

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.11.2>

УДК (621.371.332.3: 621.396.96): 537.876.23

## СОВРЕМЕННЫЕ УСТРОЙСТВА, АНТЕННЫ И ОТРАЖАТЕЛИ С НЕВЗАИМНЫМИ СВОЙСТВАМИ (ОБЗОР)

А. Н. Сычев, Н. Д. Малютин

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

Статья поступила в редакцию 5 октября 2020 г.

**Аннотация.** В обзоре рассматриваются СВЧ антенны, устройства (включая отражатели), материалы и среды с не взаимными свойствами, которые из-за их уникальности и перспективности применения стали темой большого количества научных исследований и публикаций. Отмечается, что амплитудная не взаимность может быть реализована не только с помощью подмагниченных ферритов и полупроводниковых усилителей, но и на основе параметрических и нелинейных структур с использованием пространственно-временной модуляции. Делается вывод о том, что поляризационная не взаимность также может быть достигнута и на без магнитных компонентах, включая варикапы, другие параметрические элементы. При анализе взаимных отражателей, выполненных как на «тонких» поверхностных структурах, так и на объемных волноводах, рассматриваются взаимные кросс-полярирующие (деполярирующие) отражатели-«невидимки», преобразующие исходную поляризацию падающей волны в ортогональную поляризацию отраженной, которые могут быть построены с использованием лишь взаимных пассивных компонентов без применения не взаимных (ферритовых циркуляторов, гираторов и т.п.). Совмещение поляризационных и не взаимных свойств в радарных отражателях, RFID-метках и т.п., является дополнительной степенью свободы при проектировании радиоэлектронных систем нового поколения.

**Ключевые слова:** не взаимное отражение, поляризационная не взаимность, пространственно-временная модуляция, кросс-полярирующие отражатели, RFID-метки.

**Abstract.** The review deals with microwave antennas, devices (including reflectors), materials and media with nonreciprocal properties, which, due to their uniqueness and promising application, have become the topic of a large number of scientific studies and publications. It is noted that amplitude nonreciprocity can be realized not only with the help of magnetized ferrites and semiconductor amplifiers, but also based on parametric and nonlinear structures using space-time modulation. Therefore, polarization nonreciprocity can also be achieved on magnet-free components, including varactors, and other parametric elements. When analyzing reciprocal reflectors made both on "thin" surface structures and on bulk waveguides, it is appropriate to consider reciprocal cross-polarizing (depolarizing) "invisible"-reflectors, converting the initial polarization of the incident wave into the orthogonal polarization of the reflected wave, which can be built with using only reciprocal passive components without the use of non-reciprocal ones (ferrite circulators, gyrators, etc.). The combination of polarization and nonreciprocal properties in radar reflectors, RFID tags, etc., is an additional degree of freedom in the design of new generation electronic systems.

**Key words:** non-reciprocal reflection, polarization nonreciprocity, space-time modulation, cross-polarizing reflectors, RFID tags.

## Введение

Большинство СВЧ устройств (рис. 1) при моделировании представляются или двухпортовыми устройствами, т.е. четырёхполюсниками, работающими «на проход», или однопортовыми устройствами, т.е. двухполюсниками, работающими «на отражение» (отражательные и согласованные нагрузки, отражатели и поглотители).

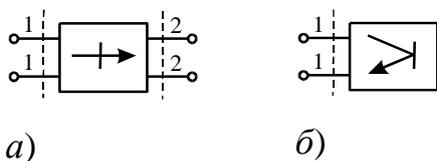


Рис. 1. Эквивалентные схемы СВЧ устройств: *а* – проходные; *б* – отражательные

Устройства, работающие «на проход», можно разделить на: 1) взаимные и 2) невзаимные. Невзаимность устройств может быть следующих типов: 1) амплитудная; 2) фазовая; 3) частотная (преобразование частоты, включая доплеровский сдвиг); 4) поляризационная. Как правило «проходные» невзаимные СВЧ-устройства строятся на подмагниченных ферритах; к ним относятся: вентили; циркуляторы (амплитудная невзаимность) и гираторы (фазовая невзаимность) [1]. Кроме того, невзаимными СВЧ-устройствами являются усилители, имеющие два порта – входной и выходной. Заметим, что существование однопортовых невзаимных отражательных устройств невозможно из-за отсутствия второго порта, что не позволяет сформировать внутри таких устройств проходной канал и, тем самым, обозначить в них прямое и обратное направления передачи. При этом, однопортовые отражательные усилители (на туннельных диодах или транзисторах) с коэффициентом отражения, превышающем единицу, существуют и являются весьма эффективным решением в ряде приложений, например, при создании «дальнобойных» меток (тегов) радиочастотной идентификации RFID.

## **1. Радиолокационные отражатели с управляемыми поляризационными свойствами**

В [2] рассматриваются рассеивающие свойства различных объектов (в том числе невзаимного рупорного отражателя) в радиолокационных диапазонах волн, которые исследуются при соблюдении условий теоремы взаимности. Создание радиолокационных отражателей с четко выраженными невзаимными свойствами позволяет решать задачу обнаружения цели с помощью поляризационных маркеров на фоне подстилающей поверхности. Такие отражатели могут быть использованы как навигационные маяки при управлении воздушным и морским транспортом, стандартные объекты при составлении спутниковых карт земной поверхности, а также в военной технике.

В предложенном в патенте [3] радиолокационном отражателе (рис. 2) падающее поле  $e_0$  возбуждает первый и второй каналы антенны 1 и на их выходах формируются сигналы  $E_1$  и  $E_2$ .

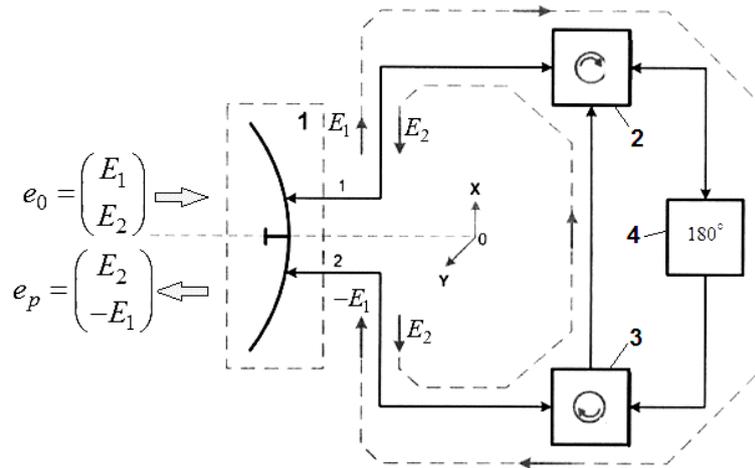


Рис. 2. Радиолокационный отражатель с управляемыми поляризационными свойствами [3]: 1 – двухканальная антенна полного поляризационного приема передачи; первый циркулятор 2 и второй циркулятор 3; двунаправленный фазовращатель 4.

Падающий сигнал на выходах каналов антенны 1 можно записать в виде вектора

$$e_0 = \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Сигнал  $E_1$  проходит первый циркулятор 2, фазовращатель 4, второй циркулятор 3, возбуждает второй выходной канал антенны 1 и излучается в пространство в обратном, по отношению к полю  $e_0$ , направлению. Сигнал  $E_2$  проходит второй циркулятор 3, первый циркулятор 2, возбуждает первый выход канала антенны 1 и излучается в пространство в обратном, по отношению к полю  $e_0$ , направлении. Отраженный сигнал можно записать в виде вектора

$$e_p = \begin{pmatrix} E_2 \\ -E_1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Соответствие между векторами  $e_0$  и  $e_p$  определяется оператором  $S$  в виде соотношения

$$e_p = S \cdot e_0 = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_2 \\ -E_1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где  $S$  - матрица обратного рассеяния заявляемого радиолокационного отражателя. Из выражения (3) следует, что матрица рассеяния заявляемого радиолокационного отражателя имеет вид антисимметричного оператора

$$S = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Таким образом, показанный отражатель является фазонезвзаимным.

В [4] описан отражатель с управляемыми поляризационными свойствами, представляющий собой пассивную переизлучающую антенну полного поляризационного «приема-передачи» электромагнитной волны, в которой установка требуемых поляризационных свойств обратного рассеяния, включая коэффициент невзаимности, производится путем регулировки управляемых аттенюаторов и фазовращателей, включенных в тракты прохождения поляризационно-ортогональных компонентов переизлучаемой волны, а также заданием угла ориентации фазовой пластинки в круглом волноводе облучателя переизлучающей антенны. При этом в тракты питающих фидеров антенны установлены невзаимные элементы – циркуляторы, обуславливающие разные пути прохождения поляризационно-ортогональных компонентов падающей волны при её обратном рассеянии. Этот отражатель может служить в качестве:

- 1) маркерного отражателя при решении задач навигации по пассивным маякам;
- 2) калибровочного отражателя при калибровке поляризационных РЛС. Он обеспечивает возможности имитации поляризационных свойств радиолокационных отражателей, в том числе с невзаимными свойствами обратного рассеяния электромагнитной волны.

## 2. Среды с пространственно-временной модуляцией

В работе [5] рассмотрены принципы и применение пространственно-временной модуляции (ПВМ). Отмечается, что постоянно растущая потребность в беспроводных системах высокоскоростной передачи данных

ведёт к переполнению электромагнитного (ЭМ) спектра. Эта потребность стимулирует разработку универсальных интегральных СВЧ и КВЧ компонентов, обладающих высокой селективностью, многофункциональностью и эффективностью. При этом требуются компоненты из класса невзаимных (НВ, nonreciprocity – NR) структур, обладающих дополнительными функциональными свойствами, включая генерацию частоты, усиление волны и возможность полнодуплексной связи. Было показано, что пространственно-временная (ПВ) модуляция является идеальным кандидатом для высокоскоростной передачи данных, учитывая ее исключительные возможности для техники электромагнитных волн.

