Российский университет дружбы народов

Инженерный факультет

Кафедра Кибернетики и Мехатроники

Реферат

Метаматериалы и проблемы «эльфийского плаща». Насколько близки «двери в сказку»?

Москва, 2013

**Введение**

Основная задача, стоящая перед разработчиками маскирующих устройств, заключается в том, чтобы сделать объект невидимым, за счет выполнения двух необходимых требований: свет не должен отражаться от объекта, и должен полностью обходить объект. При этом наблюдатель должен видеть только задний фон, а никоим образом не предмет, замаскированный устройством-невидимкой.

В 1967 году советский физик Виктор Георгиевич Веселаго (сотрудник Института общей физики имени Александра Михайловича Прохорова РАН, Москва) предсказал возможность создания материала с отрицательным коэффициентом преломления (метаматериала), который он назвал «левосторонним». В своей статье «Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями е и м», опубликованной в «Успехи физических наук», он пришел к заключению, что в материале существенно изменяются почти все известные оптические явления. 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, одним из таких свойств является то, что волна будет огибать предмет, который помещен в метаматериал, а не отражаться от него. 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. 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 волны используемого света.

В настоящее время принцип работы, так называемых плащей-невидимок из метаматериалов (греч. мета - сверх, за пределами), может быть основан на том, что они преломляют проходящий сквозь них свет таким образом, что внешний наблюдатель не может заметить скрываемый предмет. Для их создания требуются материалы с отрицательным показателем преломления света, которые и позволяют свету огибать твёрдое тело так, как будто на его месте ничего нет.

**1. Метаматериалы**

Метаматериа́л - композиционный материал, свойства которого обусловлены не столько свойствами составляющих его элементов, сколько искусственно созданной периодической структурой.

Метаматериалы синтезируются внедрением в исходный природный материал различных периодических структур с самыми различными геометрическими формами, которые модифицируют диэлектрическую проницаемость «е» и магнитную «м» восприимчивости исходного материала. В очень грубом приближении такие внедрения можно рассматривать как искусственно внесенные в исходный материал атомы чрезвычайно больших размеров. Разработчик метаматериалов при их синтезировании имеет возможность выбора (варьирования) различных свободных параметров (размеры структур, форма, постоянный и переменный период между ними и т. д.).

Одно из возможных свойств метаматериалов - отрицательный (или левосторонний) коэффициент преломления, который проявляется при одновременной отрицательности диэлектрической и магнитной проницаемостей. Пример такого метаматериала показан на Рисунке 1.

Оптические свойства вещества характеризуются показателем преломления n, который связан с е и м простым соотношением: . 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 е и м показатель преломления n должен быть меньше нуля. Отрицательные е или м получаются в том случае, когда электроны в материале движутся в направлении, противоположном по отношению к силам, создаваемым электрическим и магнитным полям

*Диэлектрическая проницаемость среды - физическая величина, характеризующая свойства изолирующей среды и показывающая зависимость электрической индукции (D) от напряженности электрического поля (E)*

*Магнитная проницаемость - физическая величина коэффициент (зависящий от свойств среды), характеризующий связь между магнитной индукцией (B) и напряженностью магнитного поля (H) в веществе.*

Природные материалы с отрицательной диэлектрической проницаемостью хорошо известны - это любой металл при частотах выше плазменной частоты (при которой металл становится прозрачным). В этом случае е < 0 достигается за счет того, что свободные электроны в металле экранируют внешнее электромагнитное поле. Гораздо сложнее создать материал с м < 0, в природе такие материалы не существуют. Именно по этой причине работы Веселаго долгое время не привлекали должного внимания научной общественности. Прошло 30 лет, прежде чем английский ученый Д.Пендри (John Pendry) в 1999 г. показал, что отрицательная магнитная проницаемость может быть получена для проводящего кольца с зазором. Если поместить такое кольцо в переменное магнитное поле, в кольце возникнет электрический ток, а на месте зазора возникнет дуговой разряд. Поскольку металлическому кольцу можно приписать индуктивность L, а зазору соответствует эффективная емкость С, систему можно рассматривать как простейший колебательный контур с резонансной частотой щ0 ~ 1/(LC)-1/2. При этом система создает собственное магнитное поле, которое будет положительным при частотах переменного магнитного поля щ < щ0 и отрицательным при щ > щ0.

**1.1 Создание метаматериалов**

Отрицательные *е* или *м* 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 *е*, а кольца с разрезами могут имитировать материал с отрицательной *м*. Эти проводники и кольца с разрезами и есть элементарные блоки, необходимые для создания широкого ассортимента метаматериалов, в том числе таких, которые искал Веселаго.

