

## ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 537.874;621.396

### НОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ МИКРОВОЛННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТАСТРУКТУРЫ В КАЧЕСТВЕ УПРАВЛЯЕМОГО РАЗДЕЛИТЕЛЯ ПУЧКА

© 2019 г. Г. А. Крафтмахер<sup>1</sup> \*, В. С. Бутылкин<sup>1</sup>, Ю. Н. Казанцев<sup>1</sup>, В. П. Мальцев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
пл. Введенского, 1, Фрязино, Московской обл., 141190 Российская Федерация

\*E-mail: gkraft@ms.ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 11.03.2019 г.

После доработки 11.03.2019 г.

Принята к публикации 21.03.2019 г.

Экспериментально показано, что микроволновый метаинтерферометр с метаструктурой (метаповерхностью или метаатомом) в качестве управляемого разделителя пучка обладает уникальной возможностью специфического селективного магнитного и электрического управления многополосной фильтрацией электромагнитных волн. Приведены результаты исследований интерферограммы модифицированного метаинтерферометра на основе волноводного тройника, в котором метаструктура содержит ферритовую пластину или структуру из проводящих резонансных элементов, совместимых с элементами управления, или их комбинацию с ферритом. Продемонстрирована зависимость формы, ширины, интенсивности и частоты интерференционной полосы от величины и знака магнитостатического поля, взаимоположения ферромагнитного резонанса и полосы, а также от электрического напряжения на варакторах, внедренных в разрывы элементов. Получены экспериментальные результаты, открывающие пути для новых методов и подходов в разработке переключаемых и управляемых многополосных микроволновых фильтров, востребованных в многофункциональных многоканальных телекоммуникационных системах.

DOI: 10.1134/S0033849419110135

#### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время перестраиваемые многополосные фильтры электромагнитных волн, востребованные в многоканальных телекоммуникационных системах, вызывают особый интерес [1]. Базой таких фильтров служит каскад разнодиапазонных резонаторов в комбинации с линией передачи. Для перестройки используются методы, апробированные в однополосных фильтрах. Они основаны на электромеханических [2], магнитных с использованием ферритов [3, 4], а также электрических эффектах с использованием полупроводниковых варакторов [5] и сегнетоэлектрических варикондов [6]. Однако управление в случае многополосной (трехполосной и более) фильтрации весьма проблематично [7]. В то же время на микроволнах известны управляемые магнитоэлектрические материалы [8], метаструктуры, метаповерхности и метаатомы [9], содержащие разомкнутые проводящие резонансные элементы, совместимые с элементами управления.

В настоящее время метаматериалы охватывают довольно широкий круг искусственных сред. В частности, перспективы фотонных кристаллов

обсуждаются в работах [10, 11], неоднородных периодических сред (электромагнитных кристаллов) – в [12]. Важную роль в развитии направления “Метаматериалы” в свое время сыграли киральные, биизотропные и бианизотропные среды [13] в связи с возможностью практического применения (радиопоглотители, “левые” среды [14, 15] предсказанные задолго ранее в [16]). Обзору теоретических исследований киральных сред посвящена работа [17]. Теоретические работы сотрудников отдела ИРЭ РАН, руководимого Б.З. Каценеленбаумом, внесли существенный вклад в развитие этого направления. Отметим разработку новых киральных элементов [18], теорию кольцевых токов в киральных элементах [19], исследования поляризационно-селективных резонансных явлений в искусственных средах с пространственной дисперсией и структурах, обладающих киральными свойствами в микроволновом диапазоне волн [20, 21], электродинамический анализ эффекта фокусировки с линзой Веселаго–Пендри [22–24], исследования эффективных параметров и распространения электромагнитных волн в волноводящих структурах с киральными элементами [25, 26].

