

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА
И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 537.874;621.396

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МЕТА-ИНТЕРФЕРОМЕТРА
С ПРОСТРАНСТВЕННО РАЗНЕСЕННЫМИ И НЕЗАВИСИМО
ЭЛЕКТРИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫМИ МЕТАСТРУКТУРАМИ НА ОСНОВЕ
КИРАЛЬНЫХ И ДИПОЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

© 2022 г. Г. А. Крафтмахер^а, *, В. С. Бутылкин^а, Ю. Н. Казанцев^а,
Д. С. Каленов^а, В. П. Мальцев^а

^аФрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
пл. Введенского, 1, Фрязино Московской обл., 141190 Российская Федерация

*E-mail: gaarkr139@mail.ru

Поступила в редакцию 12.05.2021 г.

После доработки 12.05.2021 г.

Принята к публикации 12.06.2021 г.

Экспериментально исследованы в диапазоне 3...6 ГГц функциональные особенности мета-интерферометра с пространственно разнесенными и независимо электрически управляемыми от разных источников метаструктурами на основе киральных и дипольных кольцевых электропроводящих элементов с варакторами: с метаструктурой $M1$ в качестве разделителя пучка и с $M2$ в закороченном h -плече как отражателя резонатора Фабри–Перо. Применены планарные спирали, двойные разомкнутые кольца и одинарные дважды разомкнутые кольца. Измерены резонансные отклики метаструктур и динамика интерферограммы. Продемонстрирована возможность независимого управления глубиной и шириной, а также частотой и шириной индивидуальной полосы запрета в зависимости от выбора метаструктур.

DOI: 10.31857/S0033849422050084

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к метаматериалам, содержащим электропроводящие киральные разомкнутые резонансные кольцевые элементы, совместимые с элементами магнитного, электрического и оптического управления, сохраняется и в настоящее время [1–4]. Метаструктуры, мета-атомы и мета-поверхности находят применение в разнообразных СВЧ-устройствах, среди которых важное место занимают многополосные фильтры [5]. В качестве основных компонентов в динамических коммуникационных системах востребованы независимо электрически управляемые многополосные фильтры, в которых изменения амплитудно-частотных характеристик одной полосы не затрагивали бы и другие полосы, что связано с определенными трудностями [6]. Актуальным является независимое управление амплитудой, частотой и шириной внутри индивидуальной полосы, так как при этом расширяются функциональные возможности систем [7, 8]. Многополосные микроволновые реконфигурируемые фотонные фильтры, обладающие возможностью переключения конфигурации полос пропускания в СВЧ-отклике, предложены в [9].

Учитывая актуальность и сложность проблемы, важным являются новые методы и подходы. В [10–13] показано, что применение метаструктур в интерферометрии открывает новые функциональные возможности в многополосной фильтрации микроволн. В [10, 11] продемонстрировано воздействие резонансов, ферромагнитного в феррите (при управлении магнитостатическим полем) и дипольного в метаструктуре (управляемого электрическим напряжением на варакторе) на интерферограмму мета-интерферометра при использовании метаструктуры в качестве разделителя пучка. В [12, 13] исследованы закономерности, наблюдаемые, если метаструктура расположена в закороченном h -плече на некотором расстоянии от короткозамыкателя, образуя резонатор Фабри–Перо.

В [14] впервые был предложен и исследован волноводный тройниковый мета-интерферометр, содержащий две пространственно разнесенные метаструктуры ($M1$ и $M2$) на основе линейных проводов, нагруженные варакторами с независимым управлением от разных внешних источников. Было показано независимое воздействие на интерферограмму резонансных откликов $M1$ и $M2$, которое позволяет независимо изменять ширину и частоту индивидуальной полосы запрета.

Представляет интерес исследовать и другие пространственно разнесенные метаструктуры, отличающиеся динамикой резонансных откликов, с целью изучения влияния на интерферограмму и функциональные возможности метаинтерферометра.

В данной работе исследуется волноводный тройниковый метаинтерферометр, который содержит метаструктуры на основе планарных киральных и дипольных электропроводящих элементов, нагруженных варакторами с независимым управлением от разных внешних источников. Одну из метаструктур ($M1$) поместили в интерферометр в качестве разделителя пучка, а другую ($M2$) – в закороченное h -плечо на расстоянии s от короткозамыкателя, в результате образовался резонатор Фабри–Перо. Исследовано совместное воздействие управляемых резонансных эффектов при использовании разных $M1$ (на основе киральных планарных спиралей ПС, планарных двойных разомкнутых колец ПДРК и дипольного кольца ДК1) и разных $M2$ (на основе планарных дважды разомкнутых одинарных колец ОК и дипольного кольца с двумя разрывами ДК2).

1. МЕТА-ИНТЕРФЕРОМЕТР. МЕТАСТРУКТУРЫ

Метаинтерферометр (рис. 1), выполненный на базе h -плоскостного волноводного тройника, содержит различные комбинации двух пространственно разнесенных и независимо электрически управляемых метаструктур с дипольным и киральными электропроводящими элементами: $M1$ в качестве отражателя пучка и $M2$ в закороченном h -плече на расстоянии $s = 110$ мм от короткозамыкателя 5 как отражатель резонатора Фабри–Перо. Фото метаструктур представлены на рис. 2: это резонансные неуправляемые метаструктуры (ряд из шести ПС и ряд из шести ПДРК) и метаструктуры, резонансные свойства которых управляются электрическим напряжением обратного смещения V_{OC} на варакторе (ряд из шести планарных двойных разомкнутых колец с дополнительным разрывом во внешнем кольце, нагруженном варактором ПДРК*; ряд из трех планарных ОК с двумя разрывами, нагруженными варакторами; ДК с двумя разрывами, нагруженными варакторами, как два встречных полуволновых диполя).

В метаструктурах были использованы варакторы МА46Н120 и ВВ857, емкость которых меняется в пределах 1.15...0.1 пФ и 6.5...0.55 пФ при изменении напряжения обратного смещения на варакторе V_{OC} от 0 до 30 В. В отсутствие метаструктуры тройник трансформируется в интерферометр и обладает свойствами многополосного фильтра. Увеличивая длину h -плеча, можно увеличить число интерференционных полос. Метаструктуры располагали вдоль оси прямоугольного волновода 48×24 мм.

