

МЕТАМАТЕРИАЛЫ: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Академик А.Н. ЛАГАРЬКОВ,
доктор физико-математических наук В.Н. КИСЕЛЬ
(Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН)

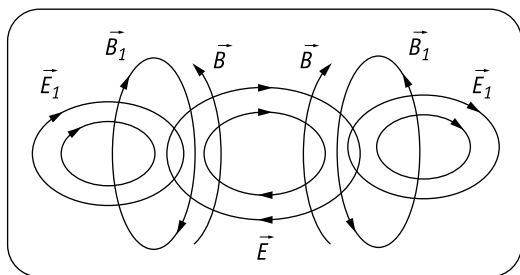
Метаматериалы¹ – это композитные материалы, обладающие уникальными электрофизическими, радиофизическими, оптическими или акустическими свойствами, отсутствующими в природных материалах². Необычные свойства электромагнитных метаматериалов, о которых речь будет идти ниже, обусловлены резонансным взаимодействием электромагнитной волны, распространяющейся в среде, с заполняющими ее включениями (структурными элементами) специальной формы.

Как известно из школьного курса физики, переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле, которое, в свою очередь, порождает переменное электрическое поле, то есть антенна, возбуждая одно из полей, вызывает появление единого электромагнитного поля. Важнейшее свойство этого поля в том, что оно распространяется в виде электромагнитных волн (рис. 1).

На большом расстоянии от источника возбуждения (заряда или антенны) электрическое и магнитное поля изменяются синфазно (рис. 2).

Электромагнитные волны в свободном пространстве вдали от источников являются поперечными волнами, т.е. колебания векторов напряжённости переменного электрического поля и индукции переменного магнитного поля взаимно перпендикулярны и лежат в плоскости, перпендикулярной к вектору Пойнтинга, указывающему (как и групповая скорость) направление переноса энергии или направление распространения электромагнитной волны. Это направление совпадает с направлением движения правого винта при повороте ручки буравчика от вектора \vec{E} к вектору \vec{B} . Скорость распространения электро-

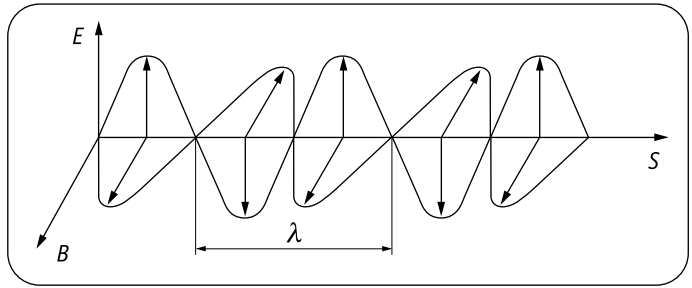
Рис. 1.
Единое электромагнитное поле
(\vec{E} – вектор напряжённости электрического поля, \vec{B} – вектор индукции магнитного поля).



¹ Приставка “мета” (греч. meta – вне, за пределами) позволяет трактовать термин “метаматериалы” как композиты, чьи эффективные электромагнитные свойства выходят за пределы свойств образующих их материалов и определяются их геометрической структурой.

² Ю.В. Гуляев, А.Н. Лагарьков, С.А. Никитов. *Метаматериалы: фундаментальные исследования и перспективы применения*. Вестник Российской академии наук, 2008, том 78, № 5, с. 438–457; А.Н. Лагарьков, В.Н. Кисель, А.К. Сарычев, В.Н. Семенов. *Электрофизика и электродинамика метаматериалов*. Теплофизика высоких температур, 2010, том 48, № 6, с. 1031–1048.

Рис. 2.
Синфазное изменение электрического и магнитного полей (λ – длина электромагнитной волны).



магнитных волн в среде без потерь энергии зависит от относительных диэлектрической ϵ и магнитной μ проницаемостей среды. Первая показывает степень реакции среды на электрическое поле, вторая – степень реакции на магнитное. У подавляющего большинства материалов ϵ и μ больше нуля (положительны). Для воздуха диэлектрическая и магнитная проницаемости среды практически равны единице, следовательно, скорость распространения электромагнитных волн в этом случае равна скорости света. Оптические свойства вещества характеризуются показателем преломления n , который связан с ϵ и μ простым соотношением: $n^2 = \epsilon\mu$ или $n = \pm\sqrt{\epsilon \cdot \mu}$. Для всех природных материалов перед квадратным корнем должен стоять знак "+", и поэтому их показатель преломления положителен.