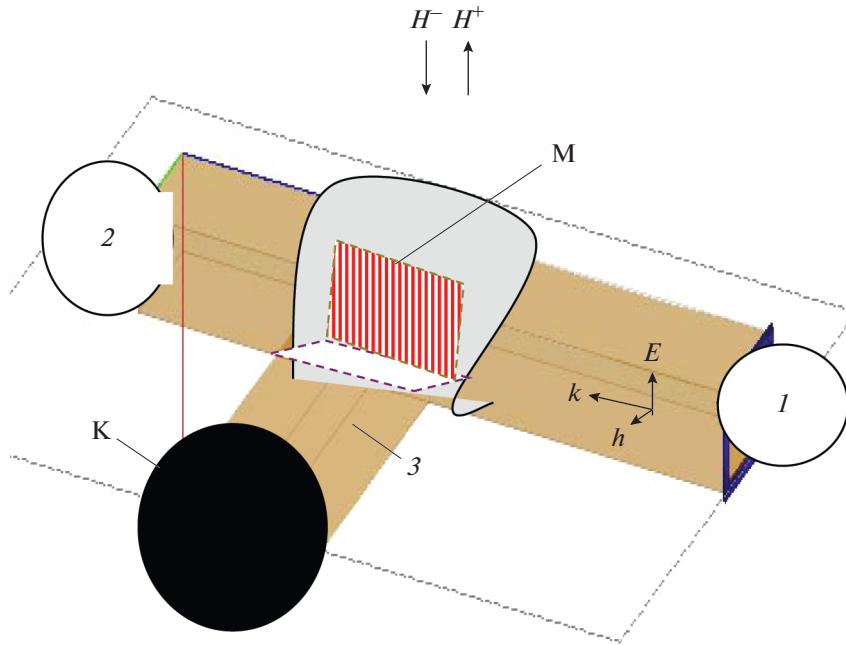


Рис. 1. Схема метаинтерферометра: М – метаструктура, К – короткозамыкатель, 1 – входной, 2 – выходной, 3 – закороченный волновод.

Метаматериалы нашли применение в управляемых микроволновых фильтрах. Первый перестраиваемый однополосный фильтр с метаматериалом в виде разомкнутого кольца с варактором был выполнен в [27], затем этот подход был развит в [28–31].

Наряду с резонаторами разрабатываются фильтры, использующие интерференцию двух сигналов: микроволновые фильтры и оптические на базе интерферометра Маха–Цендера с управляемым электрооптическим разделителем пучка [32].

Цель данной работы – осуществить управляемую многополосную фильтрацию с помощью интерферометра на основе волноводного тройника, (впервые названного нами метаинтерферометр [33]) и развить подход, предложенный в [34].

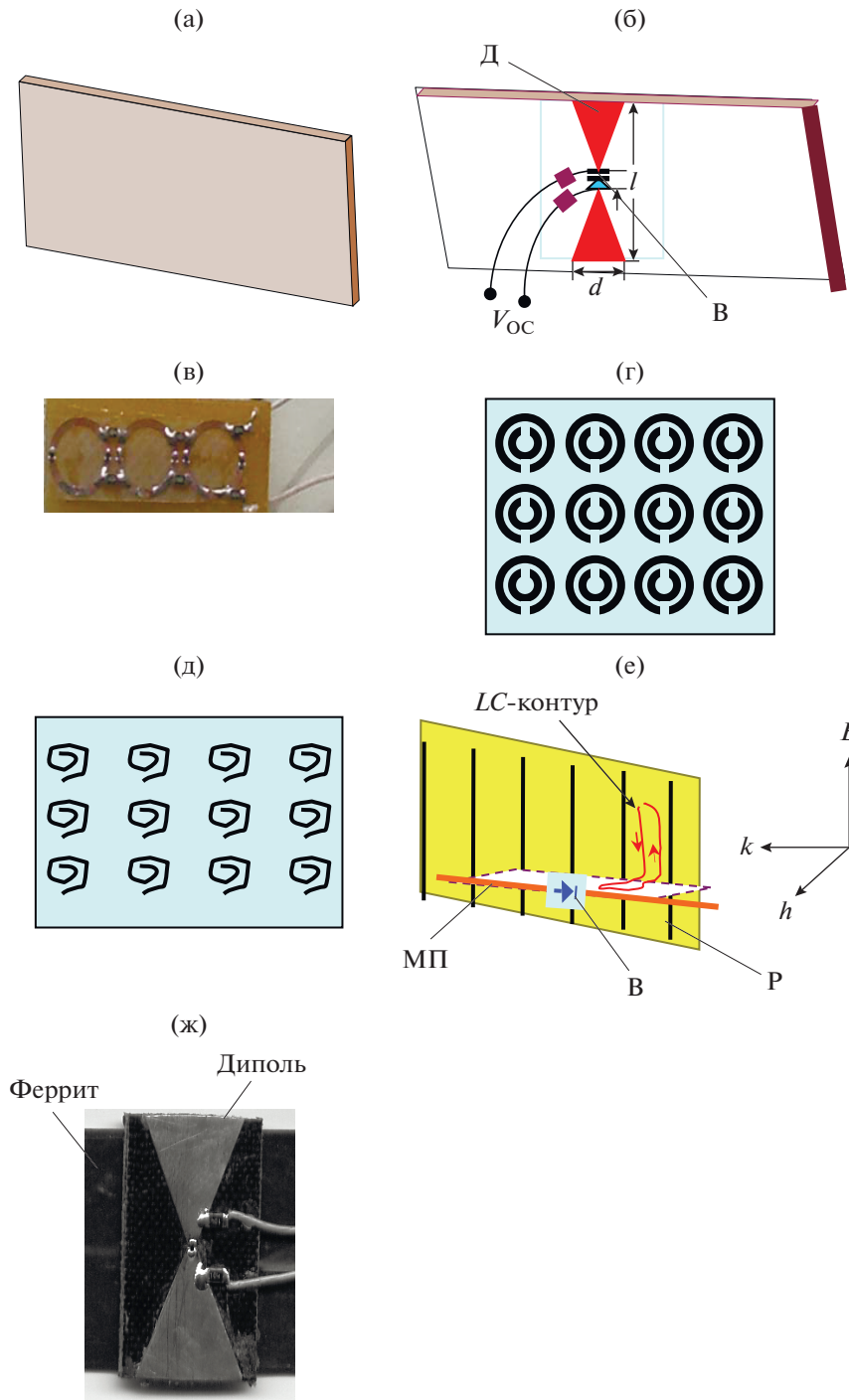
### 1. МЕТА-ИНТЕРФЕРОМЕТР, S-МАТРИЦА И ИНТЕРФЕРОГРАММА

