

Метаматериалы

ПОДГОТОВИЛ: СТУДЕНТ 4
КУРСА

ГРУППЫ Ф-2

БУХАРБАЕВ ДАНИЛ

1. Введение

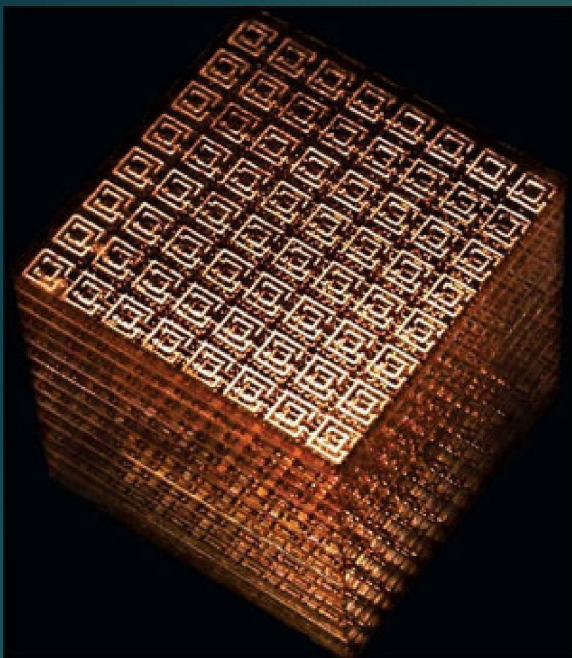


Виктор Веселаго
(13.06.1929-15.09.2018) –
советский и российский
физик, профессор,
доктор ф.-м. наук, один
из пионеров оптики
метаматериалов

- ▶ Почти 40 лет назад советский ученый Виктор Веселаго выдвинул гипотезу о существовании материалов с отрицательным показателем преломления. Световые волны в них должны двигаться против направления распространения луча и вообще вести себя удивительным образом, линзы же из этих материалов — обладать волшебными свойствами и непревзойденными характеристиками. Однако у всех известных веществ показатель преломления положителен: за нескольких лет интенсивных поисков Веселаго не нашел ни одного материала с подходящими электромагнитными свойствами, и его гипотеза была забыта. О ней вспомнили лишь в начале XXI века. Благодаря последним достижениям в области материаловедения идея Веселаго была возрождена.

- ▶ Благодаря последним достижениям в области материаловедения идея Веселаго была возрождена. Электромагнитные свойства веществ определяются особенностями образующих их атомов и молекул, обладающих довольно узким диапазоном характеристик. Поэтому свойства миллионов известных нам материалов не так уж разнообразны. Однако в середине 1990-х гг. ученые из Центра технологии материалов им. Маркони в Англии занялись созданием метаматериалов, которые состоят из макроскопических элементов и рассеивают электромагнитные волны совсем не так, как любые известные вещества.
- ▶ В 2000 г. Дэвид Смит вместе с коллегами из Калифорнийского университета в Сан-Диего изготовил метаматериал с отрицательным показателем преломления. Поведение света в нем оказалось настолько странным, что теоретикам пришлось переписать книги по электромагнитным свойствам веществ. Экспериментаторы уже занимаются разработкой технологий, в которых используются удивительные свойства метаматериалов, и создают суперлинзы, позволяющие получать изображения с деталями меньше длины огромные объемы информации.

2. Метаматериалы



Куб метаматериала представляет собой трехмерную матрицу, образованную медными проводниками и кольцами с разрезом. Микроволны с частотами около 10 ГГц ведут себя в таком кубе необычно, потому что для них куб имеет отрицательный показатель преломления. Шаг решетки — 2,68 мм, или около 0,1 дюйма

- ▶ Метаматериалы – это композитные материалы, свойства которых обусловлены не столько индивидуальными физическими свойствами их компонентов, сколько микроструктурой. Термин «метаматериалы» особенно часто применяют по отношению к тем композитам, которые демонстрируют свойства, нехарактерные для объектов, встречающихся в природе. Одним из наиболее горячо обсуждаемых в последнее время типов метаматериалов являются объекты с отрицательным показателем преломления.

- ▶ Чтобы понять, как возникает отрицательное преломление, рассмотрим механизм взаимодействия электромагнитного излучения с веществом. Проходящая через него электромагнитная волна (например, луч света) заставляет двигаться электроны атомов или молекул. На это расходуется часть энергии волны, что влияет на ее свойства и характер распространения. Для получения требуемых электромагнитных характеристик исследователи подбирают химический состав материала.
- ▶ Но как показывает пример метаматериалов, химия — не единственный путь получения интересных свойств вещества. Электромагнитный отклик материала можно «конструировать», создавая крошечные макроскопические структуры. Но как показывает пример метаматериалов, химия — не единственный путь получения интересных свойств вещества. Электромагнитный отклик материала можно «конструировать», создавая крошечные макроскопические структуры. Дело в том, что обычно длина электромагнитной волны на несколько порядков больше размеров атомов или молекул. Волна «видит» не отдельную молекулу или атом, а коллективную реакцию миллионов частиц. Это справедливо и для метаматериалов, элементы, которых тоже значительно меньше длины волны.

