

05,03

Оптически- и магнитоуправляемые метадиполи на СВЧ

© Г.А. Крафтмахер, В.С. Бутылкин, П.С. Фишер

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,
Фрязино, Московской обл., Россия
E-mail: gaarkr139@mail.ru

Поступила в Редакцию 11 октября 2024 г.
В окончательной редакции 28 ноября 2024 г.
Принята к публикации 3 декабря 2024 г.

Впервые предложены, выполнены и экспериментально исследованы в диапазоне 3–12 GHz в условиях прямоугольных волноводов и свободного пространства оптически- и магнитоуправляемые полуволновые метадиполи, представляющие собой мини-резонаторы на основе медной многозаходной киральной спирали, содержащей спаренные сердечники: полупроводник GaAs как элемент оптического управления и железоиттриевый феррит в качестве элемента магнитного управления. Измерена динамика резонансных откликов отражения и прохождения микроволн при фотовозбуждении полупроводника (волоконно-оптически ($0.97 \mu\text{m}$) или на расстоянии лазерной указкой ($0.53 \mu\text{m}$)) и при возбуждении ферромагнитного резонанса в феррите наложением постоянного магнитного поля H_0 . Показано, что с мета-диполями наблюдается трансформация откликов при внешнем воздействии и появляется возможность независимого управления частотой и интенсивностью резонансов, востребованная в телекоммуникационных СВЧ-устройствах.

Ключевые слова: полуволновой метадиполь, киральная многозаходная спираль, полупроводник, феррит, волоконно-оптическое и магнитное управление, микроволны, связанные ферромагнитный и дипольный резонансы.

DOI: 10.61011/FTT.2025.01.59765.6-25

1. Введение

В настоящее время сохраняется интерес к метаматериалам, содержащим электропроводящие киральные разомкнутые элементы, например, разные объемные спирали, планарные разомкнутые кольца с размерами, малыми по сравнению с длиной волны, обладающие пространственной дисперсией в отсутствие центральной симметрии [1,2], так как они совместимы с элементами электрического, магнитного, и оптического управления и позволяют достаточно простыми средствами в широком диапазоне частот формировать разные резонансные электромагнитные свойства, обусловленные не химическим составом, а геометрией и размерами, и управлять свойствами. Для этого в метаструктурах электродинамические объекты объединяются с объектами, обладающими другими интересными свойствами, управляемыми внешним воздействием, например, электрическим напряжением, магнитным полем или оптическим излучением. Основой феноменологической теории киральных сред являются материальные уравнения, которые кроме диэлектрической и магнитной проницаемости содержат параметр киральности, характеризующий связь электрической индукции с магнитным полем и магнитной индукции с электрическим полем. Это означает, что ток, индуцируемый переменным магнитным полем в киральных элементах, вызывает не только магнитный дипольный момент, но и электрический, а переменное электрическое поле индуцирует в таких элементах ток, который создает как электрический, так и магнитный

дипольный моменты. Направления моментов связаны с направлением спирали [1,2].

В метаструктурах наиболее часто используют электрическое управление с помощью варакторов, так как они просто интегрируются во многие виды метаматериалов [3–5]. Известно, что подачей напряжения обратного смещения на варакторы можно смещать резонансную частоту. К ограничениям универсального применения варакторов относятся потери при малых уровнях электрического напряжения и снижение эффективности на высоких частотах (выше 4–10 GHz).

Для магнитного управления применяют комбинации с ферритом возбуждая ферромагнитный резонанс (ФМР) в феррите наложением постоянного магнитного поля H_0 и сдвигая резонансную частоту при изменении H_0 [6–8]. На высоких частотах возникают трудности из-за необходимости применения больших магнитных полей или материалов с большими внутренними полями, например, гексаферритов.

Особое внимание уделяется оптическому управлению с применением полупроводников в качестве элементов управления [9–14], привлекательному благодаря низкой чувствительности к электромагнитным помехам, хорошей развязке между каналами сигнала и управления, быстрдействию и возможности волоконно-оптического адресного воздействия на интенсивность резонансов отдельных элементов в широком диапазоне частот микроволнового и терагерцового диапазонов. Оптическое воздействие не изменяет частоту резонансных откликов в отличие от электрического и магнитного.

Реконфигурируемой и перестраиваемой технологии метаматериалов и возможным приложениям посвящены работы [15–17]. В ряде работ обсуждают возможность практического применения метаструктур, метаатомов и метаповерхностей в разнообразных СВЧ-устройствах, среди которых важное место занимают перестраиваемые фильтры и антенны [3,15–18], для которых актуальным, но нерешенным в настоящее время, является независимое управление амплитудой, частотой и шириной внутри индивидуальной резонансной полосы. В связи с этим востребованы как новые структуры, так и развитие методов управления, что является стимулом и целью для дальнейших исследований.

Целью нашей работы является реализация и экспериментальное исследование новых функциональных метаструктур и новых методов управления для развития элементной базы в микроэлектронике, связанной с проблемами передачи, приема и преобразования информации с помощью волн микроволнового диапазона.

В данной работе впервые реализованы и исследованы модернизированные полуволновые метадиполи, представляющие собой киральную многозаходную медную спираль, содержащую спаренные сердечники: полупроводник GaAs (как элемент оптического управления) и железоиттриевый феррит (элемент магнитного управления). Экспериментально исследована динамика резонансных откликов прохождения и отражения микроволн в диапазоне 3–12 GHz (в условиях прямоугольных волноводов и свободного пространства) при внешнем магнитном и оптическом воздействии. На основании проведенных экспериментов выявлены интересные функциональные возможности магнитооптического управления в метадиполях, например, показано, что при определенных условиях при взаимодействии связанных ферромагнитного и дипольного резонансов частоту дипольного резонанса (ДР) можно смещать магнитным полем H_0 , а глубину и ширину ферромагнитного резонанса (ФМР) можно изменять при оптическом облучении.