Мета-интерферометр (рис. 1) представляет собой волноводный тройник *h*-типа с закороченным боковым плечом, содержащий в качестве разделителя пучка метаструктуру М, мета-поверхность или мета-атом с медными резонансными элементами, совместимыми с элементами управления. На рис. 2а–2ж представлены разные структуры для возможных применений в качестве разделителя пучка. В данной работе приводим некоторые результаты исследований метаструктур с ферритовой пластиной (см. рис. 2а), с ферритовой пластиной в комбинации с диполем “бабочка” с разрывом, в который впаян варактор (см.

рис. 2ж), с решеткой из резонансных проводов в комбинации с одиночным продольным проводом с разрывом (см. рис. 2е).

Для описания метаструктуры введем S-матрицу с элементами  $S_{mn} = s_{mn} \exp(i\varphi_{mn})$ . Учтем, что метаинтерферометр, по существу, является модификацией интерферометра Майкельсона в сочетании с интерферометром Фабри–Перо (переотражения между короткозамыкателем К и метаструктурой М). Коэффициент отражения от короткозамыкателя имеет вид  $R = r \exp(i\varphi_R)$ , далее –  $\varphi_R = \pi$ .

Из волновода 1 (см. рис. 1) на детектор в конце волновода 2 приходит сигнал с нормированной амплитудой  $S_{21} \exp(-ik_2 L_2)$ . Здесь и далее  $L_m$  – путь, пройденный излучением в волноводе *m*-го плеча тройника,  $k_m = k'_m - ik''_m$  – волновое число этого волновода. Отражением от детектора пренебрегаем. В волновод 3 поступает нормированный сигнал  $S_{31}$ . До короткозамыкателя К доходит  $S_{31} \exp(-ik_3 L_3)$ , после отражения на метаструктуру М приходит сигнал  $RS_{31} \exp(-2ik_3 L_3)$ ; в выходной волновод отсюда поступает сигнал  $S_{23}RS_{31} \exp(-2ik_3 L_3)$ , к детектору приходит  $S_{23}RS_{31} \exp(-i(2k_3 L_3 + k_2 L_2))$ . Сигнал  $S_{33}RS_{31} \times \exp(-2ik_3 L_3)$ , рассеянный структурой М обратно в волновод 2, прошедший до короткозамыкателя К, отразившийся от него и вернувшийся к структуре М, равен  $[S_{33}RS_{31} \exp(-2ik_3 L_3)] \times R \exp(-2ik_3 L_3)$ . После рассеяния структурой М



**Рис. 2.** Метаструктуры, предлагаемые в качестве разделителя пучка: а – ферритовая пластина; б – нагруженный варактором диполь “бабочка” (Д – диполь, В – варактор); в – ряд нагруженных варакторами дважды разомкнутых колец; г – решетка планарных двойных разомкнутых колец; д – решетка планарных спиралей в полтора оборота; е – решетка Р линейных резонансных проводов в комбинации с ортогонально и асимметрично расположенной медной полоской МП (В – варактор); ж – структура “феррит–диполь”.

