

УДК 537.876.23, 537.877

ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ

Ю.С. Кившарь, А.А. Орлов



Юрий Семенович Кившарь

Ведущий специалист в области нелинейной оптики, нанофотоники, оптических солитонов и метаматериалов. В 1984 году защитил кандидатскую диссертацию по теоретической физике в Физико-техническом институте низких температур имени Б. И. Веркина в Харькове. С 1989 года занимает различные исследовательские позиции в Европе и Америке. В Германии получает стипендию Александра фон Гумбольдта. В 1993 переезжает в Австралию. В настоящий момент является заслуженным профессором Австралийского национального университета, занимает пост главы Центра нелинейной физики, состоит в Австралийской Академии наук (с 2002 года). В 2010 выигрывает мегагрант Правительства Российской Федерации на проведение исследований в области метаматериалов в НИУ ИТМО. Научный руководитель лаборатории «Метаматериалы».



Алексей Анатольевич Орлов

Магистрант НИУ ИТМО, сотрудник лаборатории «Метаматериалы». В 2009 защитил бакалаврскую работу «Эффекты пространственной дисперсии в слоистых металлодиэлектрических оптических метаматериалах». Автор 10 публикаций в ведущих научных журналах, таких как Physical Review, Physics Letters, Applied Physics Letters. Стипендиат Правительства Российской Федерации и фонда «Династия». Многократный обладатель стипендии международного общества SPIE. Выступал с докладами на международных конференциях.

Представлен обзор экспериментальных результатов в области перестраиваемых и нелинейных микроструктурированных метаматериалов с отрицательным показателем преломления. Предлагаются и описываются новые типы перестраиваемых метаматериалов, обладающих либо нелинейным магнитным, либо нелинейным электрическим откликом на микроволновых частотах. Посредством введения варикапа в каждый из резонаторов в качестве нелинейного элемента достигается сдвиг частоты магнитного или электрического резонанса при изменении мощности падающей волны. Обсуждаются подходы к эффективной перестройке передающих характеристик метаматериалов путем модуляции периода решетки. Показано, что некоторые механизмы перестройки, обсуждаемые в статье, могут быть применены в оптическом диапазоне длин волн. Показано ожидаемое применение перестраиваемых и нелинейных метаматериалов в широком частотном диапазоне.

Ключевые слова: метаматериалы, нелинейность, перестраиваемость, композиты, резонаторы

Введение

Теоретические работы [1–3], наряду с проведенными экспериментальными измерениями [4, 5], доказали возможность создания новых типов микроструктурированных метаматериалов¹ с уникальными свойствами, отсутствующими в природе, включая отрицательный показатель преломления. Одна из первых реализаций такого композитного материала представляла собой решетку проводов и разомкнутых кольцевых резонаторов. Такой образец обладает отрицательными вещественными частями магнитной и

¹ Метаматериал – композиционный материал, свойства которого обусловлены не столько свойствами составляющих его элементов, сколько искусственно созданной периодической структурой

диэлектрической проницаемостей на микроволнах, т.е. представляет из себя «левосторонний» материал² с отрицательным показателем преломления. Свойства таких материалов были проанализированы теоретически В.Г. Веселаго несколько десятков лет назад [6], однако объектом активных экспериментальных исследований они стали лишь недавно.

Метаматериалы выделяются исключительными свойствами, которые проистекают из макроскопических параметров материалов, изменяемых путем соответствующего выбора и расположения их структурных элементов [7, 8]. Таким образом, становится возможным не только конструирование метаматериала с требуемой функциональностью, но и осуществление дальнейшей его перестройки на уровне образующих метаматериал элементов. Это отличает метаматериалы от обычных материалов и открывает захватывающие возможности по управлению их свойствами.

Концепция перестраиваемых метаматериалов заключается в возможности плавного изменения их свойств при помощи определенного внешнего воздействия. Ключ к перестройке резонансных метаматериалов, как и следует ожидать, лежит в воздействии на систему таким образом, чтобы изменить параметры резонанса. Характеристики метаматериала могут варьироваться, позволяя настраивать «окно» пропускания на определенную частоту.

Можно выделить несколько способов реализации перестройки метаматериалов, в том числе:

1. Модификация образующих элементов композитной структуры, например, разомкнутых кольцевых резонаторов или спаренных стержней. На микроволновых частотах такая модификация заключается во введении варикапа как нелинейного или управляемого извне элемента, что ведет к сдвигу резонансной частоты разомкнутого кольца. Для композитной структуры это вызовет изменение магнитного или электрического отклика (или обоих одновременно) при изменении мощности падающей волны [9–12];
2. Подбор подложки, на которой располагаются слои элементов, такие, как разомкнутые кольцевые резонаторы. Возможно использование специфических свойств подложки для достижения перестройки отклика всей структуры [13–15]. Схожим образом подложка может менять свои свойства при освещении;
3. Контроль свойств метаматериала путем изменения геометрии структуры с целью модификации ближнепольного взаимодействия между образующими структуру элементами – так называемая структурная перестройка [16, 17].