Однако в 40-х годах прошлого века появилась замечательная работа советского физика, открывшего комбинационное рассеяние света, Леонида Исааковича Мандельштама³, в которой было

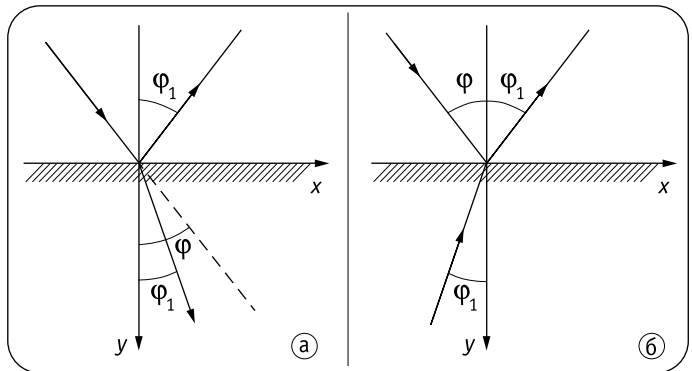
предсказано и объяснено новое явление – отрицательное преломление лучей. Это явление может существовать только в том случае, когда в преломляющей среде возбуждается обратная волна. (Ещё в начале прошлого века английский математик и гидродинамик Горацій Лэмб в своей публикации, датированной 11 февраля 1904 г.⁴, обратил внимание на возможность существования обратных волн – необычного колебательного процесса, при котором фазовая и групповая скорости волн направлены противоположно друг другу). Посмотрим на рис. 3, заимствованный из работы Мандельштама.

При падении плоской электромагнитной волны на границу раздела двух сред возникает отражённая волна под углом $\phi' = \phi$ и прошедшая волна под углом ϕ_1 . Эффект преломления света на границе раздела двух оптических сред описывается законом Снеллиуса: $n_1 \cdot \sin \phi = n_2 \cdot \sin \phi_1$, где ϕ – угол

³ Мандельштам Л.И. Лекции, прочитанные 26 февраля 1940 г. и 5 мая 1944 г. Полн. собр. тр. Т. 5. М.: Изд-во трудов АН СССР, 1950.

⁴ Lamb H. On Group Velocity // Proc. London Math. Soc. 1904. Ser. 2. V. 1. P. 473.

Рис. 3.
Схема отражения и преломления падающей плоской волны, предложенная Л.И. Мандельштамом: а – преломление на границе с обычной средой, б – преломление на границе с метаматериалом, ϕ – угол падения, ϕ_1 – угол, ϕ' – угол отражения.



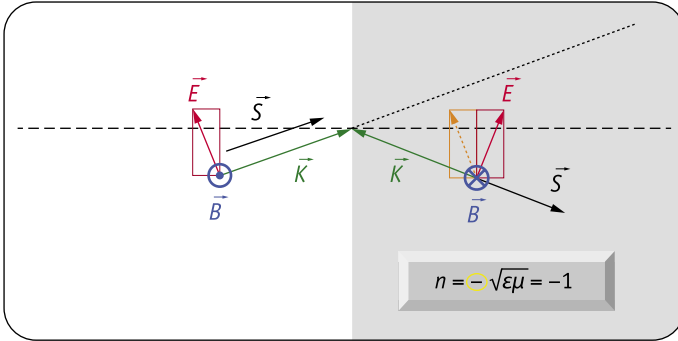


Рис. 4.
Преломление света на границе воздуха и среды с показателем преломления $n = -1$. В воздухе волновой вектор \vec{k} сонаправлен с вектором Пойтинга, в среде с $n < 0$ волновой вектор направлен в противоположную сторону.

падения света, пришедшего из среды с показателем преломления n_1 , а φ_1 – угол преломления света в среде с показателем преломления n_2 . 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. 3а). Мандельштам обратил внимание на то, что граничным условиям удовлетворяет также второе решение, при котором преломлённый луч будет направлен под углом φ_1 к нормали так, как это изображено на рис. 3б. Кажется очевидным, пишет Мандельштам, что второе решение не может существовать, потому что свет падает из первой среды во вторую

и таким образом энергия должна распространяться от границы в глубь второй среды. “Но причём здесь направление энергии?” – спрашивает Мандельштам. Направление волны определяется фазовой скоростью, а направление потока энергии – групповой. Таким образом, потребовав, чтобы поток энергии был направлен от границы

внутри второй среды, мы приходим к выводу о необходимости ориентации вектора фазовой скорости во второй среде по направлению к границе. Такая конструкция может показаться очень необычной, хотя не удивительной, замечает Мандельштам, потому что фазовая скорость ничего не говорит о направлении потока энергии. Таким образом, впервые было предсказано и объяснено отрицательное преломление света. (В связи с тем, что перевода с русского языка этой работы не существовало в течение многих лет, на неё до сих пор нет ссылок в зарубежной литературе. Только недавно её основные результаты появились на английском языке в обзоре Аграновича и Гартштейна⁵).

Следующий значительный шаг в изучении этого явления был сделан Сиву-

⁵ Agranovich V.M., Gartstein Yu.N. *Spatial Dispersion and Negative Refraction of Light // Phys. Usp.* 2006. V. 49. P. 1029.

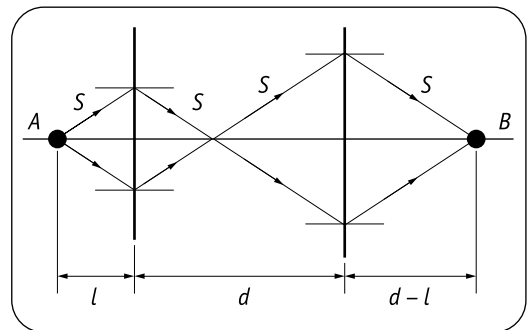


Рис. 5.
Ход лучей (S) в линзе Веселаго: А – источник, В – изображение источника, d – толщина пластины, l – расстояние источника от пластины.

