
**ЭЛЕКТРОДИНАМИКА
И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН**

УДК 537.874;621.396

**ВОЗДЕЙСТВИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ОТКЛИКОВ
ПРОСТРАНСТВЕННО РАЗНЕСЕННЫХ
И НЕЗАВИСИМО ЭЛЕКТРИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫХ МЕТАСТРУКТУР
С ВАРАКТОРАМИ НА МИКРОВОЛНОВУЮ ИНТЕРФЕРОГРАММУ
МЕТА-ИНТЕРФЕРОМЕТРА**

© 2021 г. Г. А. Крафтмахер^а *, В. С. Бутылкин^а, Ю. Н. Казанцев^а,
Д. С. Каленов^а, В. П. Мальцев^а

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

*E-mail: gaarkr139@mail.ru

Поступила в редакцию 14.05.2021 г.

После доработки 14.05.2021 г.

Принята к публикации 15.06.2021 г.

Предложено применение пространственно разнесенных и независимо электрически управляемых от разных источников резонансных метаструктур для управления многополосной интерферограммой мета-интерферометра. Показана возможность независимого управления в диапазоне 3...6 ГГц частотой и шириной индивидуальной полосы запрета с метаструктурами $M1$ (в качестве разделителя пучка), содержащей периодическую решетку параллельных проводов с ортогонально асимметрично расположенной медной полоской с разрывом, нагруженным варактором, и $M2$ (в закороченном h -плече), представляющей собой дважды разомкнутое дипольное кольцо с двумя варакторами. Исследованы резонансные отклики метаструктур и динамика интерферограммы в зависимости от напряжения обратного смещения на варакторах.

DOI: 10.31857/S0033849421120147

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время возрастает потребность в микроволновых устройствах с раздельным управлением амплитудно-частотными характеристиками. Независимо управляемые многополосные фильтры востребованы в качестве основных компонентов в динамических коммуникационных системах. Поскольку в многополосных фильтрах расстояние между полосами мало, то при управлении одной полосой независимо от других возникают определенные трудности, связанные с тем, чтобы при изменении амплитудно-частотных характеристик одной полосы не затрагивались бы и другие полосы [1]. Современные публикации, где рассматривается независимая настройка полос относительно друг друга, относятся в основном к двухполосным и трехполосным фильтрам (см., например, [2]).

Ведутся разработки многополосных фильтров с независимым управлением на основе различных линий передачи: волноводные, полосковые и микрополосковые, а также гибридные. Волноводные фильтры используются в системах радиосвязи (спутниковой и наземной) и радиолокации, благо-

даря тому, что они обладают возможностью передачи больших мощностей, минимальным уровнем потерь и высокой добротностью резонаторных систем, особенно в сантиметровом и миллиметровом диапазонах [3, 4].

Активно разрабатываются микрополосковые фильтры, которые, несмотря на большие потери и относительно низкую добротность резонаторов, имеют большие преимущества в конструктивном исполнении, обеспечивая малые габариты [5].

В последнее время получили развитие многополосные микроволновые реконфигурируемые фотонные фильтры [6–8], обладающие возможностью переключения конфигурации полос пропускания в СВЧ-отклике. Они основаны на трансформации в микроволновый диапазон оптического излучения с СВЧ-модуляцией при использовании довольно сложной оптической интерферометрической схемы на основе волоконно-оптической передачи. В зависимости от параметров схемы СВЧ-отклик содержит ту или иную конфигурацию с заданными полосами пропускания. В [8] достигнута конфигурация с 12 полосами и пока-

зана возможность отбора индивидуальных полос при переключении оптической схемы, а также продемонстрирован СВЧ-отклик с тремя полосами пропускания, отличающимися разной шириной и формой.

Интересным представляется независимое управление амплитудой, частотой и шириной внутри индивидуальной полосы, так как при этом расширяются функциональные возможности систем [9, 10].

Устройства на основе волноводов и микрополосков используют методы управления, апробированные в однополосных фильтрах.

1. Механическое или электромеханическое управление, при котором отмечается высокая повторяемость и малый уровень шумов [11, 12].

2. Наиболее распространенное электрическое или магнитное управление [13–18]. В этом случае под воздействием внешних электрических или магнитных полей происходит изменение параметров, содержащихся в этих устройствах сред (традиционно ферриты или сегнетоэлектрики) или элементов (варакторы, емкость которых зависит от напряжения смещения, или $p-i-n$ -диоды, у которых проводимость определяется смещающим током или напряжением).

3. Оптическое управление [19–21], которому в последнее время уделяется особое внимание благодаря низкой чувствительности к электромагнитным помехам, хорошей развязке между каналами сигнала и управления, быстродействию и, самое главное, возможности передачи по оптоволкну. Различают прямой [22] и непрямой [23–25] способы фотопреобразования. При прямом управлении оптическое излучение воздействует непосредственно на управляемый материал СВЧ-устройства, изменяя его диэлектрическую проницаемость. При непрямом способе оптический сигнал преобразуется фотодиодом или фоторезистором в электрический, который затем подводится к электрически управляемому элементу (варакторы, $p-i-n$ -диоды).

Судя по публикациям, для фотонных фильтров характерно управление в виде реконструкции многополосных спектральных характеристик, а волноводные и микрополосковые позволяют осуществить плавную перестройку.