**Тонкие металлические проволоки**

Массив из тонких металлических проволок предложен как первая структура с отрицательной диэлектрической проницаемостью. Большое влияние на развитие исследований материалов с отрицательным показателем преломления оказали работы Пендри. Структура с е < 0 , описанная Пендри, состоит из квадратной матрицы, образованной бесконечно длинными металлическими проволоками, расположенными в диэлектрике. Если расстояние между проволоками принять равным *а*, а радиус одной проволоки *r* << *a* , то плазменная частота для продольной плазменной моды имеет вид:



а эффективная диэлектрическая проницаемость записывается как:



Отрицательные значения диэлектрическая проницаемость принимает при щ < щ .

**2. Кольцевой щелевой резонатор (splitring resonator)**



В 1999 г. Пендри и др. предложили использовать SRR (split ring resonator - кольцевой щелевой резонатор) как основу для создания среды с отрицательной диэлектрической проницаемостью.

Двойной кольцевой резонатор представляет собой проводящую структуру, в которой емкость между двумя кольцами уравновешивает индуктивность. Переменное магнитное поле, направленное перпендикулярно поверхности колец, индуцирует ток в кольцах, который, в зависимости от резонансных свойств структуры, может усиливать или уменьшать внешнее поле, создавая положительную или отрицательную магнитную проницаемость.

 

где *а* - размеры ячейки, с - сопротивление единицы длины кольцевой структуры.

Калифорнийские ученые сконструировали метаматериал, состоящий из чередующихся проводников и РКР, собранных в виде призмы. Проводники обеспечивали отрицательную *е*, а кольца с разрезами - отрицательную *м*. 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.

**3. Общие свойства метаматериалов с отрицательным показателем преломления**

**.1 Фазовая и групповая скорости в средах с отрицательным показателем преломления**

Свет распространяется в вакууме с максимальной скоростью *c* = 300 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. Чтобы понять их смысл, представим себе импульс света, движущийся в среде. Он будет выглядеть примерно так: амплитуда волны возрастает до максимума в центре импульса, а затем снова спадает. Фазовая скорость - это скорость отдельных всплесков, а групповая скорость - это скорость, с которой движется огибающая импульса. Они не обязательно должны быть одинаковыми.

Веселаго обнаружил, что 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. Интересно рассмотреть, как будет себя вести непрерывный пучок света от источника (например, прожектора), 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:

метаматериал преломление резонатор диэлектрический





Рис. 3. Векторы ,, и в правых (а) и левых (б) средах. *EHkS*

Легко видеть, что одновременная смена знака *е* и *м* переводит правую тройку векторов **,** и в левую (см. рис. 1). При этом необходимо отметить, что при переходе из «левой» среды в «правую» свой знак меняет только продольная составляющая волнового вектора . Изотропные среды, у которых значения *е* и *м* оба являются отрицательными, обладают отрицательным преломлением, или, что тоже самое, отрицательным значением *n*. Правильно и обратное утверждение: если *n*<0, то *е* и *м* тоже *EH k k* 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 = еE2+ мH2.*

Действительно, 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:

 

откуда получаем необходимые условия:



То есть, в левых средах неминуемо присутствует частотная дисперсия.

Следует заметить, что сам факт противоположной направленности фазовой и групповой скорости не является чем-то новым. Он, в частности, обсуждался ещё в работе Л. И. Мандельштама. Кроме того, давно известны электронные устройства (например, лампы обратной волны ЛОВ), в которых фазовая скорость противоположна направлению потока энергии. В последнее время очень интенсивно обсуждаются свойства так называемых фотонных кристаллов, в которых также может быть реализована противоположная направленность векторов фазовой и групповой скорости. Однако фотонные кристаллы в общем случае являются существенно анизотропными материалами и не могут быть охарактеризованы скалярным коэффициентом преломления *n*. Это же относится и к устройствам типа ЛОВ.

Появление веществ с отрицательным значением *n* ставит очень важный вопрос: в какой мере для них справедливы все те законы и формулы электродинамики, оптики и смежных технических наук, в которые входит величина коэффициента преломления.