Полученные результаты относятся к управляемой мета-микроэлектронике („фотомагнитная метамикроэлектроника“), базируются на оптических и магнитных методах управления распространением микроволн в отличие от радиофотоники, нанофотоники, наноплазмоники, магнитооптики, изучающих управление распространением оптических сигналов [19–21].

2. Исследуемые метадиполи. Методика эксперимента

На рис. 1 представлены фото некоторых экспериментальных образцов метадиполей, исследованных в диапазоне 3–12 GHz: оптически управляемые (метадиполь I) представляют собой мини-резонаторы на основе многозаходной медной спирали, содержащей полупроводниковый сердечник GaAs и магнито-оптически управляемые (метадиполь II), содержащие спаренные

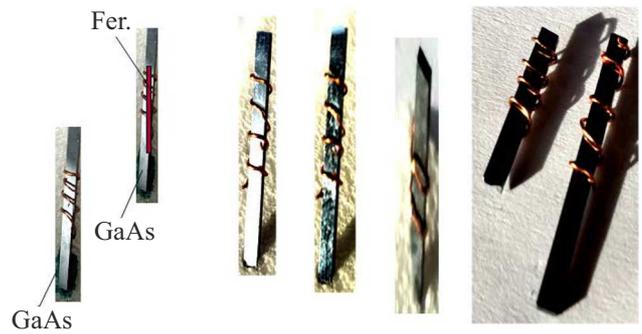


Рис. 1. Изображения исследуемых метадиполей: метадиполь I с полупроводниковым сердечником GaAs, метадиполь II содержит спаренные сердечники — полупроводниковый GaAs и ферритовый Fer, и ряд метадиполей, отличающихся разной длиной спирали и числом оборотов.

сердечники — полупроводниковый GaAs как элемент оптического управления и железоиттриевый феррит в качестве элемента магнитного управления.

Образцы метадиполя I выполнены намоткой спирали медным проводом диаметром 0.3 mm вокруг полупроводникового сердечника GaAs. Образцы метадиполя II получены намоткой спирали вокруг спаренных (приклеенных друг к другу) сердечников. Шаг спирали составлял приблизительно 2 mm. Для наблюдения резонансных откликов на разных частотах в пределах заданного диапазона и выяснения функциональных закономерностей было реализовано несколько образцов с разными длинами медного провода при разном числе оборотов (от 1.5 до 4), отличающихся, соответственно, разной высотой спирали и разными резонансными частотами. Использовались образцы GaAs с поперечным сечением 2×1 mm и длине от 7 до 23 mm, образцы ферритового сердечника имели также одинаковое поперечное сечение 1×0.9 mm, а их длины менялись от 5 до 7 mm.

Измерения откликов прохождения T и отражения R микроволн проводились при внешнем оптическом и магнитном воздействии на метадиполь в диапазоне 3–6 GHz с помощью панорамного измерителя КСВН P2-58 в условиях прямоугольных волноводов (сечение 48×24 mm) и свободного пространства (в разрыве волноводов), а также с панорамным измерителем КСВН P2-61 в диапазоне 8–12 GHz (сечение волноводов 23×11 mm). Схема эксперимента для измерения T и R приведена на рис. 2, а и 2, b.

Была исследована динамика резонансных откликов, которая зависит от свойств фотоиндуцированной диэлектрической проницаемости GaAs, магнитной проницаемости феррита при возбуждении ферромагнитного резонанса и от связи метадиполя с волноводом.

Для оптического управления применялось волоконно-оптическое облучение лазерным диодом мощностью P_λ в непрерывном режиме ($\lambda = 0.97 \mu\text{m}$). Мощность P_λ , которая измерялась Laser Power Meter (марка Field Max,

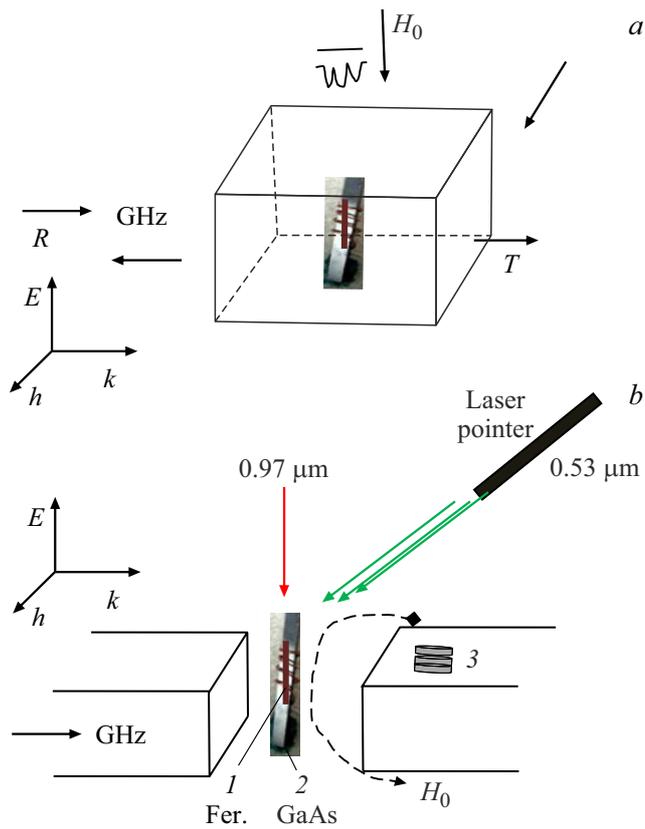


Рис. 2. Схема измерений частотной зависимости коэффициентов прохождения T и отражения R микроволн с метадиполями: a — в условиях волновода в электромагните при наложении постоянного магнитного поля H_0 , волнистая линия с чертой — условное обозначение электромагнита; b — в условиях свободного пространства при наложении H_0 (дискковый магнит 3, пунктирная линия соответствует направлению H_0) и волоконно-оптического облучения ($0.97 \mu\text{m}$) или лазерной указкой ($0.53 \mu\text{m}$).

