

МЕТАМАТЕРИАЛЫ В АНТЕННОЙ ТЕХНИКЕ: ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

Революционные изменения в технологии производства и методологии проектирования микроэлектронных устройств позволили достичь очень высокой плотности упаковки элементов и компактных размеров изделий радиоэлектроники в целом. Однако в связанных устройствах размеры антенн все еще остаются поводом для нареканий. Технология микрополосковых антенн, которая была столь многообещающей около двух десятилетий назад, ныне достигла своих пределов относительно сокращения габаритов СВЧ-устройств. Поэтому поиск нетрадиционных подходов к реализации микроволновой техники в последнее время существенно активизировался, о чем свидетельствует серия публикаций автора по технологиям электрически малых антенн (ЭМА) [1–4]. Одно из новых направлений в развитии теории ЭМА связано с достижениями в области создания метаматериалов. Рассмотрим основные результаты в данной области применительно к задаче совершенствования техники ЭМА.

ИСТОРИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

Метаматериалы – это искусственно сформированные и особым образом структурированные среды, обладающие электромагнитными свойствами, сложно достижимыми технологически либо не встречающимися в природе. Первые работы в этом направлении относятся еще к 19 веку [5]. В 1898 году Джагадис Чандра Бозе провел первый микроволновый эксперимент по исследованию поляризационных свойств созданных им структур искривленной конфигурации [6]. В 1914 году Линдман воздействовал на искусственные среды, представлявшие собой множество беспорядочно ориентированных маленьких проводов, скрученных в спираль и вложенных в фиксирующую их среду [7].

В 1946–1948 годах Уинстон Е. Кок [8, 9] впервые создал микроволновые линзы, используя проводящие сферы, диски и периодически расположенные металлические полоски, фактически образовавшие искусственную среду со специфичным

В.Слюсар, д.т.н.
swadim@inbox.ru

по величине эффективным индексом преломления. С тех пор сложные искусственные материалы стали предметом изучения для многих исследователей во всем мире. В последние годы новые понятия и концепции в синтезе метаматериалов способствовали созданию структур, имитирующих электромагнитные свойства известных веществ или обладающих качественно новыми функциями.

Приставка "мета" переводится с греческого как "вне", что позволяет трактовать термин "метаматериалы" как структуры, чьи эффективные электромагнитные свойства выходят за пределы свойств образующих их компонентов. Одно из первых упоминаний этого термина прозвучало в 1999 году в выпуске новостей форума промышленной и прикладной физики (FIAP) Американского физического сообщества (APS). Там содержался анонс серии докладов по секции "Метаматериалы", запланированных на заседание APS в марте 2000 года [10]. Среди включенных в программу докладов фигурирует выступление Роджера М. Уэлсера [11] из университета штата Техас в Остине, которого и считают автором термина "метаматериал". Впрочем, практически одновременно с ним аналогичное понятие применил Эли Яблонович, чей доклад на упомянутом форуме содержал в названии слово "Meta-Materials" [12].

Анализ публикаций по различным аспектам технологий метаматериалов позволяет классифицировать все многообразие естественных и искусственных сред в зависимости от эффективных значений их диэлектрической (ϵ) и магнитной (μ) проницаемостей (рис.1). У почти всех встречающихся в природе веществ диэлектрическая и магнитная проницаемости больше нуля. Существенно, что у подавляющего большинства сред в наиболее интересных для практического использования диапазонах частот эти параметры, как правило, вообще больше или равны единице. В зарубежной литературе данные материалы обычно называют DPS (double positive, двойные позитивные), подчеркивая тем самым положительность значений как ϵ , так и μ (правый верхний квадрант на рис.1). DPS-среды считаются прозрачными для электромагнитных волн, если внутренние потери в них малы.

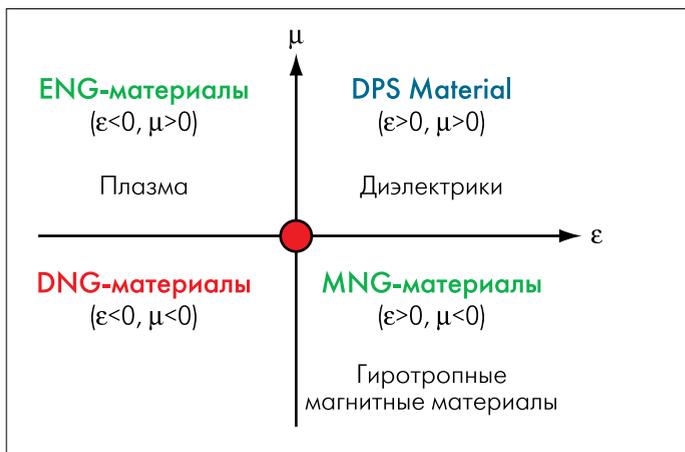


Рис. 1. Классификация физических сред в зависимости от знака величин диэлектрической (ϵ) и магнитной (μ) проницаемостей [5]

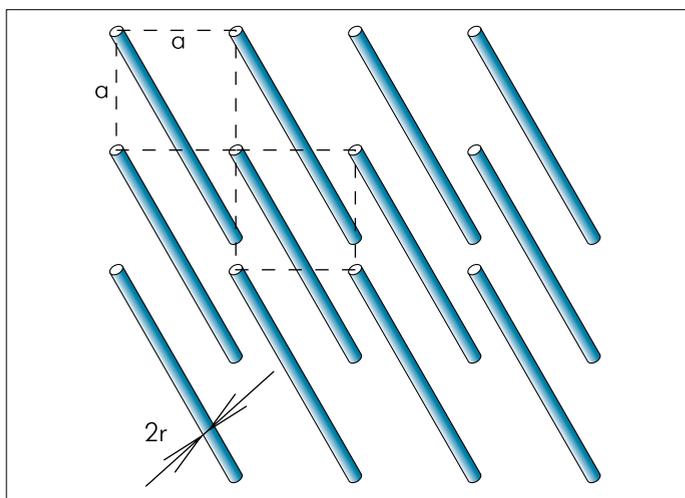


Рис. 2. Метаматериал ENG-типа в виде набора тонких металлических проводников, погруженных в поддерживающий диэлектрик [16]

Материалы, у которых отрицательна ϵ либо μ , на принятом за рубежом научном сленге называют SNG (single negative, мононегативные). В таких средах электромагнитные волны быстро затухают по экспоненте. В отношении подобных материалов полагают, что они непрозрачны для излучения, если их толщина больше, чем характерная экспоненциальная длина затухания электромагнитных волн. Если $\epsilon < 0$ и $\mu > 0$, SNG-материал называют ENG (ϵ -негативные), если $\epsilon > 0$ и $\mu < 0$ – MNG (μ -негативные).

