



«ЛЕВЫЕ» СРЕДЫ. ЧЕМ ОНИ ИНТЕРЕСНЫ?

Ю.П. Шараевский

В лекции освещены некоторые вопросы, широко обсуждаемые в последние годы и связанные с распространением электромагнитных волн в средах с одновременно отрицательными значениями диэлектрической ϵ и магнитной μ проницаемостями («левые» среды). Описываются необычные свойства таких сред, в частности, обусловленные наличием отрицательного коэффициента преломления. Обсуждаются также возможности создания метаматериалов с отрицательными значениями ϵ и μ и реализация новых физических идей с использованием «левых» сред, в том числе создание «идеальных» суперлинз.

Ключевые слова: Метаматериалы, «левая» среда, отрицательный коэффициент преломления, «идеальная» линза.

Введение: что представляют собой «левые» среды?

Одним из приоритетных направлений в науке сегодняшнего дня является создание искусственных материалов с необычными свойствами, которые не наблюдаются у природных материалов. Они получили название метаматериалы и представляют собой искусственно сконструированные структуры, состоящие из отдельных микро- и наноразмерных слоев с различными свойствами или объемных элементов (частиц) [1]. Например, в оптике они получили название фотонные кристаллы (одномерные, двумерные, трехмерные) [2]. Эти фотонные кристаллы уже сейчас, в отличие от природных кристаллов, демонстрируют удивительные свойства и начинают использоваться в оптических устройствах, в линиях связи и т.д. Активно в последние годы предпринимаются также и попытки сконструировать материалы, которые можно рассматривать как «левые» среды. Так что же представляют из себя «левые» среды?

В изотропной среде, свойства которой не зависят от направления, связь между параметрами электромагнитной волны (фазовой скоростью V_ϕ , длиной волны λ и частотой ω) определяется следующим соотношением:

$$k^2 = \frac{\omega^2}{V_\phi^2} = \frac{\omega^2}{C^2} \cdot \epsilon\mu, \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, C – скорость света в вакууме, а ϵ и μ – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды, соответственно.

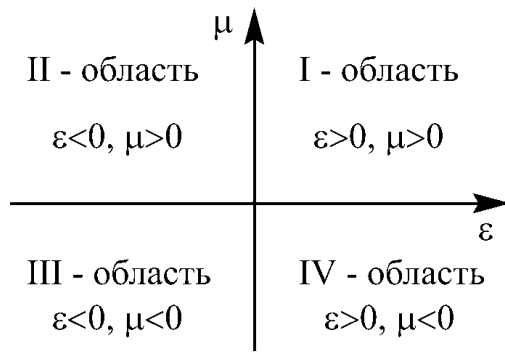


Рис. 1. Диаграмма $\varepsilon - \mu$

положителен. Если не учитывать потери в среде и считать, что ε и μ – действительные величины, то из соотношений (1) и (2) видно, что одновременная смена знаков ε и μ ($\varepsilon, \mu < 0$) не меняет эти соотношения.

Учитывая этот факт, можно высказать следующие предположения: 1) свойства веществ действительно не зависят от одновременной смены знаков ε и μ ; 2) одновременная смена знаков противоречит основным законам природы и таких веществ в природе не должно быть; 3) вещества с $\varepsilon < 0$ и $\mu < 0$ имеют право на существование и они должны обладать какими-то особыми свойствами. Именно эту последнюю гипотезу свыше 40 лет назад в 1967 году высказал советский ученый В.Г. Веселаго [3]. Такие вещества были названы им «левыми» (смысл этого термина мы поясним ниже). В зарубежной литературе они получили название *left-handed medium*. В работе [3] В.Г. Веселаго описал многие необычные свойства «левых» веществ, в частности, показал, что такие вещества должны обладать отрицательным показателем преломления, то есть в (2) для «левых» сред нужно брать знак «–». Кроме того, он высказал предположение, что искать ««левые»» вещества нужно среди анизотропных гиротропных сред¹. Поясним смысл предположение Виктора Георгиевича следующей иллюстрацией. Представим диаграмму, по осям которой будем откладывать действительные значения ε и μ (рис.1).