Среды с пространственно-временной модуляцией (среды ПВМ, space-time modulated media, STM media) являются динамическими направляющими электромагнитными структурами, чьи основные параметры изменяются как в пространстве, так и во времени. В последнее время в научных и инженерных кругах обратили значительное внимание на ПВМ-среды. Их уникальные и экзотические свойства привели к развитию оригинальных физических концепций и новых устройств в области акустики, микроволн, терагерцевых технологий и оптики.

В начале в 1950-х и 1960-х годах ПВМ-среды изучались в контексте параметрических усилителей бегущей волны. В то время свойство магнитной невзаимности (МНВ, magnet-based nonreciprocity) было доминирующим подходом в реализации вентилей (изоляторов), циркуляторов и других невзаимных устройств. Однако магнитной невзаимности свойственны громоздкость, неинтегрируемость, большой вес и плохая совместимость с высокочастотными технологиями. В последнее время тема ПВ-модуляции испытывает всплеск научного интереса благодаря необычному и уникальному свойству невзаимности (НВ, nonreciprocity – NR). ПВМ-среды устраняют проблемы, связанные с традиционными НВ-структурами, т.е. громоздкость, тяжесть и несовместимость с технологией интегральных схем на основе магнитной невзаимности, ограничения по мощности для нелинейных НВ-

структур, а также ограничения по частоте и по мощности для НВ-устройств на основе транзисторов. Она обеспечивает асимметричные межзонные фотонные переходы, субсветовые и сверхсветовые фазовые скорости, асимметричные диаграммы дисперсии, а также обладает возможностью для накопления энергии. В последнее время благодаря использованию уникальных свойств ПВМ были реализованы различные новые технологии, а также высокоэффективные немагнитные микроволновые и оптические компоненты, такие как: вентили (изоляторы); циркуляторы; смесители частоты; метаповерхности; однонаправленные расщепители луча; невзаимные антенны. В обзоре [5] на основе 62 источников излагаются принципы, теоретический анализ и результаты численного моделирования ПВМ-сред, а также их применение в системах связи. Структура обзора следующая: 1) принципы ПВ-модуляции; 2) синусоидальная ПВМ-среда; 3) применение ПВ-модуляции: а) немагнитные линейные вентили (magnet-free linear isolators); б) ПВМ немагнитные циркуляторы (STM magnet-free circulator); в) приемопередающие модули (широкополосные невзаимные компоненты с малыми потерями, невзаимный передатчик, полнодуплексный трансивер); г) чистый смеситель частот (pure frequency mixer).

В разделе «Невзаимное рассеяние» [5] со ссылкой на [6] описан эффект однонаправленности вследствие ПВ-модуляции при передаче волн через ПВМ-пластину для прямых и обратных задач. На рис. 3 а, б приведены соответственно численные результаты во временной и частотной областях для амплитуды электрического поля в прямой задаче. Здесь электромагнитная волна падает на квазиакустическую ПВМ-пластину, обладающую синусоидальной ПВМ диэлектрической проницаемостью  $\delta_\epsilon = 0,3$  и равномерной магнитной проницаемостью  $\delta_\mu = 0$ . Из рисунка видно, что волна сильно взаимодействует со средой, и падающая мощность на  $\omega_0$  эффективно передается на ПВ гармонике (ПВГ) на частотах  $\omega_0 \pm n\omega_m$ ,  $n \geq 1$ , оставляя слабую проходящую волну на частоте падения  $\omega_0$ . Напротив, падающая волна

в обратной задаче (рис. 3 в, з) проходит через пластину ПВМ со слабым взаимодействием и незначительным обменом мощностью с ПВ-модуляцией. Эти графики показывают, что среда с ПВ-модуляцией ведет себя по-разному при прохождении прямой и обратной волн, поддерживая сильные ПВ гармоника в прямом направлении и слабые в обратном.

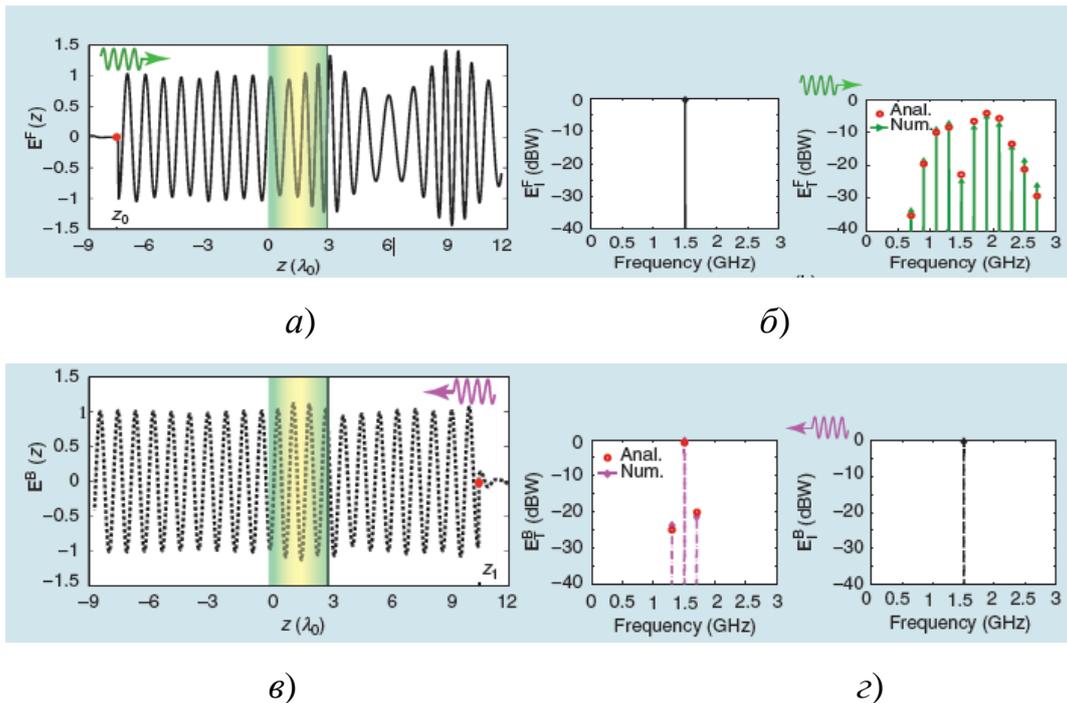


Рис. 3. Аналитические и численные (Anal., Num.; FDTD) результаты для прямой и обратной задач в квазиакустическом режиме: а и в – расчетные формы сигналов FDTD, показывающие амплитуду электрической волны для прямой и обратной задач соответственно; б и з – частотный спектр падающей и прошедшей волн для прямой и обратной задач соответственно [5].

В разделе «Безмагнитные (magnet-free) линейные вентили» [5], опять же со ссылкой на [6], описан квазиакустический СВЧ вентиль (изолятор) реализованный на вышеупомянутом эффекте. Исследовано рассеяние падающих электромагнитных волн от пластин с периодической пространственно-временной модуляцией (periodically space-time modulated slabs). Показано, что такие структуры работают как: а) невзаимные генераторы гармоник (nonreciprocal harmonic generators); б) пространственно-частотные фильтры (spatial-frequency filters). При падении волны низкочастотные

гармоники преобразуются в поверхностные волны, а высокочастотные передаются как пространственные волны. В квазиакустическом (quasisonic) режиме, когда скорость пространственно-временной (ПВ) модуляции близка к скорости электромагнитных волн в фоновой среде, волна, падающая в прямом направлении, имеет сильную связь с пространственно-временной гармоникой, при этом в обратном направлении она слабо связана с другими гармониками. Эта невзаимность на квазиакустическом эффекте используется для реализации электромагнитного вентиля (изолятора), показанного на рис. 4 и экспериментально продемонстрирована в СВЧ диапазоне.

### 3. Метаматериалы

В статье [7] предлагается концепция структуры распределенно-модулированных конденсаторов (РМК, distributedly modulated capacitors – DMC) в виде изменяющейся во времени структуры линии передачи, обеспечивающей невзаимные характеристики передачи и связи. Невзаимность достигается за счет использования дополнительного измерения – временной дисперсии – в свойстве линии передачи (рис. 5). Представлена полная теория, основанная на: а) распределенном параметрическом воздействии на изменяющуюся во времени линию передачи; б) распределенных емкостных смесителях, с акцентом на теоретические границы характеристик обратной изоляции и прямой передачи РМК (рис. 6).

Проведено моделирование и реализован прототип на печатной плате Rogers, состоящий из двух симметричных варакторных диодов на микрополосковых линиях (рис. 7–9).