Возможность контроля эффективных параметров метаматериала с использованием нелинейного отклика разомкнутых кольцевых резонаторов была предложена в ряде статей [18–20], однако только недавно эти идеи были реализованы экспериментально в новейшем типе нелинейных и перестраиваемых структур [21, 22]. Схожий подход может быть использован и при создании нелинейных электрических метаматериалов [23]. Тем не менее, реализовать такие идеи на более высоких частотах достаточно сложно. Некоторые другие подходы, разработанные совсем недавно, основываются на аналогии с природными материалами, где свойства зависят от кристаллической структуры материала [17]. Метаматериалы предоставляют замечательную возможность конструирования уникальных структур с заранее заданной функцией отклика при использовании подходящего механизма перестройки. Что более важно, диапазон перестройки заданного свойства может значительно превышать таковой у природных материалов, так как эффекты решетки могут быть усилены благодаря более высокой эффективности коллективных взаимодействий в решетке, что достигается соответствующим проектированием метаматериала.

Ниже в статье обсуждаются возможности перестройки уединенного разомкнутого кольцевого резонатора как базового элемента для создания перестраиваемых и нелинейных метаматериалов. В качестве нелинейного настраиваемого элемента в каждый резонатор вводится варикап³, в результате чего сдвиг частоты магнитного или электрического резонанса достигается либо изменением подаваемого обратного напряжения, либо изменением мощности падающей волны. Обсуждаются нелинейные магнитные и электрические метаматериалы в разомкнутых кольцевых резонаторах. Приводятся исследования по эффективной перестройке метаматериалов, базирующейся на изменении структуры решетки и модификации свойств, получаемых при ближнепольном взаимодействии соседних элементов.

Возможность перестройки разомкнутых кольцевых резонаторов

Эффективный контроль резонанса разомкнутого кольцевого резонатора достигается добавлением емкостного диода (варикапа) на внешнем кольце резонатора в точке максимума электрических токов последовательно с емкостью кольца. Это обеспечивает простой механизм перестройки и позволяет достичь нелинейности свойств, обеспечивающих практическое применение метаматериалов, что особенно

² Среды, у которых ϵ и μ – одновременно отрицательные, называют «левыми». У таких сред электрический \mathbf{E} , магнитный \mathbf{H} и волновой векторы \mathbf{k} образуют систему левых векторов.

³ Варикап (от англ. *vari(able)* – «переменный», *cap(acity)* – «емкость») – полупроводниковый диод, работа которого основана на зависимости барьерной емкости p - n перехода от обратного напряжения.

актуально в свете недавних достижений в разработке магнитных тонкопленочных и микроволновых нелинейных метаматериалов. Симметричность и простота таких систем также ведет к обширным возможностям масштабирования, позволяющим перенести идеи создания подобных структур в терагерцовую и оптическую частотную области.

Для изучения перестраиваемости и нелинейности метаматериалов рассмотрим уединенный разомкнутый кольцевой резонатор, расположенный на подложке из стекловолкна (FR4, $\epsilon_r \approx 4,4$) с медной металлизацией [9], как показано на рис. 1, а. Радиус внутреннего кольца составляет 2,56 мм. Оба кольца имеют ширину 1,44 мм, расстояние между кольцами, так же как и величина щели размыкания, равно 0,32 мм. Простая цепь смещения состоит из соединенных параллельно проволочных индуктивностей (L1, L2) и развязывающего конденсатора (C1), что схематично проиллюстрировано на рис. 1, б.

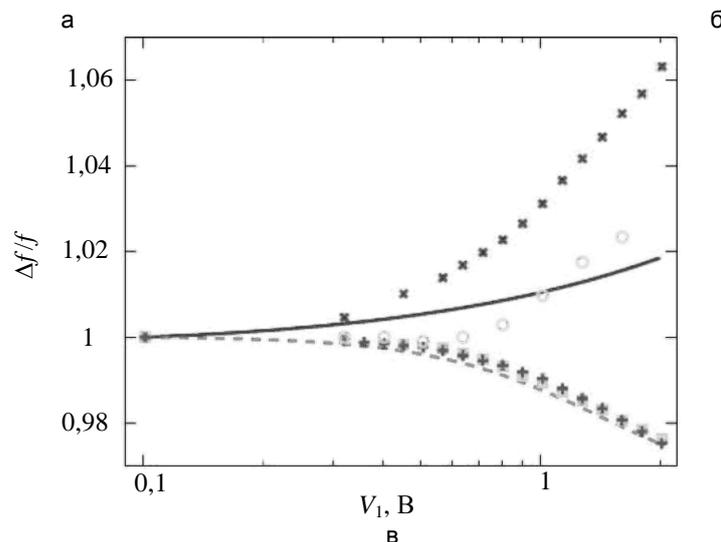
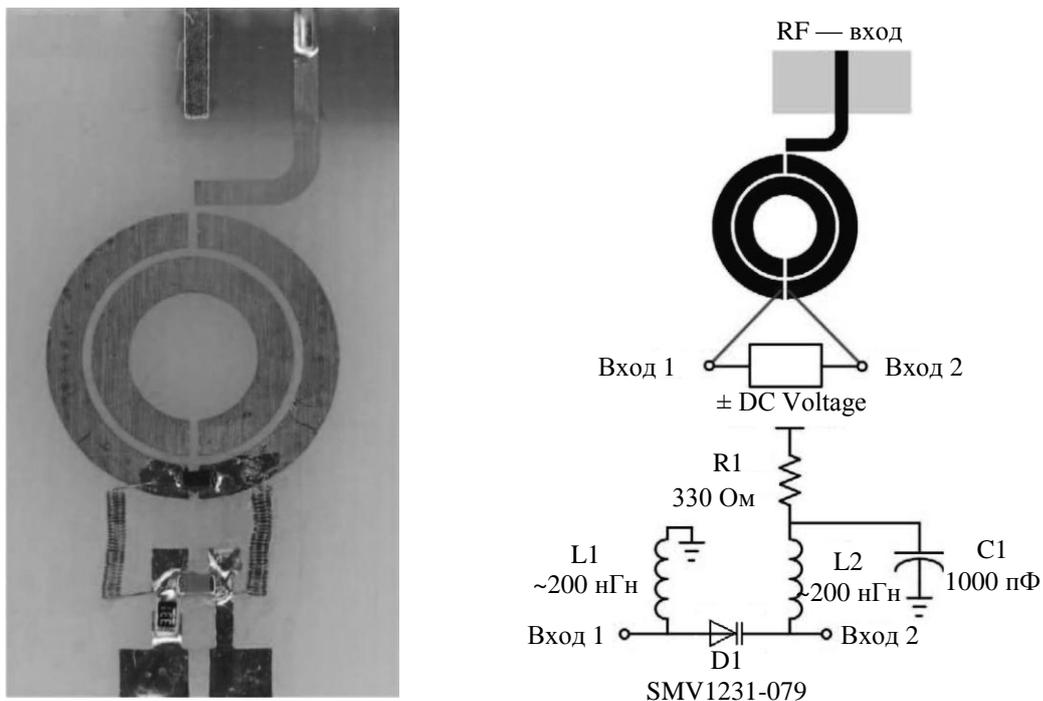