Если разместить на этой диаграмме все известные нам среды, то получится следующая картина [3]: область I – большинство изотропных диэлектриков, для которых ε и μ положительны; область II – это газообразная плазма и плазма твердых тел, для которых без магнитного поля величина ε определяется как

$$\varepsilon = 1 - \sum \frac{\omega_0^2}{\omega^2}, \quad (3)$$

где $\omega_0 = (4\pi N e^2 / m)^{1/2}$ – плазменная частота (N – концентрация носителей заряда, m – их масса, e – заряд), а суммирование проводится по всем типам носителей заряда. Из (3) видно, что при $\omega < \omega_0$ (на малых частотах) $\varepsilon < 0$. Примером такой среды является ионосфера, от которой отражаются электромагнитные волны низких частот.

¹Анизотропными называются среды, свойства которых зависят от направления (кристаллы, ферромагнитные материалы и др.). Если анизотропия вызвана приложением внешнего воздействия (например, механического, приложением электрического и магнитного полей), то такие среды называются гиротропными [4].

Для вакуума $\varepsilon = \mu = 1$, а для всех остальных веществ, встречающихся в природе, $\varepsilon, \mu > 0$. Оптические свойства вещества характеризуются показателем преломления n , который связан с ε, μ простым соотношением:

$$n = \pm \sqrt{\varepsilon \mu}. \quad (2)$$

Для всех известных материалов перед квадратным корнем должен стоять знак «+» и поэтому показатель преломления

В областях III и IV изотропных веществ с $\mu < 0$ не существует. Однако в анизотропных гиротропных средах, для которых ε и μ не являются скалярными величинами, а зависят от направления и представляются в виде тензоров, компоненты тензоров ε и μ могут иметь любой знак. В частности, для некоторых типов волн, распространяющихся в определенных направлениях, ε и μ могут быть действительными величинами и отрицательными. Хорошо известными примерами таких сред являются: 1) плазма в магнитном поле, для которой при распространении в направлении постоянного магнитного поля плоской поперечной волны, поляризованной по кругу, может быть $\varepsilon < 0$, а $\mu > 0$ (этот случай относится к области II); 2) различные магнетики в постоянном магнитном поле, для которых может быть $\varepsilon > 0$ и $\mu < 0$ (этот случай относится к области IV).

В настоящее время большой интерес вызывают также вещества, у которых тензорный характер носят одновременно ε и μ . К таким веществам относятся, например, чистые ферромагнитные металлы и полупроводники. В них при распространении определенного типа волн вдоль направления приложенного внешнего магнитного поля эффективные электрическая и магнитная проницаемости могут одновременно принимать отрицательные значения. Такие вещества, по гипотезе В.Г. Веселаго, нужно отнести к области III на рис. 1, то есть к «левым» средам.

Но резкий всплеск интереса к «левым» средам возник лишь в самом конце XX века, когда были предприняты первые попытки по созданию искусственных материалов со свойствами, предсказанными В.Г. Веселаго для «левых» сред. В 2000 году англичанин Дэвид Смит вместе с коллегами из Калифорнийского университета (Сан-Диего, США) изготовили метаматериал с отрицательным показателем преломления и опубликовали результаты экспериментального исследования [5].

Почему же так интересны «левые» среды? На этот вопрос мы и постараемся ответить ниже.

1. Основные электродинамические соотношения для «правых» и «левых» сред

Для вывода основных соотношений, описывающих распространения волн в среде, необходимо использовать уравнения Максвелла и соотношения, характеризующие свойства среды $\mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H}$, $\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}$, где \mathbf{B} , \mathbf{H} , \mathbf{D} , \mathbf{E} – вектора индукции и напряженностей магнитных и электрического полей, соответственно; ε_0 , μ_0 – электрическая и магнитная постоянные. Представим электрическую и магнитные проницаемости среды в виде $\varepsilon = p |\varepsilon|$, $\mu = p |\mu|$, где коэффициент $p = \pm 1$ [3].