ϵ -НЕГАТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Наиболее известным примером естественной ENG-среды, которая может быть либо прозрачной, либо непрозрачной для электромагнитных волн в зависимости от частоты возбуждения ω , является плазма, диэлектрическая проницаемость которой в отсутствие внешнего магнитного поля определяется согласно формуле [13]:

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}, \quad (1)$$

где ω_p – параметр, именуемый радиальной плазменной частотой (радиальная частота собственных колебаний плазмы) и зависящий от плотности, величины заряда и массы носителей зарядов. Ниже плазменной частоты диэлектрическая проницаемость отрицательна, и электромагнитные волны не могут распространяться из-за потери средой прозрачности. При $\omega > \omega_p$ величина $\epsilon > 0$, и электромагнитные волны могут проходить через ионизированную среду. Известным примером электромагнитной плазмы является ионосфера земли, от которой излучение низкой частоты отражается (при $\epsilon(\omega) < 0$), а высокочастотные электромагнитные волны проходят с малым поглощением.

В числе искусственных сред с отрицательной ϵ одной из первых была описана система из тонких металлических проводников, расположенных параллельно (рис.2). О такой среде как искусственном диэлектрике для микроволновых применений сообщалось в работе Джона Брауна [14] еще в 1953 году. Он получил соотношение для плазменной частоты данного метаматериала:

$$\omega_p^2 = \frac{2\pi c_0^2}{a^2 \ln\left(\frac{a}{2\pi r}\right)}, \quad (2)$$

где c_0 – скорость света, a – интервал между проводниками (см. рис.2), r – радиус проводника. Позднее оно было подтверждено Уолтером Ротманом, который в 1961 году продемонстрировал возможность использования множества тонких проводников для моделирования плазмы, поскольку их эффективная диэлектрическая проницаемость выражается той же самой формулой (1) [15]. В частности, для метаструктуры на основе алюминиевых проводников с радиусом $r = 1$ мкм и интервалом между ними $a = 5$ мм радиальная плазменная частота составляет примерно 8,2 ГГц.

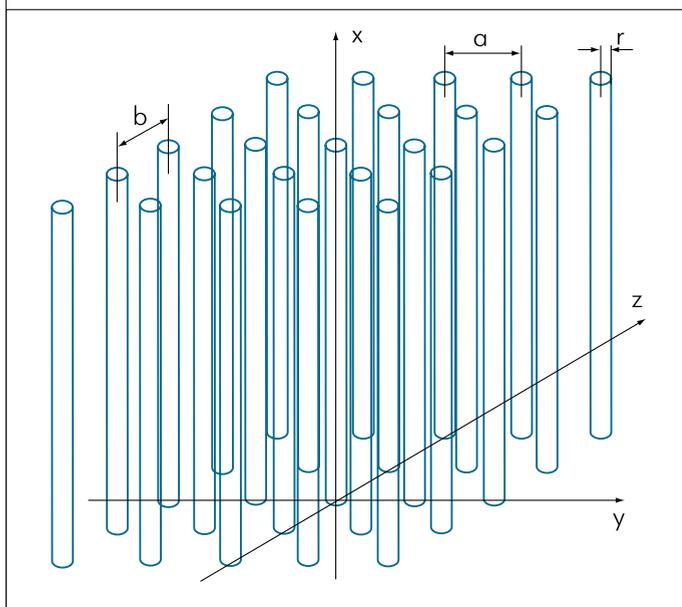


Рис. 3. ENG-метаматериал с различным интервалом между металлическими проводниками в двух ортогональных плоскостях [17]

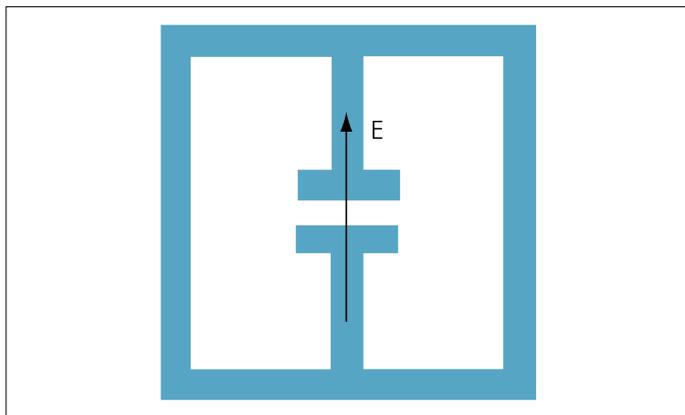


Рис.4. Альтернативный вариант элемента ENG-среды

Более общие соотношения, учитывающие неодинаковое расстояние между проводниками в разных плоскостях (рис.3), приведены в [17]:

$$\omega_p^2 = \frac{2\pi c_0^2}{ab \left[\log \frac{\sqrt{ab}}{2\pi r} + F(a/b) \right]}, \quad (3)$$

где $F(\xi) = -\frac{1}{2} \log \xi + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\coth(\pi n \xi) - 1}{n} \right) + \frac{\pi}{6} \xi$.

В случае $a = b$, функция $F(1) = 0,5275$ и выражение (3) приобретает уточненный по отношению к формуле (2) вид:

$$\omega_p^2 = \frac{2\pi c_0^2}{a^2 \left[\ln \frac{a}{2\pi r} + 0,5275 \right]}. \quad (4)$$

Как отмечено в [18], выражение (4) справедливо при условии $r < 0,01a$. В диапазоне межпроводных интервалов $0,05a < r < 0,2a$ более точное значение ω_p определяется соотношением:

$$\omega_p^2 = \frac{2\pi c_0^2}{a^2 \ln \left(\frac{a^2}{4r(a-r)} \right)}.$$

Наряду с рассмотренными проводными структурами, известны и другие конструкции искусственных ENG-матери-

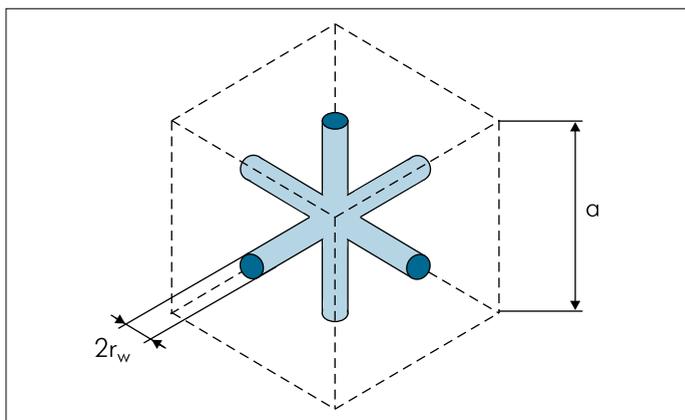


Рис.5. Триплетный элемент для создания изотропных ENG-структур [20]

алов. Например, в работе [19] описаны элементы со структурой, изображенной на рис.4. Индуктивные петли, образованные двумя разрезными рамками, создают взаимно противоположные магнитные поля, компенсирующие друг друга. В результате отклик элемента зависит только от электрической компоненты падающей на него электромагнитной волны и формируется, в основном, емкостью разреза в сочетании с активным сопротивлением материала рамки. Описан метаматериал на основе указанных элементов, обладающий отрицательным значением ϵ в терагерцевом диапазоне [19]. При межэлементном интервале 50 мкм внешние габариты рамки составили всего 36 мкм, а ширина разреза на центральной перемычке – 2 мкм.