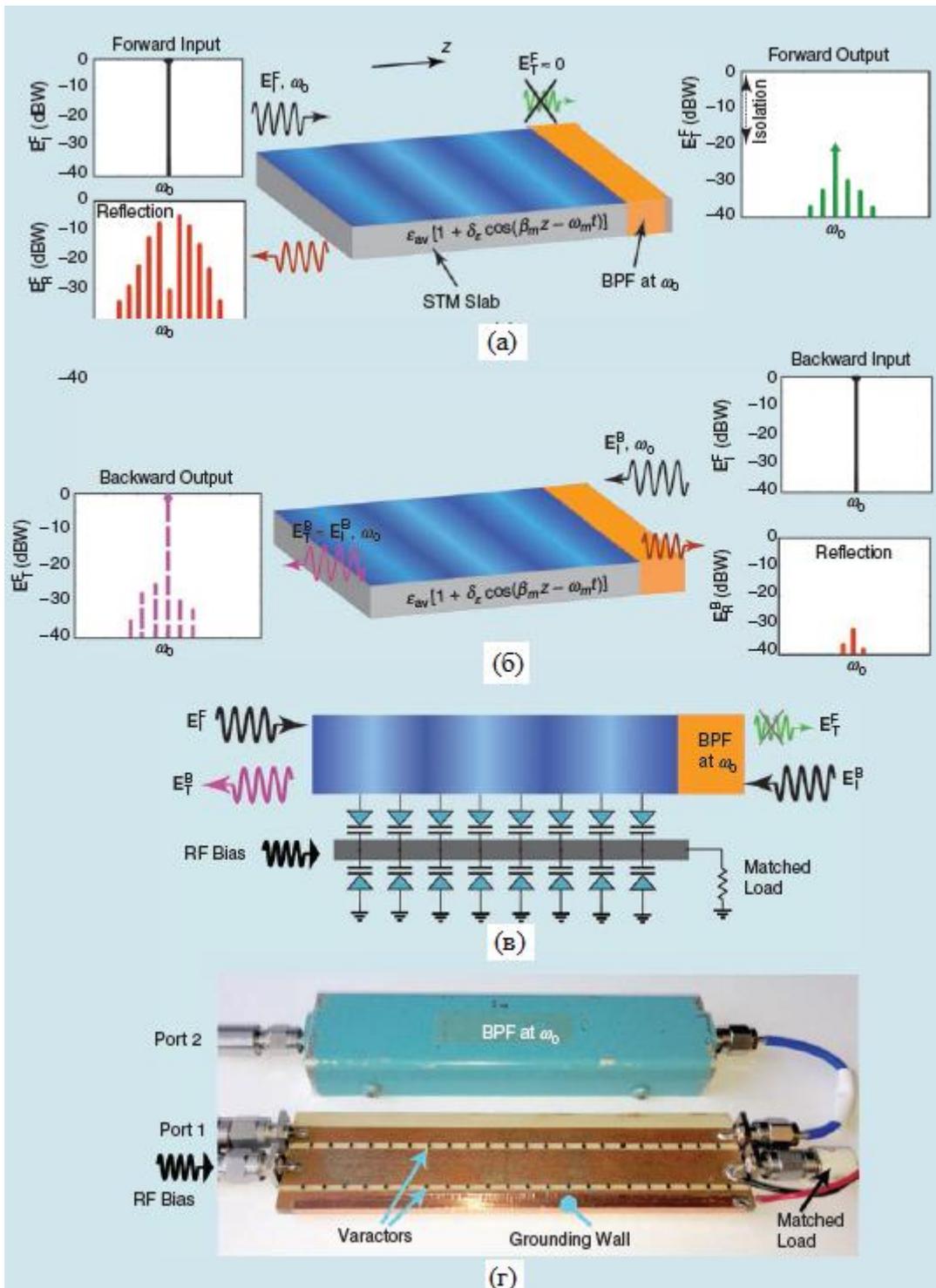


Рис. 4. Квазиакустический вентиль (изолятор) с ПВ - модуляцией: *a* – экспериментальные результаты для прямой передачи; *б* – экспериментальные результаты для обратной передачи; *в* – схема вентиля; *г* – фото изготовленного вентиля с полосно-пропускающим фильтром (BPF).

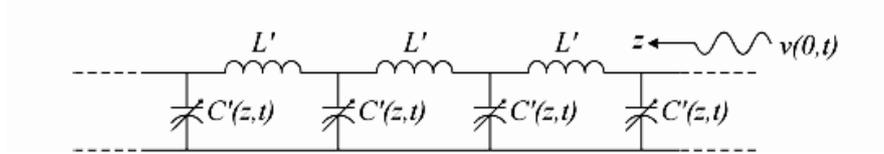


Рис. 5. Линия передачи с изменяющимися во времени параметрами, в которой погонная емкость является функцией времени и пространства (продольной координаты).

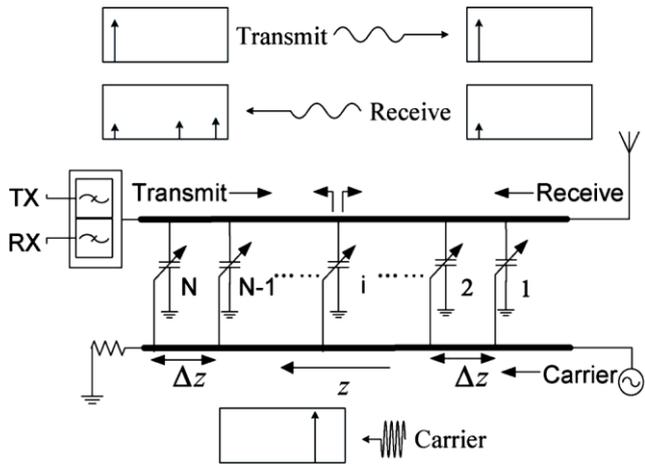


Рис. 6. Концепция предложенных распределено-модулированных конденсаторов (РМК) для применения в качестве циркулятора.

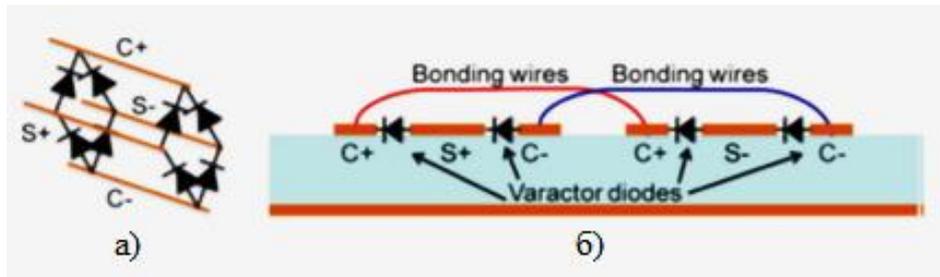


Рис. 7. РМК, реализованные в виде двойной балансной линии: а – линия передачи с двумя блоками элементов; б – микрополосковая линия с одним блоком элементов.

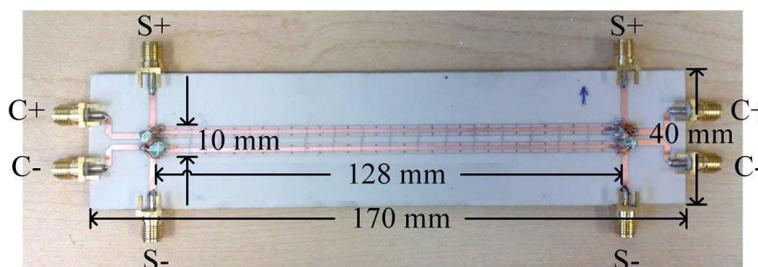


Рис. 8. Прототип РМК на печатной плате с 16-ю блоками двойных балансных варикапов, нагруженных на микрополосковую линию.

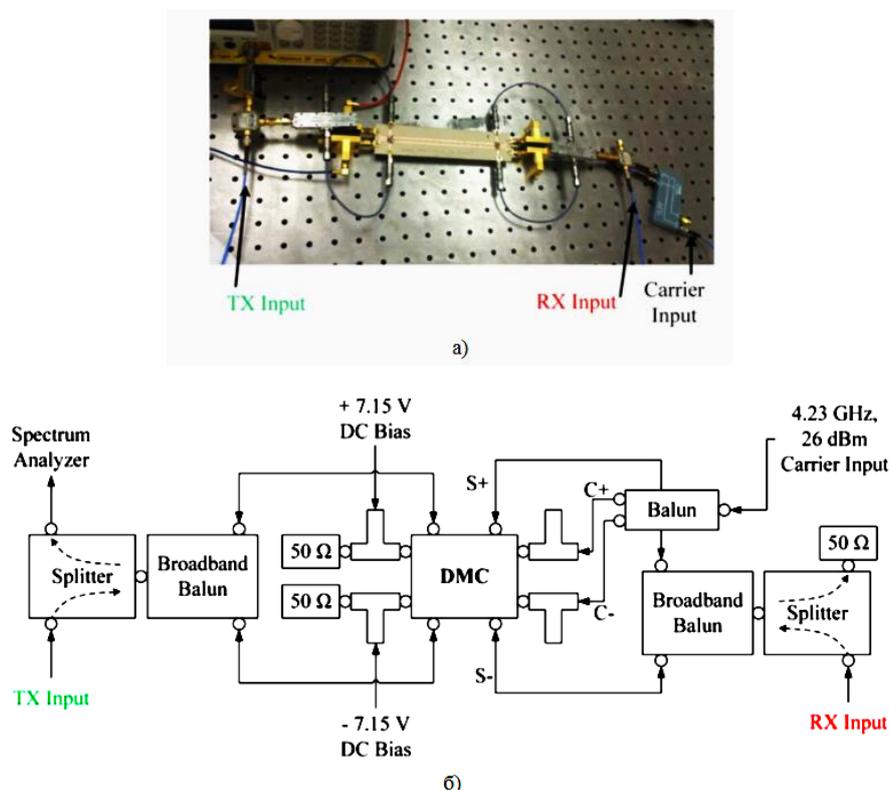


Рис. 9. Система для измерения характеристик развязки (изоляции) и вносимого усиления РМК: *a* – фотография; *б* – структурная схема.