Рис. 1. Экспериментальный образец структуры, используемой для исследования перестраиваемости и нелинейности системы, состоящей из разомкнутого кольцевого резонатора, нагруженного варикапом: фотография изготовленного разомкнутого кольцевого резонатора и контура смещения для прямой настройки резонансной частоты (а); структура резонатор–диод и схема контура смещения (б); график сдвига резонансной частоты кольцевого резонатора в зависимости от напряжения на диоде, полученный из (*), без индуктивности (—) и с индуктивностью (----), а также рассчитанный численно без индуктивности (O), с индуктивностью (+++); измеренные значения без индуктивности (x) и с индуктивностью (□) (в)

Отметим, что для представленного образца при обратном напряжении смещения величиной около 10 В (на графике не показано) резонансная частота может быть смещена до 2,9 ГГц, При уменьшении напряжении смещения до 1 В резонансная частота снижается до 2,27 ГГц, то есть ширина полосы перестройки составляет 0,63 ГГц, что эквивалентно диапазону перестройки приблизительно 26%.

Различные режимы перестройки могут достигаться путем добавления индуктивности параллельно варикапу [10]. Индуктивность способна менять знак нелинейности и исключает эффект памяти, обусловленный накоплением заряда у варикапа. В дополнение к этому при более высоких мощностях нелинейный отклик разомкнутого кольцевого резонатора становится многозначным, открывая дорогу к созданию бистабильных перестраиваемых метаматериалов [10].

Варикап, подключенный к разомкнутому кольцевому резонатору, меняет резонансную частоту ω_r , согласно закону

$$\omega_r = \omega_0 \left(1 + \frac{C_{SRR}}{C_{eff}} \right)^{1/2}. \quad (*)$$

Здесь обозначения C_{eff} и C_{SRR} указывают на емкости варикапа и разомкнутого кольцевого резонатора соответственно, а $\omega_0 = (L_{SRR}C_{SRR})^{1/2}$, индекс «SRR» относится к разомкнутому кольцевому резонатору.

Обнаружено, что при отсутствии индуктивности варикап разряжается медленно. Следовательно, необходимо проводить плавное сканирование в частотной области, чтобы убедиться, что измерения на каждой частоте не затрагиваются эффектом детектирования, возникающим на другой частоте. Резонансная частота определялась из минимума коэффициента отражения, характер ее сдвига представлен на рис. 1, в, для случаев без индуктивности и с индуктивностью.

Конфигурация элемента без индуктивности показывает более сильную нелинейность, однако обладает упомянутым эффектом памяти, который замедляет отклик на изменение входной мощности. Также обнаружено, что резонатор без индуктивности крайне чувствителен к электромагнитным помехам [9]. Данная проблема почти полностью устраняется, как только резонатор помещается внутрь волновода. Эти результаты являются отправной точкой для создания нелинейных активных метаматериалов, состоящих из перестраиваемых разомкнутых кольцевых резонаторов.

Нелинейные магнитные метаматериалы

Нелинейные магнитные метаматериалы, функционирующие на микроволновых частотах, могут быть изготовлены посредством модификации свойств разомкнутых кольцевых резонаторов и подключения варикапа к каждому элементу композитной структуры [9, 10], так что вся структура становится динамически перестраиваемой с изменением амплитуды распространяющихся электромагнитных волн. Далее будет показано зависящее от мощности пропускание магнитных метаматериалов при более высоких мощностях [21, 22], как это было предложено ранее теоретически [18]. Экспериментально было реализовано нелинейное усиление и ослабление пропускания в динамически перестраиваемом магнитном метаматериале.

Образец метаматериала был изготовлен из печатных плат Rogers R4003 толщиной 0,5 мм с номинальным значением диэлектрической постоянной 3,4. В диэлектрических платах должным образом размещены пазы с покрытыми оловом медными нелинейными кольцевыми резонаторами. Фотография одной из экспериментальных нелинейных структур представлена на рис. 2, а. Каждый разомкнутый кольцевой резонатор содержит варикап (диод с переменной емкостью – модель Skyworks SMV-1405), который вводит нелинейную зависимость от тока, что приводит к нелинейности магнитного дипольного момента каждого из разомкнутых кольцевых резонаторов [9]. В терминах эффективных параметров среды изготовленная структура обладает нелинейным намагничиванием и нелинейной магнитной проницаемостью [18]. Массивы разомкнутых кольцевых резонаторов образуют двумерную прямую решетку из $29 \times 4 \times 1$ элементарных ячеек размером 10,5 мм.