хиним⁶. Записав известные соотношения для плоской монохроматической волны:

$$[\vec{k}\vec{E}] = \frac{\omega}{c}\mu\vec{H}, \quad [\vec{k},\vec{H}] = \frac{\omega}{c}\varepsilon\vec{E},$$

где \vec{k} , \vec{E} и \vec{H} – волновой вектор и векторы напряжённости электрического и магнитного полей, соответственно, ε – диэлектрическая проницаемость, μ – магнитная проницаемость, ω и c – циклическая частота и скорость волны, Сивухин обратил внимание на то, что для $\varepsilon < 0$ и $\mu < 0$ вектор Пойнтинга $\vec{S} = \frac{c}{4\pi}[\vec{E},\vec{H}]$ направлен противоположно вектору \vec{k} , т.е. направление переноса энергии волны противоположно направлению её фазовой скорости (рис. 4⁷).

Это достаточно тонкое обстоятельство ранее оставалось незамеченным, возможно, из-за того, что волновое уравнение сохраняет свой вид при одновременной замене знаков ε и μ противоположными.

Важным шагом в изучении отрицательной рефракции (преломления) стала работа Виктора Георгиевича Веселаго, выдвинувшего гипотезу о существовании материалов с отрицательным показате-

лем преломления⁸, где были обобщены результаты, полученные ранее, и кроме того, впервые введено понятие “леворуких” (или “левых”) и “праворуких” сред. Праворукие (обычные) среды – это среды, где \vec{E} , \vec{H} и k образуют правую тройку, леворукие – левую тройку. Там же было предложено замечательное устройство, позднее получившее наименование “линзы Веселаго”. Это устройство представляет собой пластину толщиной d , которая должна быть изготовлена из “левого” вещества с $\varepsilon = -1$ и $\mu = -1$, т.е. из вещества, имеющего коэффициент преломления $n = -1$. Геометрия этого устройства изображена на рис. 5.

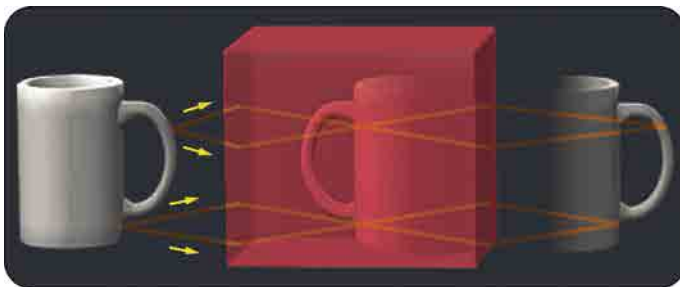
Так как преломление отрицательно, изображение источника фокусируется в двух точках: одна – внутри слоя левого вещества, другая – вне его на расстоянии $d - l$ от правого края пластины. Таким образом, В.Г. Веселаго показал, что плоский слой вещества с отрицательными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей ($\varepsilon = -1$, $\mu = -1$) служит устройством типа линзы, переносящим изображение предмета из одной области пространства в другую. При этом у такой линзы отсутствует фокальная плоскость, и она создаёт объёмное действительное изображение предмета. В связи с тем, что любой луч между объектом и изображением проходит равные пути в обычной и левой средах, набег фазы по любым траекториям между объектом и изображением равен нулю.

Принцип действия линзы Веселаго демонстрирует рис. 6⁹. Прямоугольный брусок из материала с отрицательным

⁶ Сивухин Д.В. Об энергии электромагнитного поля в диспергирующих средах // *Опт. и спектр.* 1957. Т. 3. Вып. 4. С. 308.

⁷ Радковская А.А., Прудников В.Н., Захаров П.Н., Бабушкин А.К., Королёв А.Ф., Сухоруков А.П. Волны в магнитных метаматериалах с сильным взаимодействием между элементами. Супер-линза. Специальный физический практикум. Физфак МГУ. 2009. <http://magn.ru/Rus/prak/PrakMetamaterials.pdf>

Рис. 6.
Принцип действия линзы Веселаго.



⁸ В.Г. Веселаго, Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ε и μ // *Успехи физических наук.* – 1967. – Т. 92. – С. 517–532; Veselago V.G. *Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Electrical and Magnetic Permeabilities* // *Sov. Phys. Usp.* 1968. V. 10. P. 509.

⁹ <http://photonics.phys.msu.ru/Materials/LevkinaMeta.pdf>

показателем преломления образует суперлинзу. Лучи света (жёлтые линии) от объекта (слева) преломляются на поверхности линзы и снова сходятся, формируя зеркальное изображение внутри бруска. Выходя из него, свет преломляется снова и создаёт второе изображение (справа).



Рис. 8.
Механизм возбуждения токов в метаматериале под действием внешней электромагнитной волны: в матрице проводников электрическое поле волны возбуждает линейные токи (красные стрелки), в кольцах с разрезами (резонаторах) магнитное поле возбуждает круговые токи.