и прохождения по волноводу 2 на детекторе добавляется величина

$$S_{23} [S_{33} R S_{31} \exp(-2ik_3 L_3)] R \exp(-i(2k_3 L_3 + k_2 L_2)).$$

Сигналы, получающиеся в результате повторных переотражений, в закороченном волновод

составляют геометрическую прогрессию со знаменателем  $S_{33} R \exp(-2ik_3 L_3)$ . Просуммировав сигналы, поступившие на детектор, получаем нормированную амплитуду выходного сигнала (коэффициент передачи по амплитуде)

$$t = \left[ S_{21} + \frac{S_{23}RS_{31} \exp(-2ik_3L_3)}{1 - RS_{33} \exp(-2ik_3L_3)} \right] \exp(-ik_2L_2). \quad (1)$$

Интерферограмма метаинтерферометра представляет собой зависимость от частоты коэффициента передачи по мощности

$$T = |t|^2 = \frac{s_{21}^2 + 2rs_{21} [s_{21}s_{33} \cos \Phi - s_{23}s_{31} \cos(\Phi + \tilde{\varphi})] + r^2 [(s_{21}s_{33})^2 - 2s_{21}s_{23}s_{31}s_{33} \cos \tilde{\varphi} + (s_{23}s_{31})^2]}{1 + 2rs_{33} \cos \Phi + (rs_{33})^2}, \quad (2)$$

где  $\Phi = 2k_3'L_3 - \varphi_{33}$ ,  $\tilde{\varphi} = \varphi_{33} + \varphi_{21} - \varphi_{31} - \varphi_{23}$ . Ослаблением в волноводах пренебрегаем.

Очевидно из (2), что вид интерферограммы зависит от частотной дисперсии модулей и фаз элементов **S**-матрицы и от воздействия на них внешних факторов, таких как в исследованных метаструктурах электрическое напряжение обратного смещения на варакторах  $V_{OC}$  или магнитостатическое поле  $H$ , приложенное к ферриту. Следуя [34], проиллюстрируем это на ситуации, когда в закороченном плече отражение от метаструктуры мало ( $s_{33} \ll 1$ ). В этом случае коэффициент передачи по мощности равен

$$T \approx (s_{21} - s_{23}s_{31}r)^2 + 4s_{21}s_{23}s_{31}r \sin^2(k_3'L_3 + \delta\varphi/2), \quad (3)$$

где  $\delta\varphi = \varphi_{21} - \varphi_{31} - \varphi_{23}$ .

Из (3) следует, что при неизменных абсолютных величинах элементов **S**-матрицы у коэффициента передачи могут наблюдаться минимумы вблизи частот, удовлетворяющих условию

$$\omega n_3'(\omega)L_3/c + \delta\varphi(\omega, V_{OC}, H)/2 = \pi p, \quad (4)$$

и максимумы вблизи частот, определяемых из

$$\omega n_3'(\omega)L_3/c + \delta\varphi(\omega, V_{OC}, H)/2 = \pi(p + 1/2) \quad (5)$$

( $p$  – целое число;  $n_3'$  – показатель замедления волновода  $\mathcal{Z}$ ). При этом максимальные и минимальные значения  $T$  определяются по формуле

$$T_{\max/\min} = [s_{21} \pm s_{23}s_{31}r]^2. \quad (6)$$

Отметим возможность смещения минимумов и максимумов, а также изменение контрастности интерферограммы, определяемой отношением  $T_{\max}/T_{\min}$ .

Нами использовался варактор МА46Н120 (МАСОМ), впаиваемый в разрывы элементов. При подаче напряжения обратного смещения  $V_{OC}$  от 0 до 10 В емкость варактора менялась от 1 до 0.15 пФ и резонансная частота смещалась к более высоким частотам. Размеры проводящих элементов выбирали так, чтобы резонансный отклик коэффициента прохождения  $T$  наблюдался в диапазоне 3–6 ГГц панорамного измерителя коэффициента стоячей волны напряжения (КСВН).