- ▶ Поле электромагнитных волн, что следует из их названия, имеет как электрическую, так и магнитную составляющую. Электроны в материале движутся вперед и назад под действием электрического поля и по кругу под действием магнитного. Степень взаимодействия определяется двумя характеристиками вещества: диэлектрической проницаемостью ϵ и магнитной проницаемостью μ . Первая показывает степень реакции электронов на электрическое поле, вторая — степень реакции на магнитное. У подавляющего большинства материалов ϵ и μ больше нуля.
- ▶ Оптические свойства вещества характеризуются показателем преломления n , который связан с ϵ и μ простым соотношением: $n = \pm \sqrt{\epsilon \cdot \mu}$. Для всех известных материалов перед квадратным корнем должен стоять знак «+», и поэтому их показатель преломления положителен. Однако в 1968 г. Веселаго показал, что у вещества с отрицательными ϵ и μ показатель преломления n должен быть меньше нуля.

- ▶ Отрицательные ε или μ получаются в том случае, когда электроны в материале движутся в направлении, противоположном по отношению к силам, создаваемым электрическим и магнитным полями. Хотя такое поведение кажется парадоксальным, заставить электроны двигаться против сил электрического и магнитного полей не так уж сложно.
- ▶ Если толкнуть маятник рукой, он послушно переместится в направлении толчка и начнет колебаться с так называемой резонансной частотой. Подталкивая маятник в такт с качанием, можно увеличить амплитуду колебаний. Если же толкать его с более высокой частотой, то толчки перестанут совпадать с колебаниями по фазе, и в какой-то момент руку ударит маятник, движущийся ей навстречу. Точно так же электроны в материале с отрицательным показателем преломления входят в противофазу и начинают сопротивляться «толчкам» электромагнитного поля.

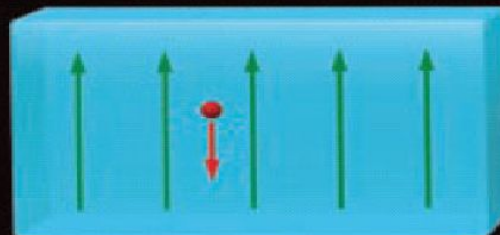
- ▶ Ключ к такого рода отрицательной реакции — резонанс, то есть стремление колебаться со специфической частотой. Он создается в метаматериале искусственно с помощью крошечных резонансных контуров, имитирующих отклик вещества на магнитное или электрическое поле. Например, в разорванном разрезном кольцевом резонаторе (РКР) магнитный поток, проходящий через металлическое кольцо, наводит в нем круговые токи, аналогичные токам, обуславливающим магнетизм некоторых материалов. А в решетке из прямых металлических стержней электрическое поле создает направленные вдоль них токи.
- ▶ Свободные электроны в таких контурах колеблются с резонансной частотой, зависящей от формы и размеров проводника. Если приложено поле с частотой ниже резонансной, будет наблюдаться нормальная положительная реакция. Однако с увеличением частоты отклик становится отрицательным, так же как в случае с маятником, движущимся навстречу, если толкать его с частотой выше резонансной. Таким образом, проводники в некотором диапазоне частот могут реагировать на электрическое поле как среда с отрицательной ϵ , а кольца с разрезами могут имитировать материал с отрицательной μ . Эти проводники и кольца с разрезами и есть элементарные блоки, необходимые для создания широкого ассортимента метаматериалов, в том числе таких, которые искал Веселаго.

- ▶ Калифорнийские ученые сконструировали метаматериал, состоящий из чередующихся проводников и РКР, собранных в виде призмы. Проводники обеспечивали отрицательную ϵ , а кольца с разрезами — отрицательную μ . В результате должен был получиться отрицательный показатель преломления. Для сравнения была изготовлена призма точно такой же формы из тефлона, у которого $n = 1,4$. Исследователи направили пучок СВЧ-излучения на грань призмы и измерили интенсивность волн, выходящих из нее разными углами. Как и ожидалось, пучок подвергся положительному преломлению на призме из тефлона и отрицательному на призме из метаматериала. Предположение Веселаго стало реальностью: материал с отрицательным показателем преломления был, наконец, получен.

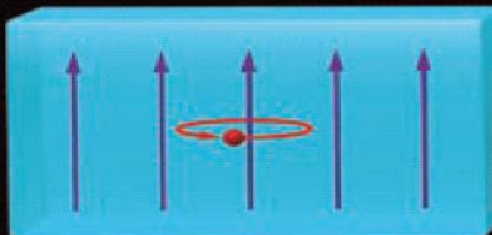
КОНСТРУИРОВАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА

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

В ОБЫЧНОМ МАТЕРИАЛЕ

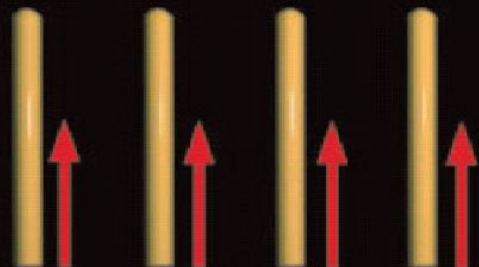


Электрическое поле (зеленое) вызывает линейное движение электронов (красные)