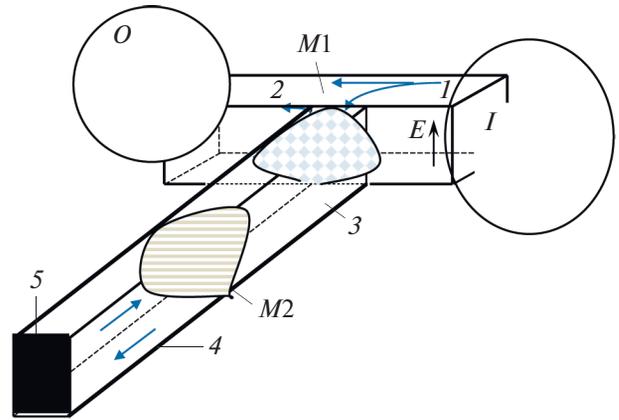


Рис. 1. Схема метаинтерферометра: I и O – вход и выход, 1 и 2 – входное и выходное плечи, $M1$ – метаструктура (разделитель пучка), $M2$ – метаструктура в закороченном h -плече (отражатель резонатора Фабри–Перо), 3 и 4 – полые отрезки короткозамкнутого h -плеча до передней границы $M2$ и между задней границей $M2$ и короткозамыкателем 5.

Исследовали динамику состояния интерферограммы, измеряя частотную зависимость коэффициента прохождения T на выходе интерферометра в зависимости от резонансных свойств метаструктур. Подача $V1_{OC}$ приводила к перестройке интерферограммы в частотной области, соответствующей области возбуждения резонанса в метаструктуре $M1$, а подача $V2_{OC}$ влияет на интерферограмму в частотной области, соответствующей области возбуждения резонанса в $M2$. Информацию о величинах напряжений представляем в виде $(V1-V2)$, например, $(0-0)$ означает, что $V1_{OC} = 0$ и $V2_{OC} = 0$ В, а $(0-10)$ означает, что $V1_{OC} = 0$, а $V2_{OC} = 10$ В. Размеры элементов выбраны так, чтобы резонансные эффекты проявлялись в заданном диапазоне 3...6 ГГц. Исследовали возможность независимого управления амплитудно-частотными характеристиками интерферограммы при совместном наложении напряжений $V1_{OC}$ и $V2_{OC}$ на варакторы $M1$ и $M2$.

2. МНОГОПОЛОСНАЯ УПРАВЛЯЕМАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ С ПРОСТРАНСТВЕННО РАЗНЕСЕННЫМИ МЕТАСТРУКТУРАМИ

2.1. Метаструктуры $M1-M2$ ($V2_{OC}$)

В данном разделе рассмотрены функциональные возможности метаинтерферометра для случая, когда $M1$ представляет собой ряд из шести ПС в полтора оборота (резонанс возбуждается микроволновым полем вблизи $f = 3.9$ ГГц), а $M2$ содержит ряд из трех планарных ОК с двумя разрывами, нагруженными варакторами (далее – 6ПС_3ОК), что обеспечивает управление резонансной частотой в широкой полосе частот.

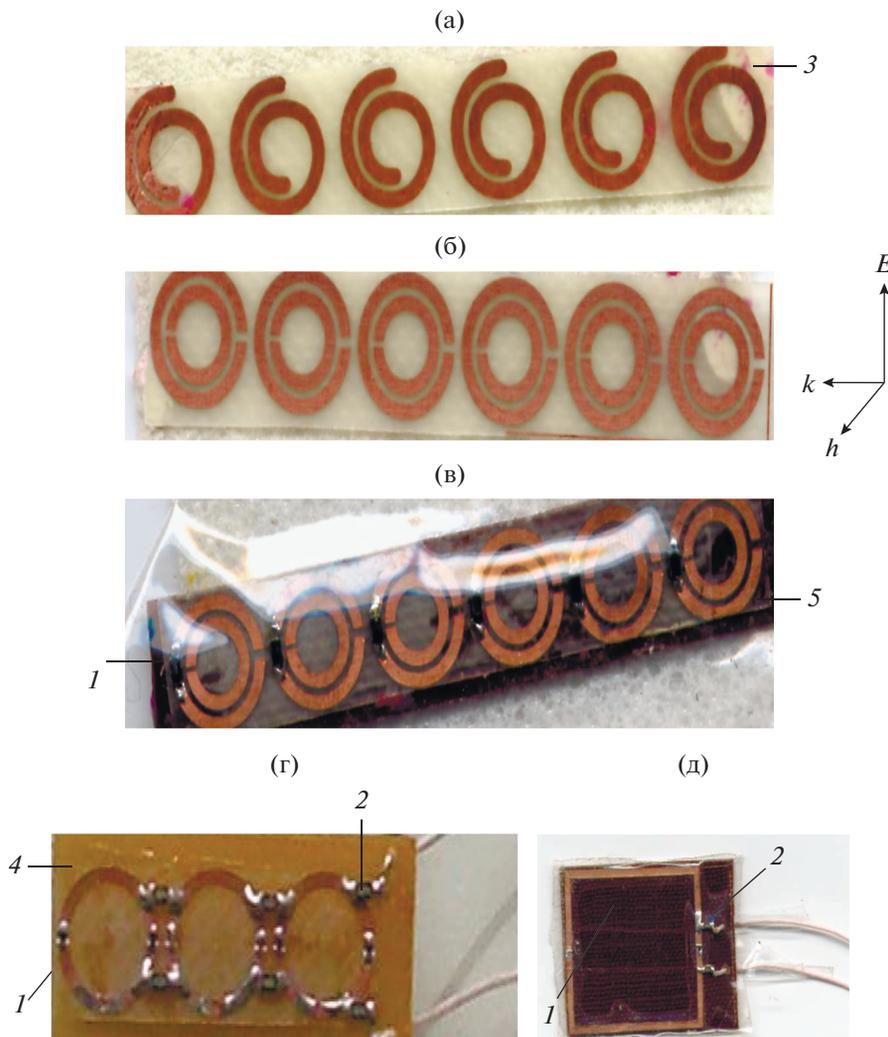


Рис. 2. Фото метаструктур: а – ряд из шести планарных киральных спиралей в полтора оборота; б – ряд из шести киральных двойных разомкнутых колец; в – ряд из шести киральных двойных разомкнутых колец с дополнительным разрывом во внешнем кольце, нагруженном варактором; г – ряд из трех планарных киральных дважды разомкнутых одинарных колец, нагруженными двумя варакторами в каждом кольце; д – дипольное кольцо с двумя разрывами, нагруженными варакторами, 1 – варактор, 2 – резистор R_L , 3, 4, 5 – подложки (полиамидная пленка, текстолит, гетинакс).

