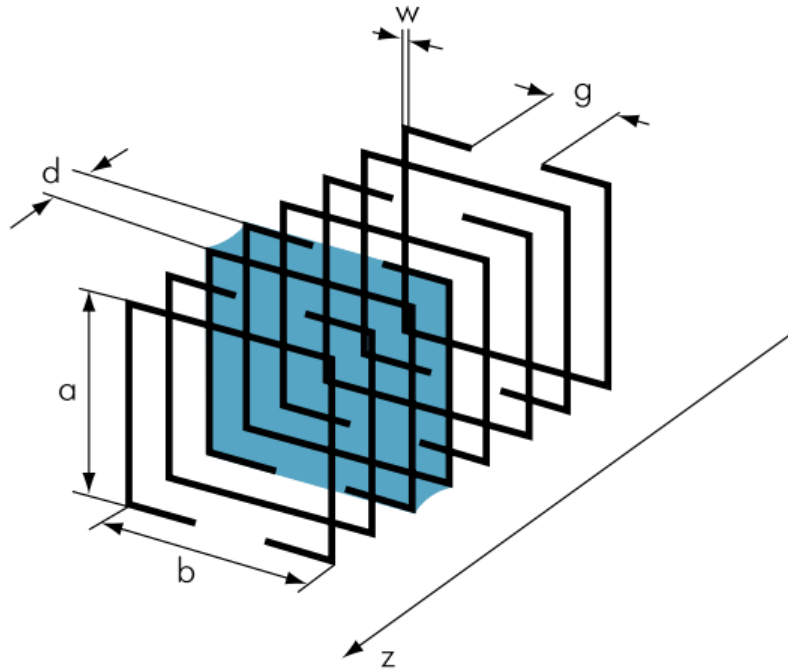
Классические метаматериалы



Классификация физических сред в зависимости от знака величин диэлектрической (ϵ) и магнитной (μ) проницаемостей

- Бинегативные среды (DNG, double negative)
 $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{Mn}_3$ (150 ГГц)

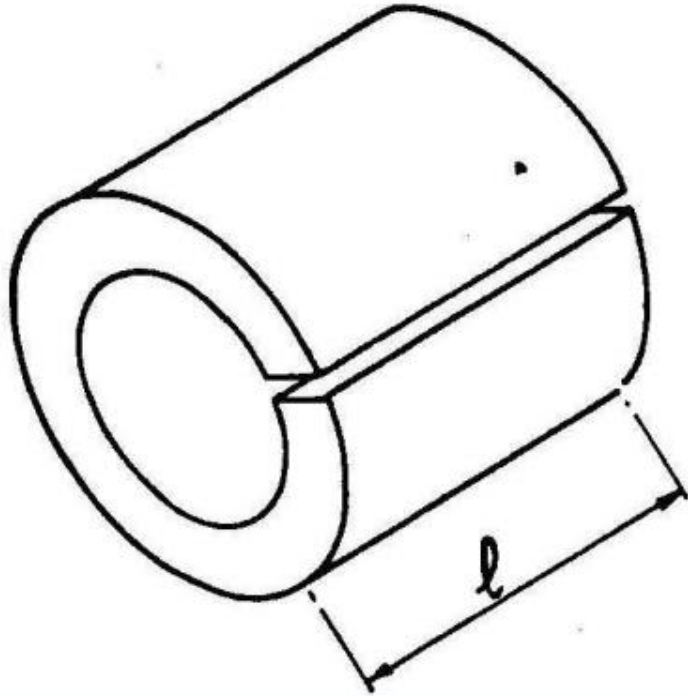
Классические структуры 3D метаматериалов



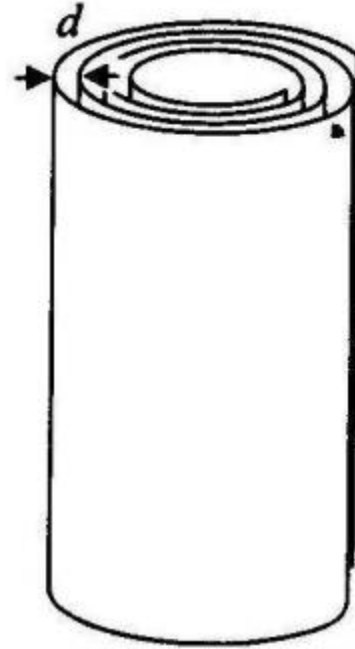
P. Ikonen, S.I. Maslovski, S.A. Tretyakov, I. Kolmakov, 2004

«метасоленоид»

S.A.Tretyakov and etc. Research on negative refraction and backward-wave media: A historical perspective. – Radio Laboratory / SMARAD Helsinki University of Technology, 2005

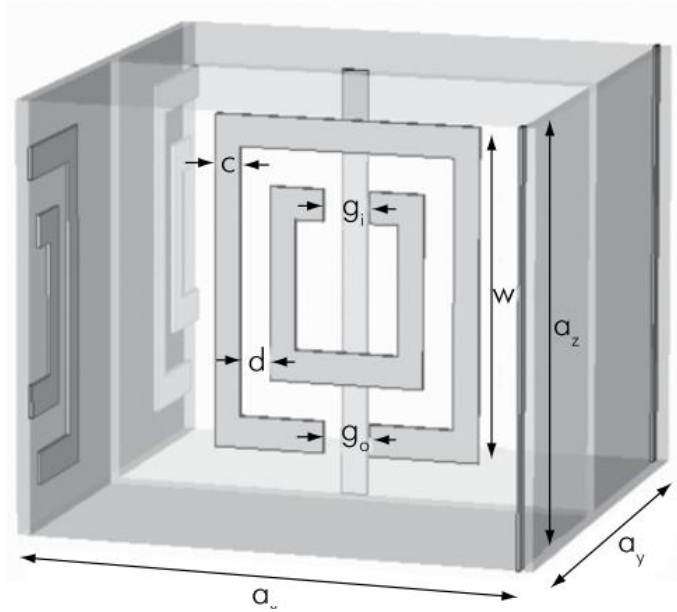


H. Schneider and P. Dullenkopf, 1977



J. Pendry et al., 1999

Классические структуры 3D метаматериалов

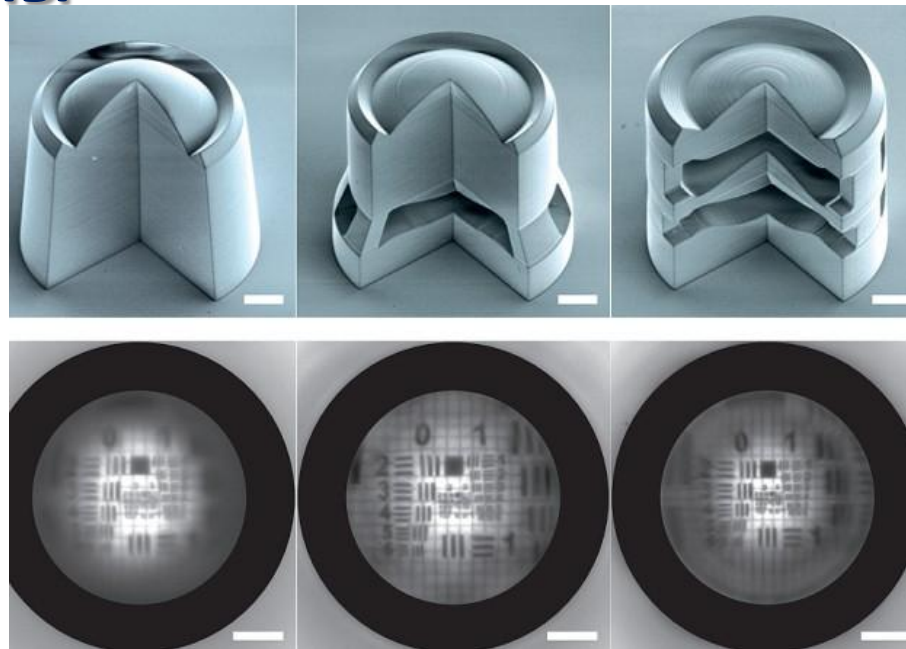


Оптические метаматериалы

- Конструкция оптических компонентов часто основана на использовании простых материалов, которые могут манипулировать светом через явление преломления. Когда луч света падает на поверхность раздела материала (например, стекла или пластика), его траектория изменяется, изгибаясь при попадании в материал на величину, связанную с его показателем преломления. Закон Снелла обеспечивает количественную взаимосвязь между углом отклонения и показателем преломления и служит основным инструментом проектирования для линз, используемых в очках, микроскопах, камерах, телескопах и многих других устройствах.
- По мере увеличения сложности материала простая трассировка лучей больше не становится жизнеспособным подходом для проектирования оптических устройств. Метаматериалы предлагают особые проблемы в этом отношении, потому что они обеспечивают беспрецедентную гибкость в отношении свойств материала. Метаматериалы могут легко поддерживать как электрический, так и магнитный отклик, который может варьироваться как в зависимости от направления, так и от пространственного положения в материале. Эта необычайная свобода делает возможным практически неограниченный набор решений для устройств; однако определение полезных решений может быть трудным делом.

Оптические метаматериалы

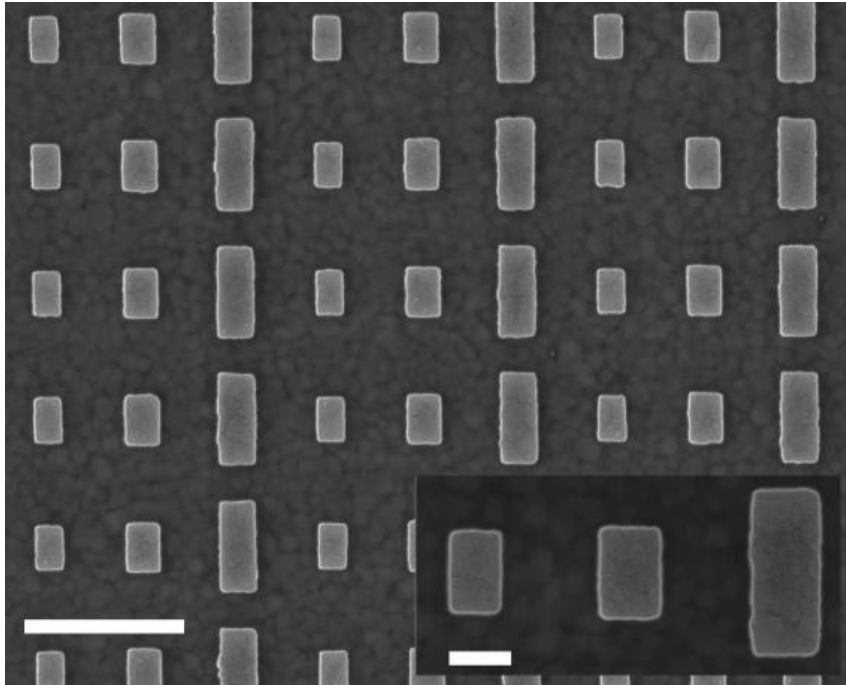
- Трансформационная оптика - это новая методология оптического проектирования, разработанная в 2006 году для использования истинного потенциала метаматериалов. Возникает основной вопрос: учитывая все возможности, которые предлагают метаматериалы, можно ли создавать новые оптические устройства, которые не могли бы быть легко спроектированы с использованием традиционных методов проектирования? Ответ на этот вопрос - однозначное «да»



- Микрообъективы диаметром 100 мкм напечатанные на 3D принтере

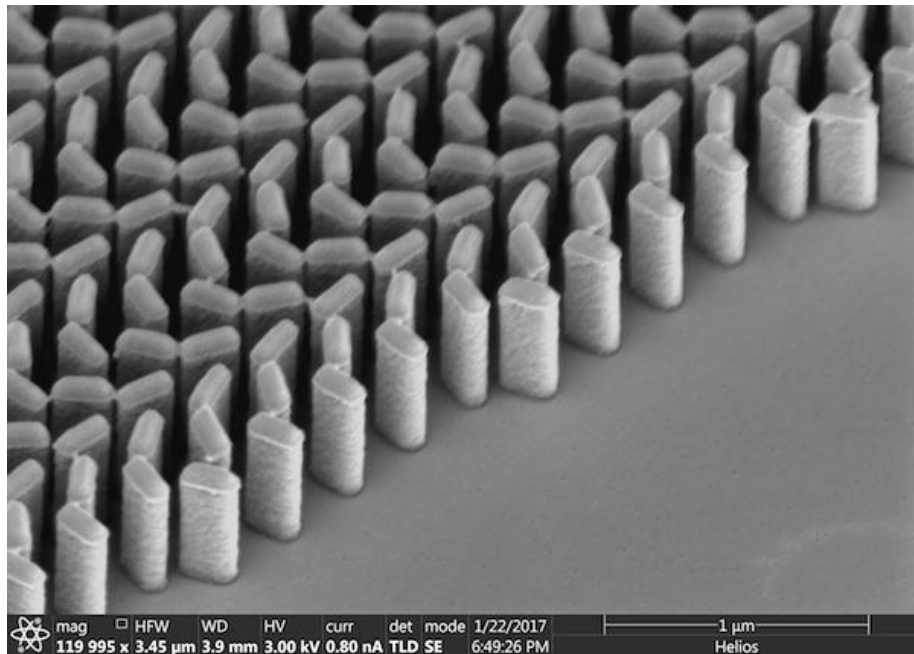
<https://habr.com/ru/company/dronk/blog/395523/>

Метаповерхности: пример 1



- **метаповерхность**, которая отражает свет под разными углами в зависимости от того, с какой стороны приходит падающий луч.
- в качестве основы для метаповерхности 50-нанометровый слой диоксида кремния, нанесенный на отражатель из серебра. На слое из SiO_2 были размещены прямоугольные nanoантенны из аморфного кремния с высоким [индексом Керра](#). Взаимодействие света, пришедшего от отражателя, с nanoантеннами порождает большой фазовый сдвиг, и диэлектрическая проницаемость этих nanoантенн может меняться в зависимости от свойств падающего света благодаря нелинейному эффекту Керра.
- нарушение [оптической взаимности](#) — то есть «выключение» отражения в одном из направлений — может быть полезно для многих практических применений, например, в оптических коммуникационных сетях