Для достижения независимости избирательных свойств метасреды от направления электромагнитных волн следует использовать трехмерные формы структурообразующих элементов. Обобщением проводных решений на изотропный вариант ENG-материалов является триплетная конструкция (рис.5).

μ-НЕГАТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Альтернативными средами с положительной диэлектрической и отрицательной магнитной проницаемостями являются, в определенных частотных режимах, некоторые гиротропные вещества. История искусственных MNG-материалов начинается в 1950-х годах, когда различные кольцевые и кольцоподобные структуры с отрицательной магнитной проницаемостью представляли интерес как типовые блоки для создания искусственных диэлектриков при изготовлении микроволновых линз. В этом контексте разрезное кольцо, использовавшееся еще в экспериментах Герца для приема электромагнитных волн, было вновь востребовано и описано в учебнике Щелкунова и Фрииса [21].

Прообразы двойных разрезных колец, использованных впоследствии Джоном Пендри [22], были на самом деле предложены в 1994 году в работе М.В.Костина и В.В.Шевченко [23]. Основные структуры, используемые для получения MNG-сред, сегодня включают тонкие вложенные металлические цилиндры, рулонные структуры типа "рулет", вложенные разрезные кольца, Ω-подобные и прямоугольные рамки и т.д. Рассмотрим наиболее важные из них.

Двойной кольцевой резонатор (split ring resonator, SRR [22]) (рис.6) – очень удачная структура, в которой емкость между двумя кольцами компенсируется их индуктивностью. Изменяющееся во времени магнитное поле с вектором напряженности, перпендикулярным поверхности колец, вызывает потоки, которые, в зависимости от резонансных свойств структуры, порождают вторичное магнитное поле, усиливающее исходное либо противодействующее ему, что приводит к положительным или отрицательным эффективным значениям μ . Частотную зависимость $\mu(\omega)$ можно описать как

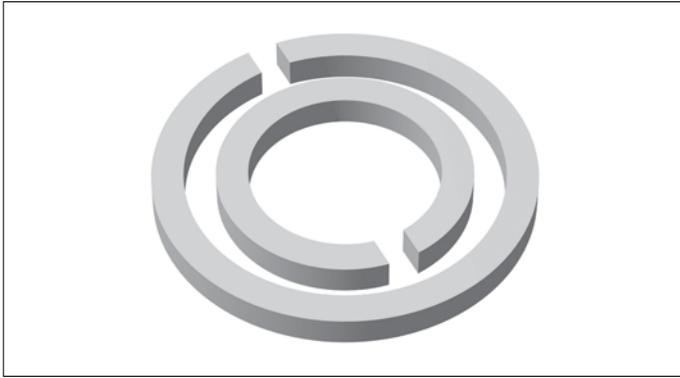


Рис.6. Двойной кольцевой резонатор (SRR)

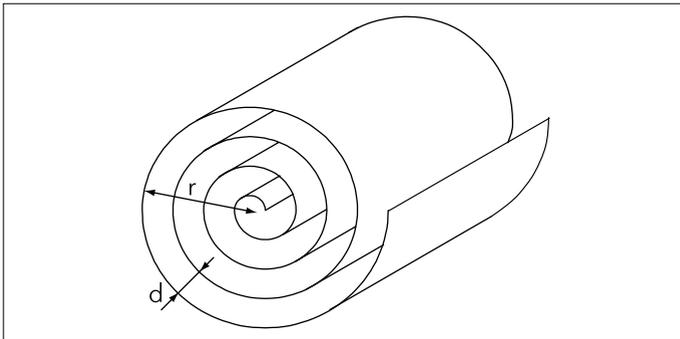


Рис.7. Рулетный элемент [16]

$$\mu(\omega) \approx 1 - \frac{\omega_{pm}^2}{\omega^2}, \quad (5)$$

где ω_{pm} – плазменная частота для MNG.

Для круглого двойного цилиндра в вакууме с сечением в виде двойного разрезного кольца (см. рис.6) в пренебрежении толщиной стенок справедливо следующее выражение [22]:

$$\mu_{eff} = 1 - \frac{\pi r^2}{a^2} \left\{ 1 - \frac{3d}{\pi^2 r^3 \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \epsilon} + i \frac{2\sigma}{\mu_0 r \omega} \right\}^{-1}, \quad (6)$$

где a – длина ячейки, σ – электрическая проводимость стенок цилиндров, d – зазор между разрезными кольцами в поперечном сечении, r – внутренний радиус меньшего из колец.

Резонансная частота данного элемента, при которой $\mu_{eff} \rightarrow \infty$, определяется из условия равенства нулю знаменателя (6) и в отсутствие потерь ($\sigma = 0$) равна

$$\omega_{0m} = \sqrt{\frac{3dc_0^2}{\pi^2 r^3}}.$$

Значение плазменной частоты может быть получено из (6) при условии $\sigma=0$, $\mu_{eff}=0$ и с учетом выполнения равенства для скорости света в среде $c_0^2 = 1/(\mu_0 \epsilon_0 \epsilon)$:

$$\omega_{pm} = \sqrt{\frac{3dc_0^2}{\pi^2 r^3 (1 - \pi r^2 / a^2)}}. \quad (7)$$

Как видно, различия между плазменной и резонансной частотами определяются множителем $1 - \pi r^2 / a^2$ в

знаменателе подкоренного выражения (7). Отрицательное значение μ_{eff} приобретает в интервале частот между ω_{0m} и ω_{pm} .

Двойной цилиндр в качестве структурной ячейки для создания MNG-материалов можно заменить так называемым рулетным элементом, который формируется при свертывании в рулон металлического листа (рис.7) [14]. Согласно [22], эффективная магнитная проницаемость рулетного элемента определяется выражением:

$$\mu_{eff} = 1 - \frac{\pi r^2}{a^2} \left\{ 1 - \frac{dc_0^2}{2\pi^2 r^3 (N-1)\omega^2} + i \frac{2\rho}{\mu_0 r \omega (N-1)} \right\}^{-1},$$

где d – толщина изолятора между витками в структуре, N – число витков, ρ – сопротивление катушки на единицу длины, $i = \sqrt{-1}$, r – внешний радиус "рулета".

Вместо сплошного двойного цилиндра на практике проще использовать набор его дискретных сечений, расположенных в стеке друг над другом с интервалом (рис.8) [22]. При таком формировании метасреды резонансная частота многослойной сборки из разрезных колец с толщиной стенок s определяется формулой

$$\omega_0^2 = \frac{3lc_0^2}{\pi r^3 \ln \frac{2s}{d}},$$

а эффективная магнитная проницаемость – выражением:

$$\mu_{eff} = 1 - \frac{\pi r^2}{a^2} \left\{ 1 - \frac{3lc_0^2}{\pi \omega^2 r^3 \ln \frac{2s}{d}} + i \frac{2l\sigma_1}{\mu_0 r \omega} \right\}^{-1},$$

где σ_1 – погонное сопротивление вдоль периметра кольца.