Разные типы микроволновых фильтров (волноводные, микрополосковые, фотонные) имеют свои преимущества при существующих недостатках, обладают различными функциональными возможностями и могут быть востребованы во многих приложениях. При этом интерес представляют комбинированные линии передачи наряду с волноводными, коаксиальными и полосковыми линиями.

При существующем разнообразии решений всегда остаются актуальными новые методы и подходы. Они включают как способы управления

и конструктивно-технологическое исполнение, так и новые применения известных материалов на основании обнаруженных новых функциональных характеристик. Для этого предлагаются ферриты, сегнетоэлектрики и полупроводники [26, 27], а также метаматериалы [28]. В [26] применены аморфные алмазоподобные пленки в микроэлектронных переключателях, в [27] тонкие пленки титаната бария-стронция для новых перестраиваемых фильтров полос пропускания. Возможность электрического и магнитного управления микроволн с помощью метаструктур на основе резонансных электропроводящих элементов, совместимых с элементами электрического управления, и их комбинаций с ферритом показана в [28].

В работах [29–32] продемонстрированы новые функциональные возможности микроволновой интерферометрии при использовании управляемых метаструктур. Предложена и экспериментально исследована многополосная селективно управляемая фильтрация микроволн на базе мета-интерферометра, когда многополосность достигается не набором полуволновых резонаторов, а применением интерферометрии. В [29, 30] продемонстрировано воздействие резонансов, ферромагнитного в феррите (при управлении магнитостатическим полем) и дипольного в метаструктуре (управляемого электрическим напряжением на варакторе) на интерферограмму мета-интерферометра при расположении метаструктуры в качестве разделителя пучка. В [31, 32] исследованы закономерности, которые наблюдаются, когда метаструктура расположена в закороченном h -плече на некотором расстоянии от короткозамыкателя, образуя резонатор Фабри–Перо. Представляет интерес исследовать управление с пространственно разнесенными и независимо управляемыми от разных внешних источников метаструктурами в мета-интерферометре с целью изучения новых функциональных свойств и выяснения возможности независимого управления амплитудно-частотными характеристиками.

В данной работе впервые предложен и исследован волноводный тройниковый мета-интерферометр, который содержит две пространственно разнесенные метаструктуры $M1$ и $M2$, нагруженные варакторами с независимым управлением от разных внешних источников. Структуру $M1$ помещаем в интерферометр в качестве разделителя пучка, а $M2$ – в закороченное h -плечо на расстоянии от короткозамыкателя, в результате чего образуется резонатор Фабри–Перо. Исследуем совместное воздействие резонансных откликов метаструктур, применяя частопериодическую решетку параллельных проводов с ортогонально асимметрично расположенной медной полоской с разрывом, нагруженным варактором ($M1$), и комбинацию из двух полуволновых диполей на основе дважды разомкнутого кольца с двумя варакторами ($M2$).

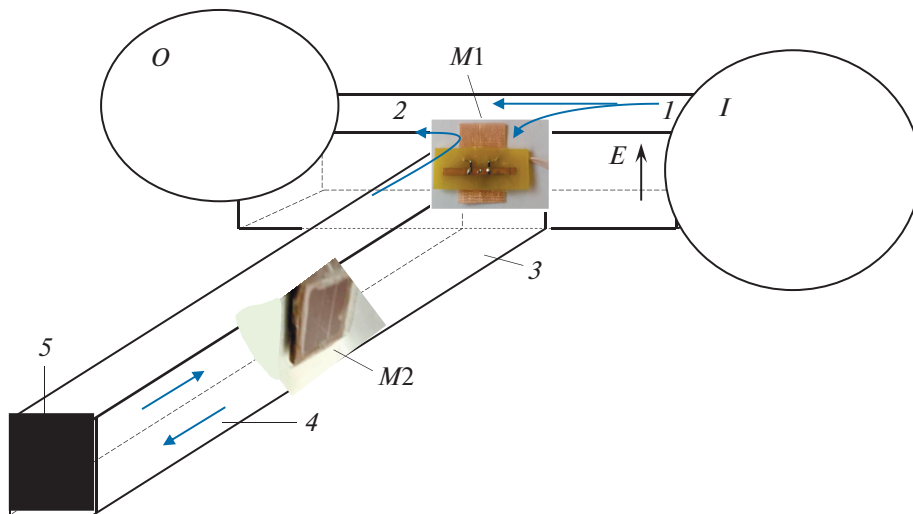


Рис. 1. Схема мета-интерферометра: I и O — вход и выход, 1 и 2 — входное и выходное плечи, $M1$ — метаструктура из линейных проводов (отражатель пучка), $M2$ — дважды разомкнутое кольцо в закороченном h -плече, 3 и 4 — полые отрезки короткозамкнутого h -плеча до передней границы $M2$ и между задней границей $M2$ и короткозамыкателем 5 .

1. МЕТА-ИНТЕРФЕРОМЕТР. МЕТАСТРУКТУРЫ

Интерферометр (рис. 1) выполнен на базе h -плоскостного волноводного тройника, который содержит управляемую метаструктуру из линейных проводов ($M1$) в качестве отражателя пучка и дважды разомкнутое кольцо ($M2$) в закороченном h -плече в качестве отражателя резонатора Фабри–Перо. Длина закороченного плеча 290 мм. Схема и фото метаструктур представлены на рис. 2а–2в.