Метаповерхности: пример 2

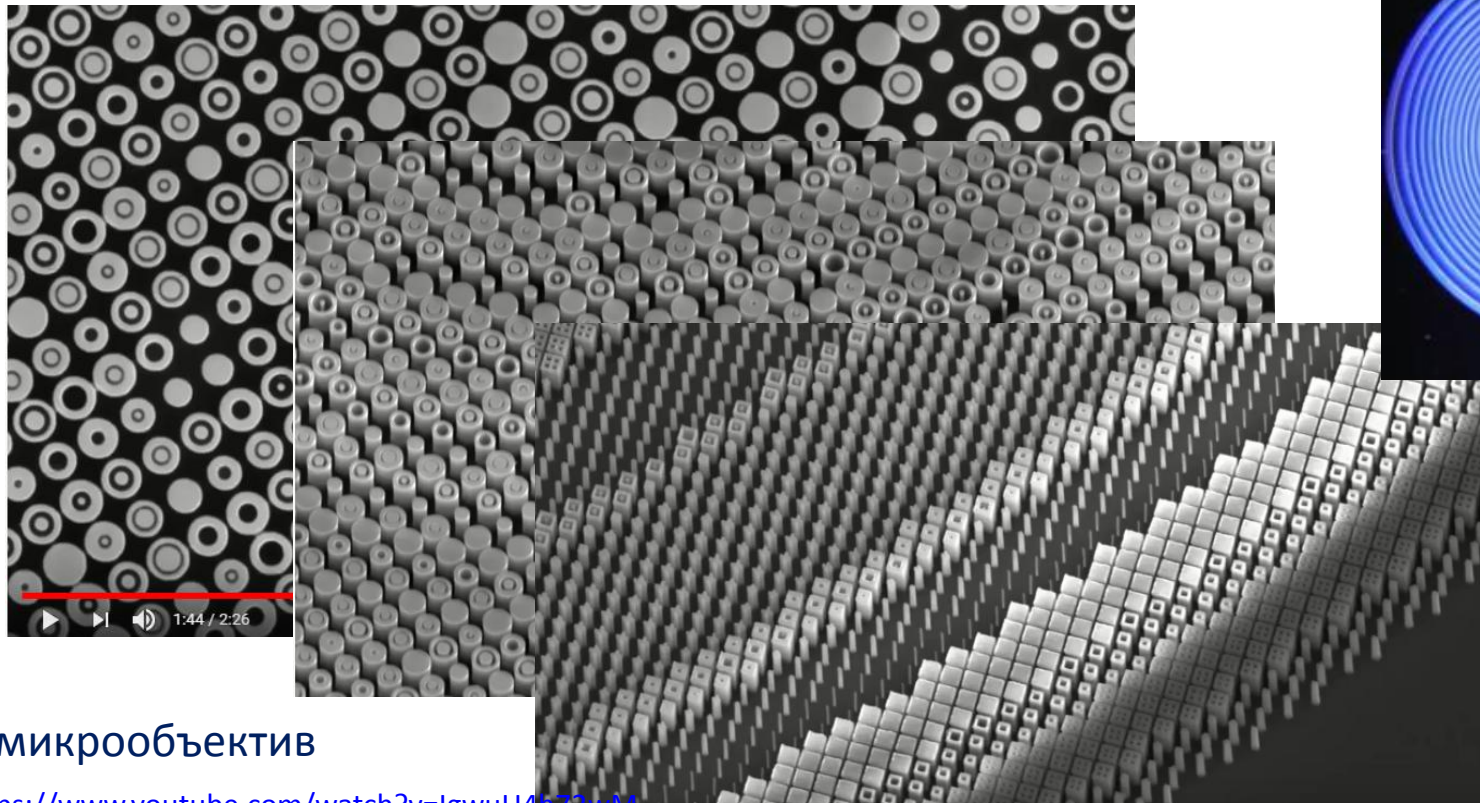


- первая плоская линза для иммерсионной микроскопии
- Линза состоит из множества нанолиней диоксида титана и изготовлена с использованием одностадийного литографического процесса.

<https://www.seas.harvard.edu/news/2017/05/building-better-microscope>

<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.nanolett.7b00717>

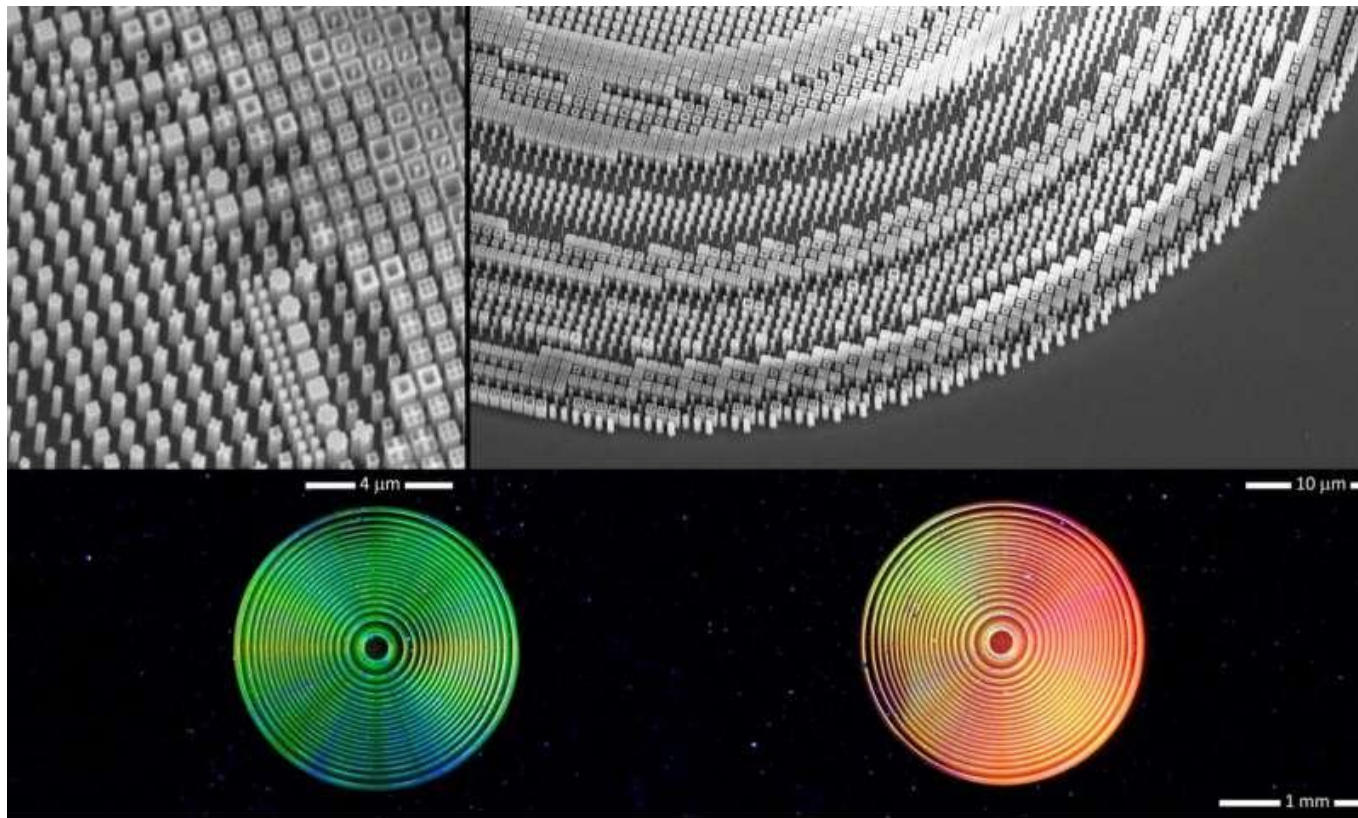
Метаповерхности: пример 3



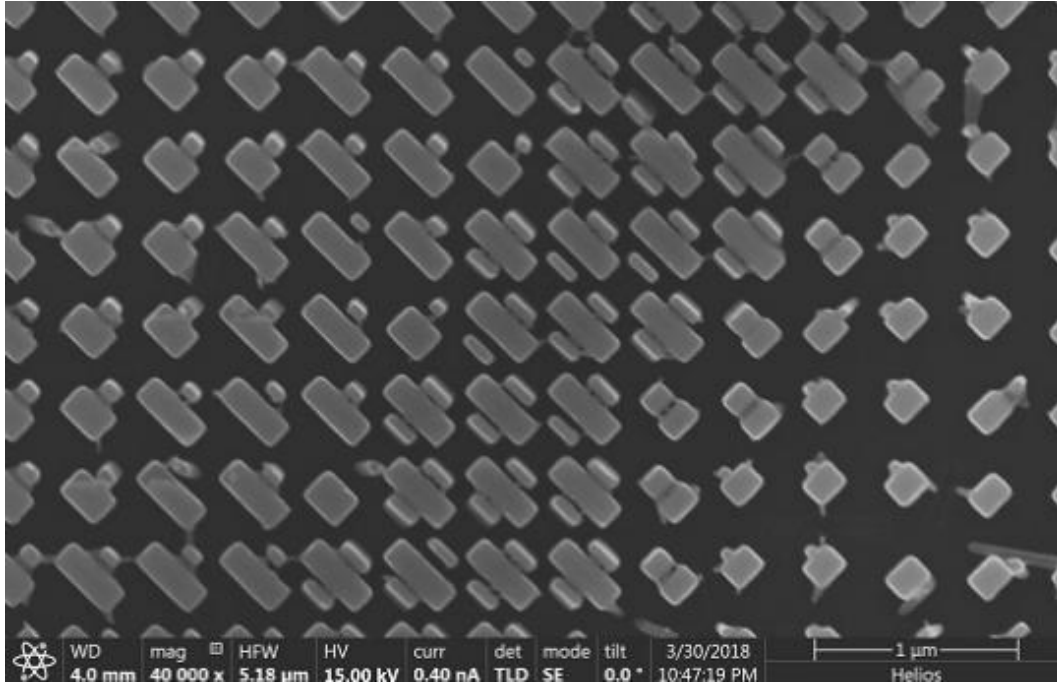
микрообъектив

<https://www.youtube.com/watch?v=lgwuU4n72wM>

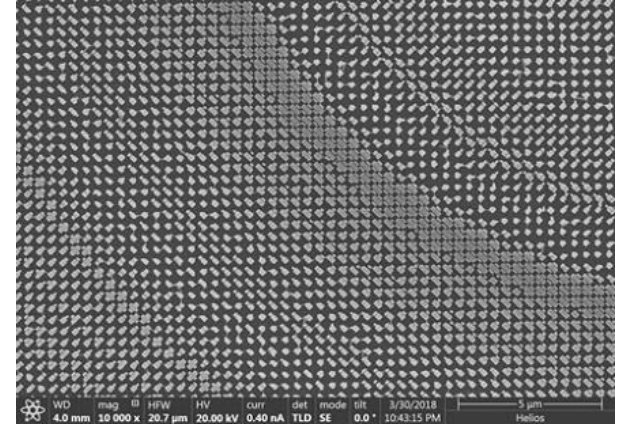
Метаповерхности: пример 4



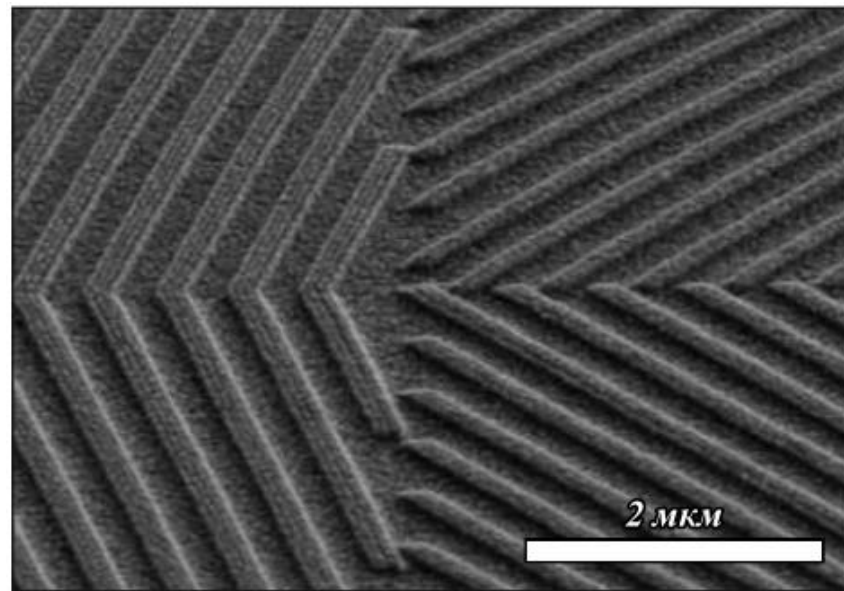
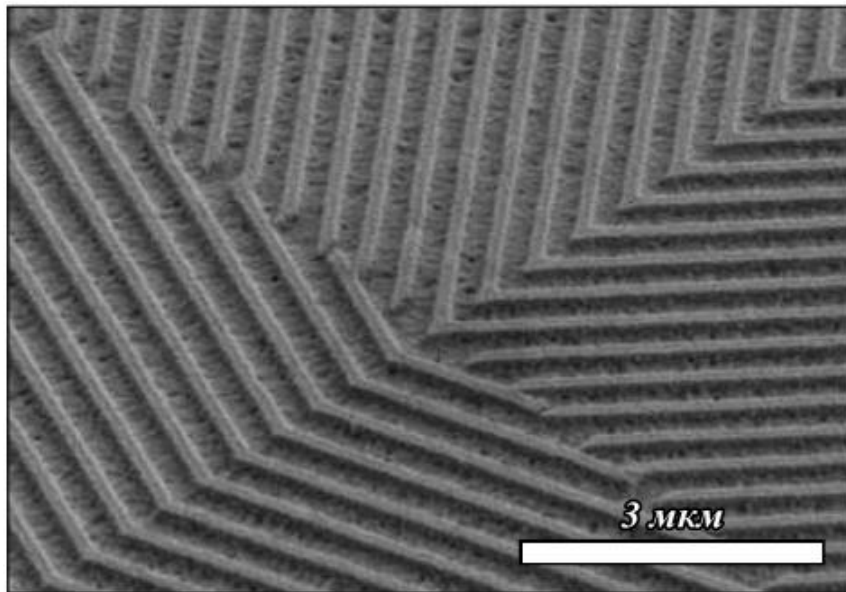
Метаповерхности: пример 5