Для обнаружения нелинейных эффектов проводились измерения пропускания перестраиваемого магнитного метаматериала при различных значениях входной мощности. При измерении рассеяния на исследуемых образцах метаматериал был размещен в плоскопараллельном волноводе. Плоскости разомкнутых кольцевых резонаторов были перпендикулярны пластинам волновода. Входная антенна располагалась посередине нижней пластины волновода на расстоянии 2 мм от блока метаматериала напротив центральной элементарной ячейки. Антенна состояла из проводника с тефлоновым напылением диаметром 1,26 мм и длиной 11 мм. Тефлоновое покрытие обеспечивает лучшую эффективность возбуждения волновода на используемой длине волны. Так как антенна располагалась перпендикулярно нижней пластине волновода, а возбужденное электрическое поле поляризовано перпендикулярно пластине, поляризация возбужденного поля оказывалась параллельной проводам. Магнитное поле волны имеет, главным образом, компоненты, лежащие в плоскости пластины, благодаря чему оно эффективно возбуждает

разомкнутые кольцевые резонаторы. Близость расположения антенны-источника к метаматериалу необходима для просачивания высокой электромагнитной мощности в образец с целью наблюдения нелинейных эффектов. Отметим, что изменение положения антенны-источника относительно центральной элементарной ячейки вносит незначительные количественные изменения в результаты измерений пропускания, однако качественно результаты оказываются идентичными. Это находит объяснение в изменении импедансного согласования антенны с образцом. Такая же антенна помещена и в центр верхней пластины, являясь приемником при измерениях спектра и растровом сканировании распределения электрического поля в горизонтальной плоскости. Входная антенна возбуждается векторным анализатором цепей Agilent E8364A, выход которого подключен к усилителю HP 83020A (уровень 38 дБ). В измерениях пропускания антенна-приемник располагалась на расстоянии 2 см сзади блока метаматериала напротив центральной элементарной ячейки метаматериала и также подключалась к векторному анализатору. Электрическое поле внутри волновода вычислялось по полученным амплитуде и фазе коэффициента пропускания S_{21} между входом источника и выходом приемника. Вследствие двумерности плоскопараллельного волновода, а также ввиду симметричности используемого образца ожидается, что электрическое поле в сканируемой области будет оставаться поляризованным главным образом перпендикулярно плоскости пластин.

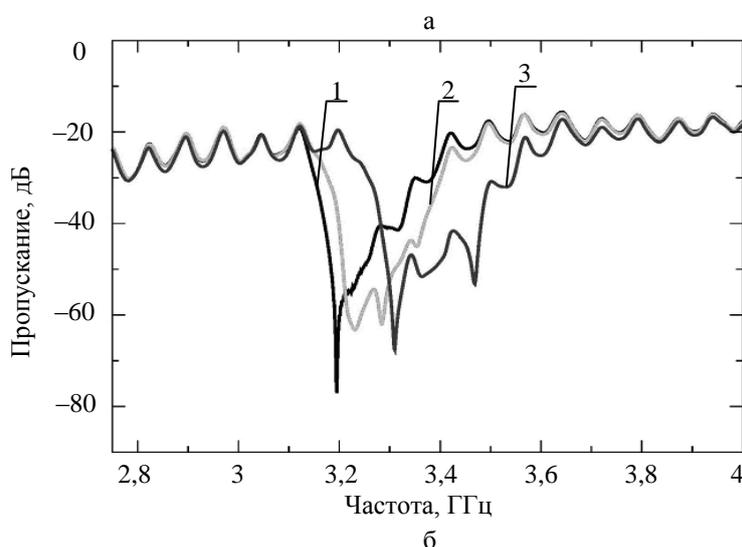


Рис. 2. Фотография нелинейного перестраиваемого магнитного метаматериала, образуемого прямой решеткой нелинейных разомкнутых кольцевых резонаторов. Каждый разомкнутый кольцевой резонатор содержит варикап с зависящим от мощности нелинейным откликом (а); измеренные коэффициенты пропускания нелинейного магнитного метаматериала при различных значениях уровней мощности: 1 — (-40) дБм, 2 — (-15) дБм, 3 — (-5) дБм (б)

С целью анализа индуцируемого сдвига магнитного резонанса как результата действия варикапов, введенных в разомкнутые кольцевые резонаторы, было измерено пропускание магнитного метаматериала для различных значений входной мощности. Рис. 2 б показывает зависимость коэффициента пропускания от частоты для трех значений входной мощности. Как и в случае единичного разомкнутого кольцевого резонатора [9, 10], резонансная частота сдвигается вправо с ростом входной мощности. Получен-

ные результаты показывают, что при выборе рабочей частоты вблизи резонанса становится возможным динамически изменять свойства пропускания метаматериала изменением входной мощности.