фирма COHERENT), можно было изменять в пределах 0–1000 mW при изменении тока. Для фотовозбуждения полупроводника подводилось оптоволокно (диаметр $110 \mu\text{m}$) перпендикулярно его поверхности сверху со стороны торца или сбоку на расстоянии приблизительно нескольких миллиметров. При этом образец GaAs подвергался оптическому воздействию частично в зависимости от его размеров, так как световое излучение имело форму круга диаметром около 5 mm, в то же время доля излучаемой мощности могла проходить мимо образца, о чем свидетельствовала визуализация инфракрасного облучения лазерным визуализатором.

Применялась также стандартная лазерная указка 303 Lxi ($P_\lambda = 60 \text{ mW}$, $\lambda = 0.53 \mu\text{m}$) на расстоянии нескольких метров от диполя для облучения GaAs зеленым светом для выяснения возможностей управления при разных λ , малыми мощностями, в разных условиях, общедоступными относительно дешевыми средствами.

Исследования проводились при комнатной температуре в условиях, необходимых для фотовозбуждения GaAs,

когда энергия фотона $h\nu$ выше ширины запрещенной зоны $E_g = 1.42 \text{ eV}$ [$h\nu$ ($\lambda = 0.53 \mu\text{m}$) $> E_g$] или близка к ширине запрещенной зоны при $\lambda = 0.97 \mu\text{m}$ [22].

Для магнитного воздействия в случае волноводов использовался электромагнит, а в условиях свободного пространства — дискковый магнит 3. Величина постоянного магнитного поля H_0 зависела от расстояния между 3 и ферритом (рис. 2, a и 2, b).

При исследовании возможности управления учитывались особенности резонансных эффектов в элементах метадиполей, которые проявлялись в измеряемых откликах T и R . По аналогии с киральными средами на основе разомкнутых спиралей [2,23] с метадиполем I (или метадиполем II в отсутствие внешнего магнитного воздействия) наблюдался дипольный резонанс, возбуждаемый переменным электрическим полем E , которое индуцирует в спирали резонансный ток, вызывающий как электрический, так и магнитный дипольные моменты. При оптическом облучении с изменением фотоиндуцируемой диэлектрической проницаемости полупроводника интенсивность ДР меняется.

В метадиполе II при наложении постоянного магнитного поля H_0 наряду с ДР можно возбудить в феррите резонансные взаимодействия, которые по аналогии с кирально-ферритовыми средами [24], могут быть двух типов. Один из них, ферромагнитный резонанс (ФМР), является результатом резонансного взаимодействия феррита с микроволновым полем h ($H_0 \perp h$), может возбуждаться и в свободном феррите. Известно, что с увеличением величины H_0 ФМР смещается в сторону высоких частот. Другой тип, назовем кирально-ферромагнитный резонанс (КФМР—ChFMR), возбуждается только на частотах ДР метадиполя, есть результат резонансного взаимодействия намагниченного феррита с наведенным переменным магнитным моментом и управляется полем $H_{0\perp}$ наведенному магнитному моменту (оси спирали). КФМР не возбуждается в свободном феррите или в феррите вне спирали.

3. Динамика резонансных откликов прохождения и отражения микроволн при внешнем воздействии

Измерения частотной зависимости коэффициентов прохождения T и отражения R микроволн в GHz диапазоне проводились при расположении метадиполей вдоль оси прямоугольных волноводов или в свободном пространстве. В зависимостях наблюдались резонансные минимумы T , которым соответствуют резонансные максимумы R (дипольные резонансы ДР, возбуждаемые микроволновым электрическим полем E в спирали как в отсутствие сердечников, так и с сердечниками) в условиях оптического воздействия (рис. 3, a и 3, b), магнитного при возбуждении ферромагнитного резонанса (рис. 4, $a-c$), кирально-ферромагнитного резонанса

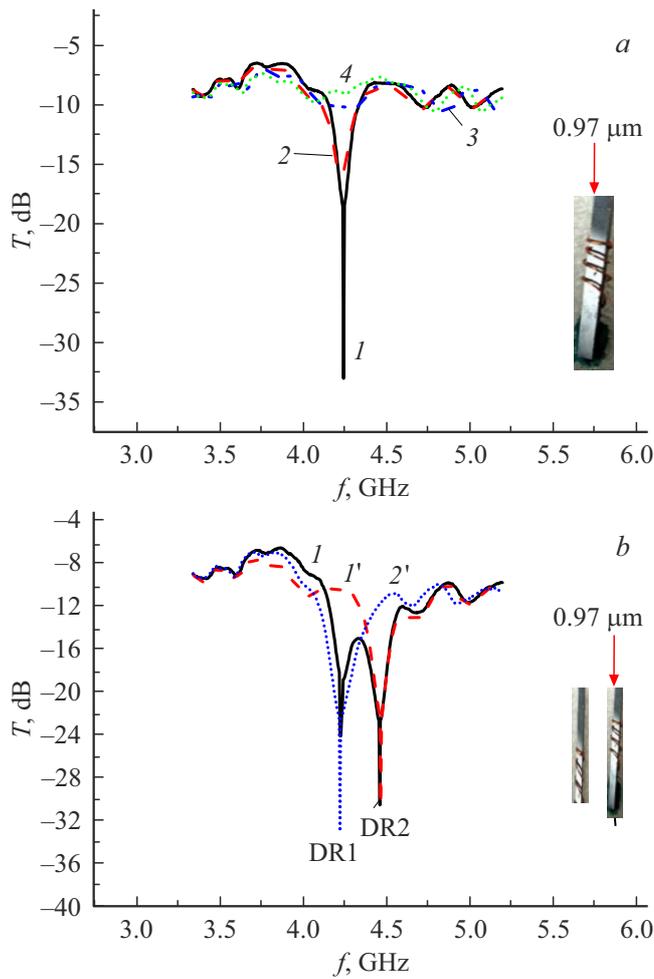


Рис. 3. Измеренная динамика резонансного отклика прохождения T микроволн с метадиоплем I в условиях свободного пространства в отсутствие магнитного воздействия при изменении мощности волоконно-оптического облучения $0.97 \mu\text{m}$, P_λ , mW: *a* — с одним метадиоплем, 0 (1), 60 (2), 100 (3), 120 (4); *b* — с двумя метадиоплями, 0 (1), 120 (1'), 120 (2').