- широкополосная ахроматическая металинза для фокусировки света независимо от поляризации

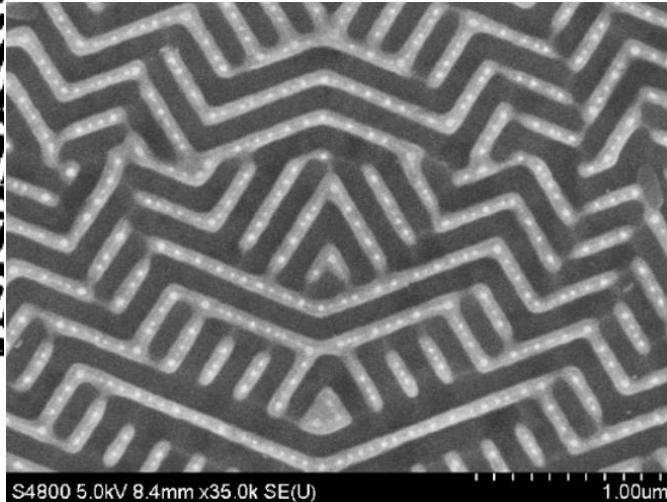
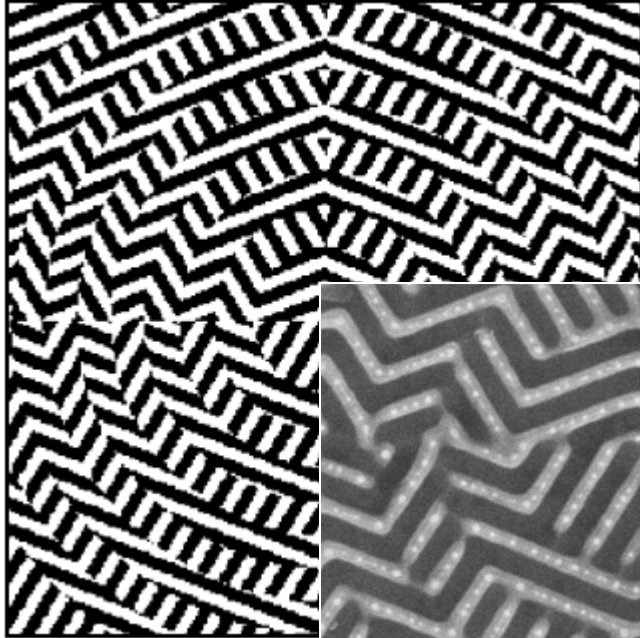


Метаповерхности: пример 6



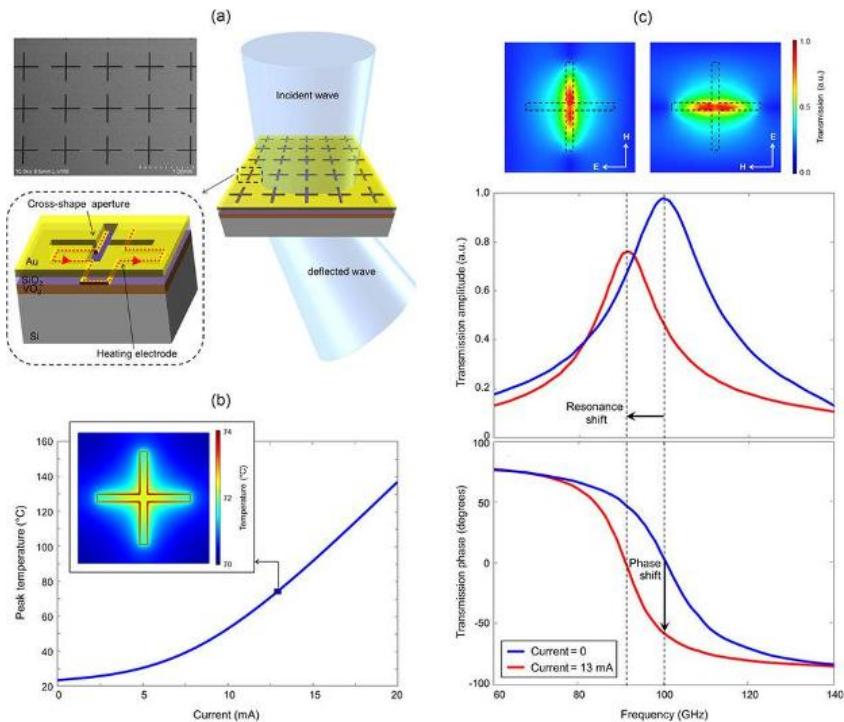
изображение поверхности отражающего радиального и азимутального поляризаторов

Метаповерхности – оптические системы



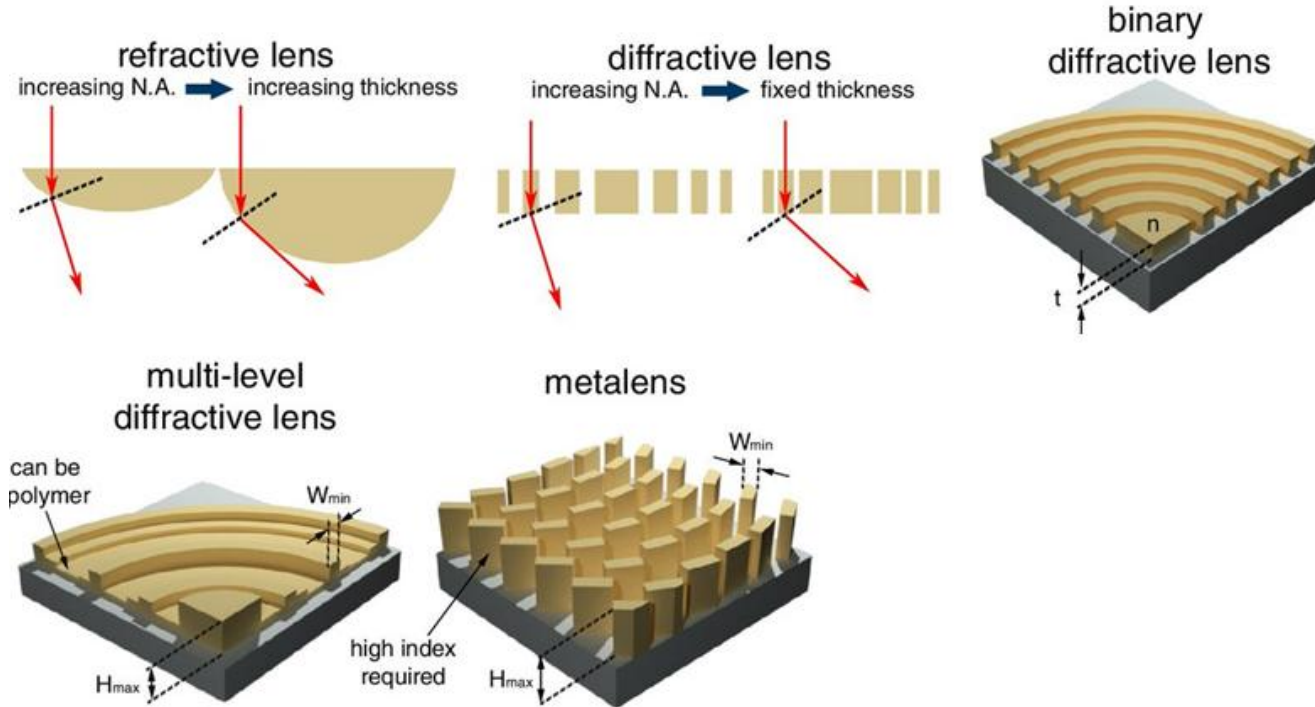
- Схема штрихов и поверхность пропускающей бинарной металлинзы 3х2 мм, одновременно преобразующей линейную поляризацию в радиальную и фокусирующей свет

Метаповерхность с управляемыми свойствами



- на подложку из кремния нанесен слой оксида ванадия, электрически изолированный от слоя золота оксидом кремния; в слое золота сделаны крестообразные апертуры; по периметру каждой апертуры расположен титана; ток на каждом нагревательном элементе контролируется с помощью микроэлектронного устройства. (b) График, показывающий зависимость температуры оксида ванадия под крестообразной апертурой от силы тока на нагревательном элементе, проложенном по периметру апертуры. (c) Пример того, как одна антенна оказывает свое действие на падающую электромагнитную волну: пик резонансной кривой пропускания оксида ванадия смещается влево, при этом фаза сдвигается, в результате чего электромагнитная волна преломляется; в зависимости от тока нагревательного элемента можно получить нужный сдвиг фазы и, соответственно, направление проходящего света.

Эволюция металинз



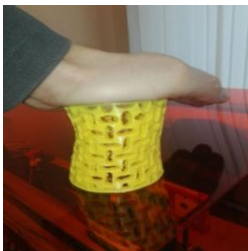
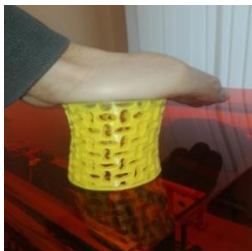
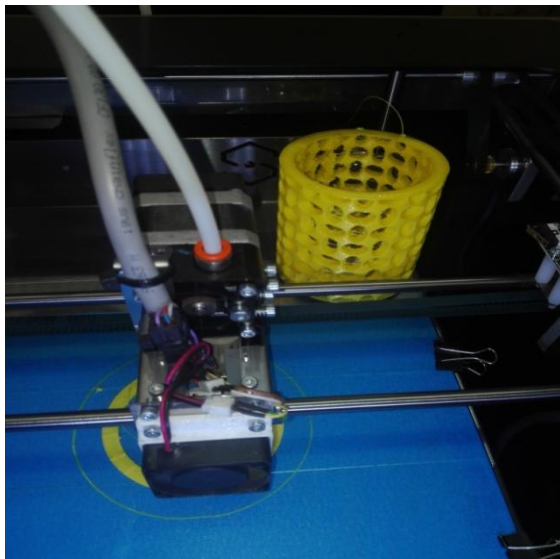
Метаповерхности для терагерцового диапазона

- четвертьволновая пластинка для частот 2,6 ТГц, 3,2 ТГц и 3,8 ТГц представляет собой решётку с периодом 60 мкм и глубиной рельефа 330 мкм, 280 мкм и 230 мкм соответственно.
- решётка с периодом 20 мкм и фактором заполнения 0,5 для частот 1,5 ТГц и 2,8 ТГц (глубина рельефа 46 и 30 мкм соответственно)

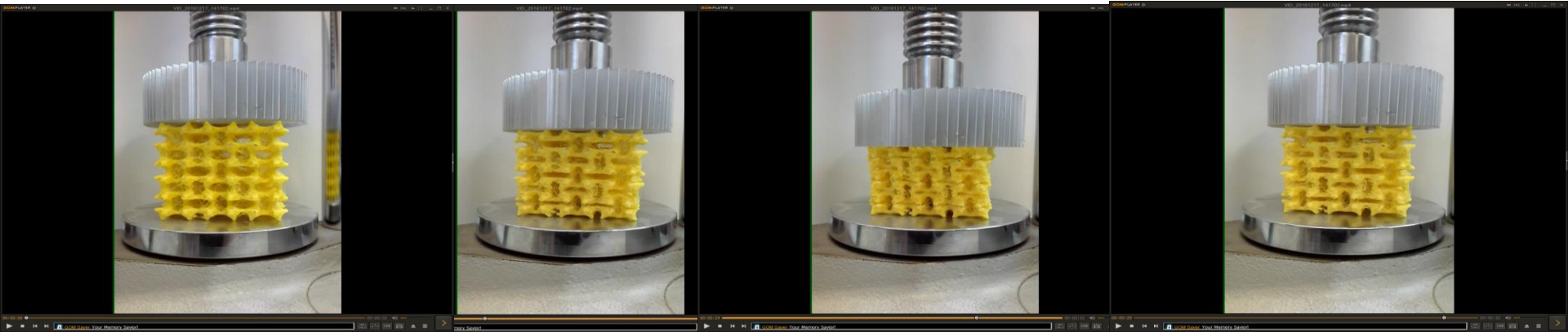
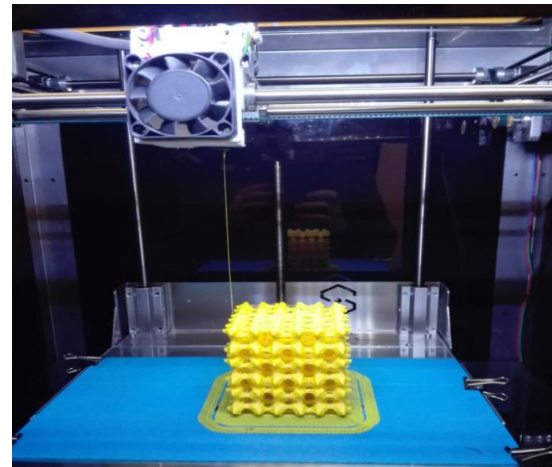
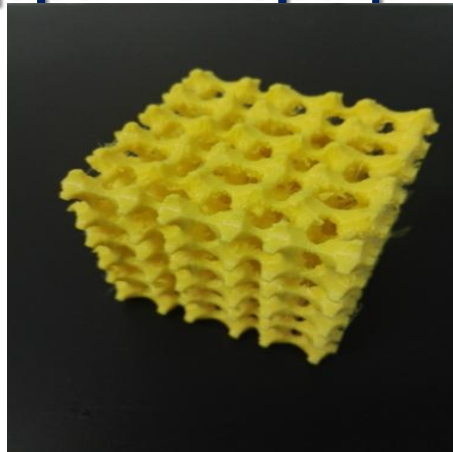
Метаматериалы: аддитивные технологии производства