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

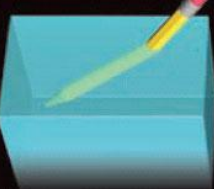
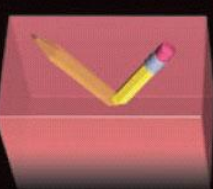
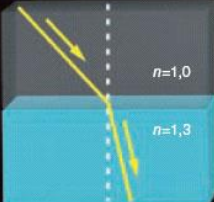
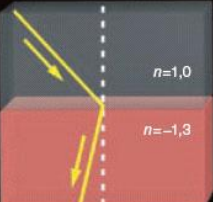


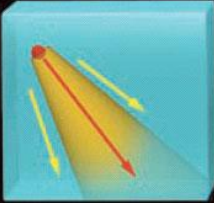
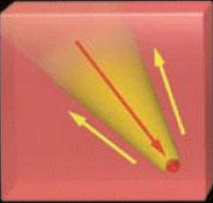
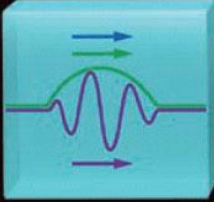
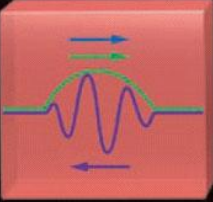


Метаматериал построен из матрицы проводников и колец с разрезом, размеры которых меньше, чем длина электромагнитных волн, для которых предполагается использовать материал

3. Общие свойства метаматериалов с отрицательным показателем преломления

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		СРЕДА С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ПОКАЗАТЕЛЕМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ
Карандаш в воде кажется изогнутым из-за более высокого показателя преломления воды		
Когда свет переходит из среды с низким показателем преломления (n) в среду с более высоким, он отклоняется в сторону нормали (лучевая линия под прямым углом к поверхности раздела)	 $n=1,0$ $n=1,3$	 $n=1,0$ $n=-1,3$
Удаляющийся объект кажется более красным из-за эффекта Доплера		
Заряженный объект (красный), движущийся быстрее скорости света, создает конус Черенковского излучения (желтый), направленный вперед		
В среде с положительным показателем преломления отдельные максимумы электромагнитного импульса (фиолетовый) движутся в том же направлении, что и огибающая (зеленая) импульса и энергия (синяя)		

Фазовая и групповая скорости в средах с отрицательным показателем преломления.

Свет распространяется в вакууме с максимальной скоростью

$$c = 300 \text{ тыс. км/с}$$


Скорость света в материале меньше:

$$v = c/n.$$

Но что будет, если n отрицателен?

Простая интерпретация формулы для скорости света показывает, что свет распространяется в обратном направлении.

В более полном ответе учитывается, что волна имеет две скорости: фазовую и групповую



Фазовая скорость — это скорость отдельных всплесков, а групповая скорость — это скорость, с которой движется огибающая импульса. Они не обязательно должны быть одинаковыми.

В материале с отрицательным показателем преломления групповая и фазовая скорости имеют противоположные направления: отдельные максимумы и минимумы движутся назад, тогда как весь импульс перемещается вперед.

Как будет себя вести непрерывный пучок света от источника, погруженного в материал с отрицательным показателем преломления?

Если бы можно было наблюдать отдельные колебания световой волны, то мы бы увидели, что они появляются на объекте, освещенном лучом, движутся назад и, в конечном счете, исчезают в прожекторе. Однако энергия светового пучка движется вперед, удаляясь от источника света. Именно в этом направлении фактически распространяется луч, несмотря на удивительное обратное движение его отдельных колебаний.

Чтобы убедиться в этом, достаточно записать следствия из уравнений Максвелла и выражение для вектора Пойнтинга для случая однородных плоских волн в изотропной среде:

$$\vec{k} \times \vec{E} = \frac{\omega}{c} \mu \vec{H}$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = -\frac{\omega}{c} \epsilon \vec{E}$$