Метаструктура $M1$ представляет собой частопериодическую решетку параллельных медных проводов в комбинации с ортогонально асимметрично расположенной медной полоской с разрывом, нагруженным варактором. Решетка изготовлена из фабричного материала на основе внедренных в диэлектрическую пленку медных проводов. Полоска расположена на текстолитовой подложке, изолированно от решетки. Длина решетки $L = 20$ мм, длина провода $l = 18$ мм, ширина 0.1 мм, расстояние между проводами 0.2 мм, длина медной полоски 30 и ширина 1.5 мм. Метаструктуру $M1$ располагаем вдоль оси входного прямоугольного волновода I (48×24 мм) в месте разветвления, напротив закороченного h -плеча.

Микроволновые свойства $M1$ в волноводе связаны с тремя резонансными эффектами [31, 33]. Один из них (I) — это дипольный резонанс в проводах решетки (при длине провода $\lambda/2$), возбуждаемый микроволновым электрическим полем E . Другой резонансный эффект (II) связан с возбуждением индукционных антипараллельных токов в пространственных U -образных LC -контурах с емкостными связями, образованными парой соседних проводов решетки и соответствующей секцией медной полоски, возбуждаемых микроволновым

магнитным полем h , направленным перпендикулярно плоскости решетки. При этом вдоль медной полоски распространяется суммарный резонансный ток за счет вкладов одинаково направленных токов от каждого из контуров, который и определяет третий резонансный отклик III в частотной зависимости коэффициента прохождения электромагнитного излучения T . Разные типы резонансов можно возбуждать раздельно в заданных диапазонах длин волн, выбирая необходимые размеры проводов и полоски. Резонанс III в полоске можно смещать, подавая напряжение обратного смещения V_{OC} на варактор, внедренный в разрыв. К выходам варактора подключены резисторы $R_L = 100$ кОм, чтобы уменьшить влияние наведенных постоянных токов и, соответственно, паразитных резонансных эффектов. Управление интерферограммой мета-интерферометра с метаструктурой $M1$ в качестве отражателя резонатора Фабри–Перо было исследовано в [31].

В данной работе, в отличие от [31], размеры структуры $M1$ выбраны так, чтобы в диапазоне 3...6 ГГц панорамного измерителя КСВН возбуждались управляемый резонанс III в медной полоске и резонансы I и II.

Метаструктура $M2$ представляет собой комбинацию из двух полуволновых диполей на основе дважды разомкнутого кольца (21×21 мм) с двумя варакторами в разрывах. Ее располагаем вдоль оси закороченного h -плеча на расстоянии $s = 110$ мм от короткозамыкателя 5 , при этом образуется резонатор Фабри–Перо.

Используем варакторы MA46H120, емкость которых меняется в пределах 1.15...0.1 пФ при изменении напряжения обратного смещения на ва-