Исследован также случай, когда $M1$ содержит ряд из шести планарных двойных разомкнутых колец ПДРК, а в качестве $M2$ по-прежнему использован ряд из трех ОК (6ПДРК-3ОК).

I. Взаимное расположение $M1$ и $M2$ в интерферометре наглядно показано на рис. 3а.

Интерферограмма с $M1$ (интерференционная зависимость T от частоты с полосами запрета F_i) представлена на рис. 3б в сравнении с интерферограммой пустого интерферометра. Из рисунка видно, что внедрение $M1$ не приводит к нарушению периодичности и изменению вида F_i пустого интерферометра за исключением полосы F_3^* , $f^* = 3.9$ ГГц (F_i^* – полосы с особенностями в результате воздействия резонанса $M1$).

На рис. 3в представлена динамика интерферограммы с $M2$ при изменении напряжения V_{2OC} от 7.3 до 7.9 В, которое позволяет управляемому резонансу в ОК возбуждаться в частотной области полосы F_3^* .

Воздействие резонансов $M1$ и $M2$ при совмещении их характеристик в одной и той же частотной области полосы F_3 продемонстрировано на рис. 3г. Из рисунка видно, что при $V_{2OC} = 0$ (кривая 1) изменения в интерферограмме связаны с резонансом $M1$, который приводит к особенности F_3^* . С наложением и увеличением $V_{2OC} = 8$ В (кривая 2) наблюдаем раздвоение полосы F_3^* при небольшом изменении ее глубины в результате влияния резонанса $M2$.

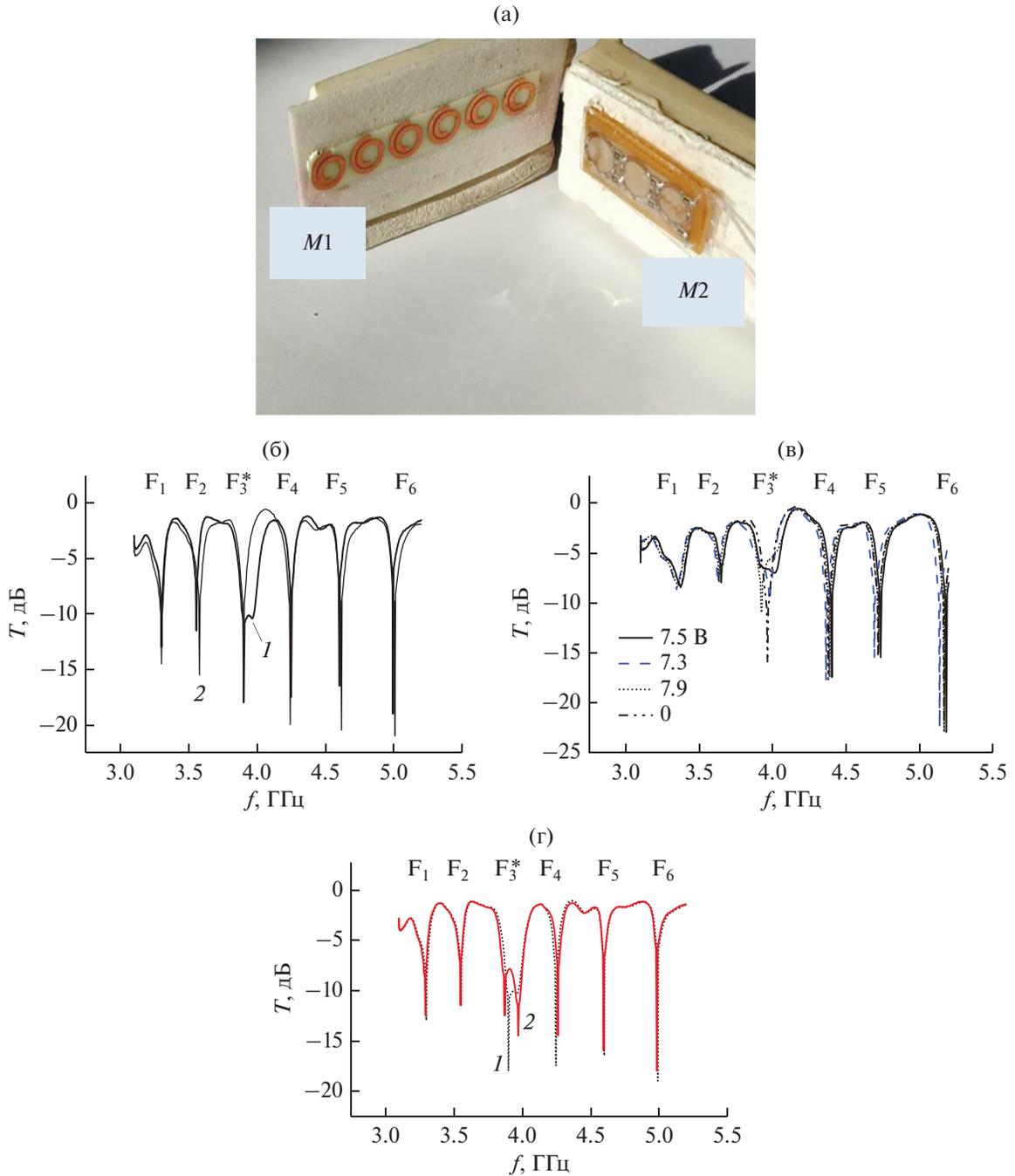


Рис. 3. Измеренные частотные зависимости прохождения T в интерферометре с метаструктурами ($M1-M2$) – (6ПС_ЗОК) в условиях $M1-V_{OC}$: а – взаимное расположение в интерферометре; б – без $M2$ кривая 1 (с $M1$) и кривая 2 (без $M1$); в – без $M1$ с $M2$ ($V_{OC}2$); г – с ($M1-M2$) в условиях ($M1-0$) (кривая 1) и ($M1-8$ В) (кривая 2).