Предположим, что в среде в направлении оси z распространяется плоская монохроматическая волна, у которой все величины изменяются по закону $\exp(i(\omega t - kz))$. Используя уравнения Максвелла и приведенные выше соотношения, для такой волны можно получить следующие выражения, описывающие связь между \mathbf{E} , \mathbf{H} и волновым вектором \mathbf{k}^2 :

$$[\mathbf{k} \mathbf{E}] = \omega \mu_0 p |\mu| \mathbf{H}, \quad [\mathbf{k} \mathbf{H}] = -\omega \varepsilon_0 p |\varepsilon| \mathbf{E}. \quad (4)$$

Расположение векторов \mathbf{k} , \mathbf{E} и \mathbf{H} представлено на рис. 2.

²Вектор $\mathbf{C} = [\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}]$ означает векторное произведение двух векторов \mathbf{A} и \mathbf{B} , причем вектор \mathbf{C} перпендикулярен плоскости, в которой лежат вектора \mathbf{A} и \mathbf{B} , и вместе все три вектора \mathbf{A} , \mathbf{B} и \mathbf{C} образуют правую тройку векторов.

Из соотношений (4) видно, что при $p = +1$ ($\epsilon, \mu > 0$), векторы \mathbf{k} , \mathbf{E} и \mathbf{H} образуют правую тройку векторов: если вращать ручку буравчика от \mathbf{k} к \mathbf{E} , то буравчик будет двигаться в направлении вектора \mathbf{H} (рис. 2, *a*). Если $p = -1$ ($\epsilon, \mu < 0$), то векторы \mathbf{k} , \mathbf{E} и \mathbf{H} образуют левую тройку векторов: буравчик движется в противоположную сторону от направления вектора \mathbf{H} (рис. 2, *б*). Таким образом, если $p = +1$, то среду можно назвать «правой», а при $p = -1$ – «левой» [3].

Поток энергии, переносимый электромагнитной волной, определяется вектором Умова–Пойтинга \mathbf{S} , который записывается как

$$\mathbf{S} = [\mathbf{E} \mathbf{H}] = w \mathbf{V}_{\text{гр}}, \quad (5)$$

где w – плотность энергии электромагнитной волны; $\mathbf{V}_{\text{гр}} = \partial\omega/\partial\mathbf{k}$ – групповая скорость, то есть скорость переноса энергии.

Таким образом, волна, распространяясь в среде, имеет две скорости – фазовую $V_{\text{ф}}$ и групповую $V_{\text{гр}}$. Чтобы понять их смысл, представим себе импульс электромагнитной волны, движущийся в среде (рис. 3). Фазовая скорость – это скорость движения фазы волны, например, максимума или минимума колебательного процесса, а групповая скорость – это скорость, с которой движется огибающая импульса. Они не обязательно должны быть одинаковы и направлены в одну сторону.

Из соотношения (5) видно, что вектор \mathbf{S} , а следовательно, и $\mathbf{V}_{\text{гр}}$, образуют с векторами \mathbf{E} и \mathbf{H} всегда правую тройку векторов. Таким образом, для «правых» сред фазовая и групповая скорости всегда направлены в одну сторону (рис. 3, *a*), а для

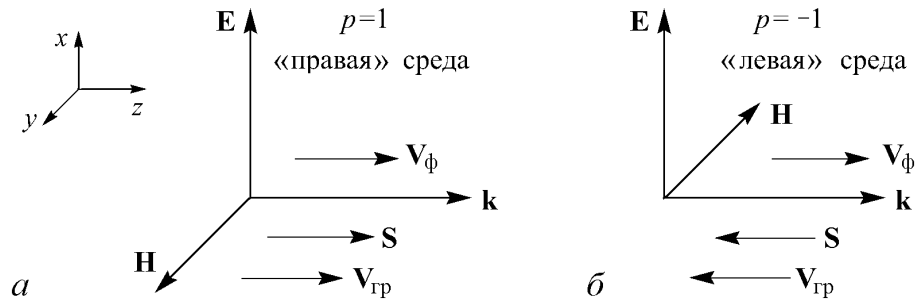


Рис. 2. Направление векторов \mathbf{k} , \mathbf{E} , \mathbf{H} и \mathbf{S} : *a* – для «правой» среды, *б* – для «левой» среды