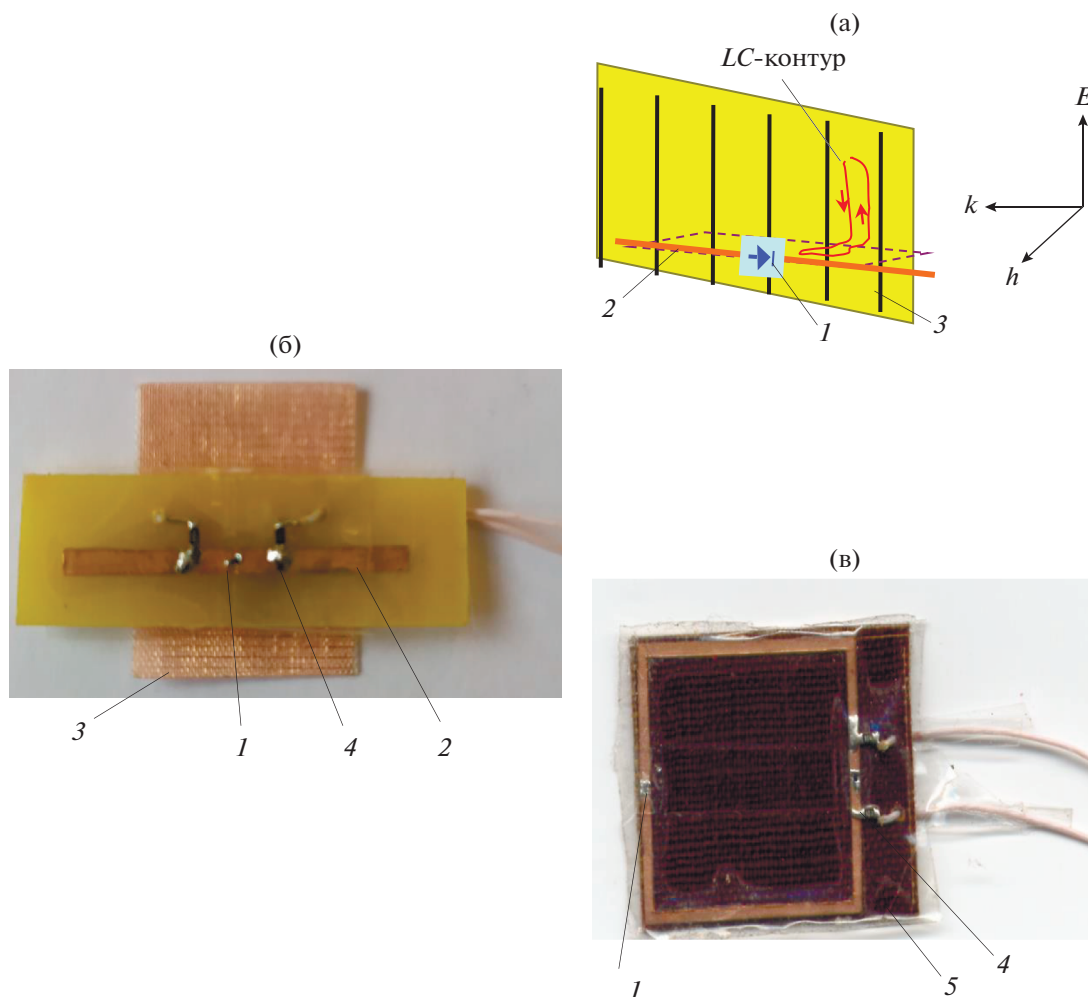


Рис. 2. Метаструктуры: а – схема метаструктуры $M1$, б – фото $M1$, в – фото $M2$ (ДК): 1 – варактор, 2 – продольная полоска с разрывом, 3 – решетка, 4 – резистор R_L , 5 – подложка.

ракторе V_{OC} от 0 до 20 В. В отсутствие метаструктуры тройник трансформируется в интерферометр и обладает свойствами многополосного фильтра. Увеличивая длину h -плеча, можно увеличить число интерференционных полос.

Измеряем частотные зависимости коэффициента прохождения T с метаструктурой в волноводе и на выходе мета-интерферометра в зависимости от напряжения обратного смещения на варакторах в диапазоне 3...6 ГГц панорамного измерителя коэффициента стоячей волны (КСВН).

2. ДИНАМИКА РЕЗОНАНСНЫХ ЭФФЕКТОВ МЕТАСТРУКТУР В ВОЛНОВОДАХ И УПРАВЛЯЕМАЯ ИНТЕРФЕРОГРАММА

Динамика резонансов с метаструктурой $M1$, которые проявляются как резонансные минимумы коэффициента прохождения $T_{мин}$, продемонстрирована на рис. 3а. Результаты получены на

основании измерений в прямоугольном волноводе частотных зависимостей коэффициента прохождения T , изменяющихся при внешнем воздействии V_{OC} . На рис. 3а видим два резонанса: на частоте 3.27 ГГц – управляемый резонанс III, возбуждаемый в полоске (смещающийся под внешним воздействием к высоким частотам), и резонанс II, возбуждаемый в решетке на частоте 4.72 ГГц, который незначительно смещается в сторону низких частот. Резонанс III плавно смещается от 3.27 до 4.38 ГГц, достигая и практически сливаясь с резонансом II при $V_{OC} = 20$ В, смещение равно 1.1 ГГц.

Динамика дипольного резонанса (ДР) в метаструктуре $M2$ при наложении V_{2OC} от 0 до 20 В продемонстрирована на измеренных в волноводе частотных зависимостях T в виде смещающегося резонансного минимума $T_{мин}$ от 3.88 до 4.98 ГГц (рис. 3б).

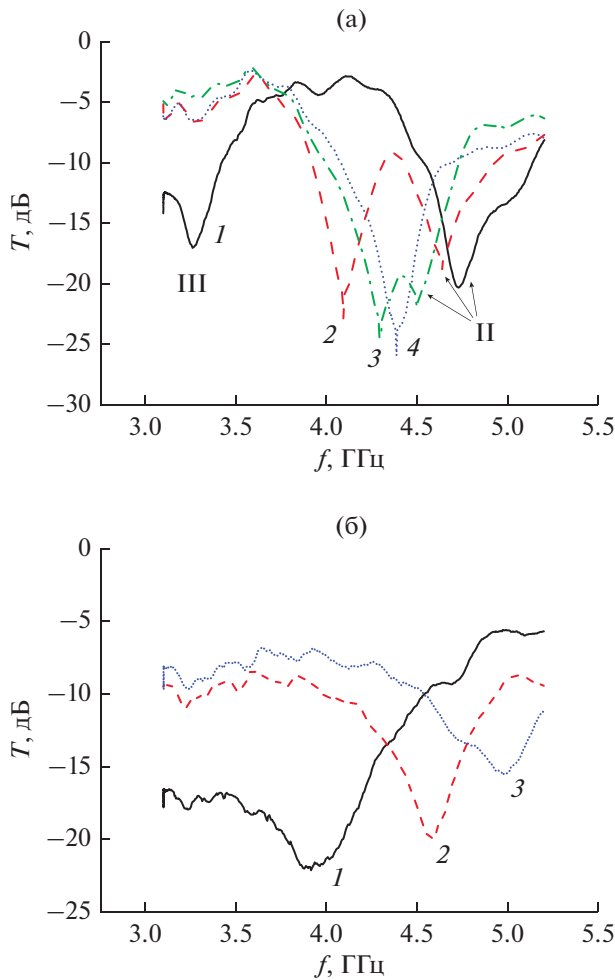


Рис. 3. Измеренные частотные зависимости прохождения T в волноводе: а – с метаструктурой $M1$ при $V_{OC} = 1$ (1), 10 (2), 15 (3), 20 В (4); б – с метаструктурой $M2$ при $V_{OC} = 0$ (1), 10 (2), 20 В (3).