Результаты измерений хорошо согласуются с теоретическим замыслом и результатами моделирования. В итоге, подтверждено, что РМК обладают большим потенциалом в качестве широкополосного циркулятора с минимальными вносимыми потерями и синтезируемыми характеристиками изоляции. Он может быть интегрирован во внешнюю радиочастотную систему, что позволит передавать и принимать сигналы одновременно на одной и той же частоте.

В [8] утверждается, что метаматериалы с временной модуляцией в последнее время привлекли к себе большое внимание из-за их свойств невзаимности и частотного преобразования. Сообщается, что прозрачная метаповерхность с временной модуляцией функционирует как серродинный преобразователь частоты X-диапазона, показанный на рис. 10, где серродин представляет собой линейный фазовый модулятор (в общем, это модулятор с линейным изменением фазы или задержки).

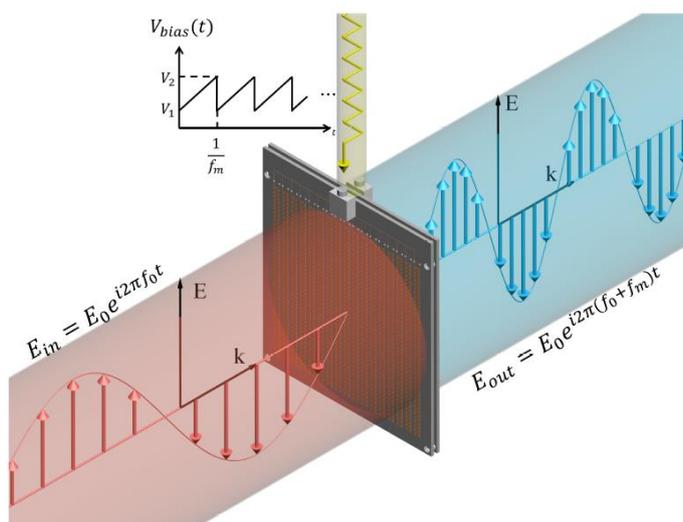


Рис.10. Прозрачный серродинный преобразователь частоты на основе метаповерхности.

Благодаря простой архитектуре смещения метаповерхность обеспечивает электрически перестраиваемую фазу коэффициента передачи, достигающую  $360^\circ$ . Для модуляции метаповерхности используется пилообразная форма напряжения, обеспечивающая преобразование частоты, подобное доплеровскому. Две такие метаповерхности могут быть соединены каскадно для получения безмагнитных (magnet-less) устройств с фазовой или амплитудной невзаимностью (non-reciprocity).

#### 4. Невзаимный волновой перенос и реализация усиливающих сред

В [9] отмечается, что пространственно-временная модуляция (ПВМ) добавляет еще одну мощную степень свободы для манипулирования классическими волновыми системами. Это открывает возможности для комплексного управления волновым поведением, недоступного для стационарных систем, таких как невзаимный волновой перенос и реализация усиливающих сред. Здесь обобщается метод матрицы передачи и используется для создания общей основы для решения задач распространения волн в изменяющихся во времени акустических, электромагнитных и электрических схемах. Предлагаемый метод обеспечивает универсальный подход к изучению общих пространственно-временных систем, который допускает любое количество модулированных во времени элементов с произвольным шаблоном модуляции, позволяет исследовать моды высокого порядка и обеспечивает

интерфейс между пространственно-временными характеристиками системы с временной модуляцией и другими системами.

В [10] отмечается, что невзаимные электронные компоненты обычно реализуются с использованием ферритов, но такие магнитные материалы не могут быть интегрированы в современные процессы производства полупроводников, а магнитные невзаимные компоненты остаются громоздкими и дорогими. Создание невзаимных компонентов без использования магнитных материалов имеет долгую историю, но в последнее время она получила новый импульс благодаря достижениям в полупроводниковой технологии. Здесь рассматривается развитие безмагнитной невзаимной электроники и невзаимных устройств; уделяется особое внимание устройствам, основанным на временной (темпоральной) модуляции, которые, возможно, обладают наибольшим потенциалом. Рассматриваются подходы, основанные на временной модуляции диэлектрической проницаемости и проводимости, а также гибридные акустоэлектронные компоненты, применяемые в мощных передатчиках для связи с одновременной передачей и приемом, в радарх, а также в полнодуплексных беспроводных радиостанциях. Также исследуются сверхпроводящие невзаимные компоненты, основанные на временной модуляции магнитной проницаемости, для возможных применений в квантовых вычислениях и рассматриваются новые ключевые вызовы в этой области.

## **5. Невзаимность антенн**

В статье [11] констатируется, что антенны обычно представляют собой взаимные (обратимые) устройства, имеющие одинаковые свойства при передаче и приеме. Чтобы нарушить (преодолеть) взаимность антенн, предлагается использовать свойство пространственно-временной модуляции в метаматериалах, диэлектрические свойства которых изменяются как в пространстве, так и во времени. Предлагается окружить антенну оболочкой с пространственно-временной модуляцией, которая придает дополнительное смещение распространяющемуся через нее электромагнитному полю.

Распространяющаяся волна взаимодействует с пространственно-временной модуляцией только в одном направлении, нарушая симметрию обращения времени и, таким образом, взаимность системы. Показано, что правильно спроектированная оболочка из метаматериала, модулированная во времени и пространстве, может использоваться для значительного изменения усиления антенны в режимах передачи и приема. Поскольку предлагаемая концепция основана на слабой связи между распространяющимися модами, требуется электрически большое расстояние распространения в оболочке, что увеличивает общие габариты системы. Однако толщину оболочки можно контролировать, изменяя параметры модуляции. Предлагаемая концепция может повысить эффективность систем радиочастотной связи, уменьшив улавливаемый внутриполосный шум или мешающие сигналы.

В [12] предложена новая и компактная невзаимная фильтрующая антенна, основанная на временной модуляции (temporal modulation). Устройство состоит из фильтрующей секции третьего порядка, интегрированной в плоскую печатную антенну Уда–Яги. Сильная невзаимность при передаче и приеме достигается на одной и той же рабочей частоте за счет временной модуляции резонаторов секции фильтрации. Эти резонаторы выполнены в виде микрополосковых четвертьволновых линий, нагруженных варикапами, расположенными на заземляющей плоскости. Эта плоскость также используется в качестве отражателя антенны Уда–Яги и для размещения копланарных линий, которые подают низкочастотное смещение на варикапы, что приводит к очень компактной конструкции. Изготовлен и успешно испытан прототип на частоте 2,4 ГГц (рис. 11, 12), показавший изоляцию более 20 дБ в режимах передачи и приема как в Е-, так и в Н-плоскостях для всех направлений в пространстве и падение усиления всего на 3,5 дБ по сравнению с эталонной антенной.

Предлагаемая антенна может быть легко интегрирована с другими электронными устройствами и может найти интересные применения в системах связи, радиолокации и зондирования.

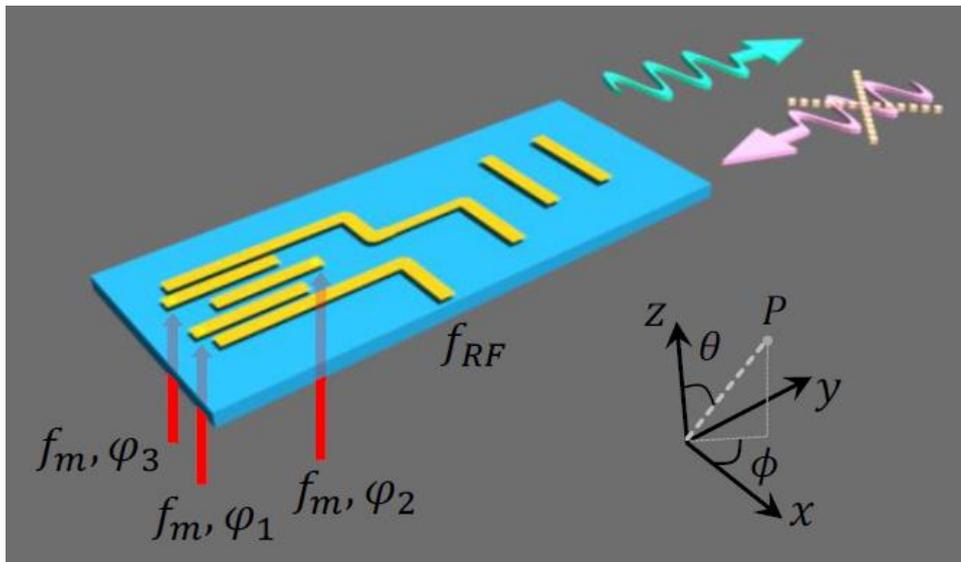


Рис. 11. Невзаимная фильтрующая антенна Уда–Яги. Резонаторы, составляющие фильтрующую часть, модулируются по времени одинаковой частотой  $f_m$ , но с разными фазами. Антенна излучает во внешнее направление ( $\theta = 90$  град.) на  $f_{RF}$ , но не может принимать энергию на данной частоте.