Метаматериалы: ИТМО 2018

Компьютерный дизайн и 3D печать структур со свойствами ауксетика (TPU и композитные материалы с наполнителями) ИТМО, 2018 год

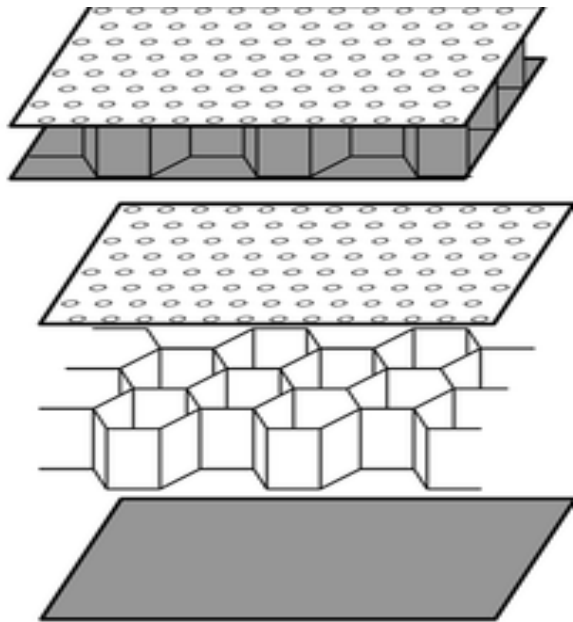


3D печать структур со свойствами ауксетиков для поглощения энергии удара и вибраций



Метаматериалы: ИТМО 2019

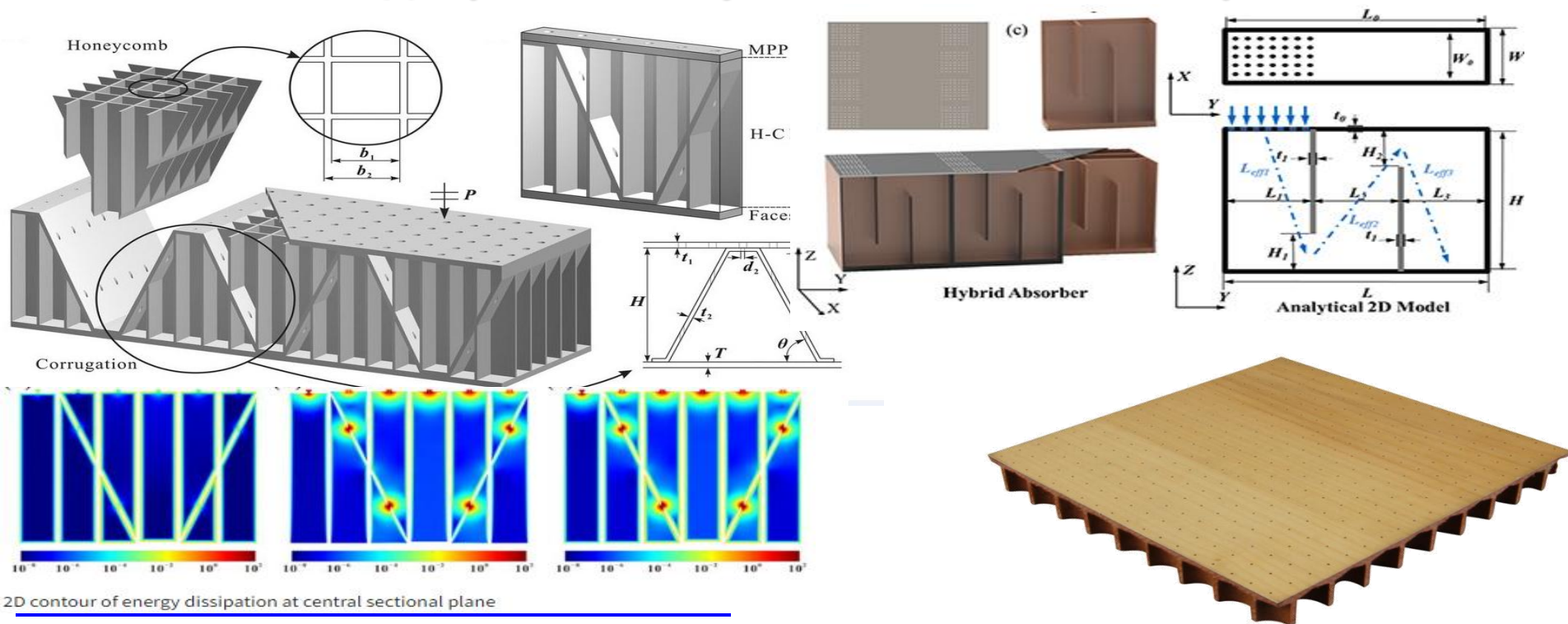
Акустические метаматериалы ...



акустические метаматериалы типа сэндвич-структур состоящие из двух оболочек, склеенных с обеих сторон сотовых ячеек позволяют создавать легкие и жесткие конструкции и имеют высокую эффективность акустического излучения или, наоборот, они чувствительны к акустическим возбуждениям.

Неравномерная микроперфорация сотовых сэндвич-материалов позволяет снизить их собственную частоту колебаний и изменять структуру волнового фронта

Новые методы расчета акустических метаматериалов



2D contour of energy dissipation at central sectional plane

<https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5090355>

<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1475090218808993?journalCode=pima>

<https://www.huiacoustics.com/product/micro-perforated-panel/>

Теория акустических метаматериалов

DE GRUYTER

Nanophotonics 2018; 7(6): 1191–1205



Review article

Bin Liang*, Jian-chun Cheng and Cheng-Wei Qiu

Wavefront manipulation by acoustic metasurfaces: from physics and applications

<https://doi.org/10.1515/nanoph-2017-0122>

Received December 6, 2017; accepted January 21, 2018

Abstract: Molding the wavefront of acoustic waves into the desired shape is of paramount significance in acoustics, which however are usually constrained by the acoustical response of naturally available materials. The emergence of acoustic metamaterials built by assembling artificial subwavelength elements provides distinct response to acoustic waves unattainable in nature. More recently, acoustic metasurfaces, a class of metamaterials with a reduced dimensionality, empower new physics and lead to extended functionalities different from their three-dimensional counterparts, enabling controlling, transmitted or reflected acoustic waves in ways that were not possible before. In this review paper, we present a comprehensive view of this rapidly growing research field by introducing the basic concepts of acoustic metasurfaces and the recent developments that have occurred over the past few years. We review the interesting properties of

1 Introduction

How to manipulate the wavefront of acoustic waves simply and efficiently is a key problem in acoustics and also the subject of many diverse areas. As representative examples, in high-intensity focused ultrasound therapy the acoustic energy must be converged into the target focal region with high precision for heating the tumor; in loudspeaker design or underwater communications various acoustic beams with special directivity need to be formed for delivering acoustic signals to far field. Due to the limitation in the acoustical properties provided by naturally available materials, however, wavefront engineering is still challenging and generally has to rely on fabricating materials of given refractive indexes into intricate shapes or using a large array of individually controlled active elements, such as the piezoelectric transducers with curved profile for producing high-intensity focused ultrasound or the large-sized array of sensors for underwater applications.

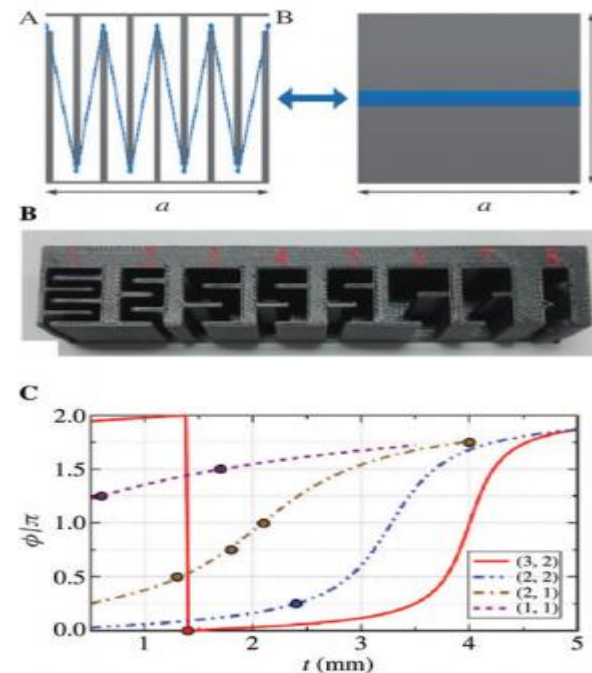
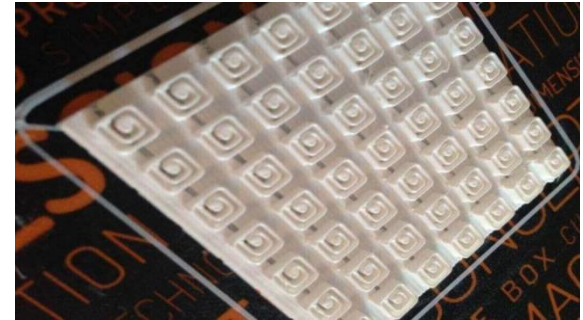
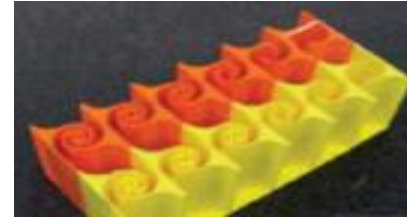
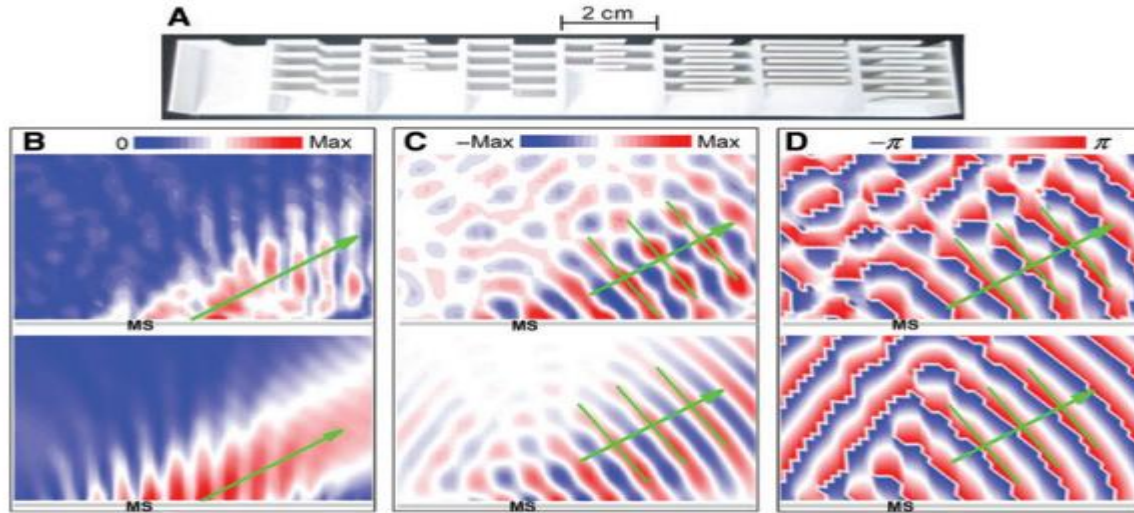


Figure 1: Reflective acoustic metasurface by coiling up space. (A) Schematic of space-coiling metamaterial units (left part) for mimicking a homogeneous effective medium with high refractive index. (B) Experimental sample of reflective-type acoustic metasurface (photo). (C) Simulated phase shift of metasurface units with different structural parameters

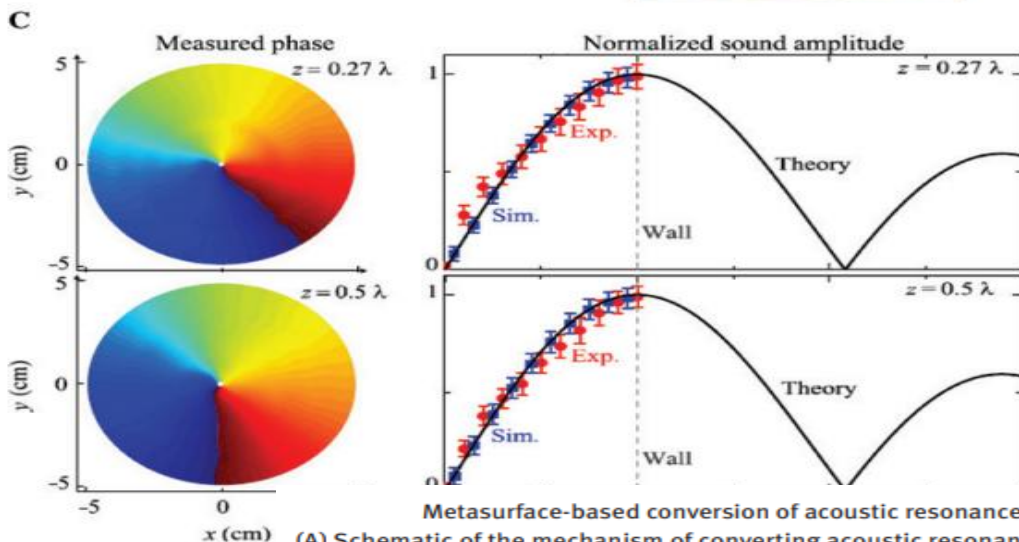
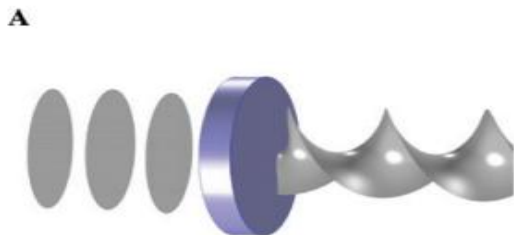
Модификация акустического фронта



Transmission-type acoustic metasurfaces by coiling up spaces.

(A) Experimental sample (photo). (B–D) Measured (upper panels) and simulated (lower panels) amplitude, temporal, and phase field distributions, respectively. The green arrows indicate the propagating wavefronts predicted by generalized Snell's law.