Размеры и геометрия метаструктур $M1$ и $M2$ выбраны так, чтобы их динамические характеристики пересекались в заданном диапазоне длин волн.

Исследуем состояние интерферограммы ($s = 110$ мм), измеряя частотную зависимость T на выходе интерферометра при совместном воздействии V_{1OC} и V_{2OC} . Подача напряжения V_{1OC} приводит к перестройке интерферограммы в частотной области, соответствующей области возбуждения резонанса III в полоске, а подача напряжения V_{2OC} влияет на интерферограмму в частотной области, соответствующей области возбуждения ДР в дипольном кольце.

Информацию о величинах напряжений представляем в виде $(V1-V2)$, например, (0–0) означает, что $V_{1OC} = 0$ и $V_{2OC} = 0$, а (0–10) означает, что $V_{1OC} = 0$, а $V_{2OC} = 10$ В.

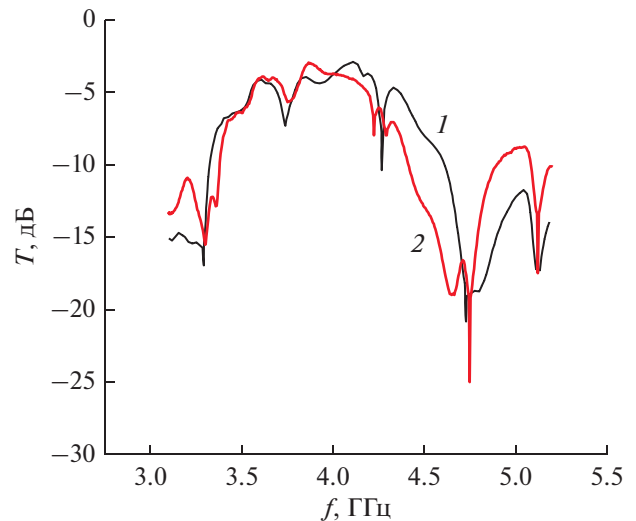


Рис. 4. Измеренные частотные зависимости прохождения T в интерферометре с метаструктурами ($M1-M2$) для ситуаций: (0–0) (кривая 1) и (0–10) (кривая 2).

На рис. 4 представлена динамика интерферограммы с изменением V_{2OC} в пределах 0...10 В для двух ситуаций: (0–0) и (0–10). В ситуации (0–0) на фоне интерференционных минимумов интерферометра наблюдаем два широких резонансных минимума прохождения: первый резонанс с $T_{мин}$ на 3.3 ГГц, обусловленный влиянием ДР и резонанса III в полоске, и второй резонанс с $T_{мин}$ на 4.78 ГГц, связанный с резонансом II в решетке. С изменением V_{2OC} в ситуации (0–10) центральная частота второго резонанса смещается в сторону низких частот (4.64 ГГц), т.е. изменение V_{2OC} , оказывающее воздействие на ДР в области 4.5...5 ГГц (см. рис. 3б), приводит к перестройке интерферограммы в этой же области.

Динамика интерферограммы с изменениями V_{1OC} продемонстрирована на рис. 5а–5г для ситуаций (5–10), (10–10), (20–0) (20–10) соответственно. В этих случаях на интерферограмме проявляются глубокие довольно широкие (по сравнению с интерференционными полосами интерферометра) смещающиеся резонансные минимумы, соответствующие возбуждению управляемого резонанса III в полоске. В ситуации (5–10) резонанс III наблюдается на 3.8 ГГц (рис. 5а), а при $V_{1OC} = 20$ В в ситуации (20–0) достигает резонанса II и сливается с ним, заполняя частотную область 4.25...4.7 ГГц между двумя интерференционными пиками полос запрета (см. рис. 5в).

При подаче напряжения $V_{2OC} = 10$ В в ситуации (20–10) происходит перестройка интерферограммы: резонанс III ($f = 4.5$ ГГц) сужается и появляется просвет между резонансным минимумом и интерференционным пиком на $f = 4.71$ ГГц (см. рис. 5г). В этом случае проявляется совместное