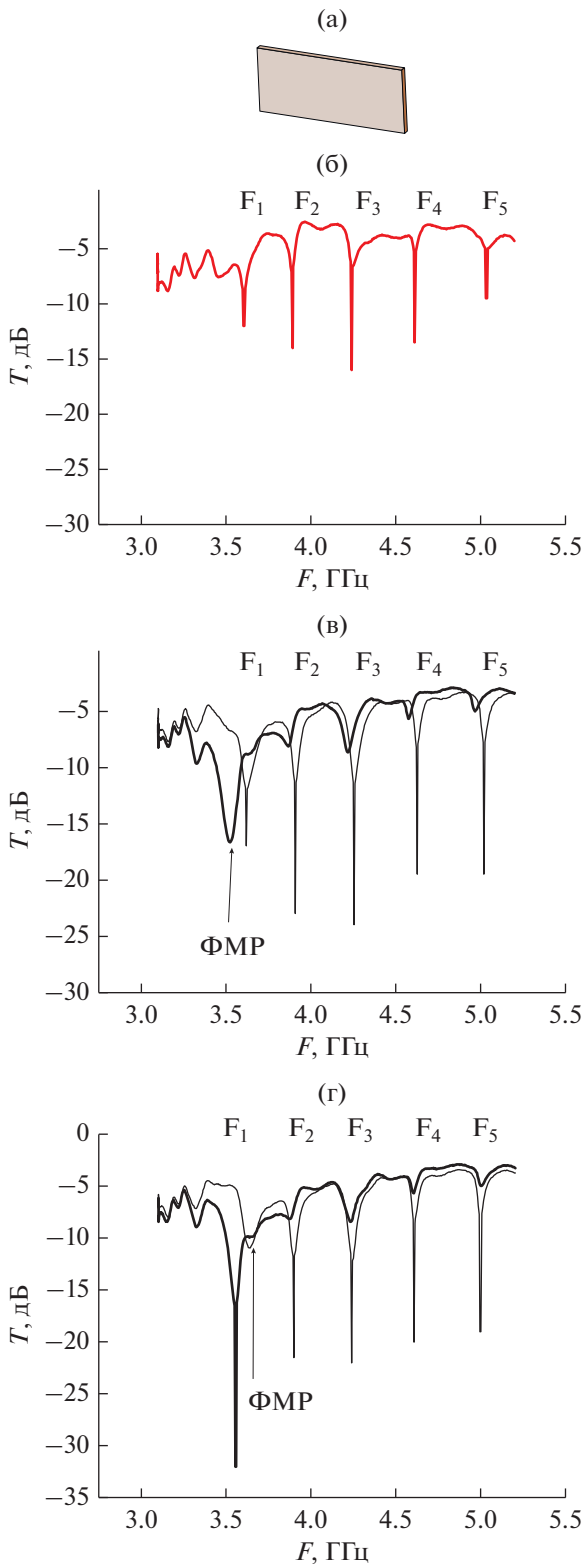
Длина закороченного плеча 250 мм. Метаструктуру располагали вдоль оси входного прямоугольного волновода  $I$  ( $48 \times 24$  мм) в месте разветвления напротив закороченного  $h$ -плеча. В этом случае интерферометр приобретает новые функциональные возможности, связанные с резонансными свойствами разделителя пучка, а также с суперпозицией прошедших, отраженных и переотраженных волн. При этом наблюдалось нарушение периодичности интерференционных полос, изменение вида, ширины, глубины, частоты в зависимости от свойств метаструктуры (ширины, интенсивности и частоты резонанса).

Состояние интерферограммы в случае магнитного управления исследовали, измеряя частотную зависимость  $T$  при разных величинах поперечного магнитостатического поля  $H$  и противоположных направлениях ( $H^+$  и  $H^-$ ). В случае электрического управления измеряли динамику  $T$  при электрическом воздействии, изменяя напряжение  $V_{OC}$ . В случае комбинации феррита и диполя исследовали состояние интерферограммы при магнитном и электрическом воздействиях одновременно, меняя напряжение  $V_{OC}$  в присутствии  $H^+$  и  $H^-$ . Частота полосы определялась частотой минимального прохождения  $T_{\min}$ , глубина – величиной  $T_{\min}$ , дБ, ширина – разностью частот в соответствующей полосе на уровне  $T = -15$  дБ.

## 2. УПРАВЛЯЕМАЯ ИНТЕРФЕРОГРАММА С МЕТАСТРУКТУРОЙ В КАЧЕСТВЕ РАЗДЕЛИТЕЛЯ ПУЧКА

### 2.1. Ферритовая пластина

На рис. 3б, 3в, 3г приведены результаты измерений  $T$  в метаинтерферометре с ферритовой пластиной ( $21 \times 14 \times 2$  мм) при разных величинах  $H^+$  и  $H^-$ . При  $H = 0$  наблюдалась интерференционная зависимость  $T$  от частоты с узкими полосами запрета  $F_1 F_2 F_3 F_4 F_5$  ( $F_i, i$  – номер полосы) и широкими полосами прозрачности ( $P_i$ ). С наложением  $H$  и возбуждением ферромагнитного резонанса (ФМР) в ферритовой пластине в спектре  $T$  появляется резонансный минимум, связанный с ФМР. При этом зависимость  $T(H^-)$ , жирная кривая, существенно отличается от  $T(H^+)$ , светлая кривая (см. рис. 3в), что может свидетельство-



**Рис. 3.** Фото структуры (а) и измеренные частотные зависимости коэффициента прохождения  $T$  в метаинтерферометре с ферритовой пластиной:  $H = 0$  (б), 740 (в) и 780 Э (г).