(рис. 5, *a* и 5, *b*), а также при объединении магнитного и оптического внешних воздействий (рис. 6, *a* и 6, *b*).

3.1. Оптическое управление: метадиополь I, P_λ ($\lambda = 0.97 \mu\text{m}$), $H_0 = 0$

На рис. 3, *a* продемонстрирована динамика резонансного отклика прохождения T микроволн с метадиоплем I в свободном пространстве, отражающая поведение ДР. Видно, что с увеличением мощности P_λ волоконно-оптического облучения происходит увеличение T на резонансной частоте, приближаясь к уровню прозрачности частотной области вне резонанса. Это вполне ожидаемо, учитывая увеличение мнимой части диэлектрической проницаемости GaAs на микроволнах при фотовозбуждении [25].

Отклик T в свободном пространстве с двумя метадиоплями I, отличающимися длиной провода спирали

(дипольные резонансы ДР1 и ДР2 проявляются на разных частотах), расположенными на расстоянии нескольких миллиметров друг от друга вдоль оси волновода, показан на рис. 3, *b*. Видно, что поочередное адресное воздействие P_λ на каждый из метадиоплей приводит к изменению соответствующего ДР практически до уровня прозрачности: ДР1 пропадает при облучении первого диполя при сохранении ДР2 (кривая 1'), соответственно ДР2 пропадает при облучении второго диполя при сохранении ДР1 (кривая 2').

3.2. Магнитное управление: метадиополь II, $P_\lambda = 0$, ФМР: $H_0 \perp h$

На рис. 4, *a–c* показана динамика откликов прохождения T и отражения R микроволн в прямоугольных волноводах при возбуждении ферромагнитного резонанса в отсутствие оптического воздействия ($P_\lambda = 0$) с метадиоплем II: спираль приблизительно 4 оборота (рис. 4, *a*), спираль в 3 оборота (рис. 4, *b* и 4, *c*).

Результаты измерений T в диапазоне 3–6 GHz с метадиоплем II на основе спирали приблизительно 4 оборота представлены на рис. 4, *a*. При $H_0 = 0$ (кривая 1) наблюдаем следует: ДР₀ (частота $f = 4.35$ GHz, глубина –26 dB).

При намагничивании феррита ($H_0 = 200$ Oe) и возбуждении ФМР на некотором удалении от частоты ДР₀, когда изменение магнитной проницаемости распространяется на частотную область ДР₀, происходит небольшое смещение частоты ДР (в сторону низких частот) и увеличение глубины, связанные с влиянием ФМР и изменением связи метадиополя с волноводом (кривая 2), при этом ФМР в спектре T мало заметен, как и в свободном ферритовом сердечнике или в феррите, расположенном снаружи спирали. При дальнейшем увеличении H_0 и приближении частоты ФМР к ДР₀ интенсивность ФМР растет (увеличивается глубина резонанса, уменьшается T на резонансной частоте), а ДР сужается и ослабляется, смещаясь к высоким частотам.

При $H_0 = 1200$ Oe (кривая 3) наблюдаем два резонанса: низкочастотный ФМР (частота 4.22 GHz, глубина —15 dB) и высокочастотный ДР (4.4 GHz, –23 dB). При дальнейшем увеличении H_0 наблюдаем динамику, характерную для связанных резонансов с перекачкой энергии и переходом одного резонанса в другой.

При $H_0 = 1600$ Oe высокочастотный резонанс, трансформируясь в ФМР, возбуждается за пределами исследуемого диапазона, при этом в спектре T остается низкочастотный пик, как ДР, который приближается к состоянию ДР₀ (кривая 4).

Подобная, характерная для связанных резонансов, динамика наблюдается с разными метадиоплями в разных частотных диапазонах при других величинах H_0 . Проявление в спектре T связанных резонансов разной природы (ферромагнитного и дипольного) наблюдается впервые. Нам неизвестны работы, где бы наблюдались или использовались связанные ФМР и ДР.