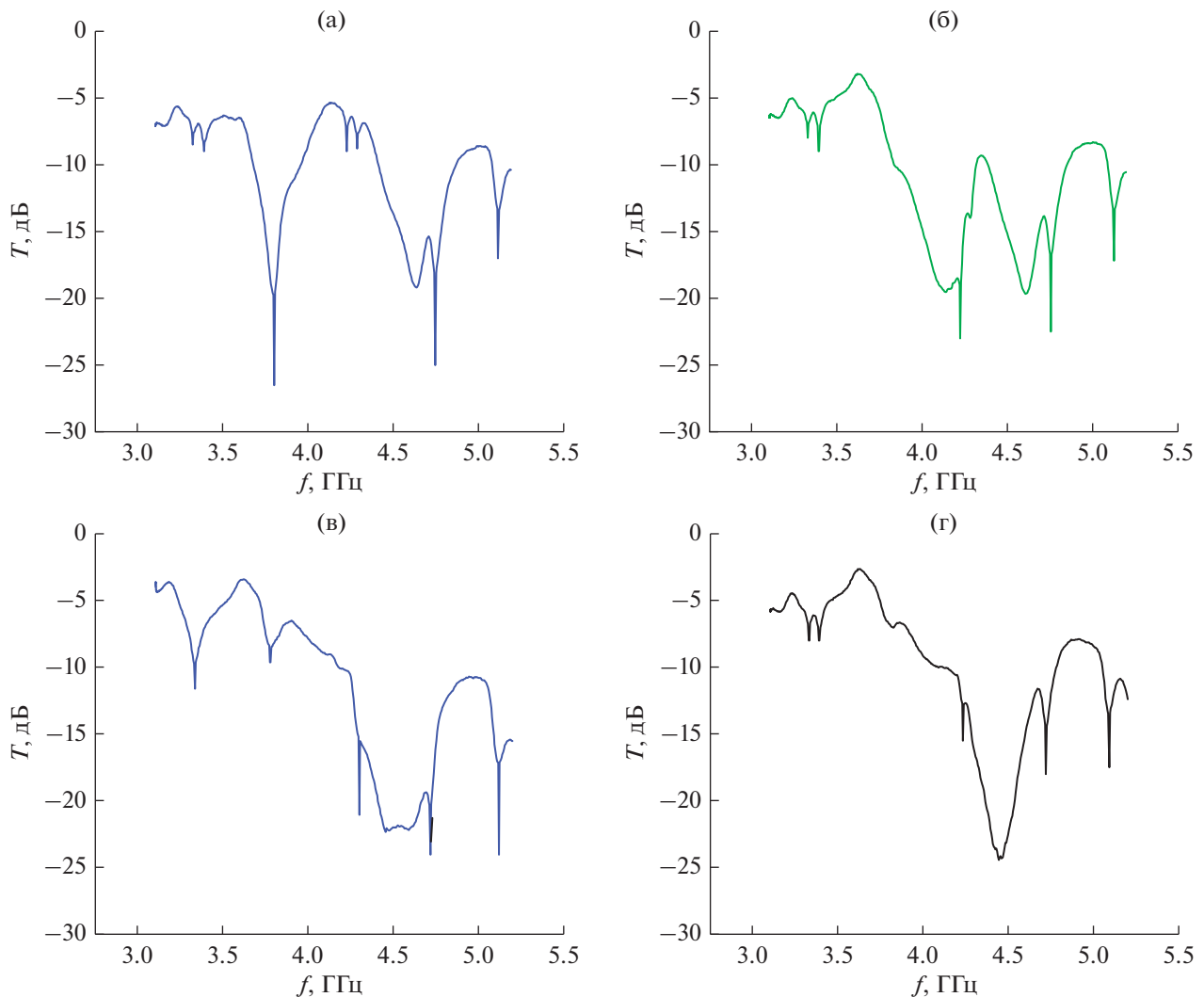


Рис. 5. Измеренные частотные зависимости прохождения T в интерферометре с метаструктурами ($M1-M2$) в ситуациях ($V1_{OC}-V2_{OC}$): а – (5–10); б – (10–10); в – (20–0); г – (20–10).

воздействие на интерферограмму резонансных эффектов, возбуждаемых в метаструктурах $M1$ и $M2$ и управляемых напряжениями $V1_{OC}$ и $V2_{OC}$ соответственно.

Для пояснения можно провести теоретический анализ с элементами $S_{ml} = s_{ml} \exp(i\varphi_{ml})$, ин-

дексы m и l относятся к соответствующим участкам интерферометра [29–32]. Интерферограмма представляет собой частотную зависимость коэффициента передачи со входа I на выход O излучения по мощности $T(\omega) = |S_{OI}|^2$. Здесь

$$S_{OI} = \{S_{21} + S_{23}r^{(FP)}S_{31} \exp(-2ik_3L_3)\} / [1 - r^{(FP)}S_{33} \exp(-2ik_3L_3)] \exp(-i(k_1L_1 + k_2L_2)) \quad (1)$$

– амплитудный коэффициент передачи сигнала со входа на выход,

$$r^{(FP)} = r_{33}^{(M)} + t_{43}^{(M)}r_{534}^{(M)} \times \exp(-2ik_4L_4) / [1 - r_{44}^{(M)}r_5 \exp(-2ik_4L_4)] \quad (2)$$

– амплитудный коэффициент отражения резонатора Фабри–Перо. Введены обозначения: $k_m =$

$= 2\pi n_m/\lambda$ и n_m – константа распространения и коэффициент замедления для m -го участка метainterферометра, L_m – путь, пройденный в нем излучением.