вать о проявлении невязимности прохождения  $T$  как в области ФМР, так и в области полос  $F_i$ . Для анализа воспользуемся параметром невязимности  $\delta = T(H^-) - T(H^+)$ , определяемом как разность коэффициентов прохождения  $T$  при противоположных направлениях поля  $H$ .

Рассмотрим приведенные на рис. 3в и 3г результаты, для чего введем обозначения:  $H_{1н}^-$  и  $H_{1в}^-$  — поле, при котором ФМР подошел к полосе  $F$  со стороны низких или высоких частот соответственно,  $F_i^{н}$  и  $F_i^{в}$  — исследуемая интерференционная полоса в условиях, когда ФМР возбуждается вблизи полосы  $F_i$  со стороны низких или высоких частот соответственно (верхние индексы относятся к приложенному магнитному полю, цифры означают номер полосы, вблизи которой возбуждается ФМР, нижние индексы соответствуют номеру исследуемой интерференционной полосы).

На рис. 3в приведены результаты измерений при  $H_{1н}^- = 740$  Э, когда ФМР возбуждается на частоте  $f = 3.52$  ГГц, вблизи полосы  $F_1$  (3.619 ГГц) со стороны низких частот. В поле  $H_{1н}^-$  прохождение  $T$  в полосе  $F_1$  (−8.6 дБ) существенно больше, чем в поле  $H_{1н}^+$  (−17 дБ). В этом случае параметр невязимности  $\delta$  ФМР = −10 дБ, а параметры невязимности  $\delta F_1^{н} = +8$ ,  $\delta F_2^{н} = +15$ ,  $\delta F_3^{н} = +14.5$ ,  $\delta F_4^{н} = +14$ ,  $\delta F_5^{н} = +15$  дБ. На рис. 3г видно, что при  $H_{1в}^- = 780$  Э с возбуждением ФМР на 3.64 ГГц вблизи  $F_1$ , но со стороны высоких частот, наблюдается уменьшение  $T$  практически до полного запрета в поле  $H_{1в}^-$  (−32 дБ). При изменении знака  $H$  происходит скачок  $T$  до уровня полос прозрачности в поле  $H_{1в}^+$ . В этом случае наблюдается смена знака и увеличение невязимности  $F_1$  ( $\delta F_1^{в} = -27$  дБ) при небольшом сдвиге частоты, а также смена знака и уменьшение невязимности ФМР ( $\delta \text{ФМР} = +1.1$  дБ). Невязимность же остальных полос меняется незначительно:  $\delta F_2^{в} = +12.5$ ,  $\delta F_3^{в} = +12.5$ ,  $\delta F_4^{в} = +14$ ,  $\delta F_5^{в} = +14$  дБ. Аналогичные эффекты наблюдались при возбуждении ФМР вблизи  $F_2, F_3, F_4, F_5$ . Например, когда ФМР возбуждался при  $H_{2н}^- = 830$  Э (ниже частоты  $F_2$ ), невязимность полос составляла  $\delta F_1^{2н} = -5$ ,  $\delta F_2^{2н} = +18$ ,  $\delta F_3^{2н} = +16$ ,  $\delta F_4^{2н} = +16$ ,  $\delta F_5^{2н} = +14$  дБ, а если выше  $F_2$  ( $H_{2в}^- = 880$  Э), то происходила смена знака и увеличение невязимности прохождения в полосе  $F_2$ . При этом относительно  $H_{2в}^- = 830$  Э невязимность других полос менялась незначительно. Параметры невязимности прохождения составляли  $\delta F_1^{2в} = -9$ ,  $\delta F_2^{2в} = -27$ ,  $\delta F_3^{2в} = +14$ ,  $\delta F_4^{2в} = +17$ ,  $\delta F_5^{2в} = +16$  дБ.

Таким образом, при возбуждении ФМР вблизи полосы запрета невзаимность увеличивается. Отрицательный знак  $\delta$  наблюдается для полос  $F_i$  при возбуждении ФМР выше их частоты (в поле  $H_B$ ), положительный знак  $\delta$  – при возбуждении ФМР ниже частоты  $F_i$  (в поле  $H_H$ ). При этом ФМР может оказывать влияние на каждую полосу поочередно при сближении с соответствующей полосой по мере продвижения к высоким частотам при увеличении поля. При небольшом изменении  $H$  с переходом ФМР через частоту полосы  $F_i$  в поле  $H_{iB}$  наблюдается смена знака при сохранении невзаимности других полос в сравнении со спектром в поле  $H_{iH}$ . В этом случае наблюдается скачок  $T$  на два порядка от полного запрета до уровня полос прозрачности.