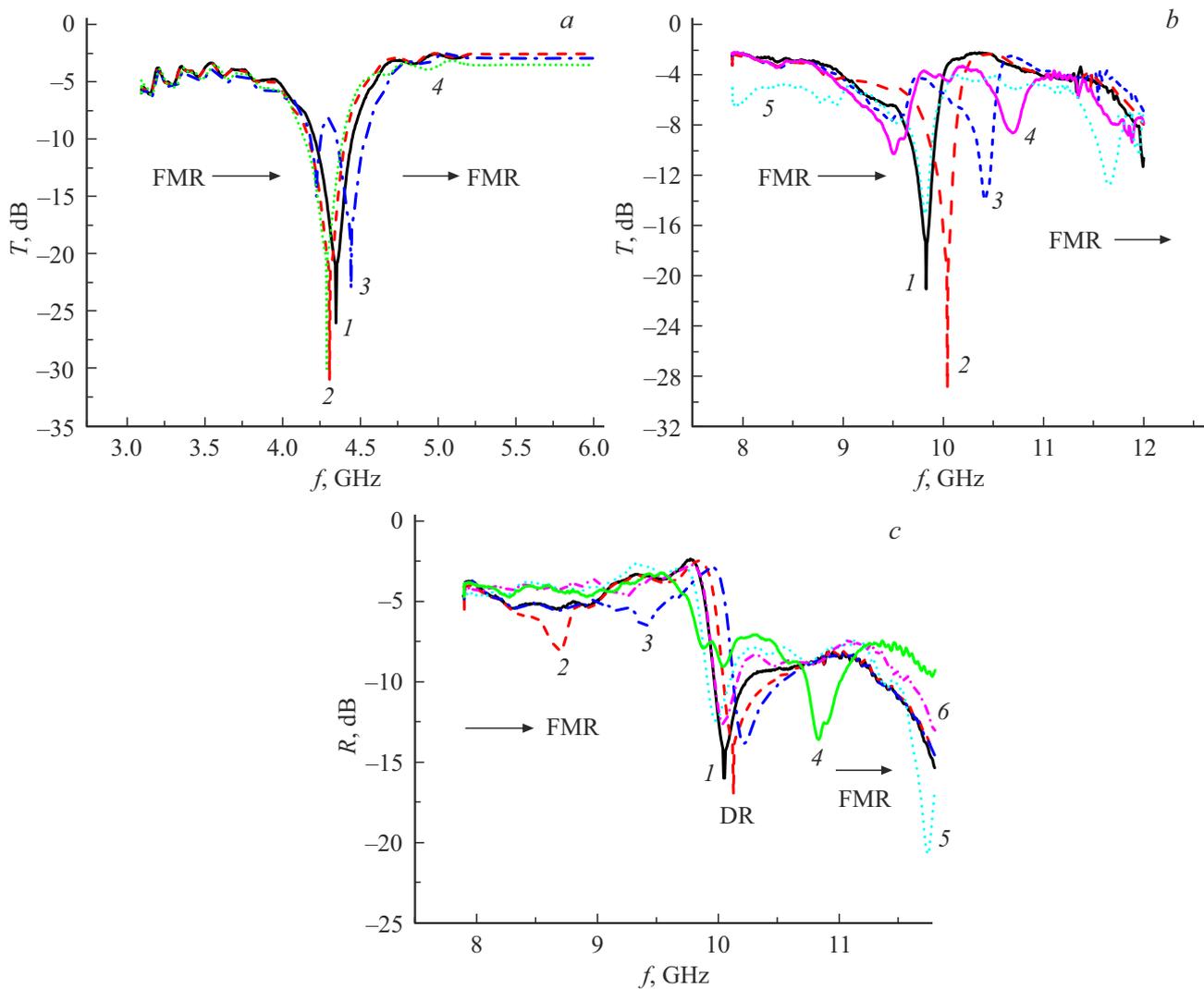


Рис. 4. Измеренная динамика частотных зависимостей прохождения микроволн T и отражения R с метадиποлями II в прямоугольных волноводах в отсутствие оптического воздействия при возбуждении ФМР вблизи ДР с изменением H_0 : a — T в диапазоне 3–6 GHz, $H = 0$ (1), 200 (2), 1200 (3), 1600 Oe (4); b — T в диапазоне 8–12 GHz, $H = 0$ (1), 2300 (2), 2500 (3), 2800 (4), 3400 Oe (5); c — R в диапазоне 8–12 GHz, $H = 0$ (1), 2500 (2), 2800 (3), 3400 (4), 4000 (5), 4400 Oe (6).

Результаты измерений T и R в диапазоне 8–12 GHz с метадиποлем II на основе спирали около 3 оборотов представлены на рис. 4, b и 4, c .

На рис. 4, b в спектре T при $H_0 = 0$ наблюдаем ДР₀ (9.86 GHz, –21 dB), кривая 1. С наложением $H_0 = 2300$ Oe возбуждается ФМР (8.84 GHz, –4.3 dB), при этом состояние ДР меняется, видно смещение частоты к 10.04 GHz и увеличение глубины до –29 dB (кривая 2).

При увеличении $H_0 = 2500$ Oe (кривая 3) наблюдаем два резонанса: низкочастотный ФМР (9.49 GHz, –7.5 dB) и высокочастотный ДР (10.42 GHz, –14 dB). Дальнейшее увеличение $H_0 = 2800$ Oe приводит к усилению и смещению ФМР, смещению и ослаблению ДР (кривая 4). В поле $H_0 = 3400$ Oe (кривая 5) ДР трансформируется в ФМР и удаляется в сторону высоких частот к $f = 11.65$ GHz, низкочастотный резонанс

(9.87 GHz, –15.2 dB), как ДР приближается к первоначальному состоянию ДР₀.

На рис. 4, c в спектре R при $H_0 = 0$ наблюдаем ДР₀ в виде максимума на частоте $f = 9.8$ GHz, соответствующего минимуму T , и резонансного минимума (–16 dB) на частоте $f = 10.05$ GHz: ДР₀ (10.05 GHz, –16 dB).

При наложении $H_0 = 2500$ Oe (кривая 2) с возбуждением ФМР (8.7 GHz, –8.1 dB) дипольный резонанс (10.13 GHz, –17 dB) смещается к высоким частотам относительно ДР₀. При увеличении H_0 до 2800 Oe (кривая 3) ФМР (9.38 GHz, –6.7 dB) наблюдается наряду с ДР (10.21 GHz, –13.9 dB), который сместился в сторону высоких частот под влиянием ФМР. При $H_0 = 3400$ Oe наблюдаем низкочастотный и высокочастотный резонансные минимумы (кривая 4) на частотах $f = 10.1$ GHz и $f = 10.8$ GHz. В полях $H_0 = 4000$ Oe (кривая 5) и 4400 Oe (кривая 6) происходит трансформация низко-

частотного и высокочастотного пиков, высокочастотный пик, как ФМР, удаляется за пределы исследуемого диапазона, а низкочастотный пик, как ДР (9.99 GHz, -12 dB) и ДР (10 GHz, -12 dB) приближается к первоначальному состоянию ДР₀.