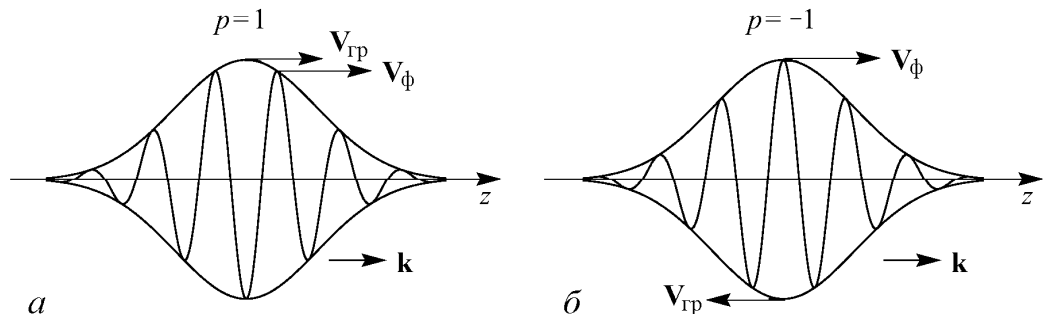


Рис. 3. Импульс электромагнитной волны, распространяющийся в направлении z : *a* – в «правой» среде, *б* – в «левой» среде

«левых» сред вектора $\mathbf{V}_{\text{гр}}$ и $\mathbf{V}_{\text{ф}}$ – в разные стороны (рис. 3, б), то есть это среды с отрицательной групповой скоростью.

Для изотропных сред фазовая и групповая скорости могут быть направлены в разные стороны только при наличии дисперсии в среде, то есть при наличии зависимости величин ε и μ от частоты. Действительно, в дисперсионных средах выражение для плотности электромагнитной энергии должно быть записано в виде [6]

$$w = \frac{1}{2} \left(\varepsilon_0 \frac{\partial(\varepsilon\omega)}{\partial\omega} E^2 + \mu_0 \frac{\partial(\mu\omega)}{\partial\omega} H^2 \right). \quad (6)$$

При $\varepsilon = \text{const}$ и $\mu = \text{const}$ из (6) получаем хорошо известное выражение для плотности энергии в изотропной диэлектрической среде: $w = (1/2) (\varepsilon_0 \varepsilon E^2 + \mu_0 \mu H^2)$, причем $w > 0$ по определению. Поэтому условие $\varepsilon = \text{const}$ и $\mu = \text{const}$ может выполняться только для «правых» сред. Для «левых» сред, если $w > 0$, то необходимо выполнение условий $\partial(\varepsilon\omega)/\partial\omega > 0$ и $\partial(\mu\omega)/\partial\omega > 0$. Эти условия не противоречат отрицательности ε и μ , но требуют соответствующих зависимостей ε и μ от частоты $\varepsilon = \varepsilon(\omega)$ и $\mu = \mu(\omega)$, то есть «левая» среда должна обладать дисперсией.

Рассмотрим теперь некоторые физические следствия, которые вытекают из соотношений (4) и (5) для «левых» сред, когда фазовая скорость противоположна групповой (скорости распространения потока энергии).

Обращенный эффект Доплера. Изменение частоты колебаний вследствие движения источника или приемника называется эффектом Доплера. Пусть приемник излучения В движется со скоростью \mathbf{V} относительно излучателя А, который излучает частоту ω_0 , как показано на рис. 4. В этом случае для частоты, воспринимаемой приемником вследствие доплеровского сдвига, можно записать выражение

$$\omega = \omega_0 \left(1 + p \frac{V}{V_{\text{гр}}} \right). \quad (7)$$

В «левой» среде ($p = -1$) приемник будет догонять точки волны, соответствующие какой-либо определенной фазе (рис. 4, б). Частота, воспринимаемая приемником (см. формулу (3)) будет меньше ω_0 , а не больше, как это должно быть для «правой» среды (рис. 4, а). При этом в формуле (7) скорости \mathbf{V} и $\mathbf{V}_{\text{гр}}$ направлены в разные стороны. Поэтому в «правой» среде удаляющийся от нас объект кажется более красным из-за эффекта Доплера, а в «левой» среде будет казаться более синим.