К сожалению, эти свойства на тот момент не были экспериментально подтверждены, поскольку не было примеров реализаций соответствующей метасреды. Вместе с тем, работы Л.И. Мандельштама, Д.В. Сивухина и В.Г. Веселаго намного опередили своё время. Прошли десятки лет после опубликования их работ до возникновения “большого взрыва” публикаций по метаматериалам, инициированного статьёй английского физика-теоретика Джона Пендри (John Brian Pendry)¹⁰, в которой было предложено использовать конкретные искусственно

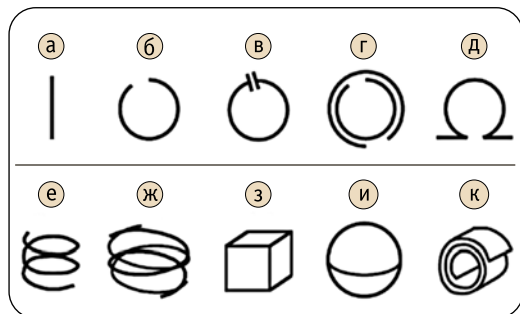
созданные материалы особой конструкции, обладающие отрицательными эффективными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей.

Отметим, что начиная с 1990 г., композиты с отрицательными значениями диэлектрической проницаемости, а с 1993 г. – и магнитной проницаемости изучались и изготавливались в России, в Институте теоретической и прикладной электродинамики РАН (ИТПЭ РАН)^{11 12}. Эти композиты использовались для создания так называемых искусственных магнетиков и радиопоглощающих материалов (РПМ) со специальными свойствами (малый вес, термостойкость, заданный частотный диапазон работы и т.д.).

В основе разработок по искусственным магнитодиэлектрикам лежит идея о том, что электромагнитный отклик материала можно “конструировать”, создавая специальным образом макроскопические структуры из крошечных элементов. Когда мы говорим об обычных

¹⁰ Pendry J.B. Negative Refraction Makes a Perfect Lens // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 85. P. 3966.

Рис. 7.
Разнообразные включения, используемые для создания метаматериалов:
а – проволока, б – разрезанное кольцо, в – кольцо с электрической ёмкостью, г – двойное разрезанное кольцо, д – Ω -включение, е – спираль, ж – бифилярная спираль, з – сегнетоэлектрический куб, и – сегнетоэлектрический шар, к – рулет.



¹¹ Электрофизические свойства перколяционных систем/ Под редакцией Лагарькова А.Н.// М.: ИВТАН.1990. С. 118.

¹² Lagarkov A.N., Sarychev A.K., Smychkovich Y.R. and Vinogradov A.P. Effective Medium Theory For Microwave Dielectric Constant and Magnetic Permeability of Conducting Stick Composites // J. Electromagn. Waves and Appl. 1992. V 6. № 9. P. 1159.

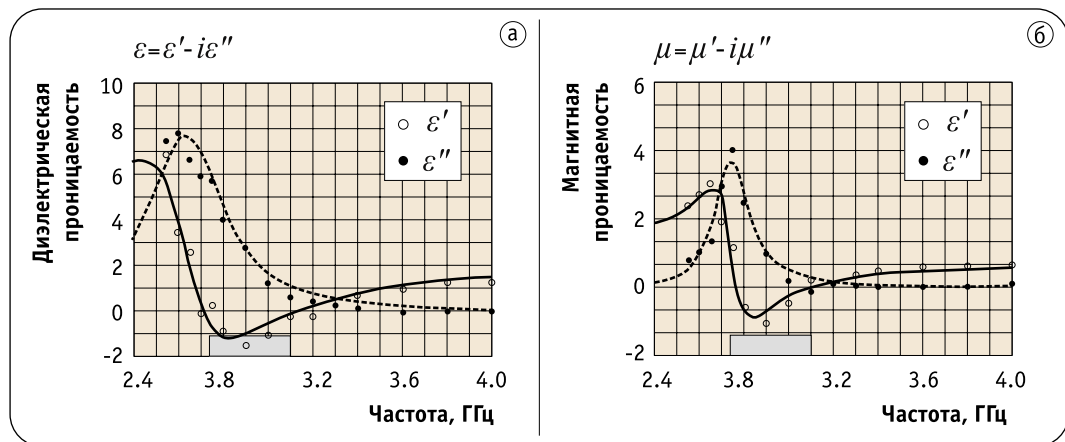
материалах, то обычно имеем в виду, что длина электромагнитной волны на несколько порядков больше размеров атомов или молекул. Волна "видит" не отдельную молекулу или атом, а испытывает коллективную реакцию множества частиц. Это справедливо и для метаматериалов, элементы которых тоже значительно меньше длины волны. На рис. 7 представлены различные виды включений, используемых для получения тех или иных метаматериалов, а рис. 8 демонстрирует механизм возбуждения токов во включениях. Падающая электромагнитная волна воздействует на электроны металлических включений, возбуждая в них переменный ток, который в свою очередь порождает переменное электромагнитное поле. Каждое включение начинает работать как колебательный контур с собственной частотой колебаний. Если частота падающей электромагнитной волны превышает собственную частоту колебаний включений, может возникнуть ситуация, когда суммарное электромагнитное поле включений будет направлено против действия падающей волны. В этом случае в среде возникает обратная волна. При этом характерный размер включений должен быть сравним или быть меньше длины волны излучения, используемого при работе с этим материалом. В случае, когда размеры отдельного структурного элемента материала существенно меньше длины волны излучения, материал может



Рис. 9.
Экспериментальный образец метаматериала, изготовленного из спиралей.