Аналогичные стековые решения возможны также на основе дискретных вырезов рулетного элемента. Вместо разрезных колец могут использоваться вложенные квадратные рамки [24], причем не обязательно расположенные в одной плоскости, а смещенные на некоторое расстояние вдоль

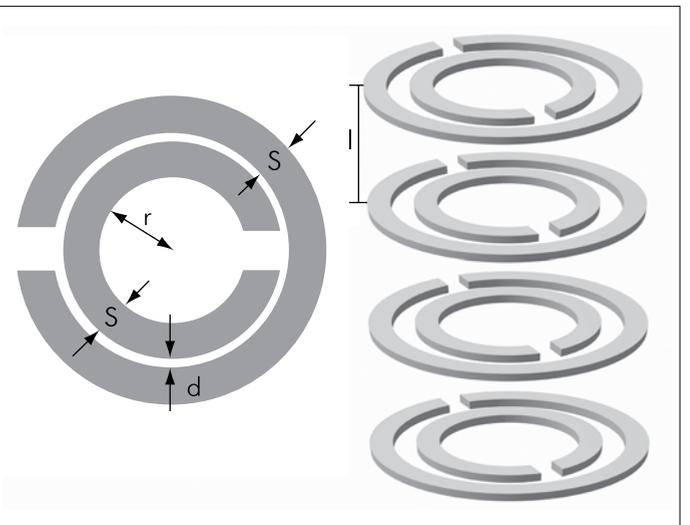


Рис.8. Стек из разрезных колец

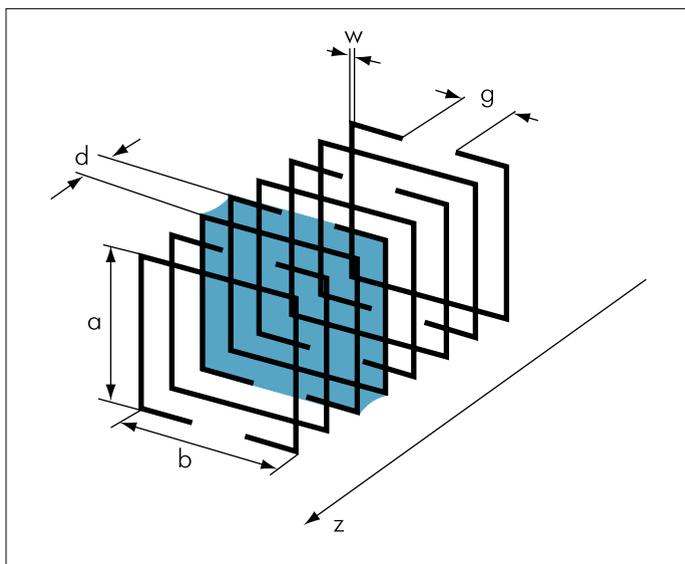


Рис. 9. Метасоленоид

общей нормали. Наконец, возможны структуры-метасоленоиды на основе разрезных прямоугольных рамок с чередующейся ориентацией разреза (рис.9) [25], S-образных элементов [24] и др.

БИНЕГАТИВНЫЕ СРЕДЫ

Последние несколько лет были богаты событиями в области развития концепций и решения проблем создания метаматериалов с отрицательным коэффициентом преломления электромагнитных волн. Эффект отрицательного преломления обусловлен одновременно отрицательными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей ($\epsilon < 0$ и $\mu < 0$). Такие материалы часто называют бинегативными средами (DNG, double negative). До недавнего времени этот класс материалов был представлен только искусственными конструкциями, однако в 2006 году было установлено, что кристаллы $La_{2/3}Ca_{1/3}MnO_3$ имеют отрицательный коэффициент преломления электромагнитных волн в диапазоне 150 ГГц.

К пониманию физики сред DNG современная наука подошла исподволь и довольно долго. Анализируя доступные ис-

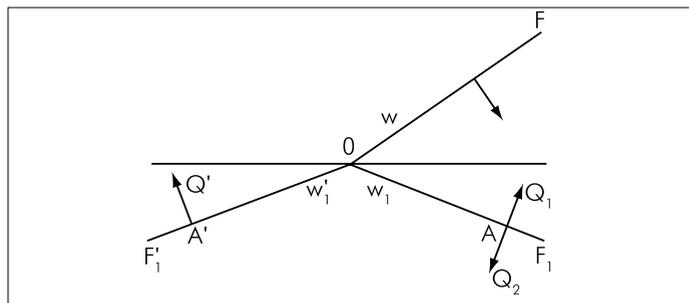


Рис. 10. Иллюстрация А.Шустера [27], показывающая, что отклонение волны при входе в среду с отрицательной групповой скоростью происходит на угол, больший угла падения, в сторону, противоположную преломлению в обычной среде. WF – фронт падающей волны, W'F₁ – фронт преломленной волны в обычной среде, W₁F₁ – фронт преломленной волны в среде с отрицательной групповой скоростью

точники, удалось получить некоторые интересные наблюдения из истории данной области, которые не следует расценивать как попытку однозначных утверждений о приоритете определенных исследователей в тех или иных открытиях.

Первый этап на пути формирования современных представлений о DNG связывают с развитием теории обратных волн, одним из ключевых понятий которой явилась отрицательная групповая скорость волны. Судя по доступным публикациям, пальму первенства в практической постановке вопроса о существовании волн с отрицательной групповой скоростью следует отдать английскому физика Артуру Шустеру (1851–1934). Этот факт отметил английский математик и гидродинамик Гораций Лэмб (1849–1934) в своей публикации [26], датированной 11 февраля 1904 года. По словам Г.Лэмба, А.Шустер обнаружил формальную возможность отрицательной групповой скорости электромагнитных волн, анализируя формулу из оптики, касающуюся аномальной дисперсии света. А.Шустер предложил Г.Лэмбу проверить гипотезу об условиях возникновения волн с отрицательной групповой скоростью, которую Лэмб и подтвердил. Таким образом, Г.Лэмб с подачи А.Шустера в 1904 году впервые рассмотрел обратные волны в механике, распространяющиеся в одном и двух измерениях. Вдохновленный аргументацией Г.Лэмба [26], в том же 1904 году А.Шустер обобщил эту теорию на оптические явления, впервые показав в своей книге [27], что обратные электромагнитные волны возможны при отрицательной групповой скорости, а также что на границе двух сред, в одной из которых распространяется прямая волна, а в другой – обратная, возникает отрицательное преломление (рис.10). Так благодаря А.Шустеру указание на возможность отрицательного преломления впервые появилось в физической литературе. Однако при этом не было детализировано, какими могли быть характерные свойства соответствующей среды в случае ее существования.