**4. Материалы - невидимки**

Идея материалов - невидимок заключается в том, что маскируемый объект помещается в некую полость внутри маскировочной оболочки, и световые волны (или любая другая разновидность электромагнитного излучения), ударяясь об эту оболочку, вместо того чтобы попадать далее в спрятанный внутри объект, плавно огибают его и, заново рекомбинируясь, выходят наружу как ни в чем не бывало. Американский физик Дэвид Смит из Университета Дьюка в этой связи приводит условную аналогию с речным потоком и камнем, помещенным на его пути: «Водные струи, сталкиваясь с камнем, просто растекаются вокруг него и соединяются вместе уже за ним». Но, в отличие от камня и речного потока, человек, наблюдающий за столкновением световых волн с оболочкой-невидимкой, прекрасно видит все прочие предметы, находящиеся непосредственно за скрытым внутри нее объектом, то есть, как бы смотрит сквозь объект, никак его не обнаруживая.

Это возможно благодаря тому, что слои с обычным и отрицательным коэффициентом преломления расположены особым образом, что приведет к тому, что лучи будут огибать предмет, помещенный внутри полости и, выходить из под плаща-невидимки так, как будто внутри него ничего нет (См. Рисунок 4).

Первые оптические метаматериалы и плащи-невидимки на их основе были созданы исследователями из университета Дюка. Такие устройства работают, преломляя свет особым образом и заставляя его огибать скрываемый объект. Однако, в этом деле имеются дополнительные тонкости, свет, обогнувший объект и выходящий из плаща-невидимки, должен иметь такую же поляризацию и фазу, как и свет, проходящий мимо плаща. Если не соблюсти эти условия, то можно будет увидеть искажение света, вспомним первую часть фильма «Хищник», из-за этого можно будет сказать, что в той точке пространства находится скрываемый объект, но нельзя будет сказать точно, что это за объект.

**4.1 Материалы - невидимки. Первые прототипы**

Американские исследователям под руководством Д.Смита (David Smith) в 2000 г. удалось создать метаматериал. Созданный метаматериал состоял из металлических стержней, ответственных за е < 0, и медных кольцевых резонаторов, благодаря которым удалось добиться м < 0. Несомненно, структуру, изображенную на Рис.2, сложно назвать материалом в традиционном смысле этого слова, поскольку она состоит из отдельных макроскопических объектов. Между тем, данная структура «оптимизирована» для микроволнового излучения, длина волны которого значительного больше отдельных структурных элементов метаматериала. Поэтому с точки зрения микроволн последний также однороден, как например, оптическое стекло для видимого света. Последовательно уменьшая размеры структурных элементов можно создавать метаматериалы с отрицательным показателем преломления для терагерцового и инфракрасного диапазонов спектра. Ученые ожидают, что благодаря достижениям современных нанотехнологий в самое ближайшее время будут созданы метаматериалы и для видимого диапазона спектра.

Так же, американские исследователи сумели продемонстрировать вполне работоспособный образец покрытия, делающего невидимым все, что под ним скрыто. Как уже сказано выше, работает это пока только для микроволнового излучения.

"Плащ" заставляет микроволновые лучи огибать цель таким образом, что наблюдателю (который обладал бы "микроволновым" зрением) кажется, будто в этом месте вообще ничего нет, он видит те предметы, что расположены за скрытым пятном. Материалы, которые позволяют обращаться со световыми лучами подобным образом (т.е. обладают совершенно нетривиальными оптическими свойствами), в естественном виде в природе не встречаются, и их необходимо еще особым образом проектировать. Речь идет о так называемых "метаматериалах" ("metamaterials"), состоящих из повторяющихся структур с экзотическими электромагнитными свойствами - своего рода базовых электронных компонент типа конденсаторов и катушек индуктивности. Фактически это просто композиция из стекловолокна, пронизанного особыми полостями, и проводящих элементов (медь). Чтобы упростить себе задачу, физики пока были вынуждены изготавливать "плащ Смита" так, чтобы он срабатывал только в одной плоскости. Экспериментальный образец представляет собой цилиндрическую конструкцию небольшой высоты диаметром меньше пяти дюймов (13 см), состоящую из ряда концентрических колец. Совместное их действие позволяет обводить микроволны вокруг центральной области, опоясанной медным кольцом.

Строго говоря, для обладателя "микроволновым зрением" медное кольцо полностью-таки не исчезает. Остается его своеобразная "тень", а также след небольшого искажения на том месте, где должно быть это кольцо. Так что сравнение с "полноценной" шапкой-невидимкой или плащом Гарри Поттера пока еще некорректно. Скорее, сравнивать нужно с боевым облачением Хищника из одноименного кинофильма или же с эльфийскими плащами, полученными Фродо и Ко в Лориэне от владычицы Галадриэль (см. эпопею "Властелин Колец" Толкиена; только то Кольцо, которое укрывал под плащом Фродо, было, конечно, не медным...).