Если параметры метаматериала меняются и пересекают границу между положительными и отрицательными значениями эффективной магнитной проницаемости, то свойства структуры, такие как пропускание, будут также переключаться так, что материал может становиться как непрозрачным, так и прозрачным. Интенсивность электромагнитных волн, генерируемых точечным источником, неравномерна, следовательно, сдвиг резонансов каждого из разомкнутых кольцевых резонаторов неоднороден внутри метаматериала. Резонаторы, более близкие к источнику, будут взаимодействовать с более сильными полями, и тогда следует ожидать, что только центральная часть метаматериала будет становиться прозрачной. Экспериментальные результаты подтверждают это предположение, показывая узкую апертуру пучка, выходящего из метаматериала [22]. В таком же образце метаматериала может проявляться и обратный эффект, когда пропускание подавляется нелинейностью. В то время как метаматериал прозрачен для низких мощностей, рост амплитуды волны усиливает непрозрачность метаматериала, препятствуя распространению излучения через образец.

Нелинейные электрические метаматериалы

Зная, что нелинейный сдвиг резонанса приводит к относительно сильному нелинейному магнитному отклику, получаемому от разомкнутых кольцевых резонаторов, схожий подход можно использовать при создании нелинейных электрических резонаторов для получения сильного нелинейного электрического отклика [23]. Исследуемая структура показана на рис. 3, а, где введены два перпендикулярных набора плат с относительно изотропным откликом. Внутри каждого резонатора произведено дополнительное размыкание для размещения варикапа, вводящего дополнительную последовательную емкость, предназначенную для перестройки резонансной частоты. Период решетки составляет 11 мм, резонаторы расположены на плакированном медью FR4, имеют ширину и высоту 8 мм с шириной ленты кольца 1 мм и зазором размыкания 0,4 мм, длиной 2,4 мм.

Измерения передаточного отклика производились при значениях входной мощности 10, 20 и 30 дБм, как показано на рис. 3, б–г. На самой низкой входной мощности (10 дБм) возможности перестройки падающей волной существенно ограничены, т.е. передаточный отклик в этом случае почти линеен. Большие потери вдали от резонанса возникают по причине умышленного рассогласования принимающей пробы, которая сконструирована так, чтобы вносить минимальные возмущения в поля внутри структуры.

Рис. 3, б, показывает, что высокочастотная мода не сдвигает свою частоту при изменении падающей мощности. Данная мода состоит из двух контуров токов, текущих в одном направлении. Таким образом, их магнитные дипольные моменты аддитивно складываются. Так как скапливаемые по сторонам зазоров заряды имеют противоположные направления, это приводит к исчезновению дипольного момента. Вследствие того, что через центральный проводник не течет никакого тока, нелинейный отклик варикапа не играет роли. Модовые конфигурации и положения запрещенной зоны подтверждаются численным моделированием пропускания в CST Microwave Studio с использованием одного элемента, где электрические границы расположены вертикально, а магнитные границы – горизонтально.

Для сравнения были отдельно исследованы две ориентации печатных плат – когда они расположены нормально к направлению распространения и когда их положение параллельно к направлению распространения. Нелинейные передаточные отклики этих структур представлены на рис. 3, в, г. В обоих случаях сохраняется существенный нелинейный отклик.

В случае плат, перпендикулярных к направлению распространения, высокочастотной запрещенной зоны не существует. Это является следствием симметрии полей поперек зазоров и отсутствия какой-либо компоненты магнитного поля, нормальной к кольцам. Отметим, что, так как в эксперименте применяется источник с цилиндрической симметрией, имеется некоторая компонента волнового вектора, нормальная к номинальному направлению распространения, а, значит, по-прежнему имеется незначительная часть второго резонанса. Также следует отметить тот факт, что оба резонанса значительно модифицируются в изотропной конфигурации по сравнению с тем, когда они измеряются независимо. По всей вероятности, это происходит ввиду сильного электрического взаимодействия соседних плат в ортогональных направлениях, так как их зазоры оказываются в непосредственной близости друг от друга.

Структурная перестройка метаматериалов

Ниже обсуждается и демонстрируется экспериментально более новый подход к эффективному контролю характеристик пропускания метаматериалов, основанный на структурной перестройке. Это концепция довольно общая, и она применима к различным метаматериалам ровно до тех пор, пока корректно описывает их параметры с помощью модели эффективной среды.

Рассмотрим анизотропный метаматериал на базе разомкнутых кольцевых резонаторов, представленный на рис. 4, а. Для существенно густых массивов взаимодействие между элементами значительно

отличается от дипольного приближения, поэтому была разработана специальная процедура для расчета эффективной магнитной проницаемости [24]. Последняя корректно сходится к приближению Клаузиуса–Мосотти только в пределе сильно разреженной решетки. Следовательно, эффект взаимосопряжения по сравнению с обычными материалами радикально усиливается, что является крайне подходящим для демонстрации эффективности перестройки решетки.