Меняя $M1$ и подбирая необходимые величины V_{OC} , можно управлять и другими частотными полосами интерферограммы F_i^* .

II. Метаструктуры $M1$ и $M2$ и их взаимное расположение в интерферометре наглядно показано на рис. 4а.

Динамика интерферограммы с $M1$ и $M2$ продемонстрирована на рис. 4б. Как видим, при $V_{OC} = 0$, когда влияние $M2$ не сказывается, существует особенность интерференционной полосы F_5^* (4.6 ГГц) с изменением ее вида и ширины относительно других полос и полосы F_5 пустого интерферометра. В этом случае проявляется влияние

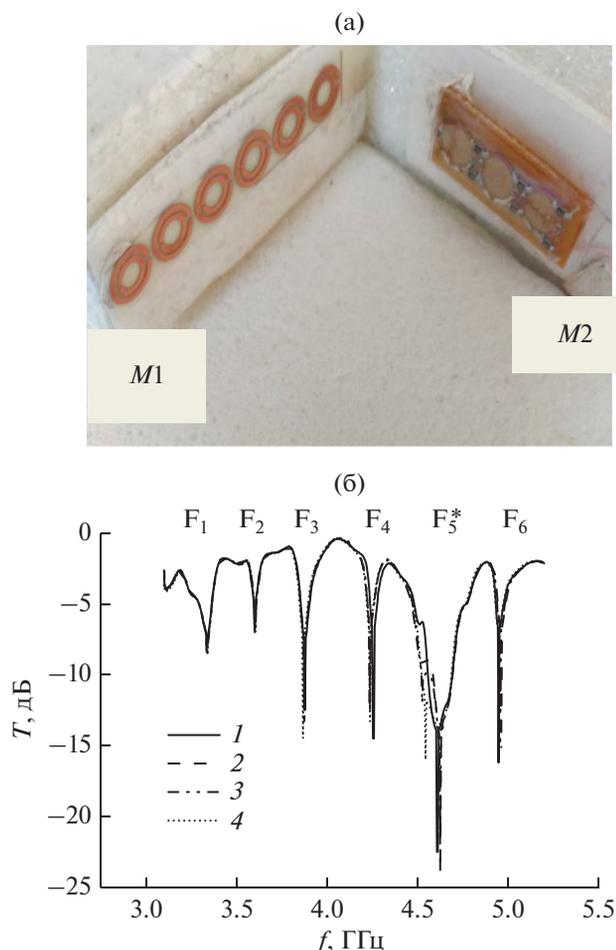


Рис. 4. Измеренные частотные зависимости прохождения T в интерферометре с метаструктурами (6 ПДРК_3 ОК) в условиях ($M1-V_{2OC}$): а – взаимное расположение в интерферометре; б – результаты измерений в условиях $V_{2OC} = 0$ (1), 12.7 (2), 13 (3) и 14 В (4).

резонансных свойств ПДРК, возбуждаемых микроволновым полем вблизи 4.6 ГГц, в виде особенностей в интерферограмме при сравнении с пустым интерферометром.

Варьируя величину напряжения V_{2OC} , можно менять состояние полосы F_5^* . Так, при $V_{2OC} = 12.7$ В наблюдаем сужение, а при $V_{2OC} = 14$ В – раздвоение.

2.2. Метаструктуры $M1(V_{1OC})-M2(V_{2OC})$

Исследуем случай, когда резонансы $M1$ и $M2$ управляются электрическими напряжениями V_{1OC} и V_{2OC} , подаваемыми на варакторы. Метаструктура $M1$ содержит ряд из шести ПДРК* с дополнительным разрывом во внешнем кольце, нагруженным варактором, а в качестве $M2$ по-прежнему используем ряд из трех ОК с варакторами (далее – 6ПДРК*-3ОК).

Также были рассмотрены представляющие интерес функциональные возможности мета-интерферометра, когда в качестве $M1$ и $M2$ использовали два дипольных кольца ДК1 и ДК2 с двумя разрывами и двумя варакторами в каждом кольце (ДК1–ДК2).

I. Метаструктуры $M1$ и $M2$ и их взаимное расположение в интерферометре наглядно показано на рис. 5а.

Частотные зависимости коэффициента прохождения ПДРК* и ОК при возбуждении резонанса, измеренные в прямоугольном волноводе при разных величинах V_{OC} , представлены на рис. 5б, 5в. Видим, что резонансы, возбуждаемые в ПДРК электрическим микроволновым полем, а в ОК магнитным микроволновым полем, которые проявляются в виде резонансных минимумов на кривой T , плавно смещаются к высоким частотам с увеличением V_{OC} в результате уменьшения емкости варактора. Как при этом меняется интерферограмма с ПДРК* ($M1$) и с ОК ($M2$), продемонстрировано на рис. 5г–5е; 6а, 6б и 7а, 7б.

На рис. 5г–5е приведены результаты измерений динамики интерферограммы с $M1$ и $M2$ при управлении резонансом $M1$ наложением напряжения V_{1OC} . Видим особенность в полосе F_4^* и F_5^* при $V_{1OC} = 0$, которая постепенно смещается к высоким частотам, затрагивая полосы F_5^* и F_6^* при $V_{1OC} = 10$ В, и удаляется к полосе F_6^* при $V_{1OC} = 20$ В в соответствии с изменением частот резонанса $M1$.

На рис. 6а, 6б показано, что, управляя резонансом $M2$, можно изменить интерферограмму в частотной области воздействия резонанса $M1$, затрагивая полосы запрета F_5^* и F_6^* (уменьшение глубины), приложив $V_{2OC} = 12.7$ и 32 В.