рассматриваться как квазиоднородный. В этом случае применимы методы теории эффективной среды, в которых материал, так же, как и однородный, характеризуется своими диэлектрической проницаемостью ϵ и магнитной проницаемостью μ . Подбирая форму, размер и структуру единичного элемента, образующего материал, можно получить резонансные особенности в частотных спектрах ϵ и μ . В частности, можно получить метаматериал, обладающий

Рис. 10.
Эффективные диэлектрическая (а) и магнитная (б) проницаемости метаматериала, изготовленного из спиралей.



одновременно отрицательными ϵ и μ . При взаимодействии с таким метаматериалом электромагнитная волна испытывает отрицательное лучепреломление на границе с двух сред.

Идея **сочетания форм** различных разновидностей элементарных антенн, которую позднее опубликовал¹³ и запатентовал¹⁴ Дэвид Смит вместе с коллегами из Калифорнийского университета в Сан-Диего, позволила в 2000 г. его исследовательской группе впервые целенаправленно создать материал, обладающий в сантиметровом диапазоне электромагнитных волн (4.2–4.6 ГГц) отрицательным коэффициентом преломления. Этот метаматериал (композит) состоял из диэлектрической основы, в которой располагалось множество медных стержней и разрезных колец, расположенных в строгом геометрическом порядке. Стержни, по сути, являлись антеннами, взаимодействующими с электрической компонентой электромагнитного поля, а разрезные кольца – антеннами, реагировавшими на магнитную составляющую. Основные размеры всех элементов и расстояние между ними были меньше длины волны, а вся система в целом обладала отрицательными эффективными значениями ϵ и μ . Результаты прямого измерения угла преломления для призмы, изготовленной из данного композита, убедительно показали, что преломление электромагнитной волны на границе такой композитной среды и свободного пространства подчиняется закону Снеллиуса с отрицательным значением коэффициента преломления n .

Метаматериал может быть построен и из включений универсального типа (например, спиралей), которые взаимодействуют как с электрической, так и с магнитной компонентой поля, в зависимости от пространственной ориентации.

Пример такого композита, созданного в ИТПЭ РАН¹⁵, показан на рис. 9.

В этой конструкции не требуется совмещения резонансных частот включений различных типов (например, штырей и колец), и поэтому изначально гарантируется совпадение частот электрического и магнитного резонанса, следовательно, отрицательные значения диэлектрической и магнитной проницаемостей реализуются в одной и той же полосе частот (рис. 10).

В своей работе Джон Пендри показал также, что линза Веселаго обладает ещё более замечательным свойством: она может создавать изображение источника без обычных искажений на масштабе длины волны. Из общего курса физики хорошо известно, что с помощью оптической системы невозможно различить между собой два предмета, если они находятся друг от друга на расстоянии, меньшем длины волны наблюдения. Именно поэтому при исследовании микромира и создании микрообъектов специалисты вынуждены переходить на всё меньшие длины волн, что необычайно удорожает стоимость оборудования. Причина этого ограничения объясняется следующим. Излучение электромагнитного источника, разложенное по полному спектру пространственных **фурье-гармоник**, состоит из распространяющихся и экспоненциально затухающих волн. Для того, чтобы передаточная функция оптической системы была равна 1 (а только тогда образ предмета будет передан без искажения), оптическая система должна собрать все пространственные фурье-гармоники. Однако в пространстве, заполненном веществом с любыми положительными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей, затухающие волны не доходят до приёмника, и часть информации о наблюдаемом объекте всегда теряется. Иначе происходит в среде с отрицательными значениями ϵ и μ . Те волны, которые экспоненциально затухают

¹³ D.R. Smith et al. *Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity – Physical Review Letters*, Vol. 84, N18, 1 May 2000, p. 4184–4187. – [http://people.ee.duke.edu/~drsmith/pubs_smith_group/Smith_PRL_84_4184_\(2000\).pdf](http://people.ee.duke.edu/~drsmith/pubs_smith_group/Smith_PRL_84_4184_(2000).pdf).

¹⁴ USA Patent № 6791432B2.

¹⁵ A.N. Lagarkov, V.N. Semenenko, V.N. Kisel and V.A. Chistyayev: *J. Magn. Magn. Mater.* Vol. 238–239 (2003), p. 161

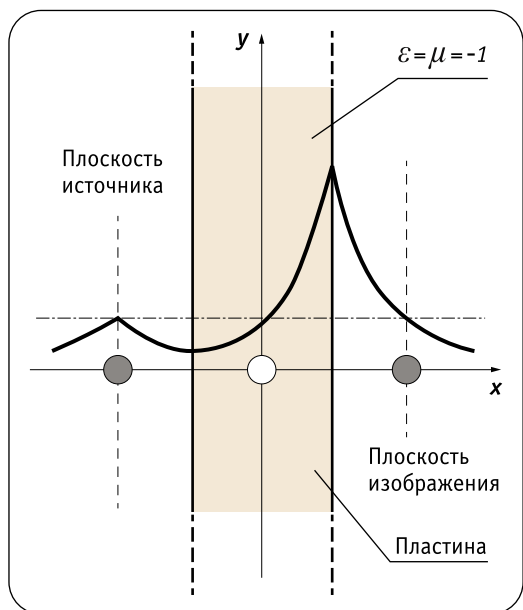


Рис. 11.
Распределение амплитуды одной из затухающих пространственных гармоник поля нитевидного источника.