В выражении (1) учтено влияние одной метаструктуры как разделителя пучка коэффициентами S_{21} , S_{23} , S_{31} , S_{33} , а другой – в качестве отражателя

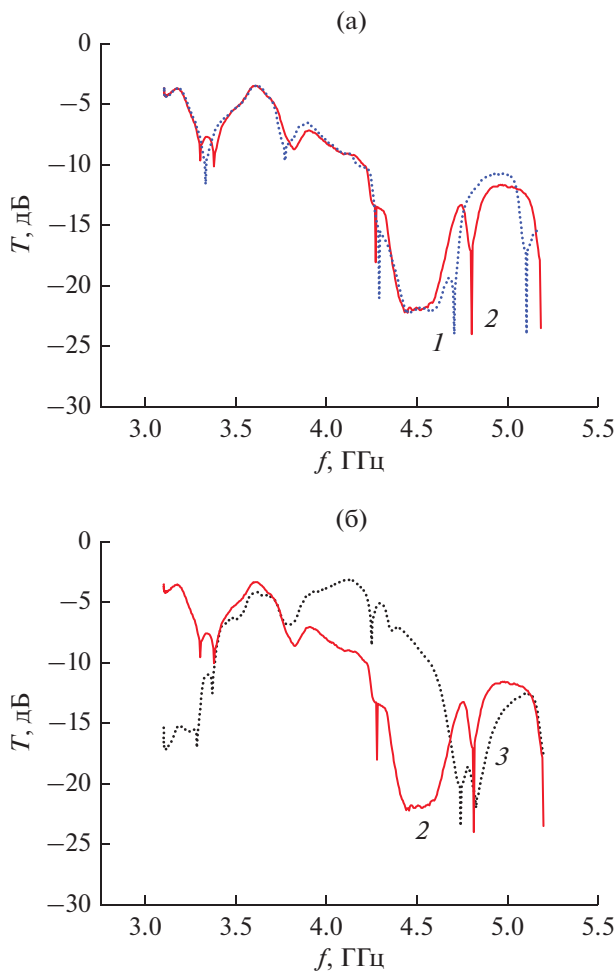


Рис. 6. Динамика интерферограммы при изменении условий внешнего воздействия на метаструктуры ($M1-M2$): а – переключение из ситуации (20–0) (кривая 1) в (20–20) (кривая 2); б – переключение из ситуации (20–20) (кривая 2) в (0–20) (кривая 3).

резонатора Фабри–Перо – коэффициентом $\mu^{(FP)}$. Вид интерферограммы определяют независимые механизмы совместного воздействия пространственно разнесенных метаструктур в зависимости от частотной дисперсии модулей и фаз элементов S -матрицы и свойств резонатора Фабри–Перо, что и наблюдается экспериментально.

Проведя сравнительный анализ измеренных интерферограмм при внешнем воздействии на резонансные свойства метаструктур $M1$ и $M2$ напряжений V_{OC1} и V_{OC2} , можно увидеть возможность независимого управления шириной и частотой интерференционного пика. В подтверждение сравним измеренные интерферограммы: на рис. 6а в ситуациях (20–0) и (20–20) и на рис. 6б в ситуациях (0–20) и (20–20). Так, из рис. 6а видно, что наблюдаемый на частоте 4.71 ГГц интерференционный пик полосы запрета в ситуации (20–0) смещается на 0.1 ГГц к частоте 4.81 ГГц в ситуации

(20–20). При переключении из (20–20) в (0–20) этот пик расширяется (см. рис. 6б). При этом на уровне –15 дБ ширина полосы запрета расширяется в пять раз, с 0.05 до 0.26 ГГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, впервые предложен и исследован волноводный тройниковый мета-интерферометр в диапазоне 3...6 ГГц, который содержит две пространственно разнесенные метаструктуры, нагруженные варакторами с независимым управлением от разных внешних источников. Одна из метаструктур $M1$ помещена в качестве разделителя пучка, а другая $M2$ – в закороченное h -плечо на расстоянии от короткозамыкателя, тем самым образуется резонатор Фабри–Перо. Исследовано совместное воздействие резонансных откликов метаструктур на интерферограмму.

Метаструктура $M1$ представляет собой частотно-периодическую решетку параллельных медных проводов в комбинации с ортогонально асимметрично расположенной медной полоской с разрывом, нагруженным варактором, и является много-резонансной с управляемым одним резонансом, возбуждаемым в полоске. Метаструктура $M2$ представляет собой дважды разомкнутое кольцо с двумя варакторами в разрывах.

Показано, что разные свойства метаструктур $M1$ и $M2$ и, что не менее важно, разное их расположение по-разному влияют на интерферограмму. Широкий резонанс $M1$ оказывает сильное влияние, существенно меняя спектр интерферограммы по сравнению с пустым интерферометром.

Показано, что подачей напряжений V_{OC1} и V_{OC2} на варакторы можно совместить воздействие в одной и той же частотной области интерферограммы динамических характеристик метаструктур, связанных с геометрией и взаиморасположением. В этом случае появляется возможность независимо управлять амплитудно-частотными характеристиками (шириной и частотой полосы запрета), изменяя сочетания напряжений ($V_{OC1}-V_{OC2}$). Так, в ситуации (20–0) наблюдается воздействие резонансов $M1$ и $M2$ в одной и той же частотной области (вблизи 4.8 ГГц). При переключении ситуации с (20–0) на (20–20) достигается смещение интерференционного пика полосы запрета на 0.1 ГГц с 4.71 до 4.81 ГГц. Переключение с (20–20) на (0–20) приводит к увеличению ширины интерференционного пика (4.81 ГГц) в пять раз.