Как водится, работы [26, 27] не стали уникальными в своем роде. Вывод о том, что отрицательная групповая скорость возможна из-за аномальной дисперсии волн, подтвердил в 1905 году Фон Лауэ (Max Theodor Felix von Laue, 1879–1960) [28]. В том же году Поклингтон в небольшой заметке [29] еще раз показал, что в определенной среде, где возможна обратная волна, активизированный источник колебаний формирует волну с групповой скоростью, направленной от источника, в то время как ее фазовая скорость ориентирована ему навстречу.

Однако очевидного практического применения у обнаруженных эффектов тогда не было, и интерес исследователей к ним поутих на несколько десятилетий, четко определив рубеж между первым и вторым этапами становления теории DNG.

С появлением в 1940-х годах СВЧ-устройств, использующих обратные волны, многие из уже основательно забытых положений теории обратных волн вновь оказались в поле зрения физиков. Формальным началом второго этапа ста-

новления теории DNG-сред можно считать лекции по оптике Л.И.Мандельштама (1879–1944) [30], датированные 1944 годом. В них, вслед за А.Шустером, были более детально рассмотрены эффект обратного распространения волн и необычный закон преломления при падении волны из свободного пространства в среду, где групповая и фазовая скорости волн направлены навстречу друг другу. При этом преломленный луч отклоняется в противоположную сторону от нормали к поверхности, нежели при падении на "обычную" среду (рис.11).

Изучение обратных волн в 1940-е годы прошлого века способствовало не только освоению их практического использования в лампах и антеннах обратной волны, но и всплеску в 1950-е годы теоретического интереса к распространению обратных волн в линиях передачи. Примером тому является работа Г.Д.Малюжинца [31] (1951 г.). Д.В.Сивухин в своей статье [32] в 1957 году первым отметил, что фазовая и групповая скорости волны будут противоположно направлены в среде с одновременно отрицательными ϵ и μ (в среде DNG). В развитие этой идеи в 1959 году В.Е.Пафомов [33] теоретически доказал возможность возникновения обратных волн в среде с одновременно отрицательными ϵ и μ . В том же году Р.А.Силин [34] вновь обратился к иллюстрации закона преломления луча в среде с отрицательной дисперсией, рассматривая кристаллы с обратными волнами.

Наиболее развитую теорию веществ с отрицательным коэффициентом преломления, с одновременно отрицательными ϵ и μ , предложил, как это признано зарубежными учеными, советский физик Виктор Георгиевич Веселаго [35]. Он родился 13 июня 1929 на Украине, сейчас – доктор физико-математических наук, профессор Московского физико-технического института, заслуженный деятель науки Российской Федерации, лауреат Государственной премии СССР.

В серии своих публикаций в 1960-х годах В.Г.Веселаго обосновал возможность существования физических сред с отрицательным коэффициентом преломления, обладающих свойствами, парадоксальными с обыденной точки зрения. Его основополагающая работа [35] содержала теоретическое описание свойств среды с одновременно отрицательными ϵ и μ , а также исследование решения уравнений Максвелла для этого случая (в английском переводе текста, опубликованном в 1968 году, ошибочно заявлено, что первые результаты по этой теме были изданы в 1964 году). При интерпретации уравнений Максвелла В.Г.Веселаго впервые использовал в качестве индекса преломления n выражение $n = -\sqrt{\epsilon\mu}$ для $\epsilon, \mu < 0$, что явилось довольно неожиданным логическим приемом. Отмечая гипотетичность соответствующей среды, Веселаго указал на бесспорный факт, что ее существование не исключается уравнениями Максвелла, и теоретически проанализировал процесс распространения электромагнитных волн в подобных средах.

В обычных средах, когда $\epsilon > 0$ и $\mu > 0$, электромагнитная волна имеет правостороннюю ориентацию тройки век-

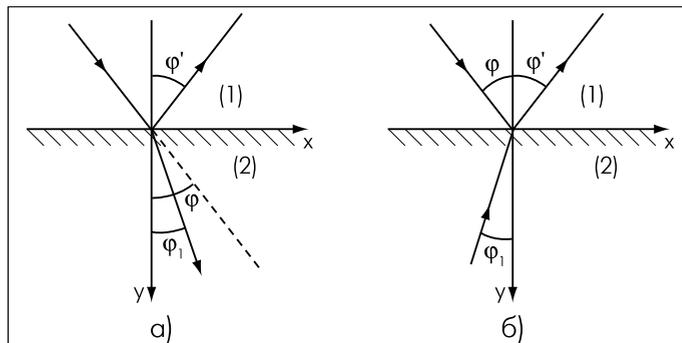


Рис. 11. Иллюстрации Л.И. Мандельштама [30]. Преломление луча: а) в обычной среде, б) в среде, где групповая скорость волн отрицательна

торов \mathbf{H} , \mathbf{E} , \mathbf{k} (магнитная и электрическая компоненты поля, а также волновой вектор). В DNG-среде векторы Умова-Пойтинга и фазовой скорости (волновой вектор \mathbf{k}) противоположны, соответственно \mathbf{E} , \mathbf{H} и \mathbf{k} формируют левостороннюю систему координат.

Отрицательная величина индекса преломления изменяет геометрическую оптику линз и других объектов, образованных из DNG-материалов. Например, фокусирующая линза становится рассеивающей. Напротив, отклоняющая двояковогнутая линза, изготовленная из DNG-материала, действует как фокусирующая. Кроме того, В.Г.Веселаго первым показал, что обычная плоскопараллельная пластина с $n = -1$ может выступать в роли собирающей линзы. В его работе [35] предсказаны такие электромагнитные эффекты в DNG-материалах, как реверсивные изменения доплеровского сдвига частоты и эффекта черенковской радиации, обращение светового давления на световое притяжение. Существенно, что эти явления не были экспериментально доказаны и/или очевидны на момент разработки теории Веселаго, поскольку не было примеров реализаций соответствующей метасреды. Усилия В.Г.Веселаго и его коллег по получению материала с отрицательным преломлением на основе магнитного полупроводника CdCr_2Se_4 оказались тщетными из-за существенных технологических трудностей его синтеза. Эта неудача, а также систематический прессинг со стороны тогдашнего директора ФИАН им.П.Н.Лебедева Д.В.Скобелевца, заключавшийся в обвинении В.Г. Веселаго в занятиях лженаукой [36], надолго охладили внимание исследователей к подобным проблемам.

На рис.12 кратко проиллюстрированы основные из рассмотренных вех истории развития теории DNG в рамках первых двух ее этапов. Данная схема примечательна тем, что под ней подписался и сам В.Г. Веселаго, соавтор работы [37], тем самым выразив свое согласие с публикациями, опровергавшими его приоритет по ряду ключевых вопросов теории DNG-сред.