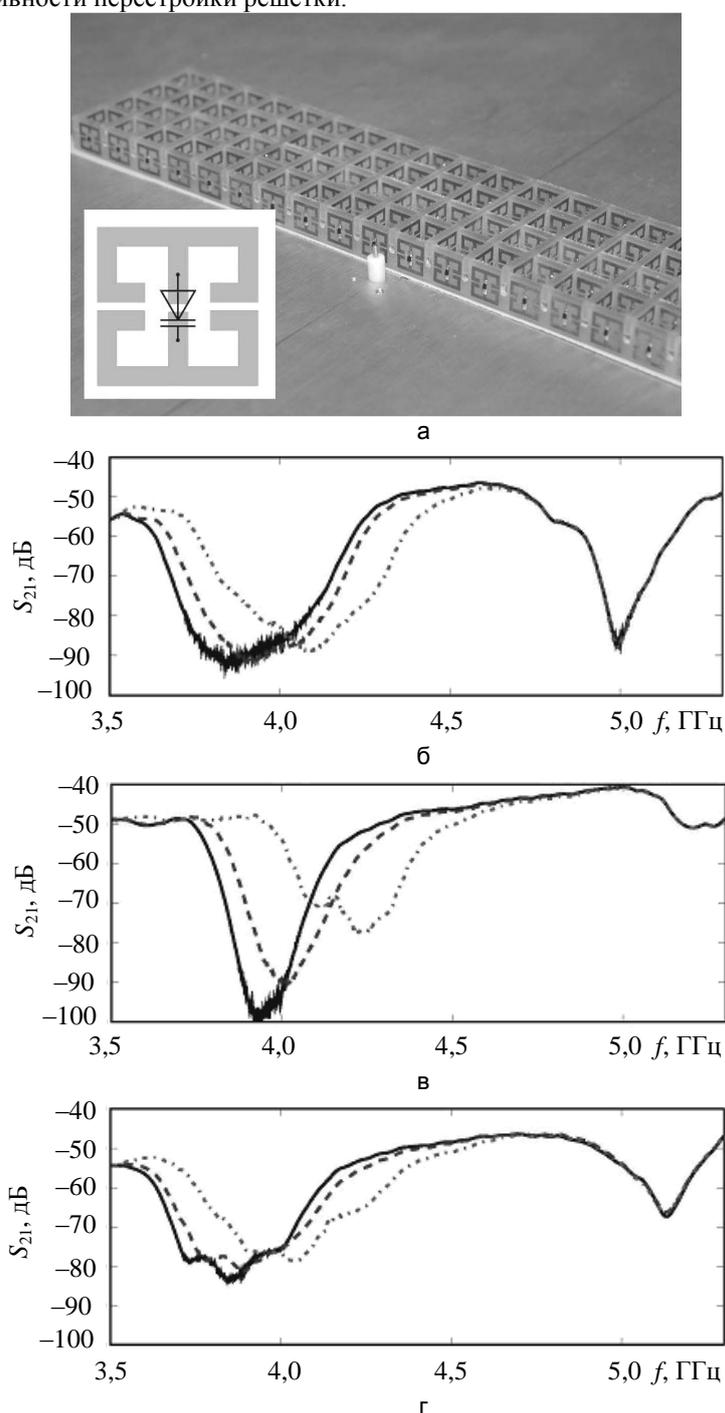


Рис. 3. Блок нелинейного электрического метаматериала, используемый в описываемых экспериментах (а). На вставке представлен структурный элемент. Экспериментально измеренное нелинейное пропускание при входных мощностях 10 (сплошная), 20 (пунктир) и 30 дБм (точки) при различных положениях плат: (б) – полный набор плат, (в) – платы перпендикулярны k , (г) – платы параллельны k

Прямым подходом к перестройке решетки служит изменение постоянной решетки b . Было показано [24], что подобным образом резонансная частота может быть заметно сдвинута. Это предположение было подтверждено в микроволновых экспериментах [16]. Так, блок метаматериала может быть настроен

последовательно на пропускание, поглощение и отражение с возможностью возврата к режиму пропускания.

Очевидным недостатком такого метода является то, что изменение b будет вести к соответствующему изменению полного размера метаматериала вдоль оси z , а для некоторых применений это может быть нежелательно.

Следуя недавней работе [17], обсудим основные принципы структурной перестройки посредством изменения периодического продольного смещения слоев в плоскости xy так, чтобы резонаторы смещались вдоль оси x (или y , или двух сразу) на некоторую часть постоянной решетки $\pm a$ для каждого b от слоя отсчета относительно первоначального положения. Это уменьшает полную взаимную индуктивность в системе и ведет к заметному постепенному увеличению резонансной частоты, при этом максимальный эффект достигается при смещении $0,5a$. Очевидно, что дальнейший сдвиг будет эквивалентен меньшим значениям сдвига до тех пор, пока решетка полностью транслирует себя с периодом a . Как следствие, резонанс среды может «двигаться» при постоянстве частоты сигнала, ведя к глубоким изменениям характеристик пропускания. Ясно, что для какого-либо частного применения может потребоваться не весь диапазон сдвигов решетки: в примере выше наиболее существенным являлось функционирование между $0,1a$ и $0,3a$, где происходят наиболее сильные смещения резонанса.

Для доказательства концепции мы остановились на небольшой реконфигурируемой системе, состоящей из колец с одним размыканием (средний радиус 2,25 мм, толщина кольца 0,5 мм, зазор 1 мм), нанесенных с периодом $a = 7$ мм на печатных платах толщиной 1,5 мм.