Таким образом, показана возможность независимого управления частотой и шириной индивидуальной полосы запрета интерферограммы в результате воздействия резонансных эффектов $M1$ и $M2$ при независимом электрическом управлении от разных внешних источников подачей одновременно на варакторы определенного соче-

тания напряжений V_{1OC} и V_{2OC} (при некотором изменении характеристик соседних интерференционных полос).

Полученные результаты могут быть полезны при разработке методов независимого управления в многополосных фильтрах, которые востребованы в многоканальных многофункциональных телекоммуникационных системах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lin Y.C., Hong T.S., Huang H.H. // IEEE Trans. 2014. V. MTT-62. № 12. Pt. 2. P. 3351.
2. Cameron R., Kudsia C., Mansour R. Microwave Filters for Communication Systems: Fundamentals, Design, and Applications (John Wiley & Sons), 2018.
3. Pelliccia L., Cacciamani F., Farinelli P., Sorrentino R. // IEEE Trans. 2015. V. MTT-63. № 10. P. 3381.
4. Shin H., Yoo J. // Int. J. Precision Engineering Manufacturing. 2017. V. 18. P. 845.
5. Беляев Б.А., Сержантов А.М., Тюрнев В.В. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. № 18. С. 31.
6. Ge J., Fok M.P. // Sci. Rep. 2015. V. 5. P. 15882.
7. Choudhary A., Aryantar I., Shahnia S. et al. // Opt. Lett. 2016. V. 41. № 3. P. 436.
8. Liu Q., Ge J., Fok M.P. // Opt. Lett. 2018. V. 43. № 22. P. 5685.
9. Chaudhary Girdhari, Jeong Yongchae, Lim Jongsik // IEEE Trans. 2013. V. MTT-61. № 1. P. 107.
10. Xiu Yin Zhang, Li Gao, Yunfei Cao et al. // Progress in Electromagnetics Research C. 2013. V. 42. P. 55.
11. Mahmoud A., Soulimane S., Plana R. et al. // Microwave and Optical Technology Lett. 2009. V. 51. № 5. P. 1336.
12. Entesari K., Rebeiz G.M. // IEEE Trans. 2005. V. MTT-53. № 3. P. 1103.
13. Brown A.R., Rebeiz G.M. // IEEE Trans. 2000. V. MTT-48. № 7. P. 1157.
14. Jose K.A., Varadan V.K., Varadan V.V. // Microwave and Optical Technology Lett. 1999. V. 20. № 3. P. 166.
15. Srinivasan G., Tatarenko A.S., Bichurin M.I. // Electron. Lett. 2005. V. 41. № 10. P. 596.
16. Вендик О.Г. // ФТТ. 2009. Т. 51. № 7. С. 1441.
17. Hieng-Tiong Su, Suherman P.M., Jackson, T.J. et al. // IEEE Trans. 2008. MTT-56. № 11(1). P. 2468.
18. Kapilevich B.A. // Microwave J. 2007. V. 50. № 4. P. 106.
19. Yamamoto Y., Mikumo S.A. // IEICE Electronics Express. 2005. V. 2. № 3. P. 86.
20. Alphones A. // Microwave and Optical Technology Lett. 1998. V. 18. № 1. P. 41.
21. Lee S., Kuga Y., Mullen R.A. // Microwave and Optical Technology Lett. 2000. V. 27. № 1. P. 9.
22. Кулыгин М.Л., Денисов Г.Г., Родин Ю.В. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. № 8. С. 49.
23. Kraftmakher G.A., Butylkin V.S., Kazantsev Yu.N. et al. // Appl. Phys. A. 2017. V. 123. № 1. P. 56. <https://doi.org/10.1007/s00339-016-0687-2>
24. Malyshev S.A., Galwas B.A., Piotrowski J. et al. // IEEE Microwave and Wireless Components Lett. 2002. V. 12. № 6. P. 201.
25. Malyshev S.A., Chizh A.L. // IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics. 2004. V. 10. № 4. P. 679.
26. Власенко В.А., Беляев С.Н., Ефимов А.Г. и др. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. № 15. С. 105.
27. Hieng-Tiong Su, Suherman P.M., Jackson T.J. et al. // IEEE Trans. 2008. V. MTT-56. № 11(1). P. 2468.
28. Butylkin V., Kazantsev Yu., Kraftmakher G., Mal'tsev V. // Appl. Phys. A. 2017. V. 123. № 1. P. 57. <https://doi.org/10.1007/s00339-016-0705-4>
29. Крафтмахер Г.А., Бутылкин В.С., Казанцев Ю.Н., Мальцев В.П. // Письма в ЖЭТФ. 2019. Т. 109. № 4. С. 224.
30. Крафтмахер Г.А., Бутылкин В.С., Казанцев Ю.Н., Мальцев В.П. // РЭ. 2019. Т. 64. № 11. С. 1070.
31. Крафтмахер Г.А., Бутылкин В.С., Казанцев Ю.Н. и др. // РЭ. 2021. Т. 66. № 1. С. 3.
32. Крафтмахер Г.А., Бутылкин В.С., Казанцев Ю.Н. и др. // РЭ. 2021. Т. 66. № 2. С. 105.
33. Kraftmakher G.A., Butylkin V.S., Kazantsev Yu.N., Mal'tsev V.P. // Electron. Lett. 2017. V. 53. № 18. P. 1264.