Тем не менее, учитывая значительный вклад статьи Веселаго [35] в теоретическое обоснование свойств среды с отрицательным преломлением, многие авторы именуют DNG-ма-

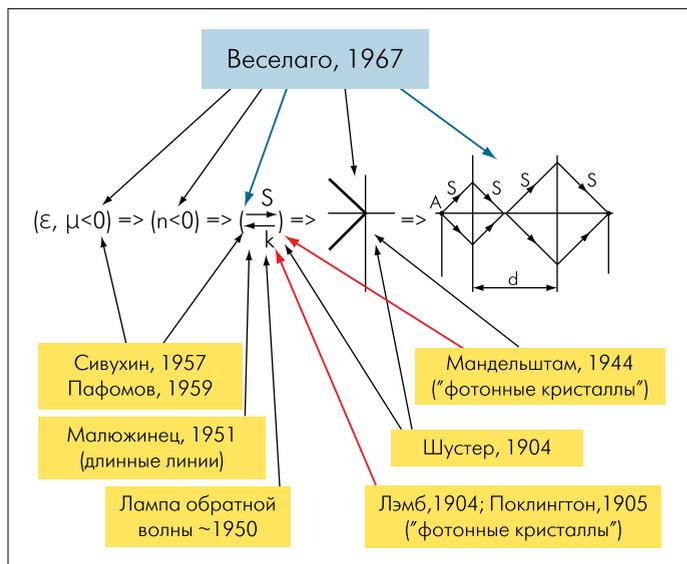


Рис. 12. Основные вехи первых двух этапов становления теории DNG [37]

териалы средой Веселаго (особенно в случае $\epsilon = \mu = -1$), средой с отрицательной рефракцией или с отрицательным индексом преломления (negative refractive index, NRI), а также "леворукими" материалами (left-handed materials, LHM), принимая во внимание отмеченную в [35] левостороннюю ориентацию векторов электромагнитной волны.

Среди публикаций 1970-х годов, явившихся, по сути, предтечей возрождения интереса к теории плоскопараллельных линз и оптике DNG-сред, необходимо отметить работы Р.А.Силина [38, 39], в которых он описал оптические свойства искусственных диэлектриков, а также исследовал особенности плоскопараллельной линзы, выполненной из метаматериала с отрицательным индексом преломления.

Новым толчком к развитию данного направления и началом современного (третьего) этапа в формировании теоретических представлений о DNG-средах послужила публикация

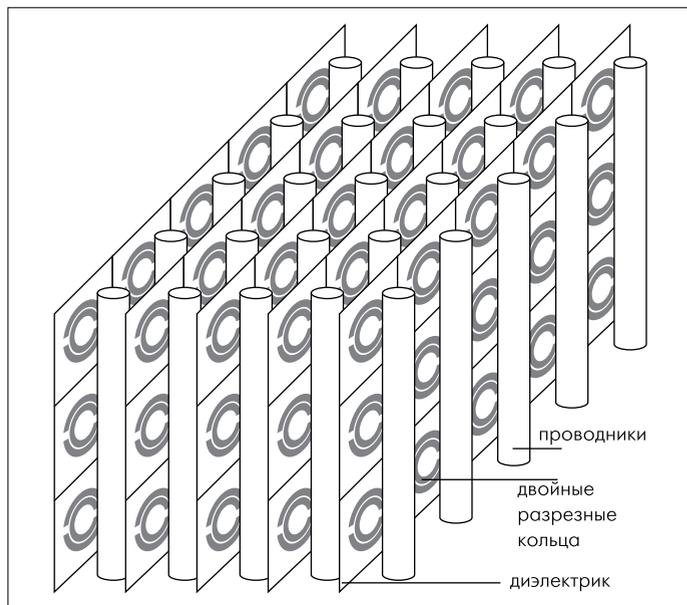


Рис. 13. Метаматериал, впервые экспериментально подтвердивший эффект "леворукости" [42]

Джона Пендри [40], в которой было предложено использовать конкретные искусственно созданные материалы особой конструкции, обладающие отрицательными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей. Пендри предложил массово использовать структуры из миниатюрных разрезных кольцевых рамок, выполняющих роль магнитных диполей, и прямолинейных отрезков провода. Этот подход основан на том, что если композитный материал состоит из дискретных рассеивающих элементов, размер которых меньше длины волны излучения, то данный композит с точки зрения электродинамики можно рассматривать как непрерывный в ограниченной полосе частот. Другими словами, физическая среда будет непрерывной в электромагнитном смысле, если ее свойства могут быть описаны усредненными параметрами, изменяющимися в масштабе, намного большем, чем размеры и интервал образующих материал компонентов.

Удивительно, что Пендри был лишь в одном шаге от лежащей на поверхности идеи сочетания форм рассмотренных им разновидностей элементарных антенн (рис.13). Эту идею позднее опубликовал [41] и запатентовал [42] Дэвид Смит вместе с коллегами из Калифорнийского университета в Сан-Диего. Именно такая очевидная комбинация структурных элементов, следовавшая из публикации Пендри, позволила в 2000 году исследовательской группе Дэвида Смита создать первый материал, обладающий в сантиметровом диапазоне электромагнитных волн (4,2–4,6 ГГц) отрицательным коэффициентом преломления. Этот метакомпозит 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, реагирующими 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 [43], убедительно показали, что преломление электромагнитной волны на границе вакуума и такой композитной среды подчиняется закону Снеллиуса с отрицательным значением индекса n . Тем самым экспериментально подтвердились основные положения работы [41]. В дальнейшем подобные эксперименты были повторены независимыми группами исследователей с тем же положительным результатом. Как и следовало ожидать, публикации [41–43] послужили толчком к появлению многочисленных работ, в которых исследовались свойства веществ с отрицательным коэффициентом преломления и делались попытки оценить их возмож-

ные практические применения. Однако основными недостатками первых метаматериалов, основанных на использовании кольцевых и прямоугольных SRR, являются узкополосность, высокие уровни электромагнитных потерь, громоздкость и непрактичность для микроволновых технических применений.

Для решения проблемы узкополосности в дальнейшем было предложено много вариантов магниточувствительных элементов, в частности – в форме Ω . Существенно, что проблема узкой полосы пропускания может быть в определенной мере решена путем оптимизации геометрических размеров SRR-резонаторов. Например, в работе [44] для прямоугольных SRR (рис.14) в диапазоне 10,57–11,82 ГГц получена ширина полосы пропускания 11,2%, что в 2,3 раза лучше, чем в первоначальном варианте, предложенном в [45]. Для поиска оптимальной комбинации геометрических параметров SRR использовался программный пакет CST Microwave Studio (www.cst.com).