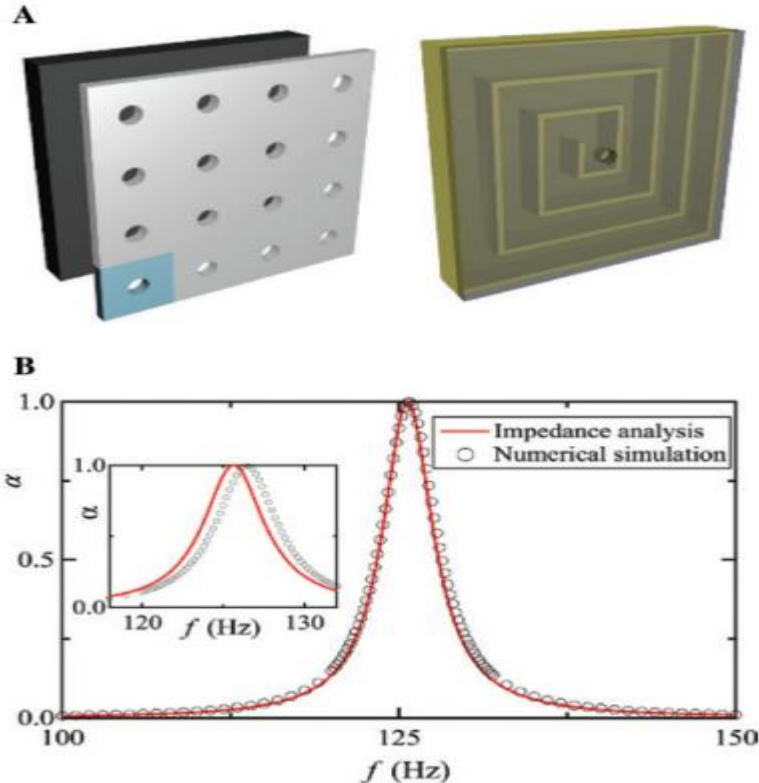
3D метаматериалы – акустические демпферы



(A) Schematic of the mechanism of converting acoustic resonance to orbital angular momentum. (B) Experimental sample (photo). (C) Simulated and measured results of the phase profile and sound amplitude on two different cross sections

“Математически” спроектированный 3D-печатный акустический метаматериал имеет такую форму, что он возвращает входящие звуки туда, откуда они пришли. [Фото: Сидни Скотт / Бостонский университет]

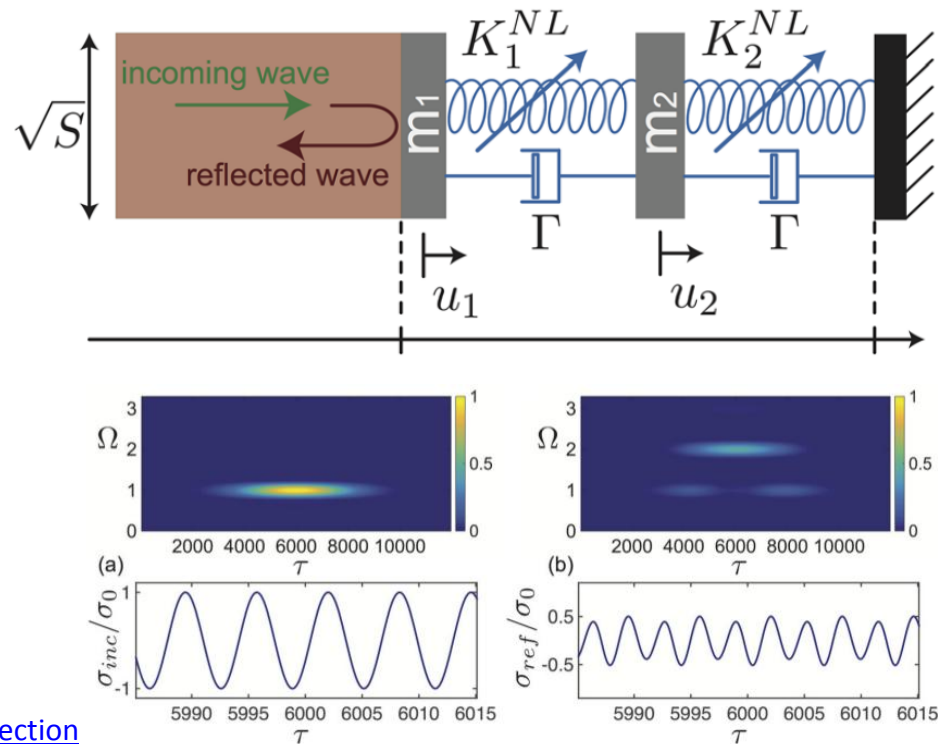
«Типовая» ячейка акустического метаматериала для поглощения звука

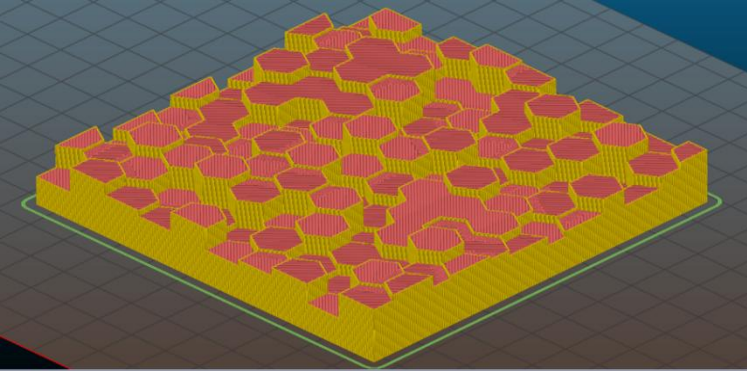


- перфорированная система с перфорированной пластиной, размещаемой перед твердым предметом.
- Метаповерхность состоит из перфорированной пластины с отверстием и спиральной воздушной камеры.

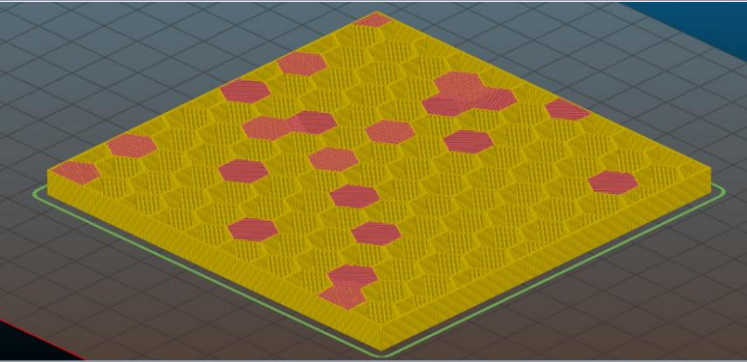
Нелинейные акустические метаповерхности

- В 2018 году физики из Франции и США под руководством Венсана Турна (Vincent Tournat) из Университета Ле-Мана теоретически описали такую акустическую метаповерхность, которая может контролируемо отражать акустические волны, изменяя при этом их частоту. По замыслу ученых, эта поверхность состоит из периодического набора нелинейных вязко-упругих элементов.





Акустический метаматериал для звукоизоляции ниже 500 Гц благодаря структурному дизайну материалов и метаматериалов.



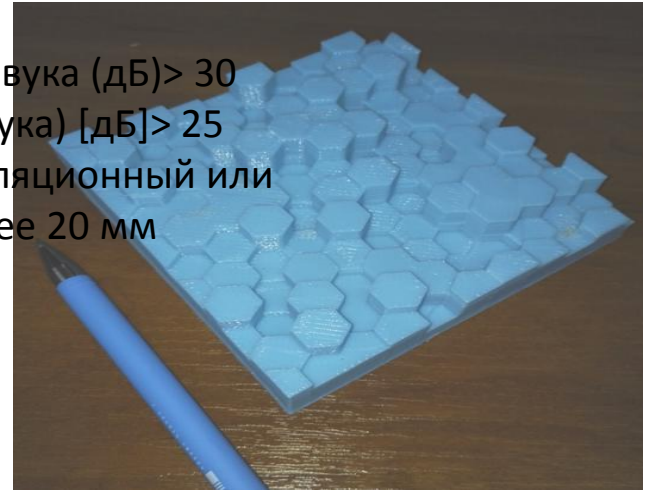
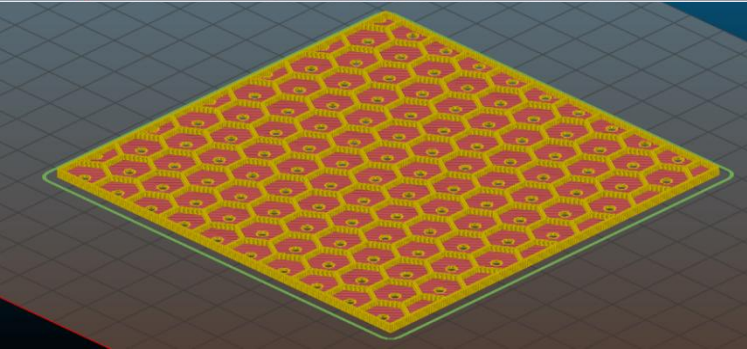
Высокоизоляционный и гибкий полимер (полимерный композитный материал).

Коэффициент звукопоглощения (от 0 до 1) $> 0,5$

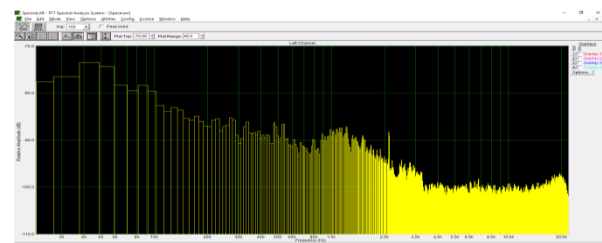
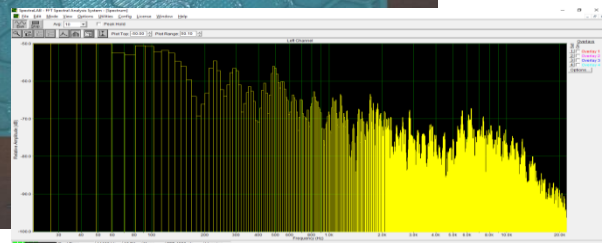
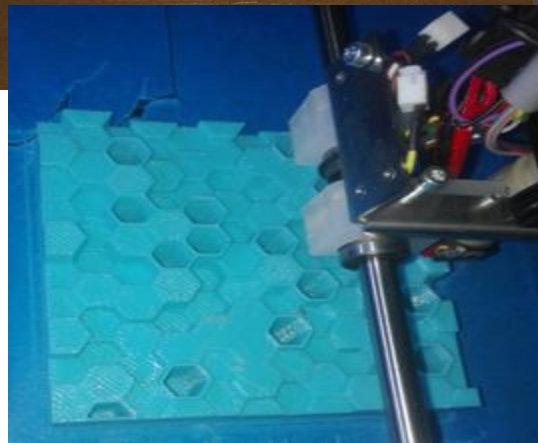
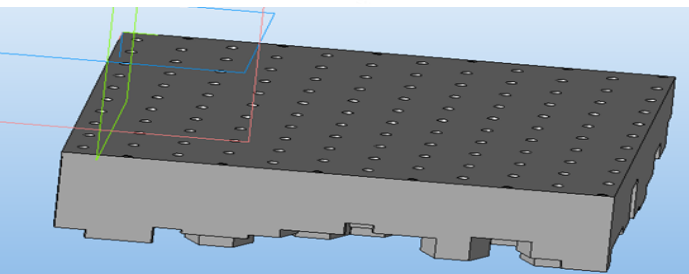
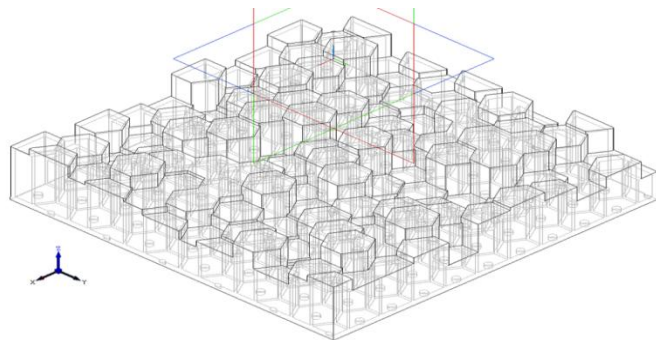
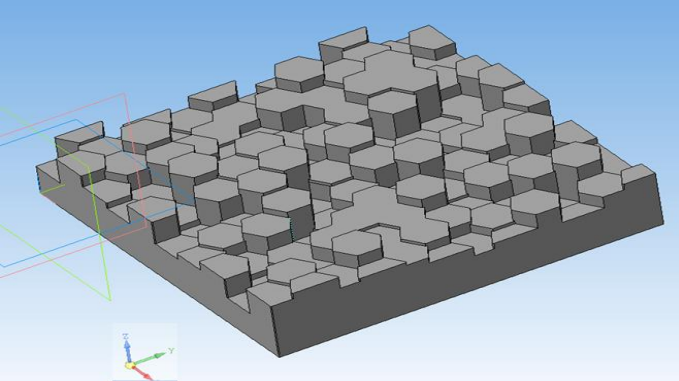
Потери при передаче звука (дБ) > 30