Световое притяжение. Монохроматическую волну в «левой» среде можно рассматривать как поток фотонов, каждый из которых обладает импульсом $\mathbf{p} = \hbar\mathbf{k}$

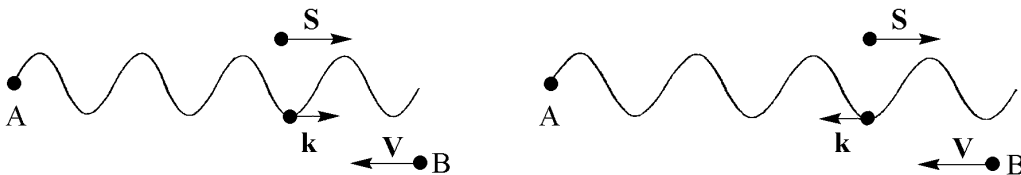


Рис. 4. Эффект Доплера: а – для «правой» среды ($p = +1$); б – для «левой» среды ($p = -1$)

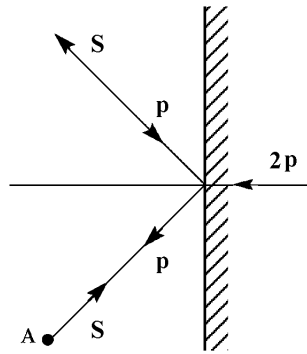


Рис. 5. Отражение луча, распространяющегося в «левой» среде, от идеально отражающей поверхности

(\mathbf{k} – волновой вектор), причем вектор \mathbf{k} направлен к источнику излучения А, а не от него, как это имеет место в «правой» среде (рис. 5). Поэтому луч света, распространяющийся в «левой» среде, при падении на идеально отражающую поверхность будет передавать ей импульс $\mathbf{p} = 2N\hbar\mathbf{k}$ (N – число падающих фотонов), направленный к источнику, как показано на рис. 5. Поэтому световое давление, характерное для обычных сред, в «левой» среде заменяется световым притяжением.

2. Преломление луча на границе с «левой» средой: среда с отрицательным коэффициентом преломления

При переходе света из одной среды в другую на границе раздела двух сред (рис. 6) должны выполняться следующие условия³:

$$E_{t1} = E_{t2}, \quad H_{t1} = H_{t2} \quad (8)$$

– равенство тангенциальных компонент напряженностей электрического и магнитного полей, соответственно;

$$p_1 |\varepsilon_1| E_{n1} = p_2 |\varepsilon_2| E_{n2}, \quad p_1 |\mu_1| H_{n1} = p_2 |\mu_2| H_{n2} \quad (9)$$

– равенство нормальных компонент электрической и магнитной индукции, соответственно.

Из (8) следует, что тангенциальные компоненты полей \mathbf{E} и \mathbf{H} , то есть лежащие в плоскости падения, в падающем и преломленном лучах сохраняют свое направление. Что касается нормальных компонент (см. формулу (9)), то они сохраняют свое направление только тогда, когда среды имеют одинаковый знак ($p_1 = p_2$). Если первая среда «правая» ($p_1 = +1$), а вторая среда «левая» ($p_2 = -1$), то нормальные компоненты полей \mathbf{E} и \mathbf{H} меняют знак.

Это соответствует тому, что при переходе в среду с другим знаком p векторы \mathbf{E} и \mathbf{H} не только изменяются по величине из-за разных значений ε и μ , но еще испытывают зеркальное отражение относительно границы раздела двух сред. Преломленный луч во второй среде («левой») будет идти симметрично относительно оси, перпендикулярной к границе раздела, по сравнению со случаем, когда вторая среда – «правая» (рис. 6). Например, карандаш, погруженный в «левую» среду, будет казаться изогнутым наружу.

³Записанные условия должны выполняться независимо от того «правая» среда или «левая».