Вполне очевидно, что для дальнейшей оптимизации формы SRR целесообразно использовать генетические алгоритмы оптимизации, и соответствующие работы, несомненно, появятся в ближайшем будущем. Применительно к много-частотным решениям имеет смысл использовать вместо разрезных кольцевых или квадратных рамок фрактальные рамки Серпинского, SRR на основе ломаной Коха или других фрактальных решений [3]. Аналогичные фрактальные конструкции следует задействовать и взамен прямолинейных проводников в ENG- или DNG-структурах. Следует учесть, что сегодня из всех средств компьютерного моделирования антенн для исследования свойств метаматериалов наиболее приспособлен пакет Ansoft HFSS (www.ansoft.com).

Обнаруженные свойства DNG-сред свидетельствуют, что их применение теоретически позволяет получить разрешающую способность оптических приборов, превосходящую дифракционный предел. Используя материалы с $\epsilon < 0$ (и, по возможности, с $\mu < 0$), можно за счет плазмонного резонанса усилить ближние (неоднородные) волны, ответственные за перенос информации о деталях, размером много меньше длины волны. Идеальной для этой цели является среда Веселаго с $\epsilon = \mu = -1$. DNG-структуры обладают и другими интересными и полезными для практики свойствами. Например, у электрически малых антенн (ЭМА), изготовленных из идеальных метаматериалов без потерь и без частотной дисперсии, существенно, по сравнению с пределом Чу [1–3], расширяется полоса пропускания, и достигаются значения добротности, более низкие, чем это следует из теории указанного фундаментального предела. К сожалению, реальные конструкции метасред обладают частотной дисперсионностью и потерями, что приводит пока к катастрофической деградации свойств антенн из метаматериалов. Поэтому основной задачей совершенствования метаструктур является синтез таких

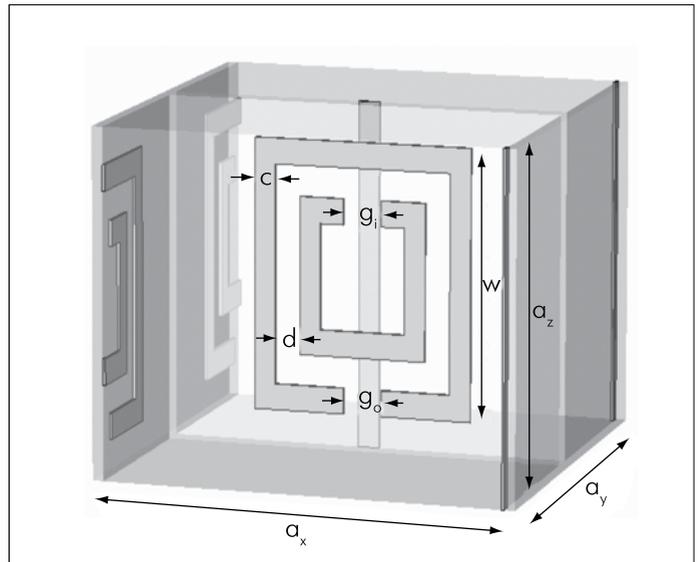


Рис. 14. Оптимизированная трехмерная ячейка DNG-метаструктуры [44]

сред, которые бы обладали минимальными потерями и мало-выраженными дисперсионными свойствами.

Однако согласно теоретическим выкладкам Веселаго, при отрицательном коэффициенте преломления в принципе не может существовать материалов без частотной дисперсии диэлектрической и магнитной проницаемостей. Объясняется это тем, что для отрицательных ϵ и μ при отсутствии их частотной дисперсии плотность энергии электромагнитного поля $W = (\epsilon E^2 + \mu H^2) / 2$ была бы отрицательной, что исключается [35]. В свою очередь, при наличии частотной дисперсии

$$W = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial [\epsilon(\omega)\omega]}{\partial \omega} E^2 + \frac{\partial [\mu(\omega)\omega]}{\partial \omega} H^2 \right].$$

При этом для получения положительных значений энергии независимо от знака ϵ и μ следует иметь положительные значения производных:

$$\frac{\partial [\epsilon(\omega)\omega]}{\partial \omega} > 0, \quad \frac{\partial [\mu(\omega)\omega]}{\partial \omega} > 0.$$

Указанные условия служат предпосылкой, позволяющей надеяться, что требуемые для создания эффективных конструкций ЭМА метаматериалы будут синтезированы. На данном же этапе основными направлениями применения метаматериалов в технике антенн являются:

- изготовление подложек в печатных антеннах для достижения широкополосности и уменьшения размеров излучателей (MNG, DNG, композитные право-левосторонние материалы (CRLH, Composite Right/Left-Handed));
- компенсация реактивности ЭМА (ENG, DNG) в широкой полосе частот, в том числе превышающей фундаментальный предел Чу;
- формирование узких лучей элементарными излучателями, погруженными в ENG- или DNG-среды;

- изготовление антенн поверхностной волны;
- увеличение развязки между элементами антенных решеток.

Но более подробно мы рассмотрим достигнутые при этом результаты, опираясь на характерные примеры метаантенн, в следующей части статьи.