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$

Векторы \vec{E} , \vec{H} , \vec{k} и \vec{S} в правых (а) и левых (б) средах

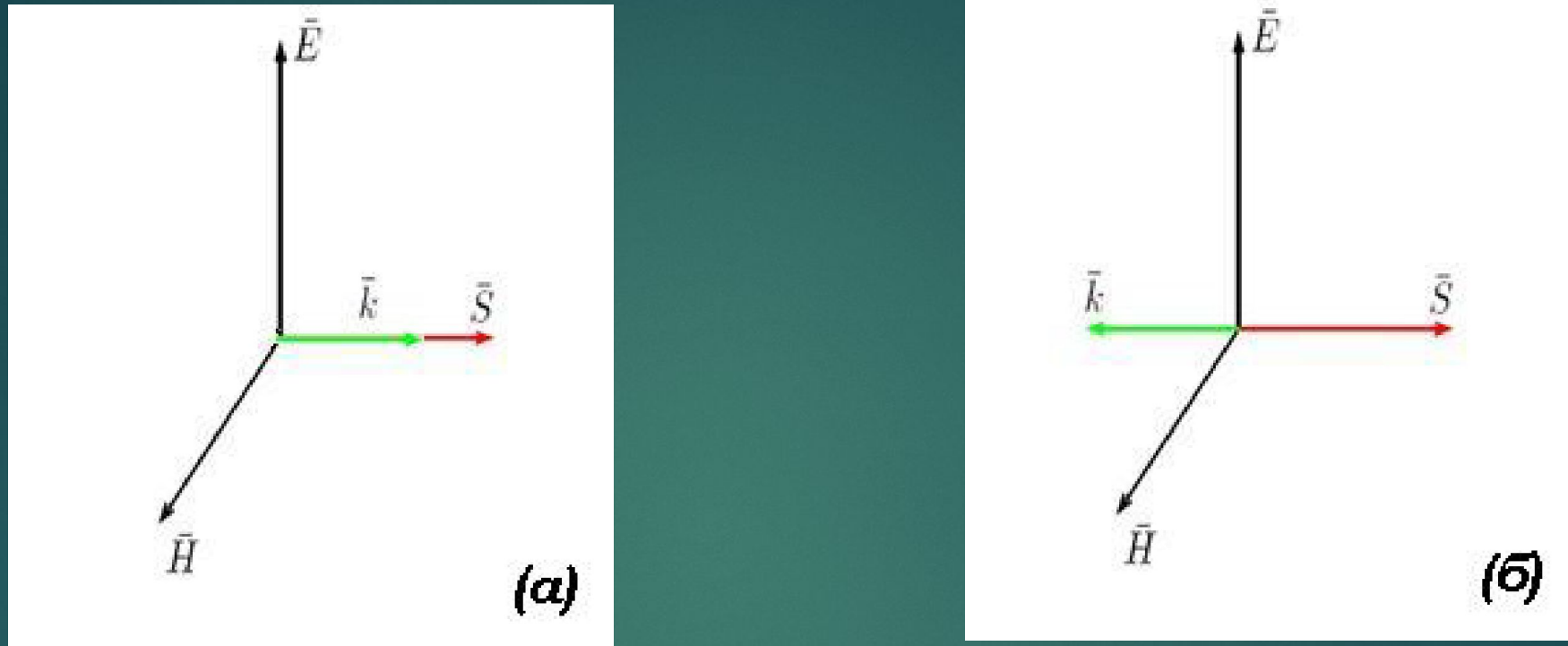


рис. 1

Одновременная смена знака ϵ и μ переводит правую тройку векторов \vec{E} , \vec{H} и \vec{k} в левую. При этом необходимо отметить, что при переходе из «левой» среды в «правую» свой знак меняет только продольная составляющая волнового вектора \vec{k} . Изотропные среды, у которых значения ϵ и μ оба являются отрицательными, обладают отрицательным преломлением, или, что тоже самое, отрицательным значением n . Правильно и обратное утверждение: если $n < 0$, то ϵ и μ тоже следует считать отрицательными, и для таких сред верны все сделанные выше утверждения.

С направлением групповой скорости связан перенос волной энергии. Важной особенностью «левых» материалов является неприменимость для них обычной формулы для плотности энергии:

$$W = \varepsilon E^2 + \mu H^2$$

Если диэлектрическая и магнитная проницаемости меньше нуля, то из данной формулы совершенно очевидно, что энергия, переносимая волной в данном материале отрицательна! Ограниченность применения вышеуказанной формулы заключается в том, что диэлектрическая и магнитная проницаемости зависят от частоты, поэтому выражение для плотности энергии следует записать с учетом дисперсии в виде:

$$W = \frac{\partial \varepsilon(\omega)}{\partial \omega} E^2 + \frac{\partial \mu(\omega)}{\partial \omega} H^2 \geq 0$$

откуда получаем необходимые условия:

$$\frac{\partial \varepsilon(\omega)}{\partial \omega} > 0,$$
$$\frac{\partial \mu(\omega)}{\partial \omega} > 0.$$

То есть, в левых средах неминуемо присутствует частотная дисперсия.

Законы геометрической оптики

Чаще всего о коэффициенте преломления материала вспоминают тогда, когда рассматривают эффект преломления света на границе раздела двух оптических сред. Данное явление описывается законом Снеллиуса:

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta,$$

где α – угол падения света, пришедшего из среды с показателем преломления n_1 , а β – угол преломления света в среде с показателем преломления n_2 .