Для сред с различными параметрами p обычную формулу Снеллиуса, связывающую углы падения и отражения, следует записать в виде

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \psi} = n_{12} = \frac{p_2}{p_1} \left| \sqrt{\frac{\varepsilon_2 \mu_2}{\varepsilon_1 \mu_1}} \right|. \quad (10)$$

Из (10) видно, что коэффициент преломления двух сред n_{12} может быть отрицательным, если p_2 и p_1 имеют разные знаки.

Необходимо отметить, что на необычные законы преломления волн, для которых фазовая и групповая скорости направлены в разные стороны, впервые обратил внимание академик Л.И. Мандельштам в 1940 году [6]. В этой работе он указывает также на то, что пространственно-периодическая среда (имелась в виду кристаллическая решетка) является примером среды, показатель преломления которой в некотором диапазоне частот может быть отрицательным.

Использование «левых» сред позволяет, в принципе, создать весьма необычные преломляющие системы (см., например, [7–10]). Примером такой среды является простая пластина толщиной d из «левого» вещества с $n < 0$, находящаяся в воздухе. На рис. 7 показано, что такая пластина может фокусировать в точку В излучение точечного источника А, находящегося на расстоянии $l < d$ от пластины.

Такая плоская пластина обладает удивительными свойствами – у нее отсутствует фокальная плоскость. Это означает, что линза создает объемное изображение предмета, что делает ее похожей на зеркало. Но, в отличие от зеркала, создаваемое изображение действительное, что открывает новые возможности для цветной фотографии. Плоско-параллельная пластина с $\varepsilon = \mu = -1$ является «идеальной» линзой («суперлинза» [8]) поскольку: а) она имеет нулевой коэффициент отражения; б) создается идеальное изображение, так как набег фазы по любым траекториям между объектом и изображением равен нулю (любой луч половину пути проходит в обычной, а половину – в идеальной «левой» среде (рис. 7); фазовые скорости в этих средах равны и противоположно направлены, следовательно, набег фаз вдоль участков траектории луча, расположенных в разных средах, компенсируют друг друга;

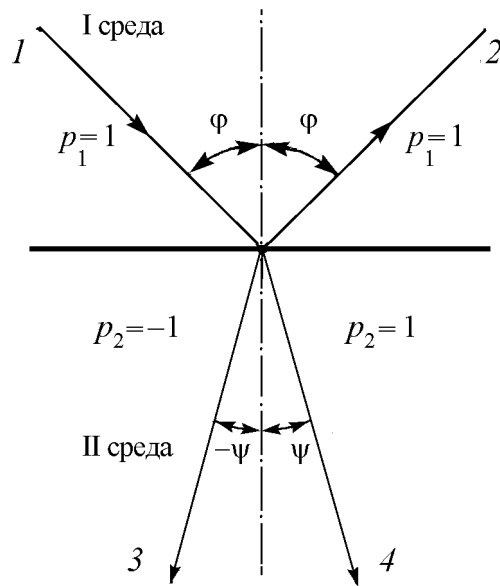


Рис. 6. Прохождение луча через границу двух сред: 1 – падающий луч, 2 – отраженный луч, 3 – преломленный луч при $p_2 = -1$; 4 – преломленный луч при $p = +1$

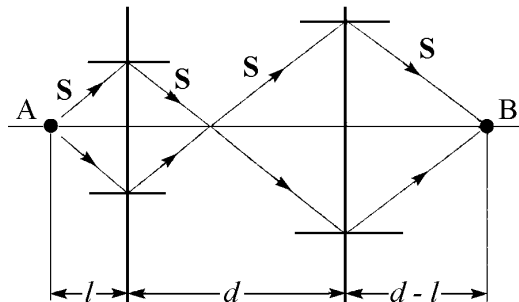


Рис. 7. Прохождение луча света через пластину из левого вещества; А – источник излучения, В – приемник излучения