2.2. Ферритовая пластина с диполем “бабочка”, нагруженным варактором

Динамика свойств метаинтерферометра с разделителем пучка в виде нагруженного варактором диполя “бабочка” ( $20 \times 10$  мм на текстолитовой подложке толщиной 2 мм), возбуждаемого микроволновым электрическим полем  $E$ , была описана в [33]. В метаинтерферометре наблюдалось изменение вида интерференционных полос при изменении с интерферометром без разделителя пучка. При  $V_{OC} = 0$  полосы запрета  $F_i$  становились шире, а полосы прозрачности  $P_i$  сужались. Это связано с тем, что в диполе при  $V_{OC} = 0$  возбуждается дипольный резонанс (ДР), который влияет на интерферограмму.

С подачей напряжения  $V_{OC}$  происходит электрическое управление интерференционным спектром (смещение и изменение вида интерференционных полос), обусловленное специфическим воздействием ДР в зависимости от его электрически управляемых свойств (ширины, интенсивности и частоты резонанса). При увеличении напряжения  $V_{OC}$  и, соответственно, уменьшении емкости варактора дипольный резонанс смещается к высоким частотам внутри диапазона 3–6 ГГц. Поскольку для ДР характерна довольно широкая полоса, его влияние охватывает несколько полос, при этом разные полосы подвергаются разному влиянию ДР и управляются по-разному. Отметим селективное увеличение прохождения  $T$  и расширение полос прозрачности, а также селективное сужение и смещение полос запрета с изменением  $V_{OC}$  от 0 до 10 В, а также переключение полос запрета (глубина составляет  $-20, -25$  дБ) на полосы прозрачности до уровня  $-5$  дБ.

При использовании цепочки нагруженных варакторами дважды разомкнутых колец (диаметр 6.6 мм), возбуждаемых микроволновым магнитным полем  $h$ , появляется возможность электрического управления одной полосой, поскольку в

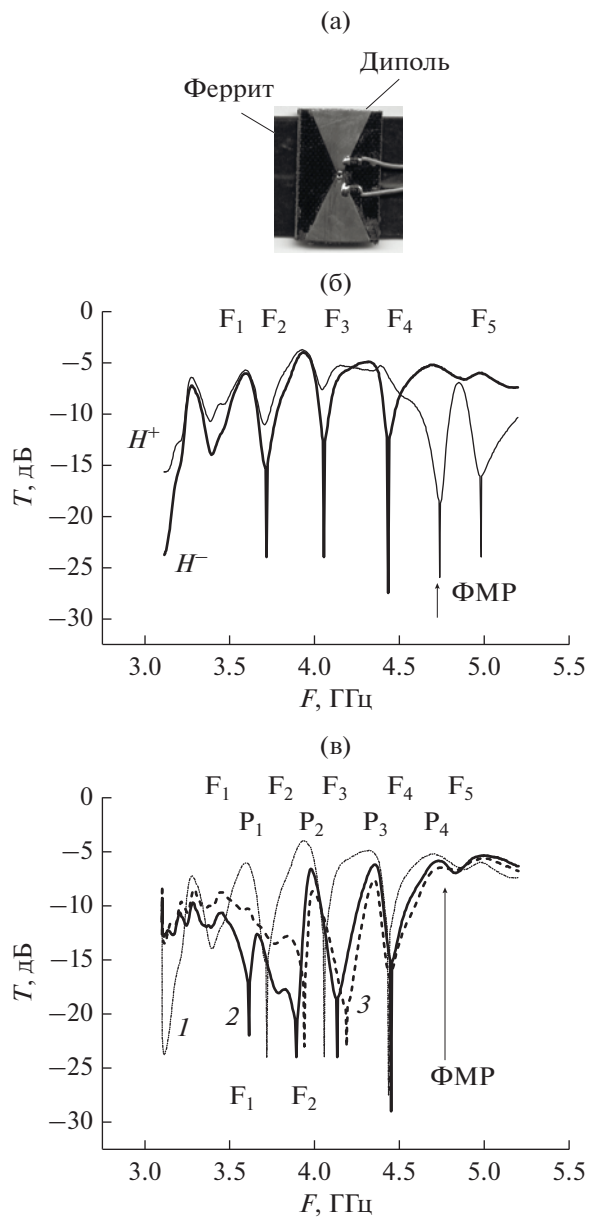


Рис. 4. Фото структуры (а) и динамика измеренной интерферограммы с метаструктурой ферритовая пластина плюс нагруженный варактором диполь “бабочка”: б) при  $H = +1000$  Э,  $H = -1000$  Э,  $V_{OC} = 0$ ; в) при  $H = -1000$  Э,  $V_{OC} = 0$  (1), 5 (2), 10 В (3).