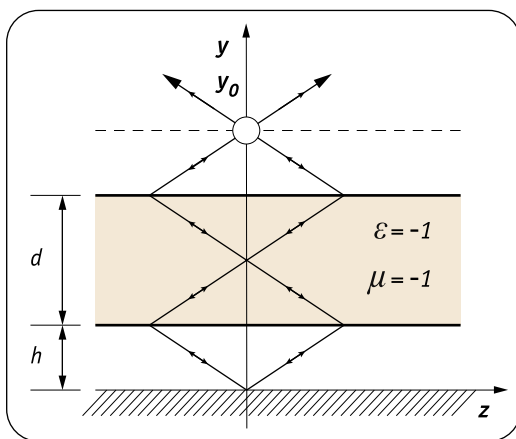
в обычных оптических материалах и средах, здесь резонансным образом усиливаются. В качестве такой среды с отрицательным значением диэлектрической проницаемости Дж. Пендри предложил плёнку серебра, у которого значение ϵ в оптическом диапазоне отрицательное. В этом случае на границе между плёнкой и вакуумом может распространяться поверхностная волна, и возникают условия **плазмонного резонанса**¹⁶, при котором

¹⁶ Плазмоны это квазичастицы, возникающие в проводниках за счёт колебаний электронов проводимости относительно кристаллической решетки. Плазмоны играют большую роль в оптических свойствах металлов. Свет с частотой ниже плазмонной частоты отражается, потому что электроны в металле экранируют электрическое поле в световой электромагнитной волне. Свет с частотой выше плазмонной проходит, потому что электроны не могут достаточно быстро ответить, чтобы экранировать его. В большинстве металлов, плазмонная частота находится в ультрафиолетовой области спектра, делая их блестящими в видимом диапазоне. По аналогии с обычными (или объёмными) плазмонами в теории вводится понятие поверхностных плазмонов. Областью

колебания электронов в проводящем слое поддерживаются внешним электромагнитным полем. Расчёты показали, что тонкий слой с отрицательными ϵ и μ начинает работать как резонатор для затухающих волн (рис. 11).

их локализации является поверхность металлов, где локализованы поверхностные заряды. Представим себе призму, одна из поверхностей которой будет покрыта плёнкой металла (серебра или золота). Если плёнка имеет значительную толщину, то энергия падающего света будет поглощаться в объёме плёнки и переизлучаться в обратном направлении, т.е. плёнка будет служить зеркалом. В случае если толщина плёнки достаточно мала, часть электромагнитной волны достигнет её внешней поверхности. Если энергия электрического поля фотонов будет достаточно велика, то они будут взаимодействовать со свободными электронами на поверхности золота. Часть фотонов при этом поглотится, передавая свою энергию поверхностным плазмонам, что приведёт к уменьшению интенсивности отражённого света. Поверхностный плазмонный резонанс возникает при условии равенства импульсов поверхностного плазмона и компоненты вектора импульса фотона, параллельной плоскости плёнки. Импульс плазмона зависит от процессов, протекающих на поверхности плёнки, например, адсорбции на нём различных биомолекул. Импульс фотона в свою очередь зависит от угла падения и его энергии, то есть длины волны.
http://www.ckp.gene.ru/left/poverhnostnyyi_plazmonnyy_rezonans/

Рис. 12.
Лучевая схема эффекта поглощения энергии всенаправленного источника в полупространстве.



В результате линза Веселаго даёт изображение, качество которого не ограничено дифракционным пределом (достигается “сверхразрешение”), в связи с чем её часто называют “суперлинзой”.