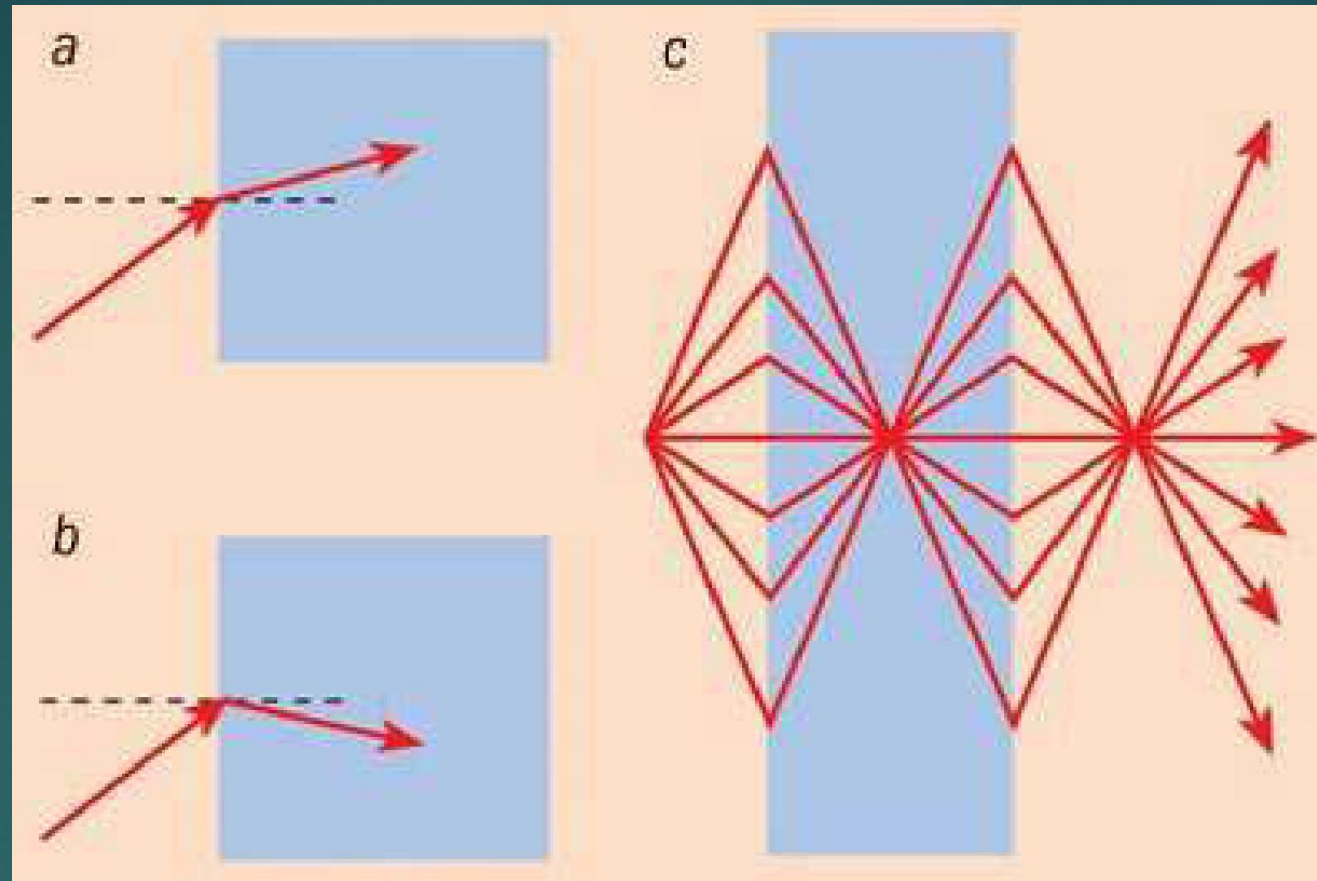


Рис. 2. а) Обычное преломление. б) Преломление в материале с отрицательным показателем преломления. в) Пластина из материала с отрицательным показателем преломления.

Для всех сред, которые могут быть найдены в природе, лучи падающего и преломленного света находятся по разные стороны от нормали, восстановленной к границе раздела сред в точке преломления (рис.2а). Однако если формально подставить в закон Снеллиуса $n_2 < 0$, лучи падающего и преломленного света находятся по одну сторону от нормали (рис. 2b).

Из геометрических построений следует, что лучи, исходящие от точечного источника, после прохождения пластины соберутся вновь в одну точку – в этом смысле пластина из левого материала подобна линзе (рис. 2с) . Тем не менее, стоит заметить, что такая пластина существенно отличается от линзы хотя бы тем, что параллельный пучок лучей после прохождения через неё так и останется параллельным. Так же, фокусироваться будут только лучи, идущие от источников, находящихся на сравнительно небольшом расстоянии. Так, например, в случае идеальной левой среды с $\epsilon = -1$ и $\mu = -1$ пластина создаст трехмерное действительное изображение всех точек предмета, расположенных на расстоянии не более чем толщина пластины.

Другие свойства метаматериалов с отрицательным показателем преломления.