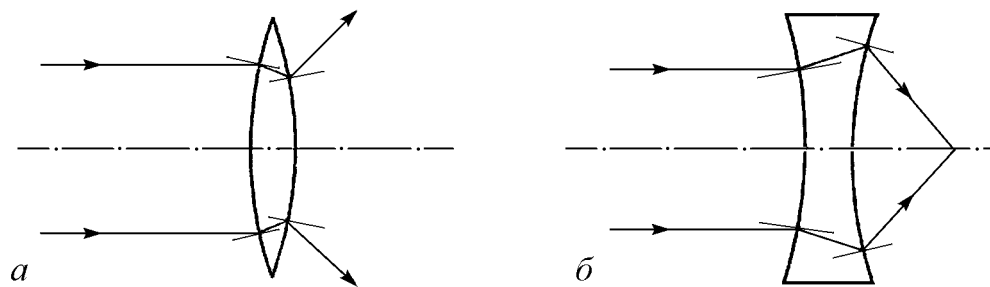


Рис. 8. Ход лучей через линзы из «левого» вещества: *a* – рассеивающая линза; *б* – собирающая линза

в) разрешающая способность такой линзы превышает предел, обусловленный волновой природой света, то есть детали, различимые на изображении, могут быть намного меньше длины волны λ .

Для обычных линз из «левого» вещества ход лучей показан на рис. 8. Как видно из рисунка, выпуклая линза является рассеивающей, а вогнутая – собирающей.

3. Возможность реализации «левых» сред

Несмотря на то, что «левые» вещества должны обладать такими удивительными свойствами, реальная возможность создания таких веществ, как мы уже говорили выше, появилась лишь в последние годы. Начались интенсивные поиски моделирования «левых» сред на основе композитных структур (метаматериалов) путем чередования элементов, обладающих $\epsilon < 0$ и $\mu > 0$, и элементов, обладающих $\epsilon > 0$ и $\mu < 0$. Если размеры таких элементов будут намного меньше длины электродинамической волны λ , то для волны такая композитная структура будет подобна сплошной [5,8,10].

Первые композитные структуры, обладающие в диапазоне сверхвысоких частот ($f = 4.5$ ГГц) свойствами «левого» вещества, были изготовлены путем периодического расположения элементов из проводящего материала на диэлектрической подложке [5], как показано на рис. 9. Трехмерная решетка из тонких прямолинейных проводящих стержней обладает отрицательными эффективными значениями ϵ , а периодическая система из проводящих элементов различных типов (проволочные кольца с разрывом, спирали и т.д.) обладает отрицательными значениями μ . Период решетки, показанной на рис. 9, равен 2.68 мм. В 2004 году Энтони Грбич (Anthony Grbic) и Джордже Элефтериадис (George Eleftheriades) из университета Торонто экспериментально показали, что можно создать метаматериал с $\epsilon = \mu = -1$ в диапазоне сверхвысоких частот [8]. Их результаты доказали, что в принципе «суперлинзу» можно построить. Но можно ли ее создать в оптическом диапазоне длин волн?

Сложность создания метаматериалов с $\epsilon, \mu < 0$ в области оптических длин волн заключается в следующем: а) размеры элементов должны быть порядка нанометров; б) металлы на оптических частотах обладают плохой проводимостью.

В настоящее время в этом направлении ведутся интенсивные исследования, направленные на решение указанных проблем (см., например, [8–10]).

Кроме того, как уже отмечалось выше, поиск «левых» сред можно проводить и среди анизотропных гиротропных сред, примером которых являются ферромагнитные материалы и полупроводники. Такие материалы отличаются тем, что у них