Продолжение следует.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Слюсар В.** Антенны PIFA для мобильных средств связи: многообразие конструкций. – ЭЛЕКТРОНИКА:НТБ, 2007, № 1, с. 64–74.
2. **Слюсар В.** Диэлектрические резонаторные антенны. Малые размеры, большие возможности. – ЭЛЕКТРОНИКА:НТБ, 2007, №.4, с. 89–95.
3. **Слюсар В.** Фрактальные антенны. Принципиально новый тип "ломаных" антенн. – ЭЛЕКТРОНИКА:НТБ, 2007, №. 5, с. 78–83; №. 6, с. 82–89.
4. **Слюсар В.** Синтез антенн на основе генетических алгоритмов. – Первая миля, 2008, № 6, с. 16–23; 2009, № 1, с. 22–25.
5. Metamaterials: Physics and Engineering Explorations/Edited by N. Engheta and R. W. Ziolkowski. – Wiley-IEEE Press, 2006.
6. **J.C. Bose.** On the rotation of plane of polarisation of electric waves by a twisted structure. – Proc. Roy. Soc., 1898, Vol. 63, p. 146–152.
7. **K.F. Lindman.** Om en genom ett isotropt system av spiralformiga resonatorer alstrad rotationspolarisation av de elektromagnetiska vågorna. — Öfversigt af Finska Vetenskaps-Societetens förhandlingar. A. Matematik och naturvetenskaper. – Vol. LVII, No. 3, 1914 – 1915, pp. 1 – 32. – <http://www.biodiversitylibrary.org/item/50732#103>.
8. **W.E. Kock.** Metal-lens antennas. – Proceedings of Inst. Radio. Engrs. and Waves and Electrons, Vol. 34, November, 1946, p. 828–836.
9. **W. E. Kock.** Metallic delay lenses. – Bell Sys. Tech. J., 1948, Vol. 27, p. 58–82.
10. FIAP Fall 1999 Newsletter. – <http://www.aps.org/units/fiap/newsletters/upload/fall99.pdf>.
11. **Rodger Walser.** Metamaterials: What are they and what are they good for? – 2000 March. Meeting of the American Physical Society, March 20–24, 2000. – <http://flux.aps.org/meetings/YR00/MAR00/abs/S9240.html>.
12. **Eli Yablonovitch.** Photonic Crystals as Meta-Materials. – там же.
13. **Дж. Джексон.** Классическая электродинамика/Пер. с англ. Г.В. Воскресенского и Л.С. Соловьева. – М.: Мир, 1965, с. 254–255.
14. **John Brown.** Artificial dielectrics having refractive indices less than unity. – Proc. Inst. Elect. Eng (London), May 1953, Part IV, vol. 100, Monograph No. 62R, p. 51–62.
15. **Walter Rotman.** Plasma simulation by artificial and parallel plate media. – IRE Trans. Ant. Propagat, Januare 1962, Vol. 10, Issue 1, p. 82–95.
16. **Zoran Jakšić, Nils Dalarsson, Milan Maksimović.** Negative Refractive Index Metamaterials: Principles and Applications. – Mikrotalasna revija, Jun 2006, p. 36–49. – <http://www.mwr.medianis.net/pdf/Vol12No1-07-ZJaksic.pdf>.
17. **P.A. Belov, S.A. Tretyakov and A.J. Viitanen.** Dispersion and reflection properties of artificial media formed by regular lattices of ideally conducting wires. – J. Electromagn. Waves Applic., 2002, Vol. 16, p. 1153–1170.
18. **Tretyakov S.A.** Analytical Modeling in Applied Electromagnetics. – Artech House, Norwood, MA, 2003.
19. **Hou-Tong Chen et al.** Active terahertz metamaterial devices. – Nature, Vol. 444, 30 November 2006, p. 597–600. – <http://physics.bu.edu/documents/thz.pdf>.
20. **M. Hudlička, J. Machač, I.S. Nefedov.** A Triple Wire Medium as an Isotropic Negative Permittivity Metamaterial – Progress in Electromagnetics Research, PIER 65, 2006, p. 233–246. – <http://ceta.mit.edu/pier/pier65/16.06102703.Hudlicka.MN.pdf>.
21. **Щелкунов С., Фриис Г.** Антенны (Теория и практика). Пер. с англ. – М.: Советское радио, 1955.
22. **J.B. Pendry et al.** Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. – IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 1999, № 47, p. 2075–2081.
23. **M.V. Kostin, V.V. Shevchenko.** Artificial magnetics based on double circular elements/Proc. of Bianisotropics'94. – Perigueux. France, May 18–20, 1994, p. 49–56.
24. **Patel, Neil.** Theory, Simulation, Fabrication and Testing of Double Negative and Epsilon Near Zero Metamaterials for Microwave Applications/ Master's Thesis in Electrical Engineering. – California Polytechnic State University, June 2008. – <http://digitalcommons.calpoly.edu/theses/7/>.
25. **S.A.Tretyakov** and many colleagues. Research on negative refraction and backward-wave media: A historical perspective. – Radio Laboratory / SMARAD Helsinki University of Technology, 2005. – http://users.tkk.fi/sergei/slides_tretyakov_latsis.pdf.
26. **Horace Lamb.** On group velocity. – Proc.

London Math. Soc., 1904, 1, p. 473–479. – http://www.hep.princeton.edu/~mcdonald/examples/mechanics/lamb_plms_1_473_04.pdf.

27. **Arthur Schuster**. An Introduction to the Theory of Optics. – Edward Arnold, London, 1904, p. 313–318.

28. **M. Laue**. Die Fortpflanzung der Strahlung in dispergierenden und absorbierenden Medien. – Ann. Phys., 1905, 18, p. 551.

29. **H.C. Pocklington**. Growth of a wave-group when the group velocity is negative. – Nature, vol.71, 1905, p. 607–608.

30. **Мандельштам Л.И.** Лекции по некоторым вопросам теории колебаний (1944 г.). Четвертая лекция/ В кн.: Мандельштам Л.И. Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механики. – М.: Наука, 1972, с. 431–437.

31. **Малюжинец Г.Д.** – ЖТФ, 1951, т.21, вып. 8, с. 940–942.

G.D. Malyuzhinets. A note on the radiation principle. – Zhurnal Technicheskoi Fiziki, vol. 21, No. 8., p. 940–942 (in Russian. English translation in Sov. Phys. Technical Physics), 1951.

32. **Сивухин Д.В.** Об энергии электромагнитного поля в диспергирующих средах. – Оптика и спектроскопия, 1957, т. 3, №4, с 308–312.

33. **Пафомов В.Е.** – ЖТЭФ, 1959. № 36, с. 1853.

34. **Силин Р.А.** Волноводные свойства двумерно периодических замедляющих систем. – Вопросы радиоэлектроники. Сер.1. Электроника, 1959, вып.4, с.11–33.

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

36. О Веселаго – весело и с добрыми пожеланиями. – За науку (газета МФТИ), 2004, № 1685. – <http://za-nauku.mipt.ru/hardcopies/2004/1685/veselago75.html>.

37. **Victor Veselago, Leonid Braginsky, Valery Shklover and Christian Hafner**. Negative Refractive Index Materials. – Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 2006, Vol. 3, p. 1–30.

38. **Силин Р.А.** О возможности создания плоскопараллельных линз. – Оптика и спектроскопия, 1978, т.44, Вып.1, с. 189–191.

39. **Силин Р.А.** Оптические свойства искусственных диэлектриков. – Известия вузов. Радиофизика, 1972, т.15, №6, с. 809–820.

40. **J.B. Pendry et al.** Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. – IEEE Trans. Microw. Theory Tech., Vol. 47, No.11, 1999, p. 2075–2084.

41. **D.R. Smith et al.** Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity – Physical Review Letters, Vol. 84, N 18, 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).

42. USA Patent № 6791432B2.

43. **R.A. Shelby, D.R. Smith, S. Schultz**. Experimental Verification of a Negative Index of Refraction. – Science, 6 April 2001, Vol. 292, No. 5514, p. 77–79. – [http://people.ee.duke.edu/~drsmith/pubs_smith_group/Shelby_Science_\(2001\).pdf](http://people.ee.duke.edu/~drsmith/pubs_smith_group/Shelby_Science_(2001).pdf).

44. **Christine T. Chevalier, Jeffrey D. Wilson**. Frequency Bandwidth Optimization of Left-Handed Metamaterial. – NASA/TM–2004-213403, November 2004. – <http://gltrs.grc.nasa.gov/reports/2004/TM-2004-213403.pdf>.

45. **R.A.Shelby, D.R.Smith, S.C.Nemat-Nasser and S.Schultz**. Microwave transmission through a two-dimensional, isotropic, left-handed metamaterial. – Appl. Phys. Lett., 22 January 2001, vol. 78, p. 489–491. – [http://people.ee.duke.edu/~drsmith/pubs_smith_group/Shelby_APL_\(2001\).pdf](http://people.ee.duke.edu/~drsmith/pubs_smith_group/Shelby_APL_(2001).pdf).