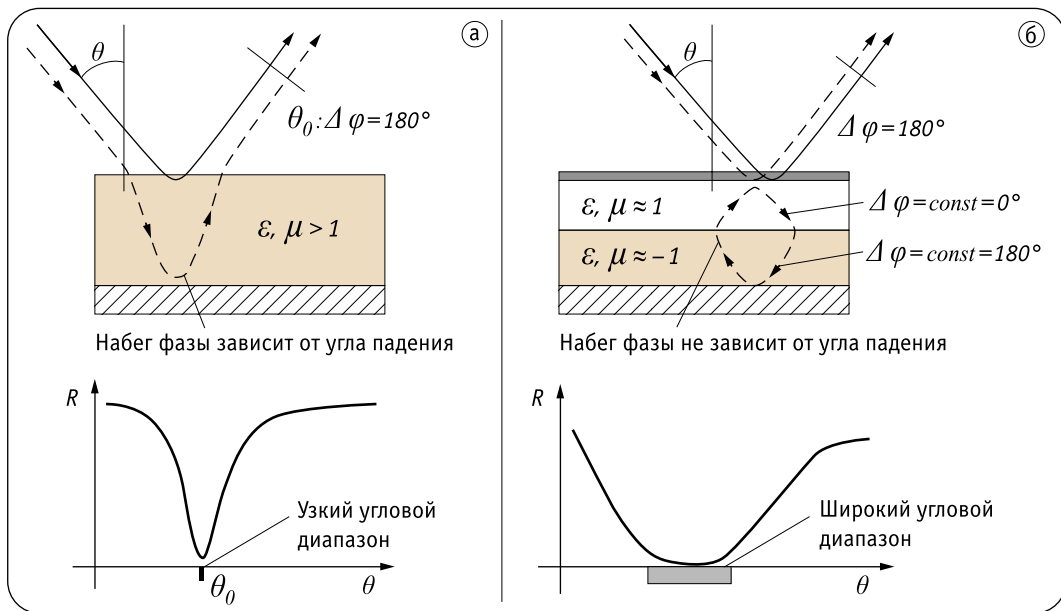
Первый эксперимент, демонстрирующий сверхразрешение, был выполнен в 2003 г. в Институте теоретической и прикладной электродинамики РАН.¹⁷ Между двумя нитевидными источниками излучения и приёмником помещалась плоская тонкая пластина, выполненная из вещества с отрицательными значениями ϵ и μ в области частот 1.7 ГГц. Расстояние между источниками составляло величину $\lambda/6$, где λ –

длина волны излучения в свободном пространстве. Без пластины метаматериала приёмник регистрировал один размытый максимум электромагнитного поля. То же самое наблюдалось вне полосы частот, соответствующей отрицательным значениям ϵ и μ . Измерения электромагнитного поля в полосе частот, где $\epsilon < 0$, $\mu < 0$, показали два чётко различимых максимума поля, что убедительно демонстрировало эффект сверхразрешения. Одним из важных и, на первый взгляд, неожиданных результатов этой работы стала возможность значительного уменьшения **апертуры линзы Веселаго** для получения сверхразрешения. Даже для поперечника линзы порядка $\lambda/3$ качество разрешения практически не менялось, что открывало широкие перспективы для различных приложений.

Для развития нанотехнологий принципиальным является достижение сверхразрешения в инфракрасном и оптическом диапазонах длин волн. Плазмонный резонанс на поверхности плёнки из серебра может значительно улучшить воспроизведение в процессе фотолитографии. Однако качественное продвижение может быть достигнуто, если

¹⁷ Lagarkov A.N., Kissel V.N. // Proc. Symp. F. Electromagnetic Materials Int. Conf. on Materials for Advanced Technologies 2003 (ICMAT-2003). Singapore: World Scientific Publishing Co., 2003. P. 157; Lagarkov A.N., Kissel V.N. // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 92. № 7. P. 077401.

Рис. 13.
Схематическое описание функционирования обычного радиопоглощающего интерференционного покрытия (а) и покрытия, основанного на метаматериале (б).



только удастся создать вещество с отрицательными значениями диэлектрической и магнитной проницаемости в оптическом диапазоне, которые будут обладать при этом и малыми потерями. В терагерцевой области спектра это удалось сделать благодаря использованию композита с резонансными включениями типа разомкнутых колец, однако в инфракрасном или оптическом диапазоне длин волн такой путь создания искусственного магнетизма сопряжён со значительными технологическими и принципиальными трудностями.

С другой стороны, потери, присущие метаматериалам, можно с успехом использовать, создавая эффективные поглотители электромагнитной энергии (радиопоглощающие материалы, РПМ). Именно в области с отрицательными значениями ϵ и μ РПМ может иметь совершенно удивительные свойства. Например, с применением метаматериала можно построить такую пассивную систему, которая обеспечивает *полное* гашение (компенсацию) поля всенаправленного источника повсюду в целом полупространстве (например, в верхнем полупространстве $y > y_0$, рис. 12^{18,19}).

Разместив между источником (т. y_0 , рис. 12) и проводящей плоскостью пластину из метаматериала (линзу Веселаго), можно поместить изображение источника непосредственно на поверхность плоскости. Если теперь вычислить набег фаз лучей с учётом того, что фазовая скорость волны в пластине отрицательна, а при отражении от металла фаза поля изменяется на противоположную, получим, что в области $y > y_0$ происходит взаимная компенсация первичного и вторичного полей. В идеальном случае, когда потери в системе исчезающе малы, полное поле в верхнем полупространстве стремится к нулю. Строгое решение соответствующей граничной задачи приводит к такому же заключению. Более

того, расчёты показали, что и в случае реального метаматериала с потерями (например, при $\epsilon = \mu = -1 - i0.1$ и толщине слоя $\lambda/12$) основная доля энергии (порядка 99%), переносится в область $y < y_0$ и там поглощается. Но если потери малы, то в этой области создаются высокие концентрации электромагнитной энергии, и поэтому с помощью метаматериалов можно создать открытые резонаторы нового типа, без типичных ограничений на геометрическую толщину системы.

На основе подобных структур можно создавать и РПМ с особыми свойствами, например, с широким угловым диапазоном работы.