STC (класс передачи звука) [дБ] > 25

Толщина (включая изоляционный или клейкий материал) менее 20 мм

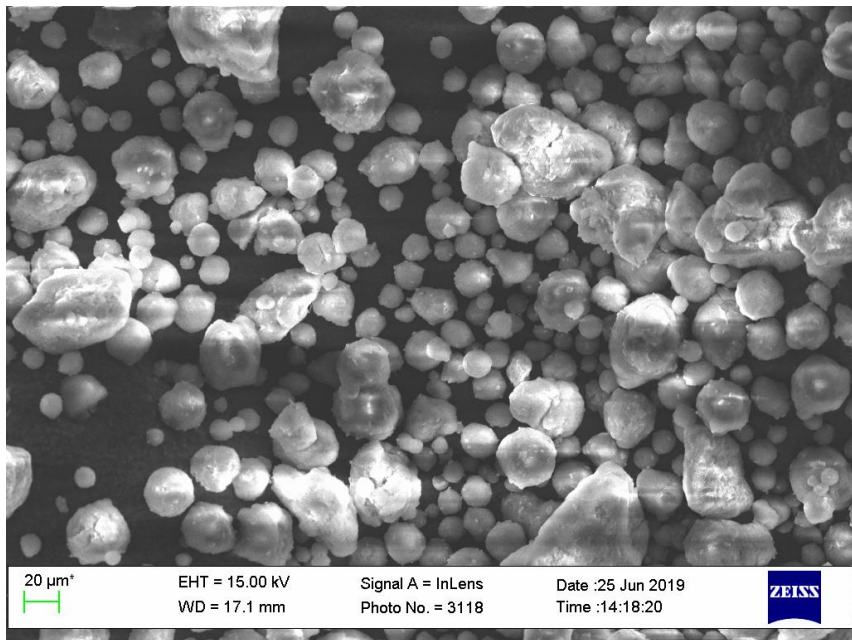


Акустические метаматериалы ИТМО



- Примеры акустических метаматериалов для поглощения звука

Градиентные матаматериалы: 3D печать с наноразмерными наполнителями



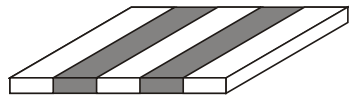
- Новые материалы с низким ожидаемым уровнем диэлектрических потерь ($\epsilon < 2.1$) были разработаны как альтернатива армированному фторопласту (PTFE) и характеризуются низкой анизотропией коэффициента диэлектрической проницаемости. Такие свойства делают их привлекательными для СВЧ устройств, где дисперсия и потери должны быть минимизированы, например при производстве печатных плат.
Наноструктурированные частицы диоксида кремния в качестве наполнителей при создании печатных плат СВЧ диапазона и соответствуют современным требованиям /4/ к материалам с низким уровнем диэлектрических потерь. Для традиционно используемого аморфного диоксида кремния значение диэлектрической проницаемости, равно четырем. Предполагается, что при использовании новых наноразмерных наполнителей можно достигнуть значений эффективной диэлектрической проницаемости ниже 2,4.

- Микрофотография частиц диоксида кремния полученных по золь-гель технологии

Метаматериалы: ИТМО 2020

Оптические метаповерхности - дифракционная оптика

Дифракционная
решетка Фраунгофера

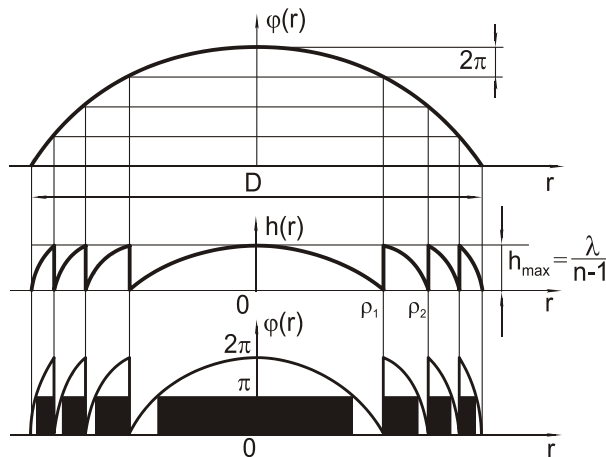


Амплитудная
маска



Фазовый
микрорельеф

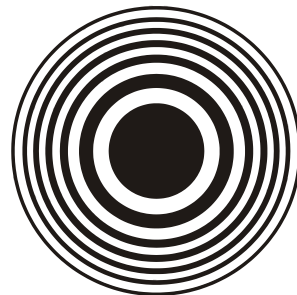
Линза
Френеля



Базовые характеристики ДОЭ:

- длина волны λ ;
- границы зон;
- профиль зон.

Зонная пластинка
Релея-Сорэ



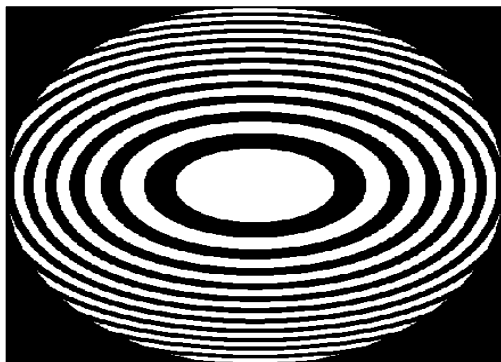
Амплитудная
маска



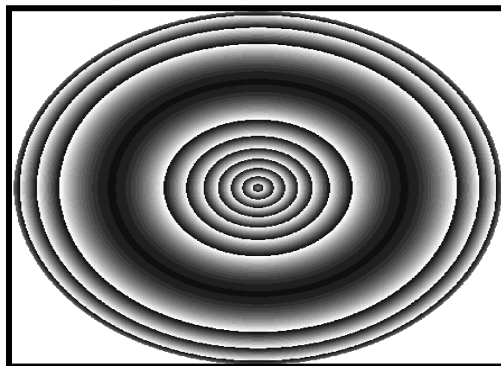
Фазовый
микрорельеф

**Основные идеи: использование явления дифракции;
сведения фазы к интервалу $[0, 2\pi)$; квантование фазы**

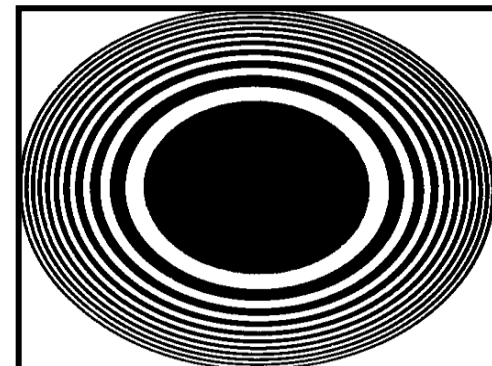
Метаповерхности: интерференционные фокусаторы



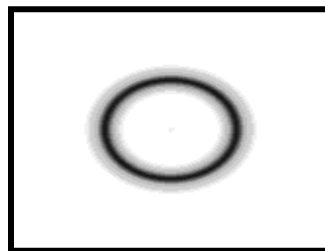
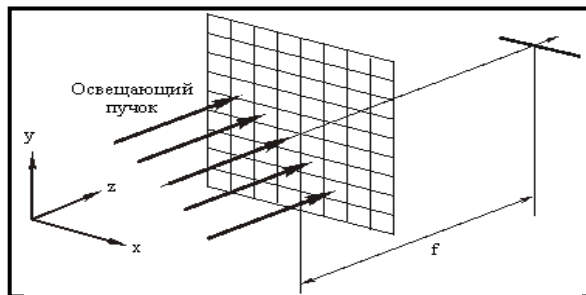
Фокусатор в поперечный отрезок $\lambda = 10.6$ мкм



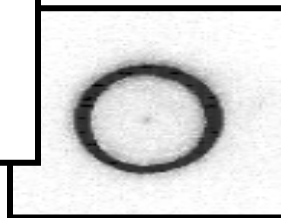
Фокусатор в кольцо $\lambda = 10.6$ мкм



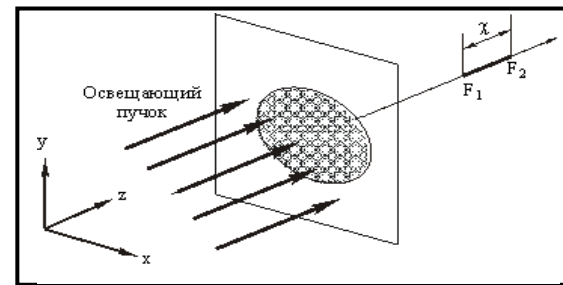
Фокусатор в соосный отрезок $\lambda = 0.63$ мкм



теория

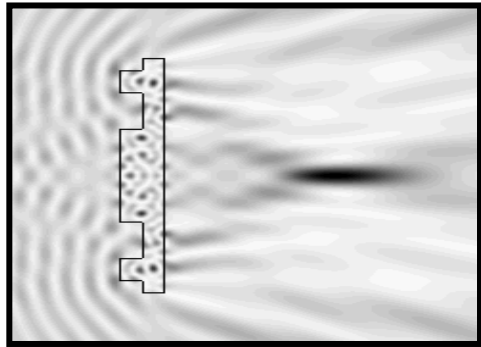
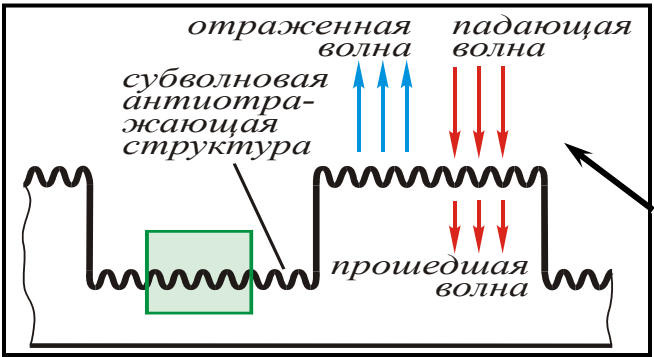
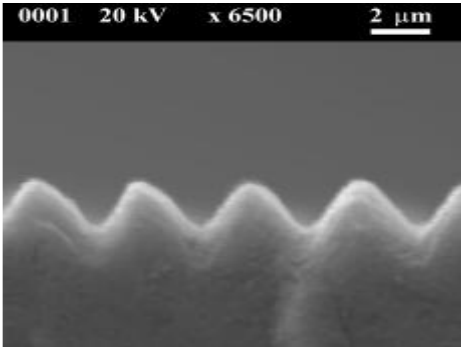


эксперимент

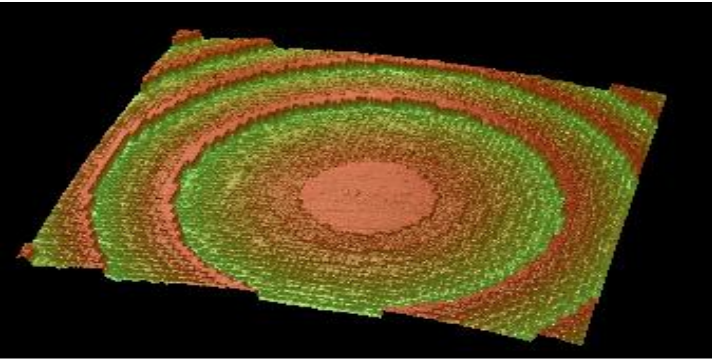
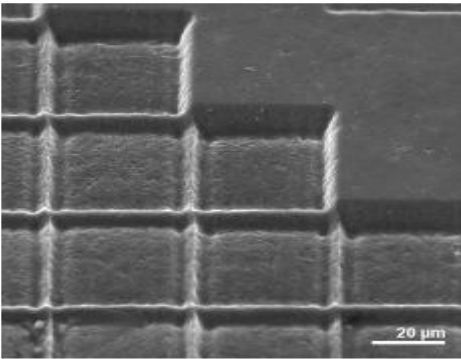


Голуб М.А., Карпеев С.В., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Сойфер В.А. «Фокусировка излучения в заданную область с помощью синтезированных на ЭВМ голограмм»,
Письма в ЖТФ, т.7, вып.10, с.618-623 (1981)

Метаповерхности: ФОКУСАТОРЫ НА АЛМАЗНЫХ ПЛЕНКАХ

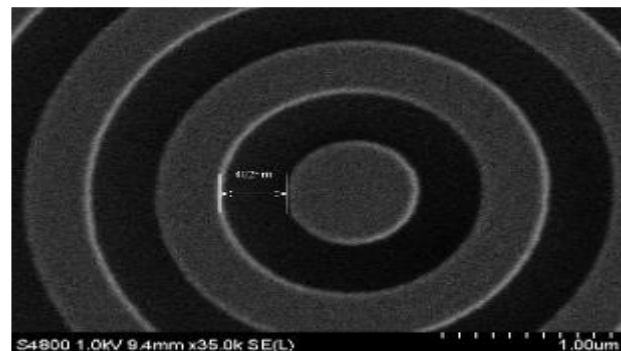
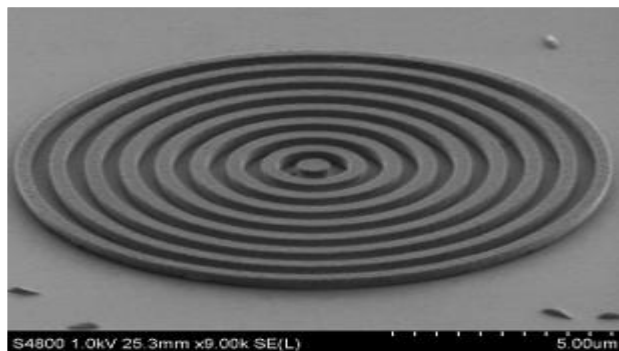
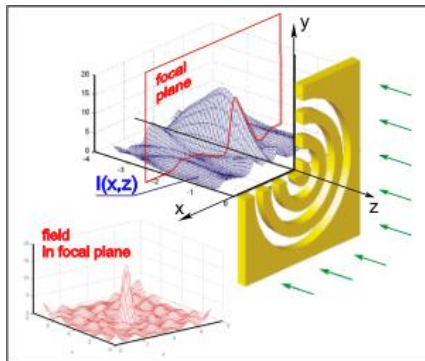


Расчет параметров субволнового микрорельефа выполнялся с помощью решения уравнений Максвелла