Т а б л и ц а 1

Физический закон	Немагнитное приближение	Точная формула
Снеллиус, Доплер, Черенков $n = \sqrt{\varepsilon} \rightarrow n = \sqrt{\varepsilon\mu}$ если $\varepsilon, \mu < 0$, то $n < 0$	$\frac{\sin \varphi}{\sin \psi} = n_{21} = \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}}$	$\frac{\sin \varphi}{\sin \psi} = n_{21} = \sqrt{\frac{\varepsilon_2 \mu_2}{\varepsilon_1 \mu_1}}$
Френель $n = \sqrt{\varepsilon} \rightarrow \frac{1}{z} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}}$	$r_{\perp} = \frac{n_1 \cos \varphi - n_2 \cos \psi}{n_1 \cos \varphi + n_2 \cos \psi}$	$r_{\perp} = \frac{z_2 \cos \varphi - z_1 \cos \psi}{z_2 \cos \varphi + z_1 \cos \psi}$
Коэффициент отражения при нормальном падении света на границу раздела	$r = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$	$r = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1}$
Условие отсутствия отражения	$n_1 = n_2$	$z_1 = z_2$
Брюстер	$\operatorname{tg} \varphi = n$	$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{\frac{\varepsilon_2 \varepsilon_2 \mu_1 - \varepsilon_1 \mu_2}{\varepsilon_1 \varepsilon_2 \mu_2 - \varepsilon_1 \mu_1}}$

Из таблицы видно, что существует три группы физических законов и эффектов, формулировки которых по-разному меняются при переходе от формул немагнитного приближения к **точным** выражениям.

К первой группе законов относится закон Снеллиуса и эффекты Доплера и Черенкова. В соответствующих формулах обычно применяемое в немагнитном приближении выражение $n = \sqrt{\varepsilon}$ просто должно быть заменено на $n = \sqrt{\varepsilon\mu}$ причём если $\varepsilon < 0$ и $\mu < 0$, то перед n тоже должен быть поставлен знак «минус».

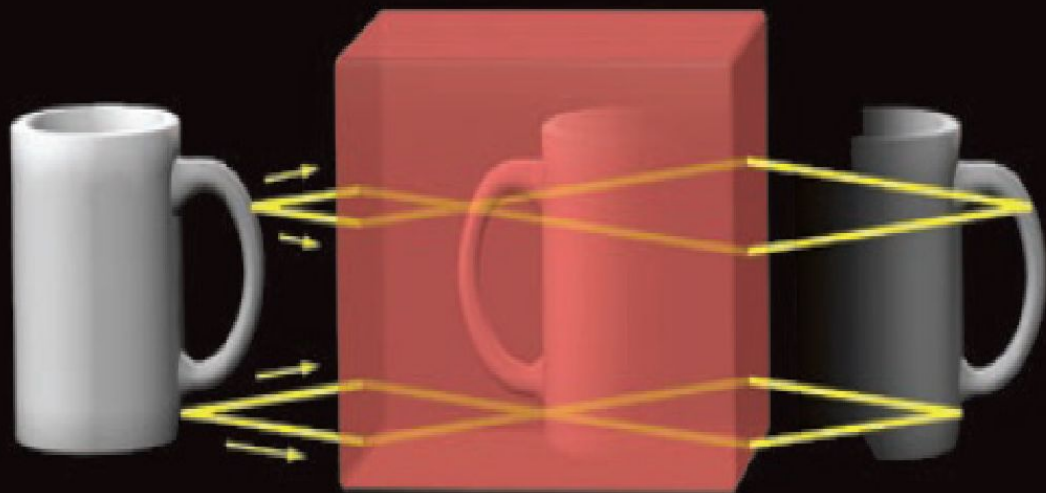
Ко второй группе относятся законы отражения и преломления света, и, в частности, формулы Френеля. В этих формулах при переходе от немагнитного приближения к точным формулам величину n следует заменять не на $n = \sqrt{\varepsilon\mu}$, а на $\sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} = \frac{1}{z}$ где величина z является величиной волнового сопротивления среды.

К третьей группе соотношений, зависящих от n , и существенно меняющихся при переходе от немагнитного приближения к точным формулам, относится, в частности, формула для угла Брюстера. Точное выражение для угла Брюстера приведено в последней строке таблицы. Подкоренное выражение в этой точной формуле не меняется при одновременной смене знаков ε и μ одной из сред. Необходимо помнить, что приведённая в таблице формула для угла Брюстера соответствует одной определённой поляризации. Для другой, перпендикулярной к ней поляризации, формула может быть получена из приведенной таблицы путем замены $\varepsilon \rightarrow \mu$ и $\mu \rightarrow \varepsilon$. Таким образом, отражение под углом Брюстера имеет место всегда, но только для одной из двух поляризаций падающего света.

4. Суперлинза

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



Веселаго использовал построение хода лучей, чтобы предсказать, что брусок из материала с отрицательным показателем преломления $n = -1$ должен действовать как линза с уникальными свойствами. Большинство из нас знакомо с линзами из материалов с положительным преломлением — в камерах, лупах, микроскопах и телескопах. Они имеют фокусное расстояние, и место, где формируется изображение, зависит от сочетания фокусного расстояния и расстояния между объектом и линзой.

Изображения обычно отличаются по размеру от объекта, и линзы работают лучше всего для объектов, лежащих на оси, проходящей через линзу. Линза Веселаго работает совершенно иначе, чем обычные: ее работа намного проще, она действует только на объекты, расположенные рядом с ней, и переносит все оптическое поле с одной стороны линзы на другую.