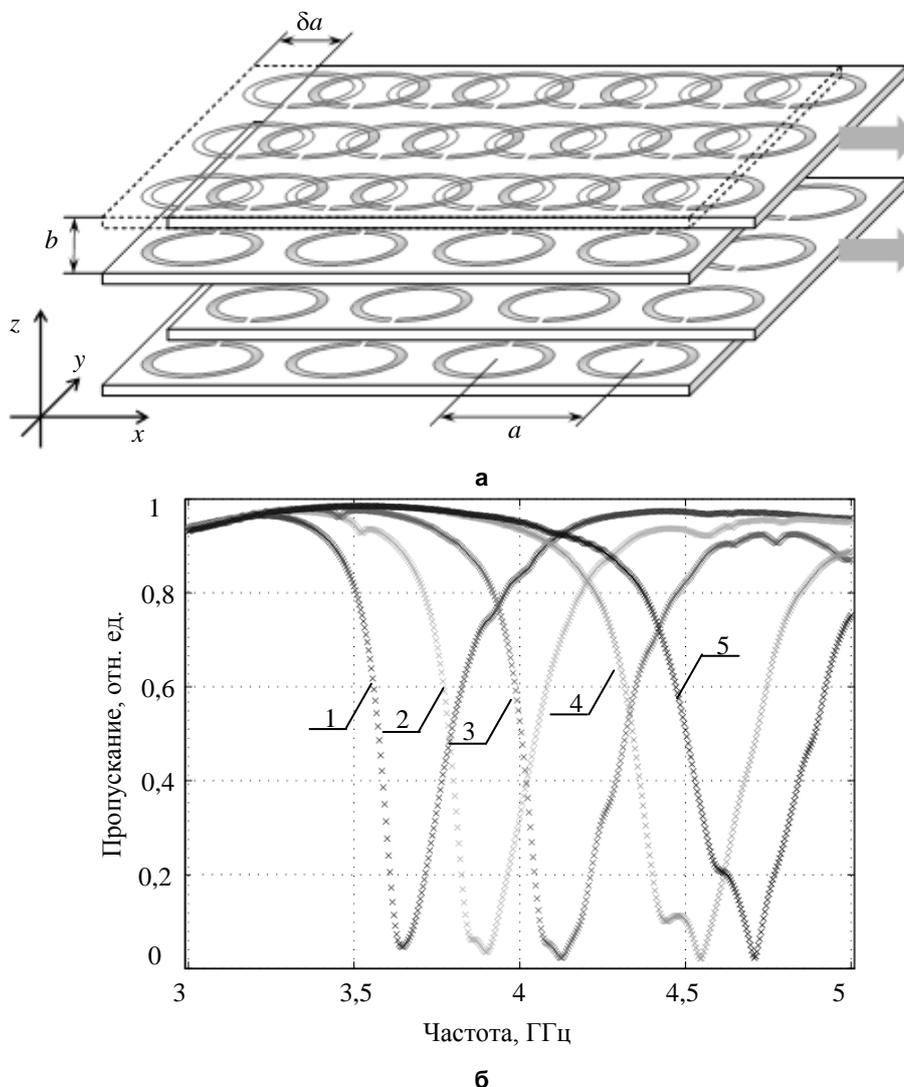


Рис. 4. Схематическое изображение одной из реализаций концепции перестраиваемой решетки в метаматериалах (а). Полученные экспериментально значения пропускания в волноводе с блоком метаматериала при различных сдвигах (1 — 0,0; 2 — 0,2; 3 — 0,3; 4 — 0,4; 5 — 0,5) (б). Слои ориентированы для сопряжения по широкой стенке. Кривые с провалами слева направо соответствуют увеличивающемуся сдвигу решетки

В направлении распространения x имеется 5 резонаторов, вдоль оси y только один период; 30 плат сложены вместе по направлению z с минимально возможной постоянной решетки $b = 1,5$ мм, используемой в измерениях. Оценка резонансной частоты уединенного резонатора (в диэлектрическом окружении) дает величину около 4,9 ГГц, однако резонанс массива резонаторов сдвигается к более низким частотам. Чтобы минимизировать нежелательные эффекты бианизотропии, связанные с единожды разомкнутыми кольцами, платы собирались так, чтобы размыкания колец в соседних слоях были сориентированы противоположно (рис. 4, а), аналогично разомкнутым кольцевым резонаторам с сопряжением по широкой стороне платы [25]. Измерения пропускания (с помощью анализатора цепей Rohde and Schwarz ZVB) были произведены для различных сдвигов решетки в прямоугольном волноводе WR-229.

Экспериментально измеренные спектры пропускания показаны на рис. 4, б. Они замечательно демонстрируют перестройку резонансной частоты. Более того, сравнение экспериментального сдвига резонанса с теоретическими предсказаниями показывает [17], что экспериментальная система демонстрирует еще большую эффективность. Это может быть объяснено образованием взаимной емкости между резонаторами, которыми мы пренебрегаем в теоретических расчетах. Действительно, для конфигурации колец с сопряжением по широкой стороне взаимная емкость между ними распределена вдоль всей окружности [25]. Очевидно, когда резонаторы продольно смещены, взаимная емкость уменьшается, таким образом данный эффект прибавляется к эффекту увеличения резонансной частоты, обусловленному уменьшением индуктивного сопряжения.

Заключение

В работе представлен краткий обзор основных экспериментальных результатов по конструированию, изготовлению и изучению характеристик перестраиваемых и нелинейных метаматериалов, функционирующих на микроволновых частотах. Такие структуры обладают как нелинейным магнитным, так и нелинейным электрическим откликом на микроволновых частотах. Они изготавливаются при помощи введения в структуру варикапов в качестве внешних перестраиваемых и нелинейных элементов. Возможность модификации резонанса разомкнутого кольцевого резонатора позволяет изменять усредненный отклик композитной структуры, делая ее параметры зависящими от внешнего напряжения смещения и падающей мощности. Обсужден предложенный новый подход к эффективной перестройке характеристик метаматериалов посредством плавного изменения структуры решетки – структурной перестройки. Некоторые из механизмов перестройки, обсуждаемые здесь, могут быть пригодными для масштабирования в оптический диапазон длин волн.