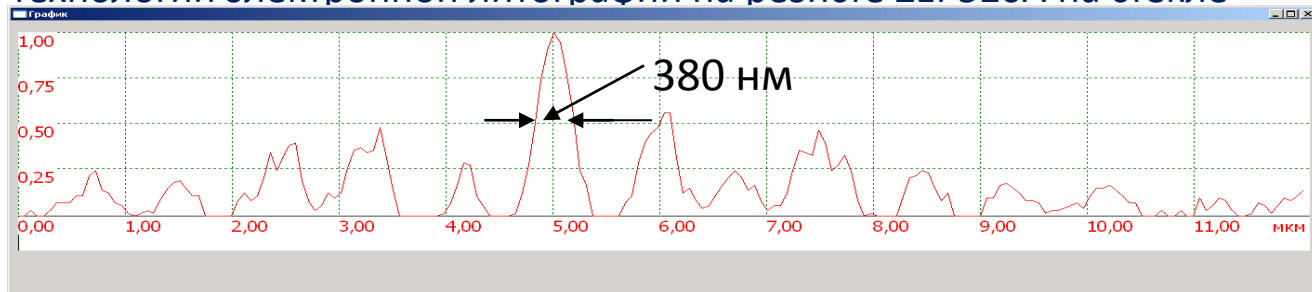
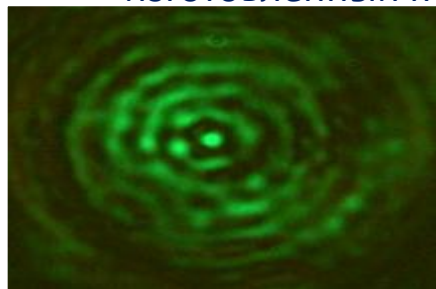


: 2.1 кВт
Фокальная область:
точка, отрезок, кольцо
Энергетическая
эффективность: 90%
Конов В.И., Прохоров А.М.,
Павельев В.С., Сойфер В.А.
Квант. электр., 29(1)9-10(1999)

Метаповерхности: микроаксикон



Бинарный микроаксикон с периодом 800 нм и высотой рельефа 465 нм, изготовленный по технологии электронной литографии на резисте ZEP520A на стекле

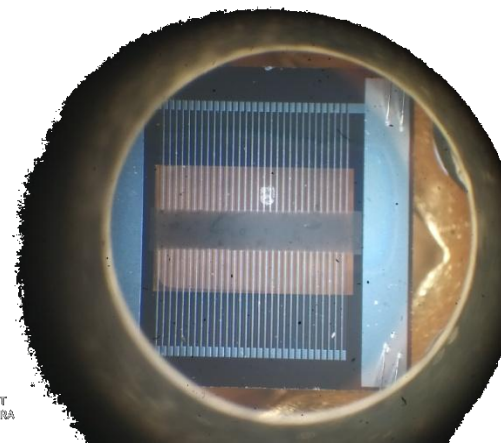
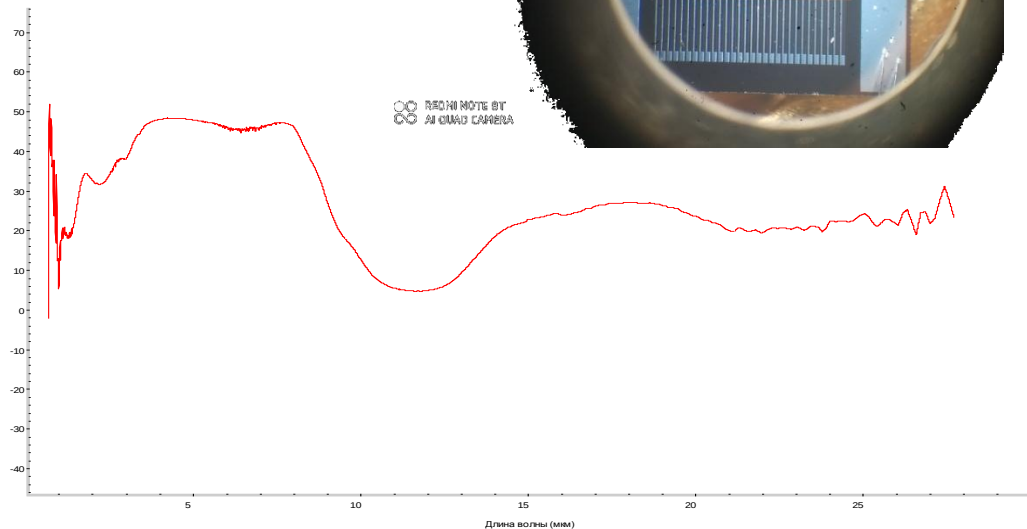
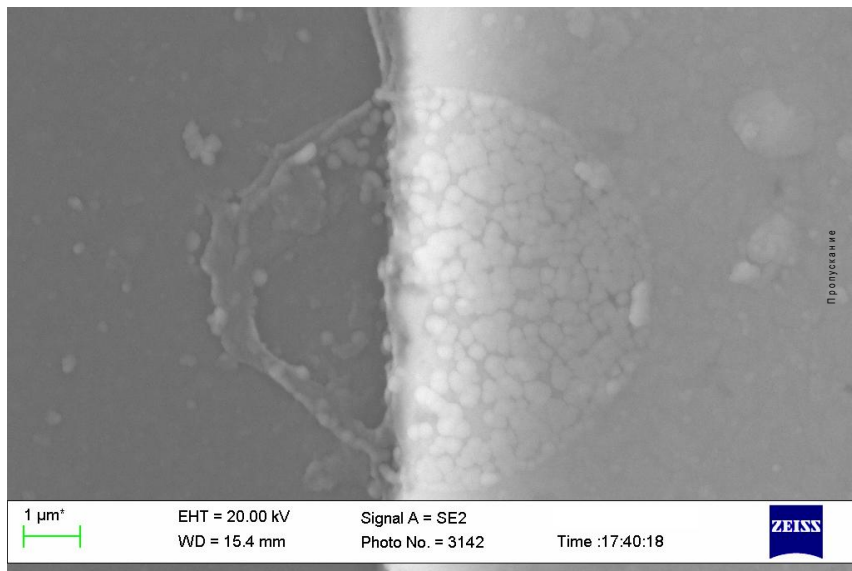


Картина дифракции в ближнем поле (на расстоянии 3 мкм аксикона) для линейно поляризованного лазерного света с длиной волны 532 нм. Диаметр центрально пятна по полуспаду интенсивности равен 380 нм, что составляет 0,7 от длины волны.

Метаповерхности: металлы & диэлектрики

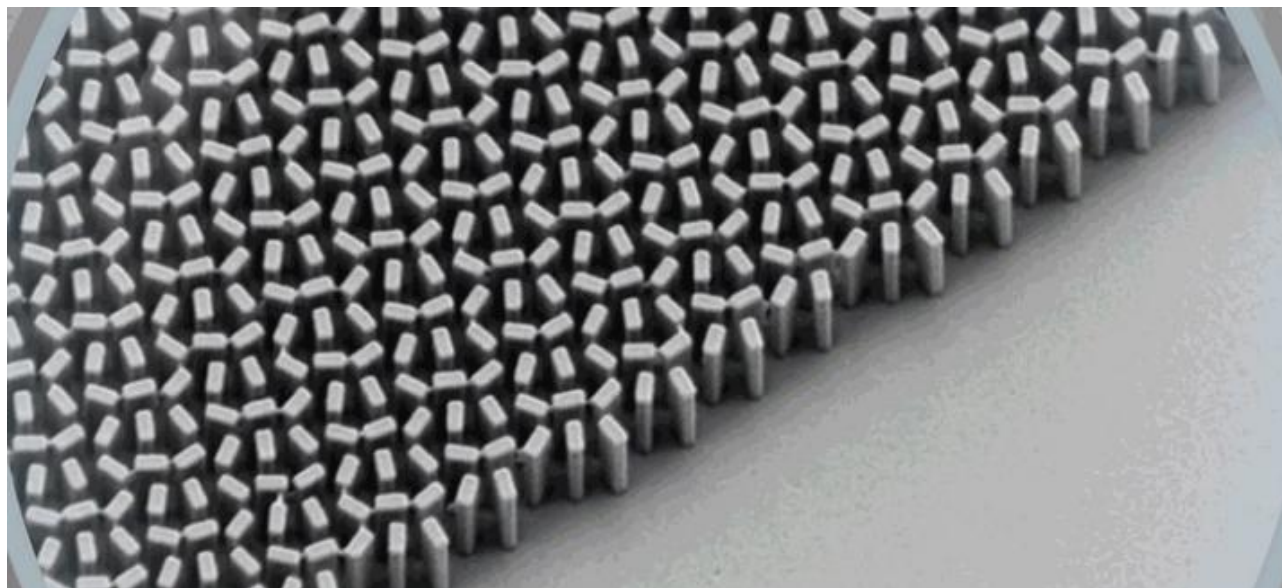
- метаповерхности – тонкие пленки из наночастиц, определенным образом размещенных на подложке.
- плазмонные метаповерхности на основе металлов работают за счет возбуждения плазмонов, то есть колебаний плотности электронного газа вдоль поверхности металла. В таких метаповерхностях удалось воспроизвести функции обычной, линейной оптики, то есть управлять направлением, амплитудой и поляризацией световой волны, не меняя ее частоту.
- **из-за больших потерь энергии на нагрев не смогли достичь эффективности классических оптических приборов.**
- Диэлектрики, такие как кремний, достаточно слабо поглощают в самых распространенных диапазонах частот и почти не нагреваются. На уровне наномасштабов диэлектрики начали использоваться примерно пять лет назад. Оказалось, что в линейном режиме они превосходят металлы. А большой показатель преломления позволяет диэлектрикам «сжимать» волну внутри частицы, делая ее соизмеримой самой структуре.

Датчик теплового потока с поглощающим покрытием

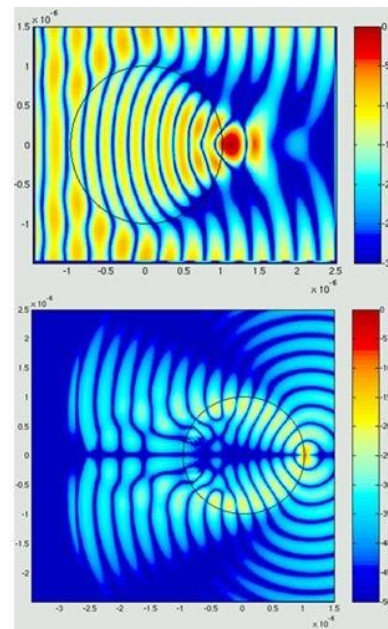
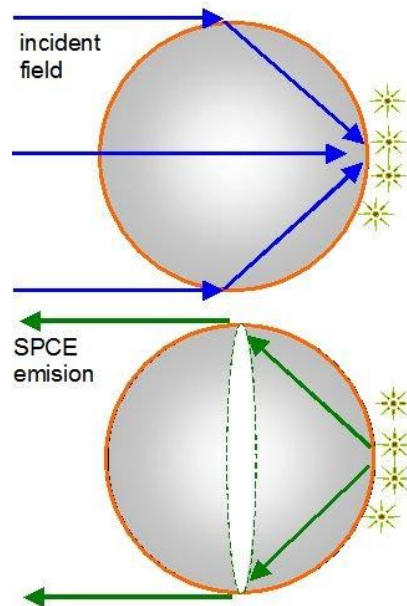
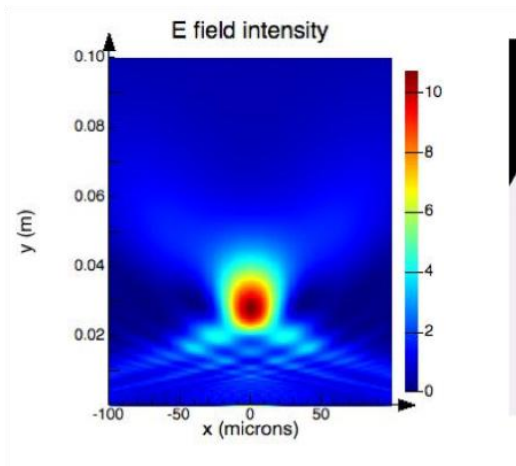


Характерный вид топологии наноструктурированного диэлектрического покрытия и спектр пропускания абсорбера датчика теплового потока с поглощающим покрытием (интегральный коэффициент пропускания T в диапазоне 0,1-14,0 мкм равен 0,26)

Диэлектрическая металинза TiO_2 на Si

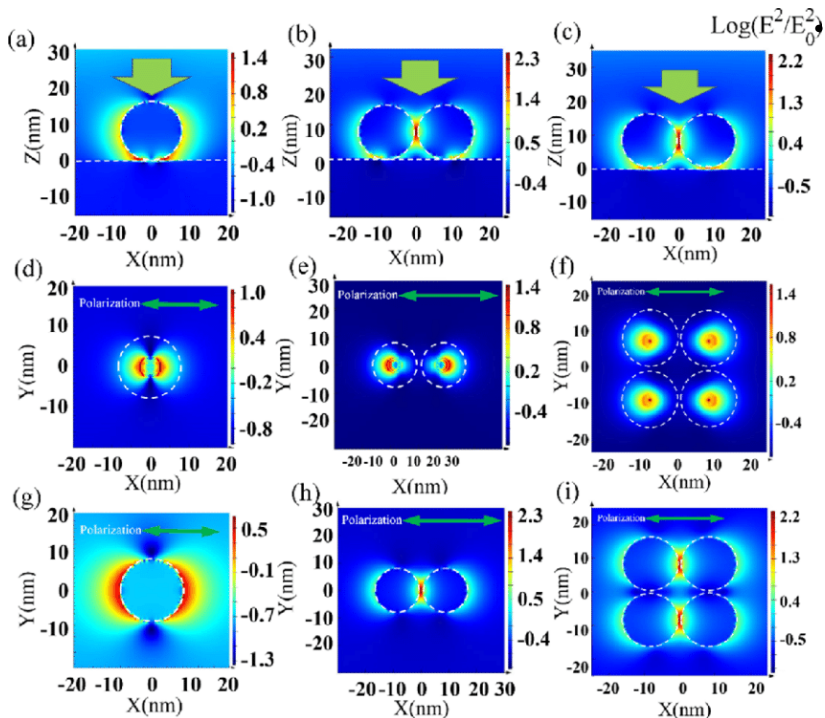


Моделирование металинз с использованием ПО Lumerical методом FDTD



https://apps.lumerical.com/metamaterials_metalens-design-example.html

Моделирование металинз с использованием ПО Lumerical методом FDTD



Метаматериалы могут быть использованы для манипулирования видимым светом способами, которые невозможны для традиционной преломляющей оптики, которая требует громоздких макроскопических структур. Линзы на основе метаматериалов, известных как металинзы, состоят из тщательного расположения «элементарных ячеек» или «метаатомов» с субволновыми структурами. Эти структуры могут быть структурированы на границе раздела, образуя метаповерхность, которая еще больше уменьшает размеры линзы по сравнению с их традиционными аналогами. Для простоты мы рассмотрим 2D моделирование, где предполагается, что структура простирается до бесконечности в направлении z . Это разумная отправная точка, даже если ожидается, что фактические мета-линзы будут цилиндрически симметричными, учитывая, что 2D-моделирование выполняется быстро, и поэтому оптимизация конструкции может быть выполнена очень быстро. В конечном счете, полное трехмерное моделирование также может быть выполнено в FDTD для уменьшенного числа выбранных конструкций, ранее смоделированных в 2D.