Далее были исследованы функциональные возможности мета-интерферометра при совместном воздействии резонансов метаструктур $M1$ и $M2$. Было выяснено, что, подбирая необходимое условие ($V_{1OC}-V_{2OC}$), можно управлять состоянием полосы F_6^* , практически не затрагивая другие полосы интерферограммы при совмещении резонансных характеристик $M1$ и $M2$ в одной и той же частотной области (в полосе запрета F_6^* , см. рис. 5е и 6б). Так, на рис. 7а, 7б показано, что, изменяя условия ($V_{1OC}-V_{2OC}$), можно управлять глубиной (T_{\min}) и шириной δ данной полосы без изменения частоты f . В условиях (20–0) наблюдаем следующее состояние полосы F_6^* : $f = 5.11$ ГГц; $T_{\min} = -20.8$ дБ; $\delta = 0.1$ ГГц (на уровне -10 дБ). При (0–32) меняется глубина ($T_{\min} = -6$ дБ), а (20–32) приводит к раздвоению и увеличению ширины $\delta = 0.16$ ГГц относительно первоначаль-

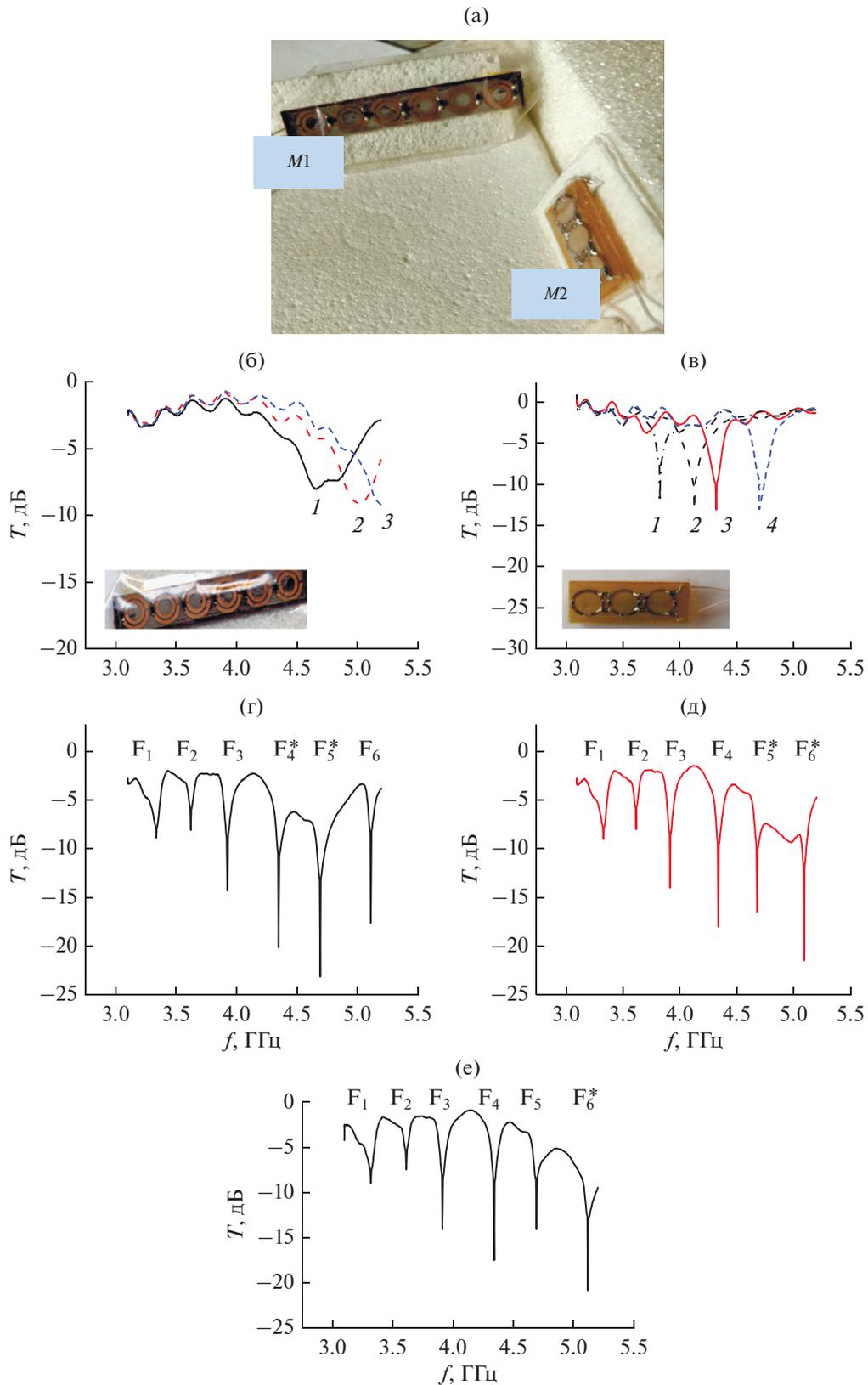


Рис. 5. Измеренные частотные зависимости прохождения T с метаструктурами (6ПДРК*_ЗОК): а – взаимное расположение в интерферометре; результаты измерений в волноводе: б – с 6ПДРК* при $V_{OC} = 0$ (1), 10 (2), 20 В (3), в – с ЗОК при $V_{OC} = 7$ (1), 8 (2), 10 (3), 15 В (4); г–е – в интерферометре в условиях $V_{2OC} = 0$ при $V_{1OC} = 0$ (г), 10 (д), 20 В (е).

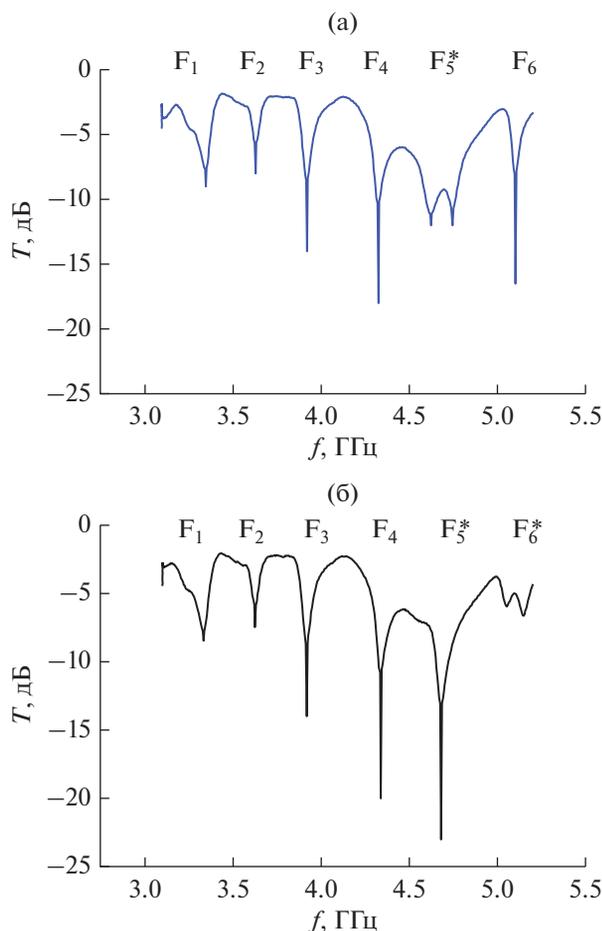


Рис. 6. Измеренные частотные зависимости прохождения T в интерферометре с метаструктурами (6ПДРК*_3ОК) в условиях $V_{1OC} = 0$ при $V_{2OC} = 12.7$ (а) и 32 В (б).