3.3. Магнитное управление: метадиоль II, $P_\lambda = 0$, КФМР: $H_0 \perp$ оси спирали

На рис. 5, *a* и 5, *b* показана динамика откликов прохождения T и отражения R микроволн с метадиолем II в прямоугольном волноводе в диапазоне 8–12 GHz при $P_\lambda = 0$ в условиях когда постоянное магнитное поле перпендикулярно оси спирали при возбуждении КФМР (ChFMR).

На рис. 5, *a* в отсутствие H_0 (кривая 1) в спектре T видим ДР₀ (9.8 GHz, -14 dB). При $H_0 = 2700$ и 3400 Oe (кривые 2 и 3) происходят небольшие изменения ДР₀. В полях $H_0 = 3700, 4000, 4170$ и 4000 Oe (кривые 4–7) наблюдаем два резонанса: низкочастотный

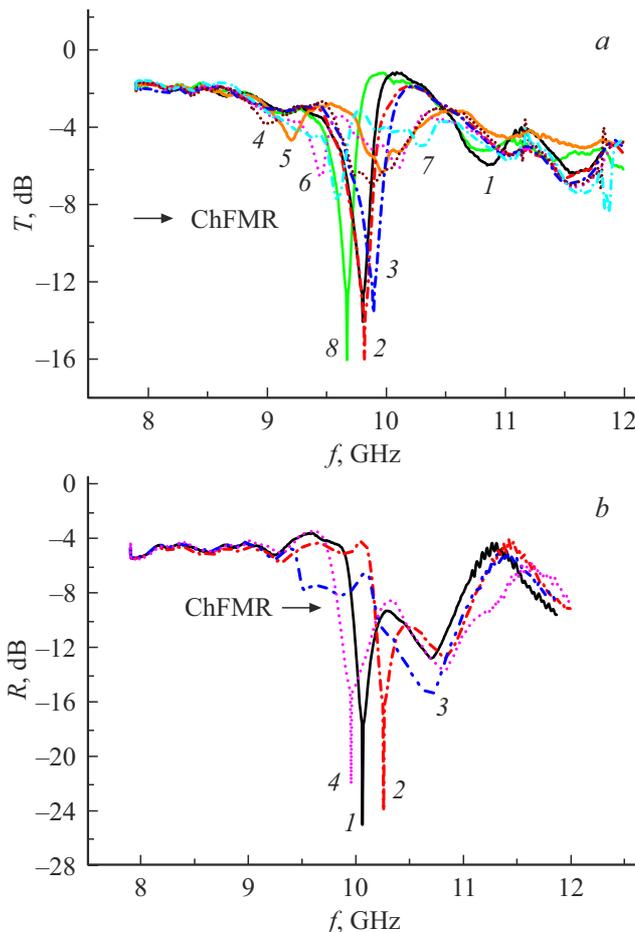


Рис. 5. Измеренная динамика частотных зависимостей прохождения микроволн T (*a*) и отражения R (*b*) с метадиолем II в волноводе в диапазоне 8–12 GHz в отсутствие оптического воздействия при возбуждении КФМР с изменением H_0 , Oe: *a* — 0 (1), 2700 (2), 3400 (3), 3700 (4), 4000 (5), 4170 (6), 4400 (7), 5000 (8); *b* — 0(1), 3700 (2), 4000 (3), 5000 (4).

резонанс, обусловленный КФМР, и высокочастотный, с перекачкой энергии и трансформацией резонансов при изменении H_0 . При увеличении $H_0 = 5000$ Oe КФМР не проявляется в спектре T , так как возбуждается только на резонансной частоте метадиполя при меньших величинах H_0 ; в этом случае наблюдаем только низкочастотный резонанс как ДР (9.7 GHz, -16 dB), приближающийся к первоначальному состоянию ДР₀ (кривая 8).

Из рис. 5, *b* видно, что в спектре R в отсутствие H_0 (кривая 1) проявляется ДР₀ (10.06 GHz, -25 dB). В поле $H_0 = 3700$ Oe (кривая 2) наблюдаем низкочастотный КФМР (9.3 GHz, -5.6 dB) и высокочастотный ДР (10.25 GHz, -24 dB), и затем при увеличении H_0 до 4000 Oe (кривая 3) перекачку энергии и трансформацию низкочастотного КФМР (9.56 GHz, -7.8 dB) и высокочастотного ДР (10.7 GHz, -15.4 dB).

При увеличении H_0 до 5000 Oe (кривая 4) низкочастотный резонанс как ДР (9.95 GHz, -22 dB) приближается к первоначальному состоянию ДР₀, а высокочастотный как КФМР (10.83 GHz, -13.6 dB), возбуждаясь только на частотах метадиполя, при дальнейшем увеличении H_0 не проявляется в спектре R , что соответствует результатам измерений динамики спектра T (рис. 5, *a*).

3.4. Магнито-оптическое управление: метадиоль II, $H_0, P_\lambda, \lambda = 0.97$ (0.53) μm

Как следует из разделов 3.2 и 3.3, наложением постоянного магнитного поля H_0 легко установить режим связанных резонансов, возбуждая ферромагнитный и кирально-ферромагнитный резонансы на частотах вблизи дипольного резонанса.

Измерениями в свободном пространстве в диапазоне 3–6 GHz можно показать, что оптическое облучение воздействует не только на дипольный резонанс, как было показано в разделе 3.1, но и на ФМР и КФМР при их возбуждении в режиме связанных ФМР и ДР резонансов (рис. 6, *a* и 6, *b*).