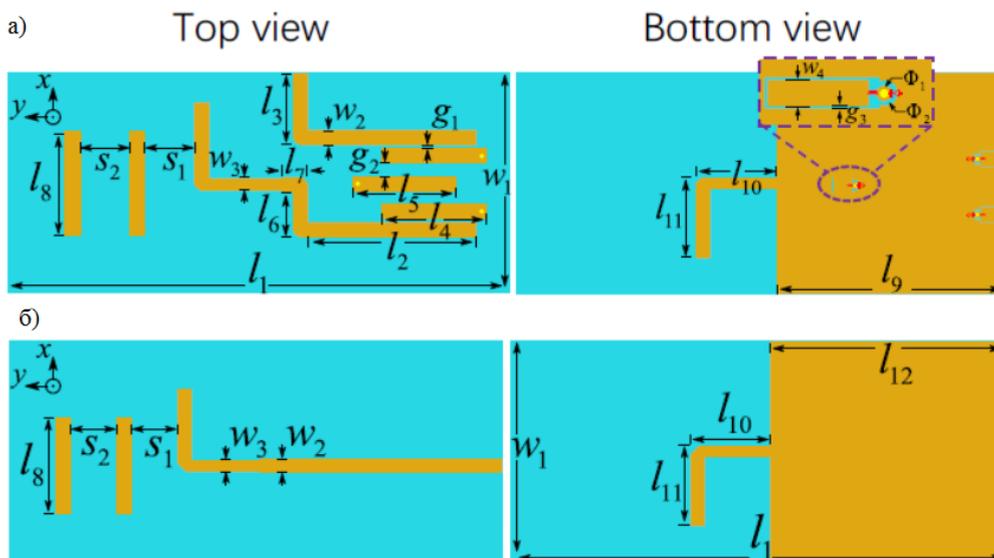


Рис. 12. Предложенная невзаимная антенна Уда–Яги (верхний ряд) и эталонная антенна, используемая для сравнения (нижний ряд). Первый и второй столбцы показывают виды сверху и снизу на печатные платы на подложке ( $170 \times 80 \times 1,575$  мм<sup>3</sup>) Rogers DiClad 880 с диэлектрической проницаемостью 2,2.

В [13] отмечается, что создание материалов с изменяющимися во времени свойствами имеет решающее значение для нарушения взаимности, которая накладывает фундаментальные ограничения на распространение волн. Однако

сложно реализовать эффективную и сверхбыструю временную модуляцию в фотонной системе. Здесь, с использованием как пространственной, так и временной фазовой манипуляции предлагаемой ультратонкой нелинейной метаповерхности, экспериментально было продемонстрировано невзаимное отражение света на длинах волн около 860 нм (рис. 13). Метаповерхность с модуляцией бегущей волны на нелинейных ячейках Керра создает пространственный фазовый градиент и многотерагерцовые временные колебания фазы, которые приводят к однонаправленным фотонным переходам как в импульсном, так и в энергетическом пространствах. Наблюдались полностью асимметричные отражения при прямом и обратном распространении света в большой полосе частот около 5,77 ТГц в пределах длины взаимодействия на субволновой длине 150 нм. Этот подход отличается потенциальной возможностью создания миниатюрных и интегральных невзаимных оптических компонентов.

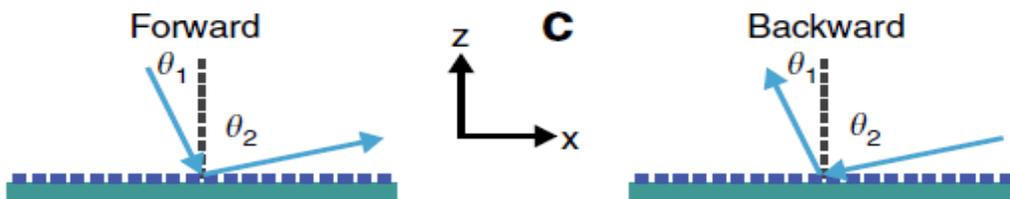


Рис.13. Невзаимные отражения света от метаповерхности с пространственно-временной модуляцией.

В статье [14] представлена конструкция простой метаповерхности, которая может вращать поляризацию линейно-поляризованной падающей электромагнитной волны к её кросс-поляризованной составляющей. Поверхность состоит из простого металлического резонатора в форме гантели, вытравленного на верхней поверхности диэлектрического материала с подложкой из РЕС. Предлагаемая гантелеподобная элементарная ячейка имеет четыре частоты плазмонного резонанса примерно 88 ГГц, 91 ГГц, 92,6 ГГц и 93 ГГц. Результаты показывают, что предлагаемая поверхность может реализовать эффективность кросс-поляризационного преобразования более

93% в полосе 87,2...93,4 ГГц как при х-, так и при у-поляризованных падающих электромагнитных волнах. Изготовлен образец, имеющий  $16 \times 16$  элементарных ячеек и занимающий площадь  $32 \times 32 \text{ мм}^2$ . Для характеристики предлагаемой поверхности используются как полноволновое моделирование, так и экспериментальные результаты.

## 6. Кросс-поляризационные преобразователи

В статье [15] предлагается двухдиапазонный высокоэффективный отражательный кросс-поляризационный преобразователь (cross-polarization converter) на основе анизотропной метаповерхности для линейно поляризованных электромагнитных волн. Его элементарная ячейка состоит из эллиптического диска-кольца, установленного на заземленной диэлектрической подложке, которое представляет собой анизотропную структуру с парой взаимно перпендикулярных симметричных осей  $u$  и  $v$  вдоль направлений  $\pm 45^\circ$  относительно направления оси  $y$ . Моделирование и результаты измерений показывают, что преобразователь поляризации может преобразовывать падающую волну с х- или у-поляризацией в свою кросс-поляризованную волну в двух полосах частот (6,99–9,18 ГГц; 11,66–20,40 ГГц) с эффективностью преобразования более 90%; кроме того, полоса на более высоких частотах является сверхширокой (54,5 %) для множественных плазмонных резонансов. Кроме того, представлен подробный анализ преобразования поляризации и вывод формулы для расчета согласно- и кросс- поляризованных отражений при у-поляризованном падении в соответствии с разностью фаз между двумя коэффициентами отражения при  $u$ -поляризованном и  $v$ -поляризованном падении. Результаты моделирования, расчетов и измерений согласуются во всех частотных диапазонах.

В работе [16] метаповерхность для широкополосного СВЧ кросс-поляризационного преобразования (КПП, cross-polarization-conversion – CPC) промоделирована, спроектирована, изготовлена и испытана. Метаповерхность состоит из связанных расщеплено-кольцевых резонаторов (РКР, split-ring-resonators – SRR) с двумя прорезями в каждом из них и расположена на

диэлектрической подложке FR4 с металлической заземляющей пластиной. Эффективное КПП для нормального и наклонного падений по уровню 3 дБ достигается в относительной полосе частот 73% от 5 до 10,8 ГГц. Это широкополосное преобразование поляризации является результатом множественных плазмонных резонансов, возникающих на трех соседних частотах. Благодаря субволновому размеру элементарной ячейки и симметричной структуре связанных РКР отклик метаповерхности не зависит от поляризации и угла падения падающей волны, что делает ее потенциальным кандидатом для многих практических приложений. Предлагаемая конструкция проверена численно и экспериментально.

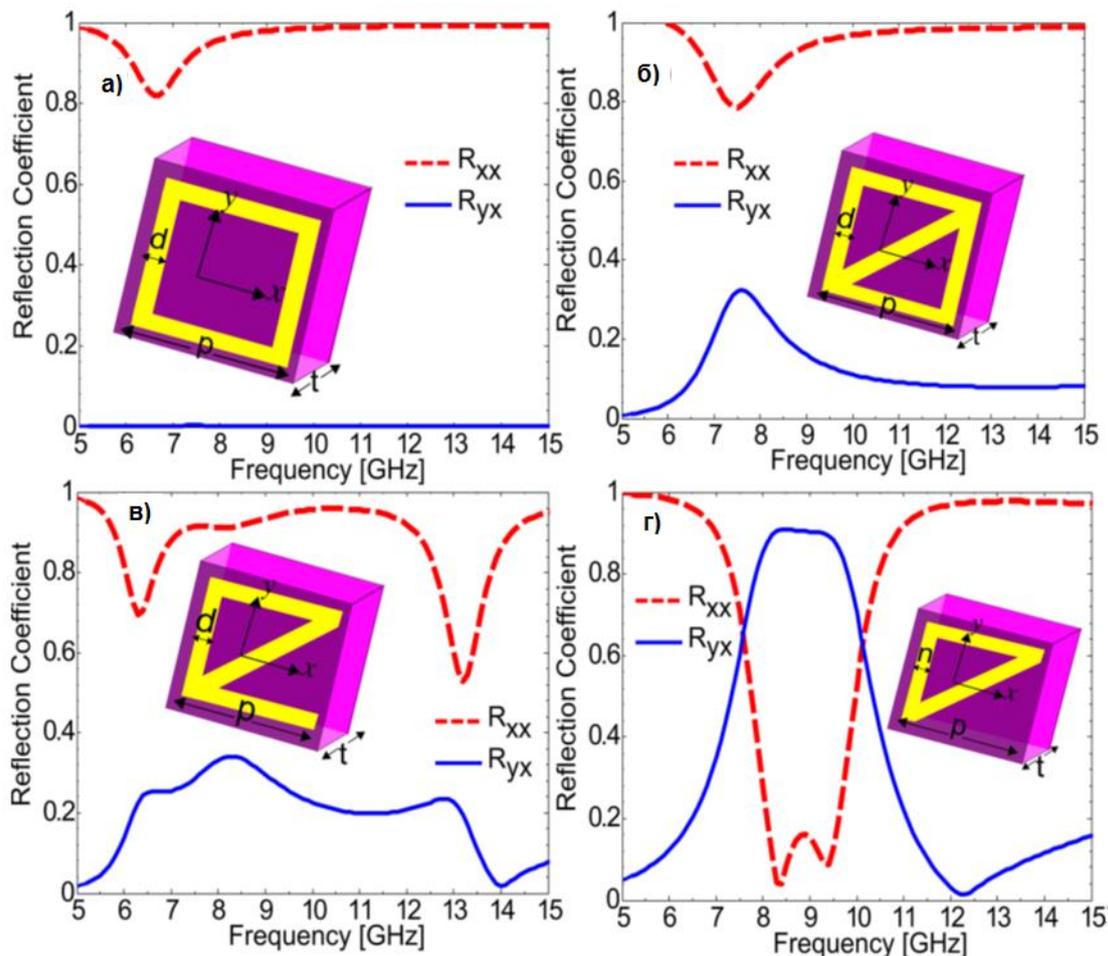


Рис. 14. Оптимизация элементарной ячейки для достижения поляризационного преобразования а) квадратная элементарная ячейка б) квадратная элементарная ячейка с диагональной металлической полоской в) квадратная элементарная ячейка с удаленным плечом, при сохранении диагональной металлической полоски г) полуквадрат с диагональной металлической полоской, т.е. треугольная элементарная ячейка.