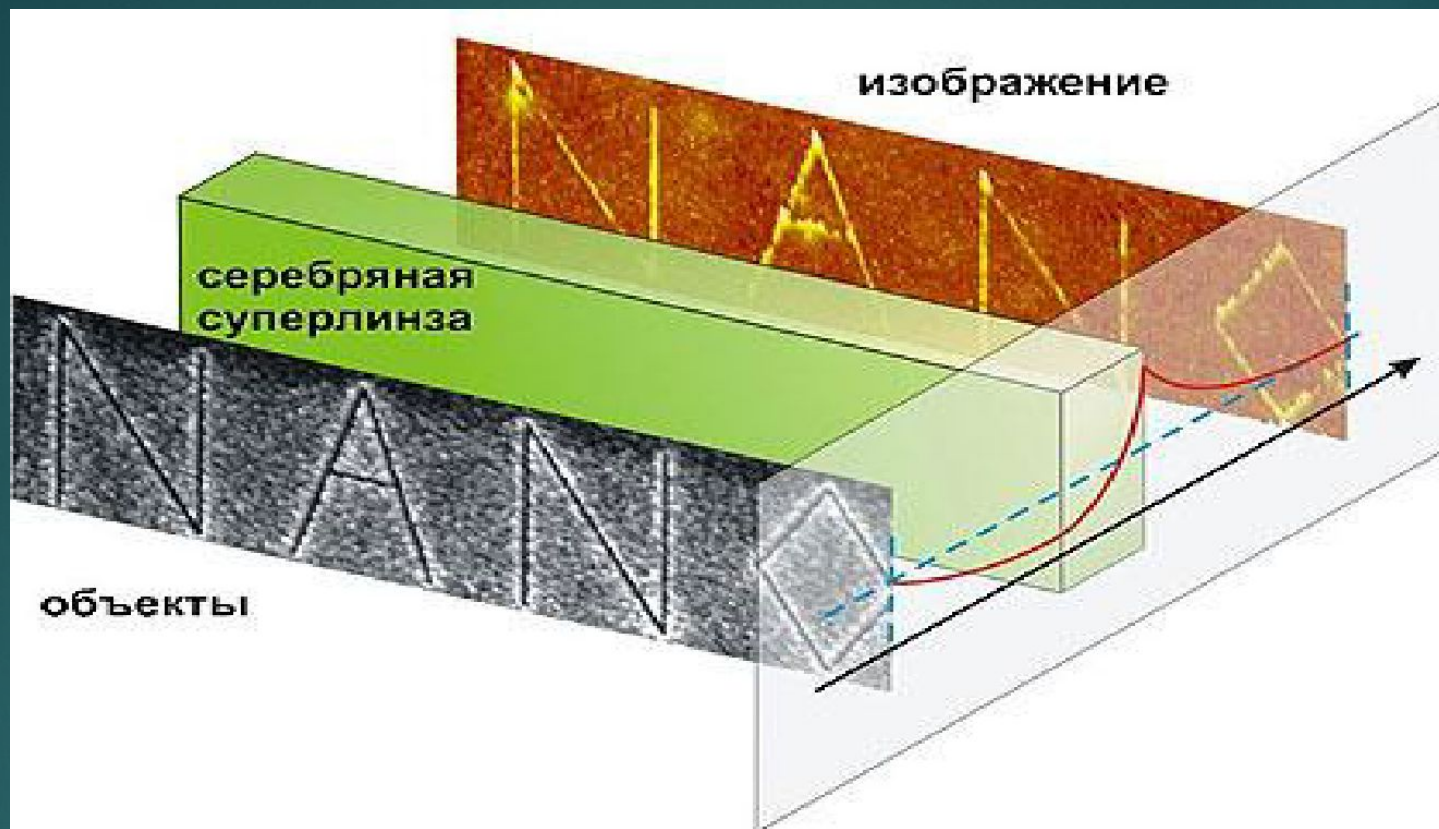
- ▶ Линза Веселаго столь необычна, что пришлось задаться вопросом: насколько совершенно она может работать? И в частности, каково может быть предельное разрешение линзы Веселаго? Оптические элементы с положительным показателем преломления ограничены дифракционным пределом— они могут разрешать детали, размер которых равен или больше длины волны света, отраженного от объекта. Дифракция накладывает окончательный предел на все системы создания изображения, наподобие наименьшего объекта, который можно рассмотреть в микроскоп, или наименьшего расстояния между двумя звездами, которое может разрешить телескоп. Дифракция определяет также наименьшую деталь, которую можно создать в процессе оптической литографии при производстве микрочипов (микросхем). Подобным же образом дифракция ограничивает количество информации, которую можно сохранить или прочитать на оптическом цифровом видеодиске (DVD). Способ обойти дифракционный предел мог бы решительным образом изменить технологии, позволив оптической литографии проникнуть в диапазон наноразмеров и, возможно, в сотни раз увеличить количество данных, сохраняемых на оптических дисках.