На рис. 6, *a* в спектре T в отсутствие H_0 видим резонансный отклик ДР₀ (3.61 GHz, -12.4 dB), кривая 1. В поле $H_0 = H_1 \cong 150$ Oe проявляется ФМР (3.17 GHz, -15 dB) наряду с ДР (3.56 GHz, -25 dB), кривая 2.

Наблюдаемое на кривой 2 (рис. 6, *a*) смещение частоты ДР и увеличение интенсивности относительно ДР₀ связано с влиянием ФМР и установлением оптимальной связи мета-диполя с питающей линией при увеличении поглощения в феррите. В присутствии $H_0 = H_1 = 150$ Oe оптическое 0.53 (0.97) μm облучение мощностью $P_\lambda = 60$ mW (кривая 2') ослабляет интенсивность как ДР (3.53 GHz, -12.9 dB), так и ФМР (3.2 GHz, -7.86 dB): глубина резонансных минимумов обоих резонансов уменьшается, практически не смещая их частоты.

На рис. 6, *b* (кривая 2) видно, что в отсутствие P_λ с увеличением $H_0 = H_2$ до 200 Oe и приближением ферромагнитного резонанса ФМР к частоте дипольного ДР₀ происходит смещение частоты и усиление ФМР (3.3 GHz, -29 dB) наряду со смещением частоты ДР (3.58 GHz, -23 dB). При наложении

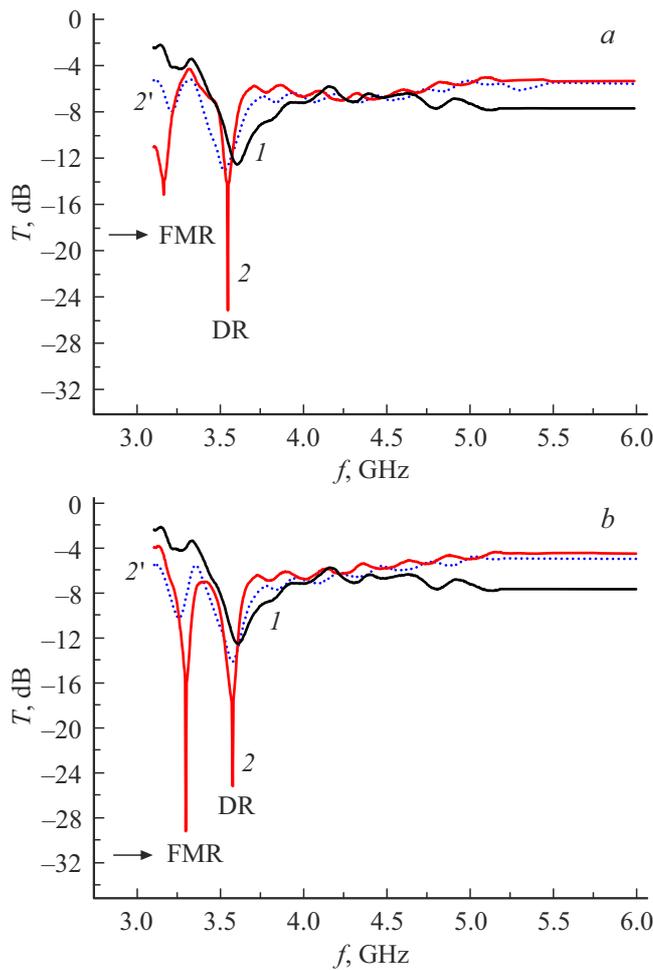


Рис. 6. Измеренная динамика частотных зависимостей прохождения микроволн T с мета-диполем Π в свободном пространстве в диапазоне 3–6 GHz в режиме связанных ФМР и ДР при $0.97 (0.53) \mu\text{m}$ облучении: a — $1 (H_0 = 0 \text{ Oe}, P_\lambda = 0 \text{ mW})$, $2 (H_0 = 150 \text{ Oe}, P_\lambda = 0 \text{ mW})$, $2' (H_0 = 150 \text{ Oe}, P_\lambda = 60 \text{ mW})$; b — $1 (H_0 = 0 \text{ Oe}, P_\lambda = 0 \text{ mW})$, $2 (H_0 = 200 \text{ Oe}, P_\lambda = 0 \text{ mW})$, $2' (H_0 = 200 \text{ Oe}, P_\lambda = 60 \text{ mW})$.

H_2 оптическое $0.53 (0.97) \mu\text{m}$ облучение ($P_\lambda = 60 \text{ mW}$) ослабляет интенсивность обоих резонансов (кривая $2'$): ФМР (3.27 GHz, -10.14 dB) и ДР (3.57 GHz, -13.96 dB).

Таким образом, в режиме связанных ФМР и ДР резонансов появляется возможность независимого управления резонансными частотами магнитным полем H_0 и интенсивностями резонансов оптическим облучением P_λ при последовательном магнитном и оптическом воздействии на метадиполь.

Заключение

Впервые предложены и выполнены оптически-магнито-управляемые метадиполи, представляющие собой мини-резонаторы на основе медной многозаходной киральной спирали, содержащей спаренные сердечники: полупроводник GaAs и железиттриевый феррит.

Измерениями динамики резонансных откликов прохождения и отражения микроволн в условиях прямоугольных волноводов и свободного пространства исследованы особенности дипольного резонанса, ферромагнитного и кирально-ферромагнитного резонансов, наблюдаемые с мета-диполями в диапазоне 3–12 GHz при наложении постоянного магнитного поля и волоконно-оптическом $0.97 \mu\text{m}$ облучении с изменением мощности от 0 до 120 mW, а также при облучении $0.53 \mu\text{m}$ лазерной указкой мощностью 60 mW, примененной на расстоянии нескольких метров от диполей.