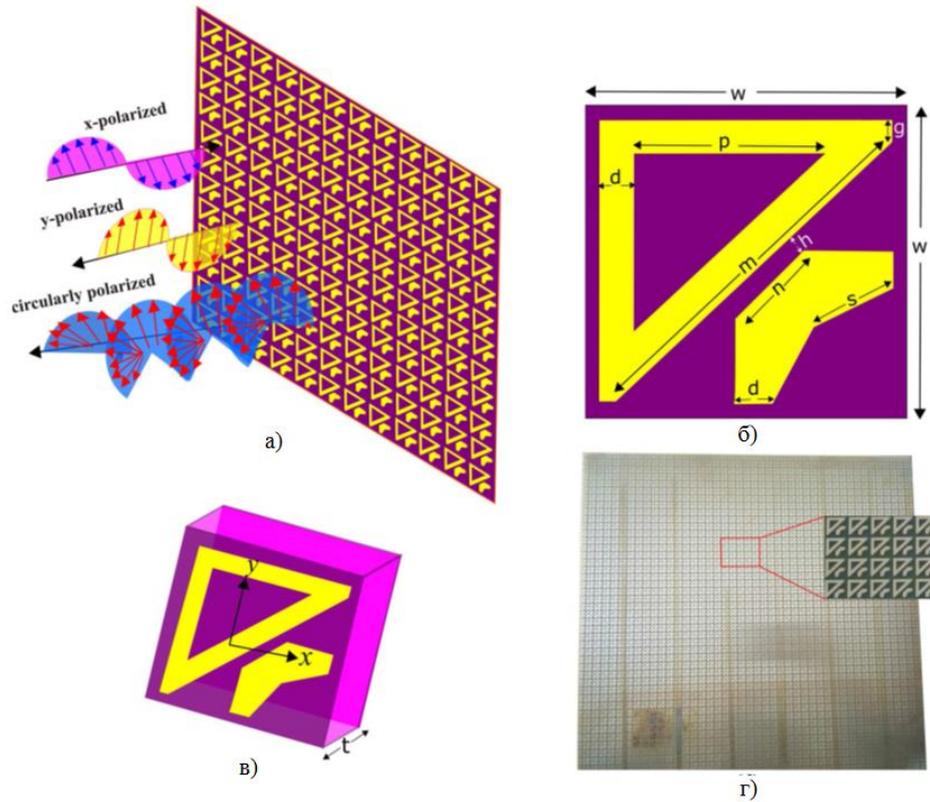


Рис. 15. Схематическое изображение предлагаемой конструкции метаповерхности: а) – двумерная решетка элементарных ячеек; б) – двумерный вид элементарной ячейки (желтая часть – металл); в) – трехмерный вид элементарной ячейки; г) – изготовленный прототип.

В исследовании [17] представлена ультратонкая однослойная метаповерхность, демонстрирующая как линейное кроссполяризационное преобразование (КПП), так и преобразование линейной поляризации в круговую (ЛП–КП, LP-to-CP) в X-диапазоне (рис. 14). Разработанная метаповерхность действует как многофункциональная поверхность, обеспечивающая КПП в относительной полосе пропускания 31,6% (8–11 ГГц) с эффективностью более 95%, в то время как преобразование линейной поляризации в круговую осуществляется в двух полосах частот: от 7,5–7,7 ГГц и 11,5 ГГц–11,9 ГГц. Более того, общая оптимизированная структура элементарной ячейки приводит к стабильному преобразованию поляризации при изменении угла падения до  $45^\circ$  как для поперечно-электрической (ТЕ), так и для поперечно-магнитной (ТМ) поляризации. Предлагаемая метаповерхность с простой структурой, компактными размерами, угловой стабильностью и

многофункциональностью подходит для многих приложений в устройствах связи и манипуляции поляризацией (рис. 15).

В [18] разработан и изготовлен плоский кросс-поляризующий отражатель на печатной плате для калибровки поляриметрических радаров на частоте 77 ГГц. Отражающая структура состоит из подложки с двусторонней металлизацией, вытравленной полосковой сеткой спереди и заземляющей пластиной сзади (рис. 16, а). Первоначальная конструкция и оптимизация параметров основаны на расчетах элементарной ячейки. Затем выполняется полноволновое моделирование небольшой версии структуры, чтобы проверить результаты элементарной ячейки и учесть краевые эффекты на границах конечной поверхности. Наконец, изготавливается вариант оптимизированной конструкции размером 24 см и 24 см, который измеряется в безэховой камере с полностью поляриметрической радиолокационной системой, работающей на частоте 77 ГГц. Результаты сравниваются с результатами для двугранного угла, повернутого на  $45^\circ$ . Измеренное значение поляризационной развязки 20 дБ в осевом направлении в полосе 76–78 ГГц доказывает эффективность предлагаемой структуры (рис. 16, б).

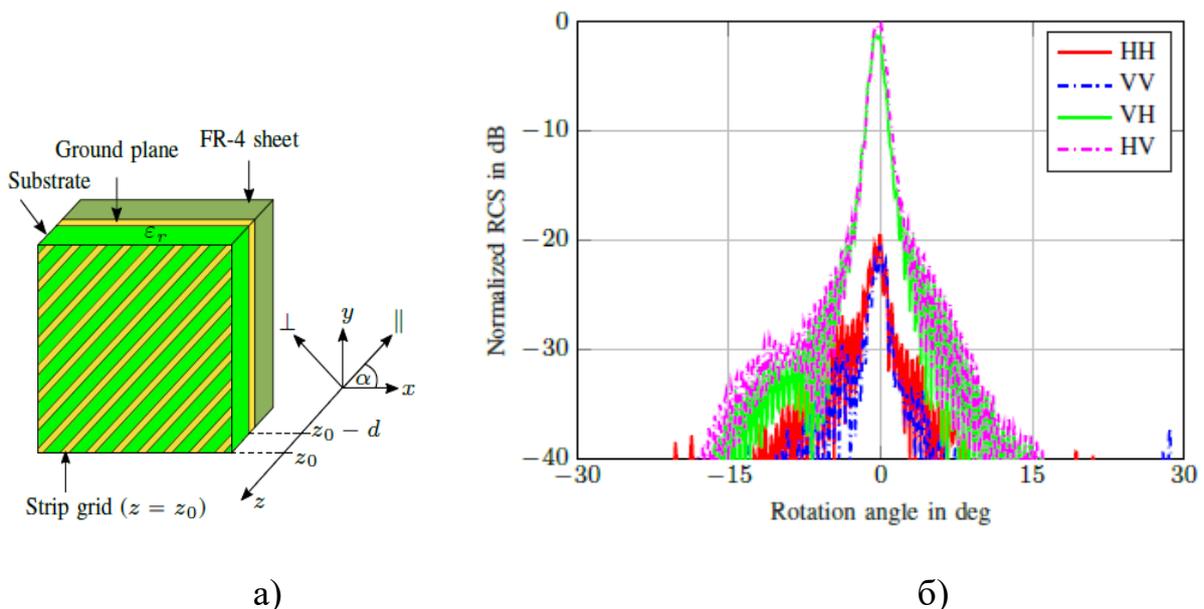


Рис. 16. Кросс-поляризующий отражатель: а) – структура элементарной ячейки; б) – нормированная эффективная площадь рассеяния (ЭПР, RCS) отражателя (24×24 см) в зависимости от азимутального угла и сочетания поляризаций на передачу и прием в полосе 76–78 ГГц.

В статье [19] представлена новая конструкция бесчиповой RFID-метки, которая упрощает обнаружение предметов в реальной среде. С этой целью представлены несколько рассеивателей, способных деполаризовать падающую волну и создать отклик с ортогональной поляризацией (рис. 17).