Рассмотрим рис. 13а, который качественно объясняет работу обычного интерференционного материала с $\epsilon > 1$ и $\mu > 1$. Толщина материала должна быть выбрана таким образом, чтобы волна, отражённая от внешней поверхности материала (сплошная линия), была противофазна волне, прошедшей через слой и отражённой от металла.

При этом амплитуды волн должны быть близки друг к другу для обеспечения минимума коэффициента отражения. Набег фазы зависит, в частности, от толщины материала. Будем считать частоту падающей волны постоянной величиной. Если угол падения волны изменяется, то при использовании обычного материала набег фазы зависит от этого угла, что приводит к узкому угловому диапазону работы материала.

Рассмотрим теперь диаграмму, показанную на рис. 13б. Метаматериал состоит из тонкой полупрозрачной магнитной плёнки и двух слоёв одинаковой толщины с $\epsilon \approx \mu \approx 1$ и $\epsilon \approx \mu \approx -1$. В этом случае суммарный набег фазы в слое не зависит от угла падения волны вследствие взаимной фазовой компенсации, вызванной отрицательной фазовой скоростью обратной волны в слое метаматериала. Соответственно, коэффициент отражения слабо зависит от угла падения волны до тех пор, пока сохраняются требуемые амплитудные соотношения волн. Кроме того, нет принципиальных физи-

¹⁸ Kisel V.N., Lagarkov A.N. // Phys. Rev. E. 2007. V. 76. № 6. P. 065601

¹⁹ Lagarkov A.N., Kisel V.N., Semenenko V.N. // Progress in Electromagnetics Research Lett. 2008. V. 1. P. 35

ческих ограничений и на толщину поглотителя такой конструкции.

Полученные на сегодняшний день результаты показывают, что РПМ на основе метаматериалов могут иметь ряд преимуществ по сравнению с обычными материалами, включая малый вес, значительную конструктивную гибкость. В частности, можно создать искусственные композитные материалы с хорошим поглощением благодаря достаточно высоким диэлектрическим и магнитным потерям; кроме того, материалы могут обеспечить низкое отражение, если выбрать эффективные ϵ и μ таким образом, чтобы входной импеданс²⁰ материала был близок к импедансу свободного пространства. Важно, что фазовые соотношения в поглощающем материале обеспечены свойствами метаматериала, в котором распространяется обратная волна, а не большими толщинами согласующих слоёв поглощающего материала традиционного типа.

Метаматериалы открывают новые возможности для разработки различных СВЧ и оптических устройств, таких как фокусирующие системы, нанолазеры, поглотители, резонаторы и многие другие устройства. Разработка новых электромагнитных материалов, начинающаяся с конструирования элементарной ячейки с заранее заданными свойствами, которые могут и не встречаться в природе – это новая технология, открывающая широкие перспективы. Спектр потенциальных применений метаматериалов простирается от уникальных датчиков комбинационного рассеяния, антенн и отражателей с особыми свойствами до создания поглотителей и экранов электромагнитного излучения (в популярной литературе – шапок- и ковров-невидимок). Более того, в последнее время получили развитие работы по созданию и исследованию механических (например, акустических) метаматериалов, ведь все эффек-

ты, описанные выше применительно к электромагнитным метаматериалам, имеют свои аналоги в структурах из акустических метаматериалов-композигов. Объясняется это тем, что существует очень близкая аналогия между уравнениями акустики и системой уравнений Максвелла, которые в 2-мерном случае даже записываются одинаково, с точностью до обозначений. Близкие аналогии существуют и в гидродинамике (аналог электрического тока, реализуемого в проводах, представляет собой поток, создающий вокруг себя течение некоторой жидкости, аналог электрического поля представляет собой ускорение некоторого течения, а аналог магнитной индукции – частоту некоторого вращательного движения этой жидкости, разложение уравнений для сохранения импульса и массы по возмущениям приводит к волновым уравнениям, также аналогичным уравнениям Максвелла для распространения электромагнитных волн и т.д.²¹). Однако, несмотря на весь прогресс, достигнутый в экспериментальных и теоретических исследованиях, к настоящему моменту коммерчески успешным продуктом оказались, пожалуй, лишь радиопоглощающие метаматериалы и некоторые СВЧ устройства, использующие композиты с отрицательными ϵ и μ . Впрочем, многие интересные результаты и приложения, относящиеся к оптическому (инфракрасному и видимому) диапазону находятся на самом пороге успешного внедрения в практику. Тем не менее, физика метаматериалов очень интересна не только благодаря своим захватывающим потенциальным приложениям, но и сама по себе, как пример до конца ещё не реализованной возможности открыть удивительные явления в той области науки (классическая макроскопическая электродинамика), где, казалось бы, всё давным-давно исследовано и систематизировано.

²⁰ Импеданс (англ. *impedance*, от лат. *impedio* – препятствую) (комплексное сопротивление) – аналог электрического сопротивления для гармонических процессов.

²¹ В.Л. Бычков. О гидродинамических аналогиях между уравнениями классической гидродинамики и электродинамики в электрохимии // *Химическая физика*. 2014, том 33, № 3, с. 75–83.