Авторы благодарят Правительство Российской Федерации за предоставленный мегагрант для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования; руководителя лаборатории «Метаматериалы» НИУ ИТМО П.А. Белова. Выражаем благодарность членам и посетителям Центра нелинейной физики в Канберре, а также соавторам оригинальных результатов, обобщенных в настоящей статье, в частности М.В. Горкунову, А.Б. Козыреву, М. Лапину, С. Моррисону, Д. Пауэллу и И.В. Шадривову.

Литература

1. Pendry J.B., Holden A.J., Stewart W.J., and I. Youngs. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures // *Phys. Rev. Lett.* 1996. V. 76. P. 4773.
2. Pendry J.B., Holden A.J., Robbins D.J., and Stewart W.J. Magnetism from conductors and enhanced non-linear phenomena // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 1999. V.47. P.2075.
3. Markos P. and Soukoulis C.M. Transmission studies of left-handed materials // *Phys. Rev. E.* 2002. V. 65. P. 036622.
4. Smith D.R., Padilla W., Vier D.C., Nemat-Nasser S.C., and Shultz S. Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity // *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 84. P. 4184.
5. Parazzoli C.G., Greigor R.B., Li K., Koltenbah B.E.C., and Tanielian M., Experimental Verification and Simulation of Negative Index of Refraction Using Snell's Law // *Phys. Rev. Lett.* 2003. V. 90. P. 107401.
6. Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ // *УФН.* 1967. Т. 8. С. 2854.
7. Lapine M. and Tretyakov S. Contemporary notes on metamaterials // *IET Microwaves Antennas & Propagation.* 2007. V. 1. P. 3.
8. Sihvola A. Metamaterials in electromagnetic // *Metamaterials.* 2007. V. 1. P. 2.
9. Shadrivov I.V., Morrison S.K., and Kivshar Yu.S. Tunable split-ring resonators for nonlinear negative-index metamaterials // *Optics Express.* 2006. V. 14. P. 9344.
10. Powell D.A., Shadrivov I.V., Kivshar Yu.S., and Gorkunov M.V. Self-tuning mechanisms of nonlinear split-ring resonators // *Appl. Phys. Lett.* 2007. V. 91. P. 144107.

11. Wang B., Zhou J., Koschy T., and Soukoulis C.M. Nonlinear properties of split-ring resonators // Opt. Express. 2008. V. 16. P. 16058.
12. Boulaïss K.A., Rule D.W., Simmons S., Santiago F., Gehman V., Long K., and Rayms-Keller A. Tunable split-ring resonator for metamaterials using photocapacitance of semi-insulating GaAs // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. P. 043518.
13. O'Brien S., McPeake D., Ramakrishna S.A., and Pendry J.B. Near-infrared photonic band gaps and nonlinear effects in negative magnetic metamaterials // Phys. Rev. B. 2004. V. 69. P. 241101.
14. Sheng Z. and Varadan V.V. Tuning the effective properties of metamaterials by changing the substrate // J. Appl. Phys. 2007. V. 101. P. 014909.
15. Shen N.-H., Kafesaki M., Koschny T., Zhang L., Economou E.N., and Soukoulis C. Broadband blue-shift tunable metamaterials and dual-band switches // Phys. Rev. B. 2009. V. 79. P. 161102(R).
16. Shadrivov I.V., Powell D.A., Morrison S.K., Kivshar Yu.S., and Milford G.N. Scattering of electromagnetic waves in metamaterial superlattices // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. P. 201919.
17. Lapine M., Powell D., Gorkunov M., Shadrivov I., Marques R., and Kivshar Yu.S. Structural tunability in metamaterials // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 95. P. 084105.
18. Zharov A.A., Shadrivov I.V., and Kivshar Yu.S. Nonlinear properties of left-handed metamaterials // Phys. Rev. Lett. 2003. V. 91. P. 037401.
19. Lapine M., Gorkunov M., and Ringhofer K.H. Nonlinearity of a metamaterial arising from diode insertions into resonant conductive elements // Phys. Rev. E. 2003. V. 67. P. 065601.
20. Gorkunov M. and Lapine M. Tuning of a nonlinear metamaterial band gap by an external magnetic field // Phys. Rev. B. 2004. V. 70. P. 235109.
21. Shadrivov I.V., Kozyrev A.B., van der Weide D.W., and Kivshar Yu.S. Tunable transmission and harmonic generation in nonlinear metamaterials // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. P. 161903.
22. Shadrivov I.V., Kozyrev A.B., van der Weide D.W., and Kivshar Yu.S. Nonlinear magnetic metamaterials // Opt. Express. 2008. V. 16. P. 20266.
23. Powell D.A., Shadrivov I.V., and Kivshar Yu.S. Nonlinear electric metamaterials. // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 95. P. 084102.
24. Gorkunov M., Lapine M., Shamonina E., and Ringhofer K.H. Effective magnetic properties of a composite material with circular conductive elements // Eur. Phys. J. B. 2002. V. 28. P. 263.
25. Marques R., Mesa F., Martel J., and Medina F. Comparative Analysis of Edge- and Broadside- Coupled Split Ring Resonators for Metamaterial Design — Theory and Experiments // IEEE Trans. Anten. Propag. 2003. V. 51. P. 2572.

Кившарь Юрий Семенович

– Австралийский Национальный университет, Центр нелинейной физики, профессор, ysk@internode.on.net

Орлов Алексей Анатольевич

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, alexey.orlov@phoi.ifmo.ru