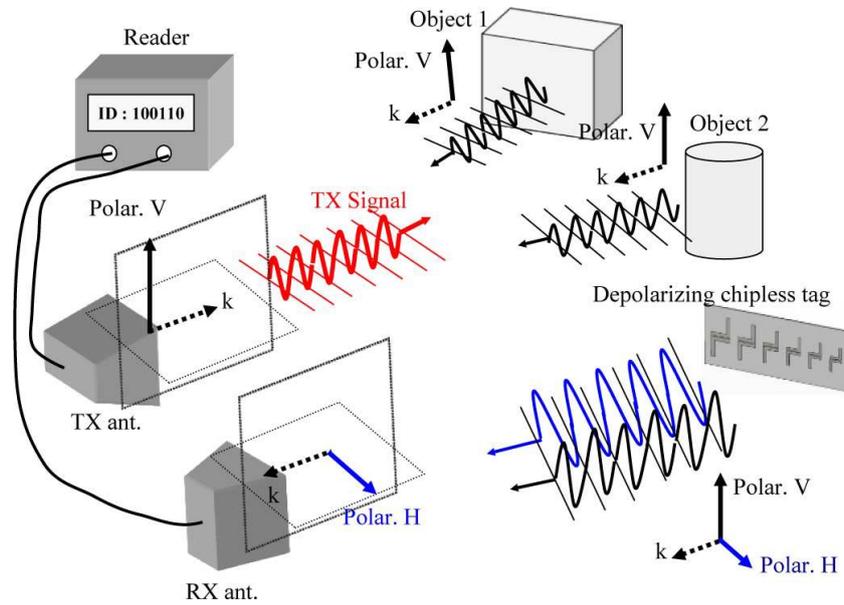


Рис. 17. Принцип работы деполаризующей бесчиповой RFID-метки. Антенна передатчика (TX) отправляет сигнал с вертикальной поляризацией, а антенна приемника (RX) работает с горизонтальной поляризацией.

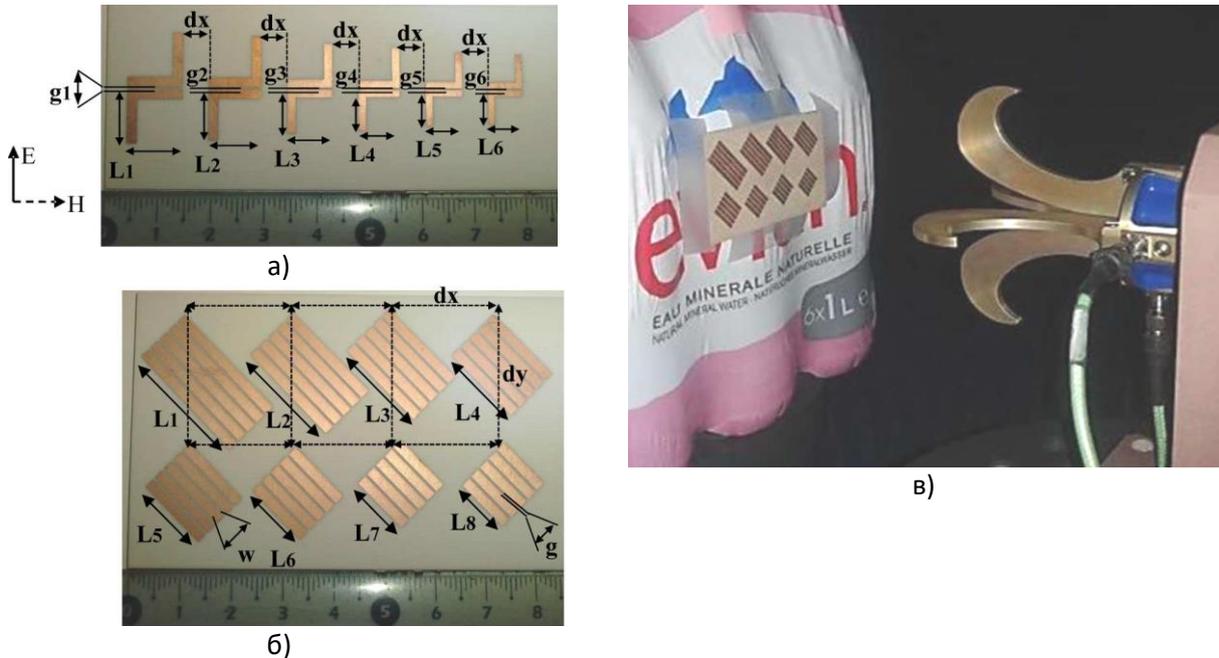
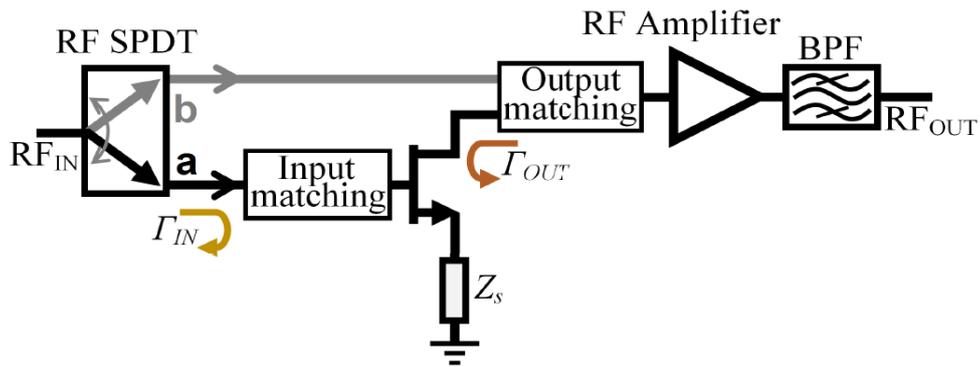
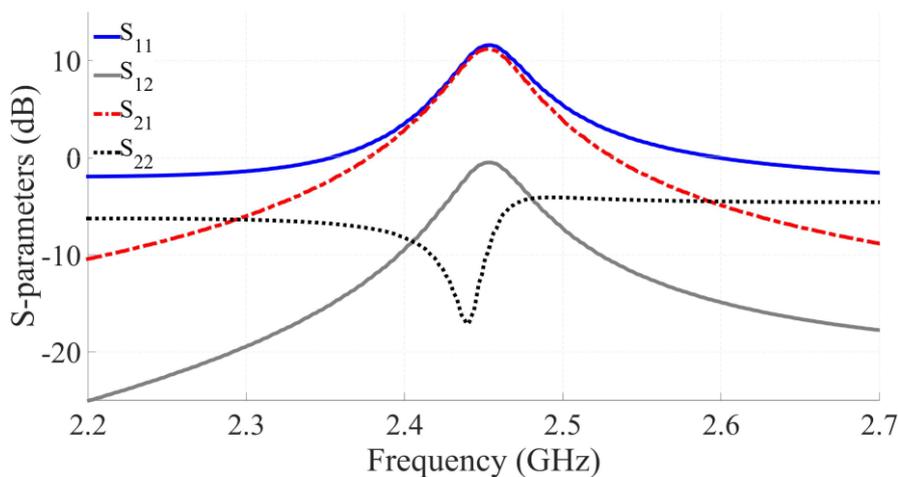


Рис. 18. Радиочастотные метки (теги): а) – на основе двойных L-резонаторов; б) – на основе закороченных диполей, ориентированных под углом  $45^\circ$ ; в) – фотография тестируемых RFID-меток, приклеенных к упаковке бутылок с водой и прямо-передающей антенны

Измерения в безэховой камере и в реальных условиях (в полосе 3–7 ГГц), когда метки размещены на диэлектрических и металлических объектах, показывают их высокую способность обнаружения (на дальности до 20 см). Впервые проводится исследование методики увеличения зоны обнаружения с помощью упрощенного шага калибровки. Это позволяет обнаруживать метки на объектах различного размера и состава, что требуется в большинстве RFID-приложений (рис. 18).



а)



б)

Рис.19. Схема метки (тега) для двусторонней связи с использованием обратного рассеяния (backscatter communication – BSC) (а); S-параметры двунаправленного отражательного усилителя (б).

В [20] предложена структура RFID-метки двунаправленного обратного рассеяния, с возможностью записи и чтения, которая содержит отражательный усилитель (рис. 19). Усиление при отражении  $S_{11}$  используется для модуляции сигнала обратного рассеяния (для передачи и считывания), в то время как

усиление проходящего сигнала  $S_{21}$  является фиксированным (при приеме и записи). Устройство проанализировано и рассчитано на частоту 2,45 ГГц с полосой пропускания 120 МГц. Измерения показали возможность получения глубины модуляции 40 дБ, т.е.  $S_{11} \approx 20$  и  $-20$  дБ при реализации амплитудной манипуляции обратного рассеяния, тогда как прямое усиление стабильно  $S_{21} \approx 15$  дБ.

В [21] отмечается, что нарушение лоренцевой взаимности имеет фундаментальное значение для ряда функциональных радиочастотных и оптических устройств, таких как вентили и циркуляторы. Приложение внешнего возбуждения, такого как магнитное поле или пространственно-временная (spatial-temporal) модуляция, использовалось для достижения невзаимного отклика. Для полного пассивного нарушения взаимности в качестве альтернативы могут также применяться и нелинейные эффекты. Здесь представлена связанная система, состоящая из линейного и нелинейного мета-атомов, в которой достигается невзаимность на основе связи и расстройки частот составляющих ее мета-атомов. Линейный мета-атом представляет собой металлический спиральный резонатор, а нелинейный – такой же резонатор плюс резонансное разрезанное кольцо, нагруженное варактором (рис. 20).