Измерениями спектра прохождения микроволн с двумя метадиполями показано адресное воздействие оптического облучения, когда интенсивность дипольного резонанса заданного метадиполя ослабевает, резонансные свойства исчезают.

Показано, что ферромагнитный резонанс усиливается с приближением к частоте дипольного резонанса и может управляться не только постоянным магнитным полем H_0 , но и оптическим облучением GaAs, а дипольный не только оптическим облучением, но и полем H_0 .

Показано, что в режиме связанных ферромагнитного (кирально-ферромагнитного) и дипольного резонансов появляется возможность независимого управления резонансными частотами магнитным полем H_0 и интенсивностями резонансов оптическим облучением при последовательном магнитном и оптическом воздействии на метадиполь. Связанные резонансы разной природы (ферромагнитный и дипольный) исследуются впервые.

Полученные результаты базируются на объединении оптических и магнитных методов управления распространением микроволн в рамках востребованной в настоящее время управляемой мета-микроэлектроники и могут быть полезны, в частности, в разработке фильтров, СВЧ-антенн в системах спутниковой связи, радиолокации, телекоммуникационных устройствах.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Финансирование работы

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Список литературы

- [1] V. Lindell, A.J. Vitanen, S.A. Tretyakov. Electromagnetic Waves in Chiral and Bi-Isotropic Media (Artech House Antenna Library. 1994).
- [2] Б.З. Каценеленбаум, Е.Н. Коршунова, А.Н. Сивов, А.Д. Шатров. Успехи физических наук **167**, *11*, 1201 (1997).
- [3] Y. Tawk, J. Costantine, and C. G. Christodoulou. IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett. **11**, (2012).

- [4] A. Velez, J. Bonache, F. Martín. *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.* **18**, 1, 28, (2008).
- [5] A. V'elez, J. Bonache, F.Martín. *Microw. Opt. Technol. Lett.* **49**, 9, 224 (2007).
- [6] Y.X. He, P. He, S.D. Yoon, P.V. Parimi, F.J. Rachford, V.G. Harris, C. Vittoria. *J. Magn. Magn. Mater.* **313**, 187 (2007).
- [7] H.J. Zhao, J. Zhou, Q. Zhao, B. Li, L. Kang, Y. Bai. *Appl. Phys. Lett.* **91**, 13, 131107 (2007).
- [8] G. Srinivasan, A.S. Tatarenko, M.I. Bichurin. *Electron. Lett.* **41**, 10, 596 (2005).
- [9] H.T. Chen, J.F. O'Hara, A.K. Azad, A.J. Taylor. *Laser Photonics Rev.* **4**, 513 (2011).
- [10] W.J. Padilla, A.J. Taylor, C. Highstrete, M. Lee, R.D. Averitt. *Phys. Rev. Lett.* **96**. 107401 (2006).
- [11] H.T. Chen, W.J. Padilla, J. Zide, A.C. Gossard, A.J. Taylor, R.D. Averitt. *Nature* **444**, 597 (2006).
- [12] S. Xiao, T. Wang, X. Jiang, T. Liu, C. Zhou, J. Zhang. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **53**, 503002 (2020).
- [13] J.M. Manceau, N.-H. Shen, M. Kafesaki, C.M. Soukoulis, S. Tzortzakis. *Appl. Phys. Lett.* **96**, 02111 (2010).
- [14] Г.А. Крафтмахер, В.С. Бутылкин, Ю.Н. Казанцев, В.П. Мальцев, П.С. Фишер. *Письма в ЖЭТФ* **114**, 9, 586 (2021).
- [15] R. Cameron, C. Kudsia, R. Mansour. *Microwave Filters for Communication Systems: Fundamentals, Design, and Applications*. John Wiley & Sons (2018).
- [16] J.P. Turpin, J.A. Bossard, K.L. Morgan, D.H. Werner, P.L. Werner. *Int. J. Antenn. Propag.* **2014**, 429837 (2014).
- [17] N. I. Zheludev, Y. S. Kivshar. *Nature Materials* **11**, 11, 917 (2012).
- [18] С.Е. Банков, А.Г. Давыдов, А.А. Курушин. *Журнал радиоэлектроники* **4** (2010).
- [19] Урик Винсент Дж.-мл., МакКинни Джейсон Д., Вильямс Кейт Дж. *ОСНОВЫ МИКРОВОЛНОВОЙ ФОТОНИКИ*. перевод с английского д.т.н. М.Е. Белкина, к.ф.-м.н. И.В. Мельникова, к.ф.-м.н. В.П. Яковлева под редакцией д.т.н., д.э.н., проф. С.Ф. Боева, акад. РАН, д.ф.-м.н., проф. А.С. Сигова при поддержке ОАО „РТИ“. М: ТЕХНОСФЕРА, 376 с., ISBN 978-5-94836-445-2, (2017).
- [20] G. Armelles, A. Cebollada, A. García-Martín, M.U. González. *Adv. Optical Mater.* **1**, 10 (2013).
- [21] A.I. Chernov, M.A. Kozhaev, I.V. Savochkin, D.V. Dodonov, P.M. Vetoshko, A.K. Zvezdin, V.I. Belotelov. *Opt. Lett.* **42**, 279 (2017).
- [22] Киттель, Чарльз. *Введение в физику твердого тела* (8-е изд.). Нью-Джерси: Wiley. стр. 680. ISBN 978-0-471-41526-8. OCLC 820453856. Гл. 11, стр. 379 (2013)
- [23] S.A. Tretyakov. *Topical Review. J. Opt.* **19**, 013002 (2017).
- [24] Г.А. Крафтмахер. *Радиотехника и электроника* **48**, 1, 106 (2003)
- [25] В.С. Бутылкин, Г.А. Крафтмахер, П.С. Фишер. *Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования* **1**, 41 (2024).

Редактор А.Н. Смирнов