Моделирование электромагнитных полей методом Йи

- Для моделирования оптических эванесцентных пучков использован метод FDTD (Finite-difference time-domain), который относится к общему классу сеточных методов решения дифференциальных уравнений. Базовый алгоритм метода был впервые предложен Кейном Йи (Калифорнийский университет) в 1966 г. в статье «Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media» журнала «IEEE Transactions on Antennas and Propagation».
- В первоначальном узком смысле под FDTD подразумевалось использование базового алгоритма Йи для численного решения уравнений Максвелла. В современном более широком смысле FDTD включает в себя множество самых разнообразных возможностей: моделирование сред с дисперсными и нелинейными свойствами, применение различных типов сеток (помимо первично предложенной прямоугольной сетки Йи), использование методов постпроцессорной обработки результатов и т. д.

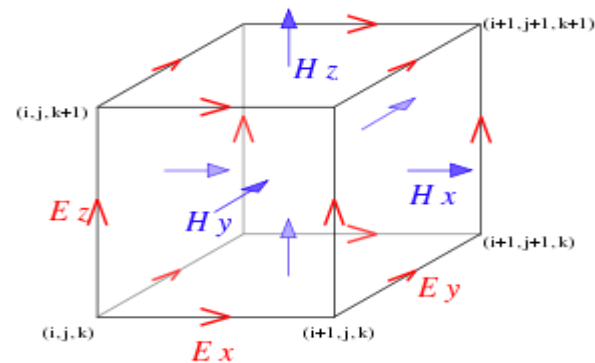
БОМ: алгоритм Йи (FDTD)

В уравнениях Максвелла изменение электрического поля E (частная производная) зависит от распределения в пространстве магнитного поля H (ротор). Аналогично, изменение поля H зависит от распределения в пространстве поля E .

При моделировании, пространство разделяется на ячейки сетки FDTD, в которых сетки для полей E и H смещены по отношению друг к другу на половину шага дискретизации времени и по каждой из пространственных переменных.

Конечно-разностные уравнения позволяют определить поля E и H на

данном временном шаге на основании известных значений полей на предыдущем. При заданных начальных условиях алгоритм Йи дает эволюционное решение во времени от начала отсчета с заданным временным шагом.



алгоритм Йи (FDTD): ограничения

- Как и в любом другом разностном методе, в FDTD существует проблема неточного отображения границы тела на вычислительную сетку. Любая кривая поверхность, разделяющая соседние среды и геометрически не согласованная с сеткой, будет искажаться эффектом «лестничного приближения». Для решения данной проблемы можно использовать дополнительную сетку с большим разрешением в тех областях пространства, где расположены тела со сложной геометрической структурой. Также можно видоизменять разностные уравнения в узлах сетки, находящихся вблизи границы между соседними телами. Менее затратным методом является введение эффективной диэлектрической проницаемости вблизи границы между телами (subpixel smoothing).

алгоритм Йи (FDTD): ограничения

- FDTD — относительно простой метод.
- Поскольку FDTD работает во временной области, он позволяет получить результат для широкого спектра длин волн за один расчет. Это может быть полезно при решении задач, в которых не известны резонансные частоты или в случае моделирования широкополосных сигналов.
- FDTD удобен при задании анизотропных, дисперсных и нелинейных сред.
- Метод позволяет непосредственно моделировать краевые эффекты и эффекты экранирования, причем поля внутри и вне экрана могут быть рассчитаны как напрямую, так и нет.

Величина шага дискретизации по пространству должна быть значительно меньше исследуемых длин волн и типичных размером исследуемой структуры. В некоторых случаях (инверсные опалы с маленькими перегородками между шариками) это может потребовать сеток с маленьким шагом, что означает большие затраты памяти и большое время расчета.

FDTD рассчитывает поля внутри счетной области. Если требуется найти поле на большом расстоянии от источника, то необходимо увеличение счетной области и времени расчета. Существуют модификации метода для нахождения поля на удалении, но они требуют постобработки.

расчет полей методом FDTD: валидация Lumerical

Расчет электромагнитных полей методом FDTD

Файл Проект Просмотр Справка Регистрация_программы

Геометрия | Гранич. услов. | Источник | Границы TF-SF | ДН | Отчет

Размеры счетного объема

Число ячеек:
X: 50 Y: 50 Z: 50

Размер ячеек, (м):
X: 0.01 Y: 0.01 Z: 0.01

Объем: (0.49 x 0.49 x 0.49) м
Максимальная частота, МГц: 1500.00

☐ Применять магнитные материалы
☐ Применять полярные диэлектрики

Вычислить
☐ SAR С задержкой, шагов: 0

Описание счетного проекта:

Кол-во шагов: 500
Конечное время: 9.6292 нс

Время
Шаг по времени: 0.010000000000000001
По условию уст

Информация
Количество ячеек: 125000
Счетный регион: 0.49 x 0.49 x 0.49 м
Границы: 0.117
Объект: 0.26
Дальнее поле: 0.26
Приближенно
Объем ОЗУ: 20
Занято: 61%

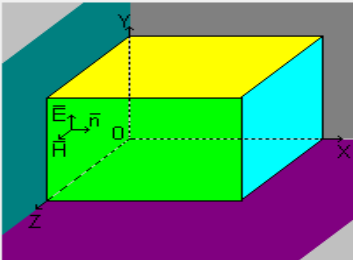
Пуск

Расчет электромагнитных полей методом FDTD

Файл Проект Просмотр Справка Регистрация_программы

Геометрия | Гранич. услов. | Источник | Границы TF-SF | ДН | Отчет

Нижняя (Y=1)
Mur's ABC (1st order)
Верхняя (Y=max)
Mur's ABC (1st order)
Ближняя (Z=max)
Mur's ABC (1st order)
Дальняя (Z=1)
Mur's ABC (1st order)
Правая (X=max)
Mur's ABC (1st order)
Левая (X=1)
Mur's ABC (1st order)



Внешнее поле движется слева вдоль оси X, вектор H направлен вдоль оси Z. Вектор E может менять наклон в плоскости YOX.

Пуск
Стоп
Объект
Графики
Визуализация
Закреть

Кол-во шагов: 500
Конечное время: 9.6292 нс

расчет полей методом FDTD: валидация Lumerical

Расчет электромагнитных полей методом FDTD

Файл Проект Просмотр Справка Регистрация_программы

Геометрия | Гранич. услов. | **Источник** | Границы TF-SF | ДН | Отчет

Источник сигнала

- ☒ Внешнее поле по всему объему (вдоль оси X)
- ☐ TF-SF (деление поля на полное-рассеянное)
- ☐ Только внутренние источники напряжения

Внешнее поле по всему объему

Угол падающего поля к оси X:

Шаг: 1653, время: 28.633

Вертикальный X-срез

Горизонтальный Y-срез

Вертикальный Z-срез

Вид слева X=18

Вид сверху Y=18

Вид спереди Z=18

Величина для визуализации

- ☐ Ex ☐ Hx ☐ Ix ☐ |E| ☐ dT
- ☐ Ey ☐ Hy ☐ Iy ☐ |H|
- ☒ Ez ☐ Hz ☐ Iz ☐ SAR

Диапазон: x 10

☐ Логарифмический масштаб

☒ Растянуть изображение

☒ Включить вывод Частота:

Запись картинок на диск

☐ Писать на диск: ☒ X-срез ☒ Y-срез ☒ Z-срез

Пуск

Стоп

Расчет электромагнитных полей методом FDTD

Файл Проект Просмотр Справка Регистрация_программы

Источник | **Границы TF-SF** | ДН | Отчет

Границы области TF-SF будут расположены на две ячейки глубже установленных здесь границ, если выбран расчет дальнего поля или диаграммы направленности. Кнопка Авто устанавливает вокруг объекта минимальные границы.

Авто

Пуск

Стоп

Объект

Графики

Визуализация

Закрыть

Нелинейные оптические метаматериалы ...



- **Нелинейные метаматериалы** могут использоваться для отражения, передачи, фокусировки, поглощения и генерации света - все важные функции в общем управлении светом. Чтобы получить еще больший контроль, внутреннюю нелинейность материалов можно использовать для создания гораздо большей функциональности, включая сдвиги длин волн, удвоители частоты, переключатели, модуляторы и многие другие устройства, важные для множества технологий. И, как показали линейные метаматериалы, нелинейные метаматериалы предлагают еще больше сюрпризов и возможностей, поскольку теперь как линейные, так и нелинейные ответы могут быть разработаны по желанию. Возможности почти безграничны!

Нелинейные оптические метаматериалы ...

- В 2018 году в США экспериментально реализованы два типа метаповерхностей: дефлектор и вортекс. Дефлектор отклоняет падающую волну на заданный угол, а вортекс закручивает свет из линейной поляризации в круговую. При этом оба типа устройств переводят длину волны света из инфракрасного в видимый диапазон.

Потенциальные партнеры

- Международная лаборатория нанофотоники и метаматериалов Университета ИТМО
- НИИРМ , Таратын (литография, СВЧ оптика)
- Институт ПФП БГУ, Шаронов (фокусаторы, алмазоподобные пленки и графен на меди)
- Институт физики (террагерцовая оптика)
- Самарский государственный аэрокосмический университет

Литература

- W.E. Kock. Metal-lens antennas. – Proceedings of Inst. Radio. Engrs. and Waves and Electrons, Vol. 34, November, 1946, p. 828–836.
- Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ . – Успехи физических наук, 1967, т.92, №7, с. 517– 526
- Metamaterials: Physics and Engineering Explorations/Edited by N. Engheta and R. W. Ziolkowski. – Wiley-IEEE Press, 2006.
- Rodger Walser. Metamaterials: What are they and what are they good for? – 2000 March. Meeting of the American Physical Society, March 20–24, 2000.
- *Слюсар В.* Метаматериалы в антенной технике: история и основные принципы // Электроника: наука, технология, бизнес. — 2009. — № 7. — С. 70—79.
- Hou-Tong Chen et al. Active terahertz metamaterial devices. – Nature, Vol. 444, 30 November 2006, p. 597–600

- **Спасибо за внимание ...**

Справочно...



Виктор Георгиевич Веселаго. Родился 13 июня 1929 на Украине, доктор физико-математических наук, профессор Московского физико-технического института, заслуженный деятель науки Российской Федерации, лауреат Государственной премии СССР.

Его работа содержала теоретическое описание свойств среды с одновременно отрицательными ϵ и μ , а также исследование решения уравнений Максвелла для этого случая. При интерпретации уравнений Максвелла В.Г.Веселаго впервые использовал ϵ , $\mu < 0$. Для такой среды, Веселаго указал на бесспорный факт, что ее существование не исключается уравнениями Максвелла, и теоретически проанализировал процесс распространения электромагнитных волн в подобных средах.



1967 г. Июль

Том 92, вып. 3

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

538.30

**ЭЛЕКТРОДИНАМИКА ВЕЩЕСТВ С ОДНОВРЕМЕННО
ОТРИЦАТЕЛЬНЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ ϵ И μ**

В. Г. Веселаго

II. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН В ВЕЩЕСТВЕ С $\epsilon < 0$ И $\mu < 0$. «ПРАВЫЕ» И «ЛЕВЫЕ» ВЕЩЕСТВА

Для того чтобы выявить электродинамические закономерности, существенно связанные со знаком ϵ и μ , следует обратиться к тем соотношениям, в которых ϵ и μ выступают раздельно, а не в виде произведения, как это имеет место в (1) — (3). Такими соотношениями являются прежде

всего уравнения Максвелла и материальные уравнения

$$\left. \begin{aligned} \text{rot } \mathbf{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \\ \text{rot } \mathbf{H} &= \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H}, \\ \mathbf{D} &= \epsilon \mathbf{E}. \end{aligned} \right\} \quad (4')$$

Для плоской монохроматической волны, у которой все величины пропорциональны $e^{i(kx - \omega t)}$, выражения (4) и (4') сводятся к

$$\left. \begin{aligned} [k\mathbf{E}] &= \frac{\omega}{c} \mu \mathbf{H}, \\ [k\mathbf{H}] &= -\frac{\omega}{c} \epsilon \mathbf{E}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

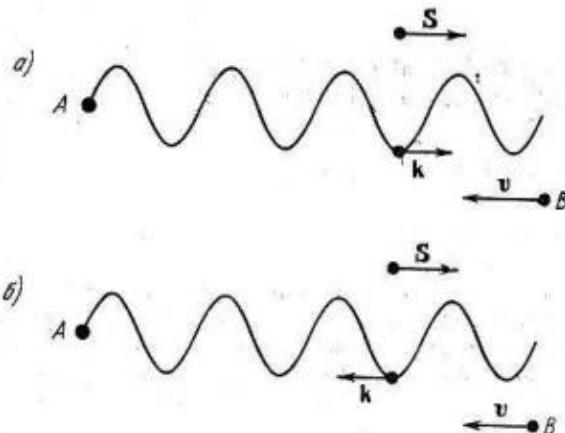


Рис. 1. а) Доплер-эффект в правом веществе.
б) Доплер-эффект в левом веществе.

Буквой А обозначен источник излучения, буквой В —

Полезные ссылки

- Ремнев М А, Климов В В "Метаповерхности: новый взгляд на уравнения Максвелла и новые методы управления светом" УФН **188** 169–205 (2018)
<https://ufn.ru/ru/articles/2018/2/c/references.html#ref>