Другое важное ограничение: как уже упоминалось, система работает только в очень узком и весьма "ненаглядном" диапазоне частот (впрочем, кто знает, может быть охотившиеся за Фродо назгулы видели как раз в микроволновом диапазоне...). Хотя испытания в специальной камере подтвердили правильность теоретических выкладок ученых, фактически исследователи пока еще сделали только самые первые шаги к созданию настоящего плаща-невидимки.

Теперь Смит надеется математическим образом рассчитать и построить трехмерную структуру, которая могла бы скрывать объект полностью при наблюдениях из любой точки. А проблема с видимым светом состоит в том, что экспериментаторам в таком случае придется иметь дело с гораздо меньшими длинами волн, ну а это в свою очередь означает, что оптические метаматериалы должны быть основаны уже на структурах наномасштаба, создание которых пока еще не под силу современным нанотехнологиям. К тому же, чтобы объект полностью исчез из вида, укрывающий его плащ должен будет правильно взаимодействовать с излучением одновременно всех длин волн (то есть различных оптических цветов). Технология, способная на это, потребует гораздо большего количества чрезвычайно запутанных и разнородных структур, и пока неясно, можно ли это все совместить на практике.

Дженнифер Дион (Jennifer Dionne), ученая-материаловед из Стэнфордского университета, и ее коллеги разработали совершенно новый тип метаматериала с гибридной структурой поверхности, который без стеснения можно назвать революционным материалом. Гибридная структура поверхности нового материала позволяет ему эффективно взаимодействовать с двумя составляющими электромагнитных колебаний в чрезвычайно широком диапазоне, охватывающем весь спектр видимого света. Материал был создан с помощью способа, называемого конформным преобразованием, который заключается в «сворачивании» плоского двухмерного метаматериала с известными оптическими свойствами в трехмерный наноразмерный объект, сформированный в виде полумесяца, что позволяет сохранить оригинальные оптические свойства исходного материала и придает ему новые уникальные свойства.

Новый метаматериал в большем масштабе представляет собой упорядоченную трехмерную решетку, узлы которой состоят из трех вышеописанных оптических атомов. Расстояния между узлами решетки и отдельными оптическими атомами определяют рабочий диапазон этого метаматериала и, когда он «настроен» на середину оптического диапазона, материал демонстрирует отрицательный коэффициент преломления в полосе от синего до красного цвета, оставляя неохваченными только узкие полосы по краям диапазона видимого света. Исследователи утверждают, что небольшие изменения в структуре метаматериала позволят расширить охватываемую им полосу, которая будет соответствовать или будет шире диапазона видимого света.

Широкая полоса пропускания нового метаматериала позволяет рассчитывать на то, что в недалеком будущем материалы такого класса будут использованы для создания плащей-невидимок, использование которых позволит эффективно скрывать объекты, по крайней мере, от человеческого взгляда. Помимо этого, уникальные свойства метаматериала, позволяющие реализовать уникальные методы управления светом, обеспечат появление множества технологий, о возможности реализации которых никто ранее не мог и предположить.

Группа Стэнфордских ученых опубликовала описание нового метаматериала и его уникальных оптических свойств в последнем выпуске журнала «Advanced Optical Materials».

**Список литературы**

1. Блиох К.Ю. <http://elibrary.ru/author\_items.asp?refid=12649987&fam=%D0%91%D0%BB%D0%B8%D0%BE%D1%85&init=%D0%9A+%D0%AE>, Блиох Ю.П. <http://elibrary.ru/author\_items.asp?refid=12649987&fam=%D0%91%D0%BB%D0%B8%D0%BE%D1%85&init=%D0%AE+%D0%9F> Что такое левые среды и чем они интересны?// Успехи физических наук, Т. 174, № 4, 2004. -С. 439-447.

. Веселаго В. Г. Электродинамика материалов с отрицательным коэффициентом преломления // Успехи физических наук. - 2003. - 7. - с. 790-794.

. Веселаго, В. Г. Электродинамика веществ с одновременными отрицательными значениями и/В. Г. Веселаго <http://elibrary.ru/author\_items.asp?refid=122762033&fam=%D0%92%D0%B5%D1%81%D0%B5%D0%BB%D0%B0%D0%B3%D0%BE&init=%D0%92+%D0%93>//Успехи физических наук. <http://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7325> -1967. -Т. 92. -№ 3. -C. 517-525.

4. Головкина М.В. Материалы с отрицательным показателем преломления в волноведущих структурах // ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ . - Самара: Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2006. - С. 14-21.

. Слюсар В. Метаматериалы в антенной технике // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. - Смоленск: Рекламно-издательский центр "Техносфера", 2009. - С. 70-79.