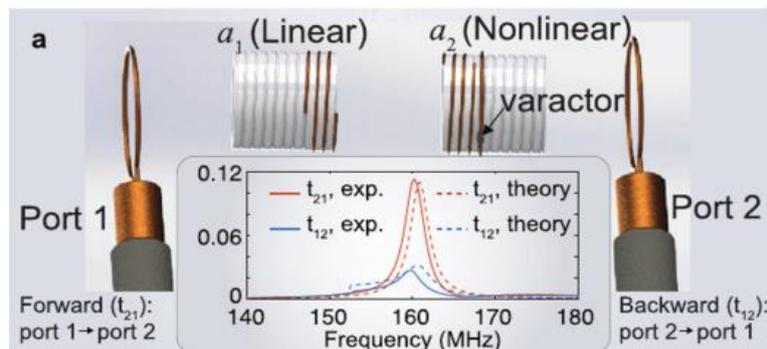


Рис. 20. Экспериментальная проверка и анализ невзаимного отклика с использованием магнитно-связанных мета-атомов. На вставке – измеренные и рассчитанные коэффициенты передачи в прямом и обратном направлениях.

Разработана аналитическая модель на основе теории связанных мод (ТСМ) с целью проектирования и оптимизации невзаимных мета-атомов в этой связанной системе. Проведена экспериментальная демонстрация ВЧ вентиля, у

которого отношение между коэффициентами прямой и обратной передачи (т.е. вентильное отношение, изоляционный контраст, развязка) составляет около 20 дБ (см. рис. 20). При этом невязимость системы зависит от входной мощности (экспериментально исследовано в диапазоне  $-20$  дБм ...  $10$  дБм); с ростом мощности развязка растет. Важно отметить, что использование разработанной здесь модели ТСМ позволяет обобщить предсказания ограничений невязимости, основанной на нелинейности, тем самым облегчая разработку новых подходов к нарушению лоренцевой взаимности. Модель ТСМ и схема реализации, представленные в этой работе, могут быть развернуты в широком диапазоне приложений, включая интегральные фотонные устройства, оптические метаматериалы и метаповерхности.

### **Заключение**

Таким образом, в последнее время СВЧ антенны, устройства (включая отражатели), материалы и среды с невязимыми свойствами из-за их уникальности и перспективности применения стали темой большого количества научных исследований и публикаций.

При этом, амплитудная невязимость может быть реализована не только с помощью подмагниченных ферритов и полупроводниковых усилителей, но и на основе параметрических и нелинейных структур с использованием пространственно-временной модуляции. Следовательно, поляризационная невязимость также может быть достигнута на безмагнитных компонентах, включая вариакпы, другие параметрические элементы и т.п.

Понятие невязимого отражения рассматривают при моделировании двухпозиционных радаров (лидаров), когда между парой приемопередающих портов облучаемого отражателя выделяют путь прямого и обратного прохода волны, и сам отражатель является невязимым устройством.

Хотя и при моделировании однопозиционных РЛС невязимое отражение можно рассматривать тогда, когда в ортогонально-совмещенном отражателе (это может быть полосково-пластинчатая антенна или открытый конец круглого или квадратного волновода) выделяется два порта, и один порт

пропускает базовую поляризацию, например, вертикальную, а другой порт – ортогональную, здесь горизонтальную. При этом, в моделируемом двухпортовом отражателе, работающем «на проход», существует два направления передачи – прямое и обратное, следовательно, возможно существование и его невзаимных свойств – амплитудных и/или фазовых.

При анализе взаимных отражателей, выполненных как на «тонких» поверхностных структурах, так и на объемных волноводах, уместно рассматривать взаимные кросс-полярирующие (деполярирующие) отражатели-«невидимки», преобразующие исходную поляризацию падающей волны в ортогональную поляризацию отраженной, которые могут быть построены с использованием лишь взаимных пассивных компонентов без применения невзаимных (ферритовых циркуляторов, гираторов и т.п.).

Совмещение поляризационных и невзаимных свойств в радарных отражателях, RFID-метках и т.п., является дополнительной степенью свободы при проектировании радиоэлектронных систем нового поколения.

### **Благодарности**

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № FEWM-2020-0039 от 01.03.2020. Авторы благодарят Хлусова В.А., Ровкина М.Е. за полезное обсуждение обзора.

### **Литература**

1. Сазонов Д. М., Гридин А. М., Мишустин Б. А. Устройства СВЧ – М: Высш. школа, 1981.
2. Sukhanyuk M., Shoshin E. L. Nonreciprocal horn reflector // Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates Modern Techniques and Technologies, 2003. МТТ 2003, Tomsk, 2003. P. 71-73. <https://10.1109/SPCMTT.2003.1438135>.

3. Пат. RU2398318. Радиолокационный отражатель. / Авторы: Осипов М.В., Хлусов В.А. Патентообладатель: ЗАО "Научно-производственная фирма Микран". Заявка 2009130828/09, 12.08.2009, опубл.: 27.08.2010.– Бюл. № 24.
4. Пат. RU2398317. Радиолокационный отражатель с управляемыми поляризационными свойствами / Авторы: Доценко В.В., Осипов М.В., Хлусов В.А., Патентообладатель: ЗАО "Научно-производственная фирма Микран", Заявка № 2009132450/09, заявл.: 27.08.2009, опубл.: 27.08.2010.– Бюл. № 24.
5. Taravati S., Kishk A.A. Space-time modulation: Principles and applications // IEEE Microwave Magazine.2020. Vol. 21. No. 4. P. 30-56. April 2020. <https://doi.org/10.1109/MMM.2019.2963606>.
6. Taravati S., Chamanara N., Caloz C.. Nonreciprocal electromagnetic scattering from a periodically space-time modulated slab and application to a quasisonic isolator // Phys. Rev. B, Condens. Matter. 2017. Vol. 96. No. 16. P. 165,144, Oct. 2017. <https://doi.org/10.1103/Phys-RevB.96.165144>.
7. Qin S., Xu Q., Wang Y.E. Nonreciprocal components with distributedly modulated capacitors // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 2014. Vol. 62. No. 10. P. 2260–2272.
8. Wu Z., Grbic A. Serrodyne frequency translation using time-modulated metasurfaces // [On-line]: <https://www.researchgate.net/publication/333161134>.
9. Li J., Zhu X., Shen C., Peng X., Cummer S.A. Transfer matrix method for the analysis of space-time-modulated media and systems // Physical Review B. 2019. Vol. 100. P. 144311. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.100.144311>.
10. Nagulu A., Reiskarimian N., Krishnaswamy H. Non-reciprocal electronics based on temporal modulation // Nat Electron. 2020. No.3. P. 241–250. [Online]: <https://doi.org/10.1038/s41928-020-0400-5>.
11. Ramaccia D., Sounas D.L., Alu A., Bilotti F., Toscano A. Nonreciprocity in antenna radiation induced by space-time varying metamaterial cloaks // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2018. Vol. 17. No. 11. P. 1968–1972. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2870688>.

12. Zang W.J., Wang X.T., Ivarez-Melcon A.A., Gomez-Diaz J.S. Nonreciprocal Yagi-Uda filtering antennas. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2947847>  
[Online]: <https://arxiv.org/abs/1906.06418>.
13. Guo X., Ding Y., Duan Y., Ni X. Nonreciprocal metasurface with space-time phase modulation". [Online] [www.nature.com/lsa](http://www.nature.com/lsa).
14. Al-Nuaimi M.K.T., Hong W., Mahmoud A. Design of cross polarization conversion metasurface using dumbbell-like unit cell // 2017 Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), Xi'an. 2017. P. 1–3.  
<https://doi.org/10.1109/APCAP.2017.8420433>.
15. Lin B., Wang B., Meng W., Da X., Li W., Fang Y., Zhu Z. Dual-band high-efficiency polarization converter using an anisotropic metasurface // Journal of Applied Physics. 2016. Vol. 119. P. 183103. [Online]:  
<https://doi.org/10.1063/1.4948957>.
16. Khan M.I., Fraz Q., Tahir F.A. Ultra-wideband cross polarization conversion metasurface insensitive to incidence angle // Journal of Applied Physics. 2017. Vol.121. P. 045103. [On-line] <https://doi.org/10.1063/1.4974849>.
17. Khan M.I., Khalid Z., Tahir F.A. Linear and circular-polarization conversion in X-band using anisotropic metasurface // Scientific Reports. 2019. No.9. P. 4552.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-40793-2>  
[Online]: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-40793-2>
18. Visentin T., Michev R., Hasch J., Zwick T. Cross-polarized planar reflector for polarimetric radar calibration at 77 GHz // Conf. 2018 German Microwave Conf. (GeMiC). <https://doi.org/10.23919/GEMIC.2018.8335035>.
19. Vena A., Perret E., Tedjni S. A Depolarizing chipless RFID tag for robust detection and its FCC compliant UWB reading system // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2013. Vol. 61. No.8. P. 2982-2994.  
<https://doi.org/10.1109/TMTT.2013.2267748>.
20. Khaledian S., Farzami F., Smida B., Erricolo D. Two-way backscatter communication tag using a reflection amplifier // IEEE Microwave and Wireless

Components Letters. 2019. Vol. 29. No. 6. P. 421-423.

<https://doi.org/10.1109/LMWC.2019.2912299>.

21. Zhao X., Wu K., Chen C., Bifano T. G., Anderson S. W., Zhang X.

Nonreciprocal magnetic coupling using nonlinear meta-atoms. // Adv. Sci. 2020.

P. 2001443. <https://doi.org/10.1002/advs.202001443>.

**Для цитирования:**

Сычев А.Н., Малютин Н.Д. Современные устройства, антенны и отражатели с невзаимными свойствами (обзор). Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.11.2>