- ▶ Линза Веселаго столь необычна, что пришлось задаться вопросом: насколько совершенно она может работать? И в частности, каково может быть предельное разрешение линзы Веселаго? Оптические элементы с положительным показателем преломления ограничены дифракционным пределом— они могут разрешать детали, размер которых равен или больше длины волны света, отраженного от объекта. Дифракция накладывает окончательный предел на все системы создания изображения, наподобие наименьшего объекта, который можно рассмотреть в микроскоп, или наименьшего расстояния между двумя звездами, которое может разрешить телескоп. Дифракция определяет также наименьшую деталь, которую можно создать в процессе оптической литографии при производстве микрочипов (микросхем). Подобным же образом дифракция ограничивает количество информации, которую можно сохранить или прочесть на оптическом цифровом видеодиске (DVD). Способ обойти дифракционный предел мог бы решительным образом изменить технологии, позволив оптической литографии проникнуть в диапазон наноразмеров и, возможно, в сотни раз увеличить количество данных, сохраняемых на оптических дисках.

- ▶ Разрешение суперлинзы ограничено качеством ее материала с отрицательным преломлением. Для лучшей работы требуется не только чтобы показатель преломления n был равен -1 , но также чтобы ϵ и μ оба были равны -1 . Линза, у которой эти условия не выполняются, имеет резко ухудшенное разрешение. Одновременное выполнение этих условий — очень серьезное требование. Но в 2004 г. Энтони Грбич и Джордж Элефтериадес из Университета Торонто экспериментально показали, что метаматериал, построенный так, чтобы иметь $\epsilon = -1$, и $\mu = -1$ в диапазоне радиочастот, действительно может разрешить объекты в масштабе меньшем, чем дифракционный предел. Их результат доказал, что суперлинзу можно построить, но можно ли ее создать для еще более коротких — оптических длин волн?

- ▶ Сложность масштабирования метаматериалов в область оптических длин волн имеет две стороны. Прежде всего, металлические проводящие элементы, образующие микросхемы метаматериала, типа проводников и колец с разрезом, нужно уменьшить до масштаба нанометров, чтобы они были меньше, чем длина волны видимого света (400–700 нм). Во вторых, короткие длины волн соответствуют более высоким частотам, а металлы на таких частотах обладают худшей проводимостью, подавляя таким образом резонансы, на которых основаны свойства метаматериалов. В 2005 г. Костас Соуколис из университета штата Айова и Мартин Вегенер из университета Карлсруэ в Германии экспериментально продемонстрировали, что можно сделать кольца с разрезами, которые работают при длинах волн всего 1,5 мкм. Несмотря на то, что при столь малых длинах волн резонанс на магнитной компоненте поля становится весьма слабым, с такими элементами все еще можно сформировать интересные метаматериалы.

- ▶ Но пока еще затруднительно изготовить материал, который при длинах волн видимого света приводит к $\mu = -1$. К счастью, возможен компромисс. Когда расстояние между объектом и изображением намного меньше, чем длина волны, необходимо выполнить только условие $\epsilon = -1$, а значением μ можно пренебречь. Как раз в прошлом году группа Ричарда Блэйки из университета Кентербери в Новой Зеландии и группа Ксианга Джанга из Калифорнийского университета в Беркли, следуя этим предписаниям, независимо продемонстрировали сверхразрешение в оптической системе. При оптических длинах волн собственные резонансы металла могут приводить к отрицательной диэлектрической постоянной (ϵ). Поэтому очень тонкий слой металла при длине волны, где $\epsilon = -1$, может действовать как суперлинза. И Блэйки, и Джанг использовали слой серебра толщиной около 40 нм, чтобы получить изображение пучков света с длиной волны 365 нм, испускаемых сформированными отверстиями, меньшими, чем длина волны света. И хотя серебряная пленка далека от идеальной линзы, серебряная суперлинза существенно улучшала разрешение изображения, доказывая правильность основного принципа работы суперлинзы.



Нанометровое изображение, построенное с помощью суперлинзы: разрешение превышает дифракционный предел.

5. ВЫВОД

- ▶ С точки зрения физики метаматериалы с отрицательным показателем преломления являются антиподами обычных материалов. В случае отрицательного показателя преломления происходит обращение фазовой скорости электромагнитного излучения; доплеровский сдвиг происходит в противоположную сторону; черенковское излучение от движущейся заряженной частицы происходит не вперед, а назад; собирающие линзы становятся рассеивающими и наоборот... И все это – лишь небольшая часть тех удивительных явлений, которые возможны для метаматериалов с отрицательным показателем преломления.
- ▶ Демонстрация работы суперлинзы— лишь последнее из многих предсказаний свойств материалов с отрицательным преломлением, которые предстоит реализовать, а это признак быстрого прогресса, происходящего в этой все расширяющейся области. Возможность отрицательного преломления заставила физиков пересмотреть практически всю область электромагнетизма. И когда этот круг идей будет полностью понят, основные оптические явления, такие как преломление и дифракционный предел разрешения, придется пересмотреть с учетом новых неожиданных поворотов, связанных с материалами, дающими отрицательное преломление.

Список литературы:

1. Веселаго В.Г. «Электродинамика материалов с отрицательным коэффициентом преломления» УФН, № 3, (2003).
2. Дж. Пендри, Д. Смит. «В поисках суперлинзы», «В мире науки» №11, 2006.
3. Веселаго В.Г. «Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ ». – Успехи физических наук, 1967, т.92, №7, с. 517–526

Спасибо за внимание 😊