ного (20–0) при некотором изменении глубины ($T_{\min} = -13$ дБ...–15 дБ).

II. Динамика резонансов ДК1 и ДК2, которые проявляются в одной и той же частотной области заданного диапазона частот как резонансные минимумы коэффициента прохождения T_{\min} показана на рис. 8а, 8б. Результаты получены на основании измерений в прямоугольном волноводе частотных зависимостей прохождения T , изменяющихся при внешнем воздействии V_{OC} . Видим, что резонансы плавно смещаются к высоким частотам с увеличением V_{OC} в результате уменьшения емкости варакторов.

Состояние интерферограммы с ДК1 и ДК2 отражено на рис. 9–11 (взаимное расположение ДК1 и ДК2 в интерферометре наглядно показано на рис. 9а). Видим, что при наложении ($V_{1OC} = 0$) интерферограмма теряет периодичность по сравнению с пустым интерферометром и происходят существенные амплитудно-частотные изменения (рис. 9б). Наблюдаем изменения интенсивностей

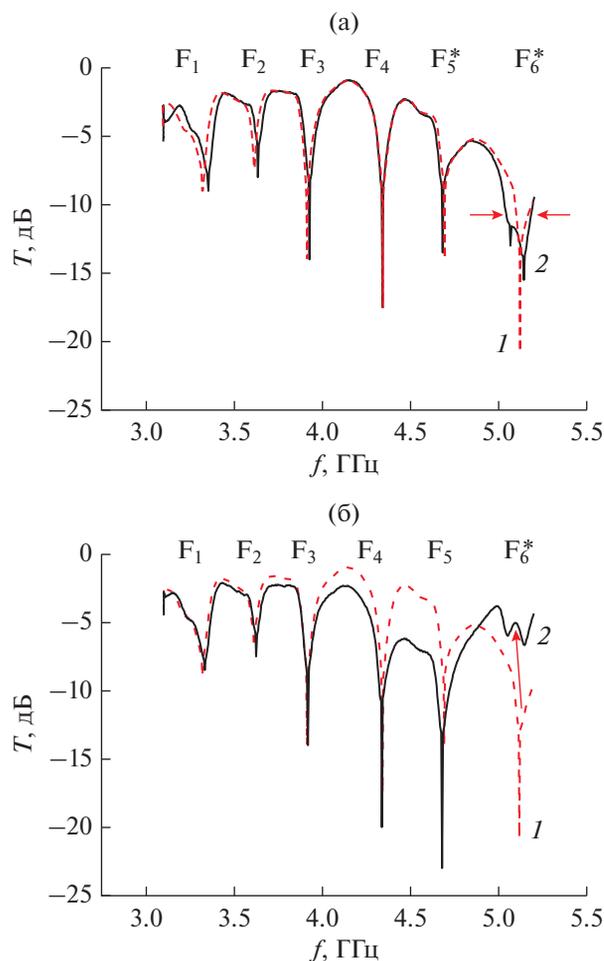


Рис. 7. Динамика интерферограммы при изменении условий внешнего воздействия на метаструктуры (6ПДРК*_3ОК): а – из условий (20–0) (кривая 1) на (20–32) (кривая 2); б – из (20–0) (кривая 1) на (0–32) (кривая 2).

и частот полос запрета в условиях (4–0) и (15–0), охватывающих, в отличие от ПДРК* и ОК, почти весь измеряемый диапазон в результате воздействия довольно широкого резонанса ДК1.

Изменения интерферограммы при наложении ($0 - V_{2OC}$) в условиях (0–10) и (0–20) приведены на рис. 10а. Наблюдаем увеличение числа полос запрета при небольших амплитудно-частотных изменениях. Состояние интерферограммы при совместном воздействии управляемых резонансных эффектов ДК1 и ДК2 при ($V_{1OC} - V_{2OC}$) в условиях (20–20) продемонстрировано на рис. 10б.

Было показано, что, варьируя условиями ($V_{1OC} - V_{2OC}$), можно управлять частотой и шириной δ полосы запрета. На рис. 11а видно, что полоса F^* смещается на 0.09 ГГц (от 4.275 до 4.366 ГГц) при изменении условий от (0–20) к (29–20). Меняя условие (0–20) на (10–0), наблюдаем уширение полосы F^* в несколько раз (на

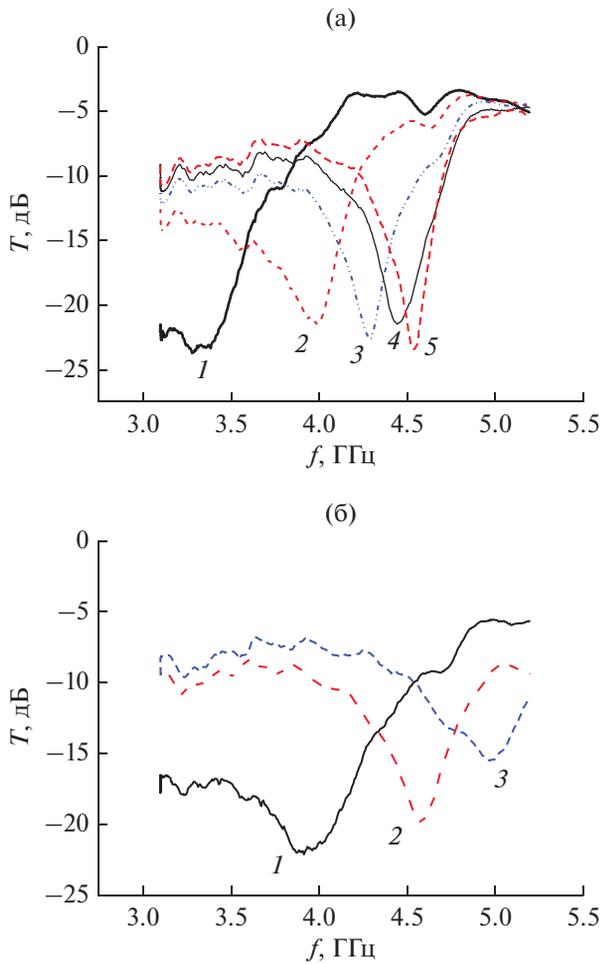


Рис. 8. Измеренные частотные зависимости прохождения T в волноводе: а – с ДК1 при $V_{OC} = 0$ (1), 5 (2), 10 (3), 15 (4), 29 В (5); б – с ДК2 при $V_{OC} = 0$ (1), 10 (2), 20 В (3).