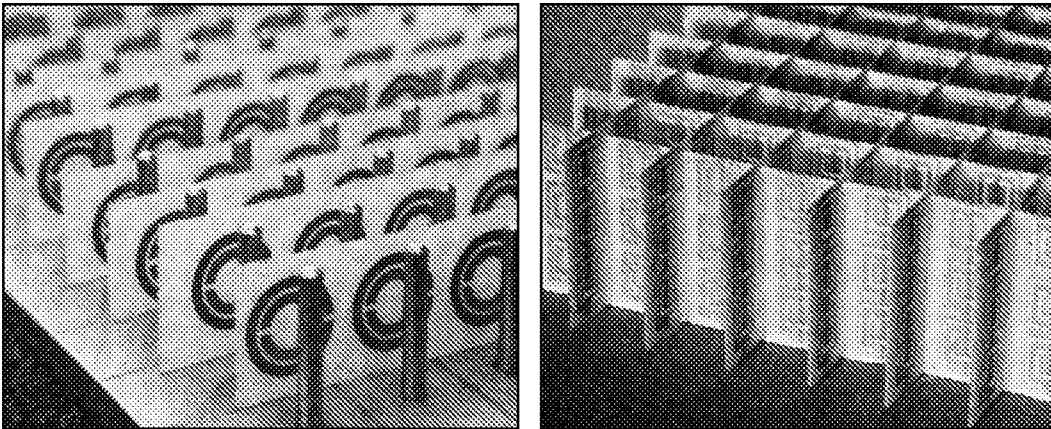


Рис. 9. Композитная структура из проводящих элементов

имеются, во-первых, подвижные носители, образующие электронно-дырочную плазму, и во-вторых, существует система спинов, обеспечивающих большую магнитную восприимчивость. Однако такие материалы обладают еще очень малой подвижностью носителей, что не позволяет наблюдать в них слабозатухающие волны.

Выводы

Возможность создания метаматериалов с отрицательными значениями ϵ и μ заставляет физиков в настоящее время пересмотреть практически многие основные положения электродинамики (законы преломления, дифракционный предел разрешения и другие).

Создание таких материалов открывает широкие возможности для реализации новых физических идей: создание «идеальных суперлинз», новые возможности для цветной фотографии, способ обойти дифракционный предел позволяет оптической литографии проникнуть в диапазон нанометров и на порядки увеличить плотность записи на оптических дисках и т.д.

Хотя большинство экспериментов в настоящее время выполнено в диапазоне сверхвысоких частот, есть надежда, что будут созданы метаматериалы типа «левых» сред и в оптическом диапазоне.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ (№ 11-02-00057) и гранта Правительства РФ для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования (№ 11.G34.31.0030).

Библиографический список

1. *Banerjee B.* An Introduction to Metamaterials and Waves in Composites. New York: CRC Press, 2011.
2. *Sakoda K.* Optical Properties of Photonic Crystals. Berlin: Springer-Verlag, 2001.

3. *Веселаго В.Г.* Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ε и μ // УФН. 1967. Т. 92, вып. 3. С. 517.
4. Физическая энциклопедия: Т. 1. М.: «Советская энциклопедия», 1988.
5. *Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C., Nemat-Nasser S.C., Schultz S.* Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity // Phys. Rev. Lett. 2000. Vol. 84, № 18. P. 4184.
6. *Мандельштам Л.И.* Лекции по теории колебаний. М.: Наука, 1972.
7. *Блюх К.Ю., Блюх Ю.П.* Что такое «левые» среды и чем они интересны? // УФН. 2004. Т. 174, № 4. С. 439.
8. *Пендри Д., Смит Д.* В поисках суперлинзы // В мире науки. 2006. № 11. С. 14.
9. *Силин Р.А.* Электромагнитные волны в искусственных периодических структурах // УФН. 2006. Т. 175, № 5. С. 562.
10. <http://www.ee.duke.edu/drsmith/>

*Саратовский государственный
университет им. Н.Г. Чернышевского*

Поступила в редакцию 12.01.2012

LEFT-HANDED MEDIA: WHAT IS INTERESTING?

Yu.P. Sharaevskii

Questions associated with the propagation of electromagnetic waves in media with simultaneously negative dielectric ε and magnetic permeability μ (left-handed medium) are considered in this work. These questions are widely discussed in recent years. The specific properties of such media, in particular, caused by the presence of the negative refractive index, are described. The possibilities of creating of metamaterials with negative values of ε and μ and the implementation of new physical ideas using left-handed medium including creation of perfect superlens are discussed.

Keywords: Metamaterials, left-handed medium, negative refractive index, perfect lens.



Шараевский Юрий Павлович – родился в 1942 году в Николаевске-на-Амуре Хабаровского края. Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой нелинейной физики Саратовского государственного университета. Работал в области электроники и радиофизики сверхвысоких частот, в настоящее время область научных интересов – нелинейная динамика волновых процессов в тонких магнитных пленках и в композитных структурах на их основе. Автор более 130 научных и научно-методических работ, двух коллективных монографий.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: SharaevskyYP@info.sgu.ru