уровне -15 дБ от 0.01 до 0.08 ГГц, как показано на рис. 11б). Отметим, что изменения полосы F^* затрагивают, к сожалению, и другие полосы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы функциональные свойства управляемой микроволновой интерферометрии с применением резонансных метаструктур на основе киральных и дипольных кольцевых электропроводящих элементов, резонансные отклики которых оказывают воздействие на интерферограмму в зависимости от того, какими обладают свойствами и как расположены в мета-интерферометре.

Исследованы функциональные особенности мета-интерферометра с пространственно разнесенными и независимо электрически управляемыми от разных источников метаструктурами на основе киральных и дипольных элементов: с метаструктурой $M1$ в качестве разделителя пучка и с

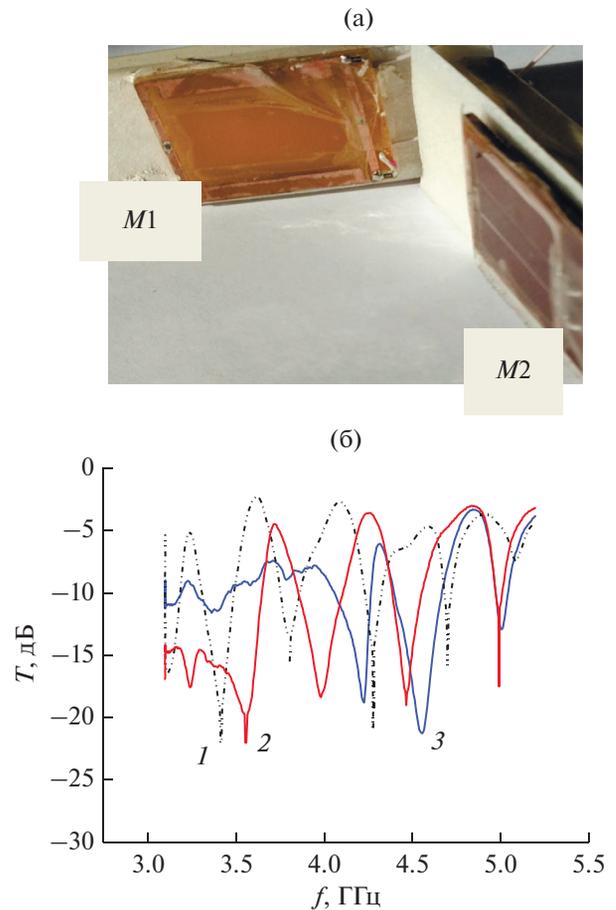


Рис. 9. Динамика интерферограммы при изменении условий внешнего воздействия на метаструктуры (ДК1_ДК2): а – взаимное расположение в интерферометре; б – при ($V_{1OC}=0$) в условиях (0–0) (кривая 1), (4–0) (кривая 2) и (15–0) (кривая 3).

$M2$ в закороченном h -плече как отражателе резонатора Фабри–Перо. Метаструктуры выполнены на основе планарных спиралей и двойных разомкнутых колец, обладающих резонансными откликами на определенных частотах, а также управляемых электрическим напряжением двойных разомкнутых колец с дополнительным разрывом во внешнем кольце, нагруженным варактором, одинарных дважды разомкнутых колец с варакторами и нагруженного варакторами дипольного кольца с двумя разрывами. Исследованы их разные комбинации.

Измерена динамика резонансных откликов метаструктур в прямоугольном волноводе в зависимости от напряжения обратного смещения на варакторах V_{OC} и интерферограмма при разных комбинациях ($M1-M2$).

Показано, что при совместном наложении напряжений V_{1OC} и V_{2OC} на варакторы $M1$ и $M2$ с воздействием на интерферограмму динамиче-

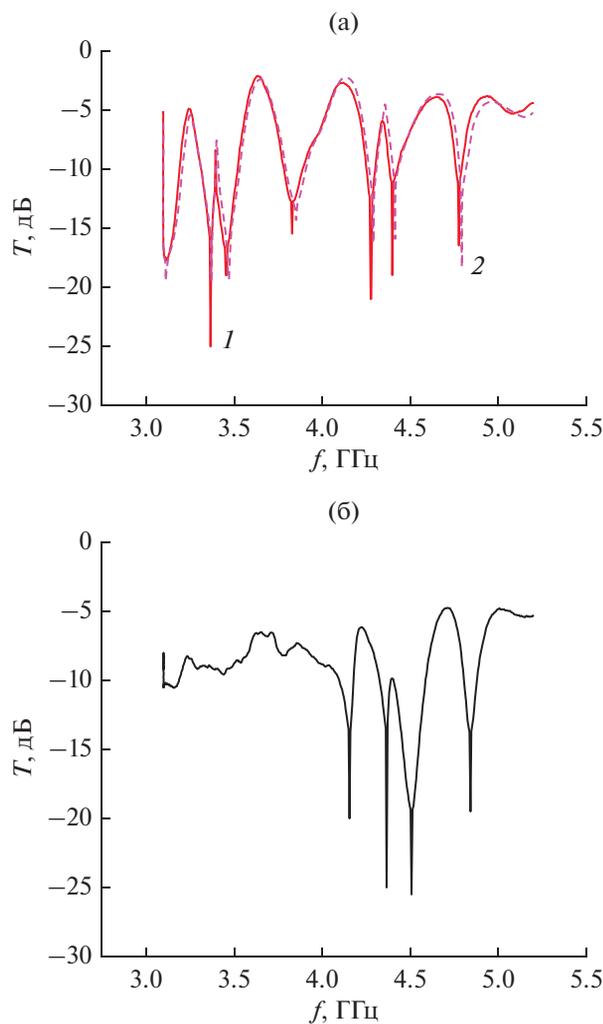


Рис. 10. Динамика интерферограммы при изменении условий внешнего воздействия на метаструктуры (ДК1_ДК2): а – при $(0-V_{2OC})$ в условиях $(0-20)$ (кривая 1), $(0-10)$ (кривая 2), б – при $(V_{1OC}-V_{2OC})$ в условиях $(20-20)$.

ских характеристик метаструктур в одной и той же частотной области появляется возможность независимого управления амплитудно-частотными характеристиками интерферограммы.

Показано также, что функциональные возможности мета-интерферометра зависят от выбора метаструктур. Так, с метаструктурами (6ПДРК*-3ОК), варьируя величинами $(V_{1OC}-V_{2OC})$, можно управлять глубиной ($T_{мин}$) и шириной (δ) индивидуальной полосы запрета без изменения частоты f при незначительном влиянии на соседние полосы, при этом частотный спектр интерферограммы мало отличается от пустого интерферометра. С комбинацией (ДК1–ДК2) можно управлять частотой f и шириной δ , затрагивая и соседние интерференционные полосы при существенном от-

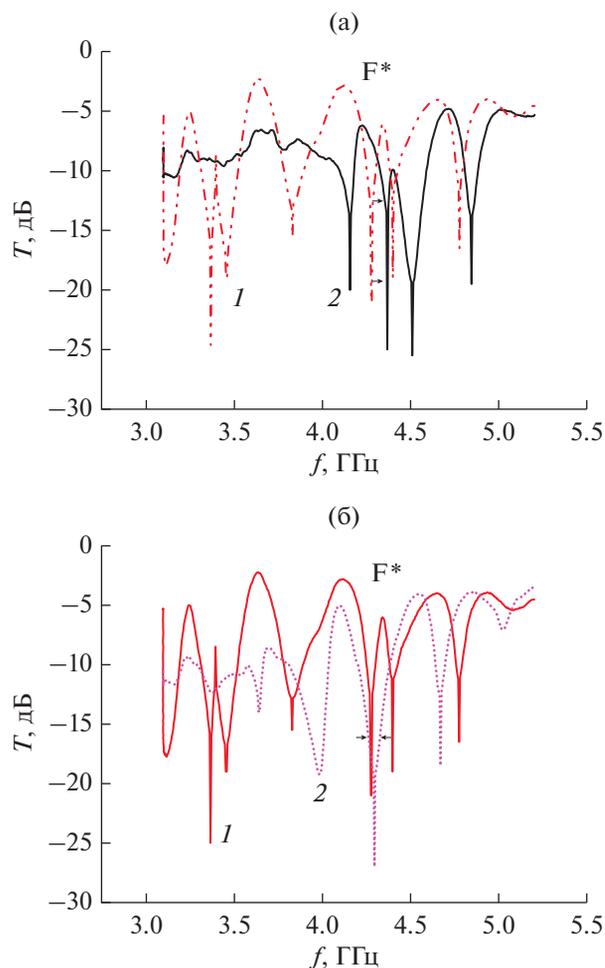


Рис. 11. Динамика интерферограммы при изменении условий внешнего воздействия на метаструктуры (ДК1_ДК2): а – из условий $(0-20)$ (кривая 1) на $(29-20)$ (кривая 2); б – из $(0-20)$ (кривая 1) на $(10-0)$ (кривая 2).

личии спектра интерферограммы от пустого интерферометра.

Полученные результаты могут служить мотивацией для дальнейших исследований с применением других разнообразных метаструктур и быть полезны при разработке многополосных фильтров с независимым управлением амплитудно-частотными характеристиками, востребованных в многоканальных многофункциональных телекоммуникационных системах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания ИРЭ РАН по теме 0030-2019-0014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chen Hou-Tong, O'Hara John F., Azad Abul K., Taylor Antoinette J.* // *Laser Photonics Rev.* 2011. V. 5. № 4. P. 513.
2. *Xiao Shuyuan, Wang Tao, Liu Tingting et al.* // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2020. V. 53. № 50. P. 503002.
3. *Крафтмахер Г.А., Бутылкин В.С., Казанцев Ю.Н., Мальцев В.П.* // *РЭ.* 2018. Т. 63. № 7. С. 641.
4. *Butylkin V., Kazantsev Y., Kraftmakher G., Mal'tsev V.* // *Appl. Phys. A.* 2017. V. 123. № 1. P. 57.
5. *Cameron R., Kudsia C., Mansour R.* *Microwave Filters for Communication Systems: Fundamentals, Design, and Applications.* Hoboken: John Wiley & Sons, 2018.
6. *Lin Y.C., Hong T.S., Huang H.H.* // *IEEE Trans.* 2014. V. MTT-62. № 12. Pt. 2. P. 3351.
7. *Chaudhary G., Jeong Y., Lim J.* // *IEEE Trans.* 2013. V. MTT-61. № 1. P. 107.
8. *Xiu Yin Zhang, Li Gao, Yunfei Cao et al.* // *Progress in Electromagnetics Research C.* 2013. V. 42. P. 55.
9. *Liu Q., Ge J., Fok M.P.* // *Opt. Lett.* 2018. V. 43. № 22. P. 5685.
10. *Крафтмахер Г.А., Бутылкин В.С., Казанцев Ю.Н., Мальцев В.П.* // *Письма в ЖЭТФ.* 2019. Т. 109. № 4. С. 224.
11. *Крафтмахер Г.А., Бутылкин В.С., Казанцев Ю.Н., Мальцев В.П.* // *РЭ.* 2019. Т. 64. № 11. С. 1179.
12. *Крафтмахер Г.А., Бутылкин В.С., Казанцев Ю.Н., Мальцев В.П.* // *РЭ.* 2021. Т. 66. № 1. С. 3.
13. *Крафтмахер Г.А., Бутылкин В.С., Казанцев Ю.Н., Мальцев В.П.* // *РЭ.* 2021. Т. 66. № 2. С. 105.
14. *Крафтмахер Г.А., Бутылкин В.С., Казанцев Ю.Н. и др.* // *РЭ.* 2021. Т. 66. № 12. С. 1147.