кольцах возбуждается довольно узкий магнитный резонанс в отличие от диполя “бабочка”. При подаче  $V_{OC}$  может меняться поочередно форма и ширина отдельной полосы  $F_i$  практически без смещения и изменения спектра других полос [33].

Динамика свойств метаинтерферометра, реализованного добавлением к ферритовой пластине нагруженного варактором диполя “бабочка”, представлена на рис. 4. С наложением поля  $H$  и возбуждением ФМР полосы  $F_i$  становятся невза-



имными и могут управляться как полем  $H$ , так и напряжением  $V_{OC}$ . На рис. 4б приведены частотные зависимости  $T$  при наложении  $H_{4b}^- = H_{4b}^+ = 1000$  Э в отсутствие  $V_{OC}$ . В этом случае ФМР возбуждается выше  $F_4$  (и заодно выше  $F_1, F_2, F_3$ ), наблюдается отрицательный знак  $\delta$  для полос  $F_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) и усиление невязности  $T$  в полосе  $F_4$ . Действительно, прохождение  $T_{F_i}$  в поле  $H_{4b}^-$  существенно меньше, чем в поле  $H_{4b}^+$ . При этом,  $T_{F_1}(H_{4b}^-) = -14$  дБ,  $T_{F_1}(H_{4b}^+) = -11$  дБ;  $T_{F_2}(H_{4b}^-) = -24$  дБ,  $T_{F_2}(H_{4b}^+) = -11$  дБ;  $T_{F_3}(H_{4b}^-) = -24$  дБ,  $T_{F_3}(H_{4b}^+) = -8$  дБ;  $T_{F_4}(H_{4b}^-) = -27.5$  дБ,  $T_{F_4}(H_{4b}^+) = -6$  дБ. Невязность полос  $\delta F_1^{4b} = -3$ ,  $\delta F_2^{4b} = -13$ ,  $\delta F_3^{4b} = -16$ ,  $\delta F_4^{4b} = -22$  дБ.

С подачей напряжения  $V_{OC}$  происходит электрическое управление невязным интерференционным спектром (смещение и изменение вида интерференционных полос), обусловленное специфическим воздействием ДР. Динамика показана на рис. 4в в условиях  $H_{4b}^- = 1000$  Э при наложении напряжения  $V_{OC} = 0, 5, 10$  В.

С изменением  $V_{OC}$  меняется частота, глубина и ширина полос запрета. Частота полосы определяется частотой минимального прохождения  $T_{мин}$ , глубина – величиной  $T_{мин}$ , дБ, ширина – разностью частот в соответствующей полосе на уровне  $T = -15$  дБ. В отсутствие напряжения ( $V_{OC} = 0$ ) полосы  $F_1, F_2, F_3, F_4$  наблюдаются соответственно на частотах 3.4, 3.72, 4.06, 4.43 ГГц. При  $V_{OC} = 5$  В полоса  $F_1$  углубляется и смещается на 0.21 ГГц к частоте  $f(F_1) = 3.61$  ГГц. При этом полоса  $F_2$  расширяется и смещается на 0.17 ГГц к  $f(F_2) = 3.89$  ГГц, полоса  $F_3$  расширяется и смещается незначительно на 0.07 ГГц к  $f(F_3) = 4.1$  ГГц, а полоса  $F_4$  практически не смещается,  $f(F_4) = 4.45$  ГГц. Отметим, что в этом случае при  $V_{OC} = 5$  В полосы запрета  $F_1, F_2, F_3$  занимают частотное положение полос прозрачности  $P_1, P_2, P_3$ , соответствующее  $V_{OC} = 0$ . При дальнейшем повышении напряжения,  $V_{OC} = 10$  В, существенно увеличивается прохождение  $T$  в полосе  $F_1$ , полоса  $F_2$  сужается в несколько раз и незначительно, на 0.05 ГГц, смещается к  $f(F_2) = 3.94$  ГГц, полоса  $F_3$  незначительно, на 0.05 ГГц, смещается к  $f(F_3) = 4.18$  ГГц, а полоса  $F_4$  практически остается без изменений. Таким образом, из рис. 4б, 4в видно, что с изменением  $V_{OC}$  наблюдается синхронное, но неодинаковое изменение формы, интенсивности, ширины, частоты нескольких полос  $F_i$  и переключение полос  $F_i$  на полосы  $P_i$ . Состояние интерферограммы, меняющееся с изменением  $V_{OC}$ , зависит от взаимоположения ФМР и ДР. При сближении их частот

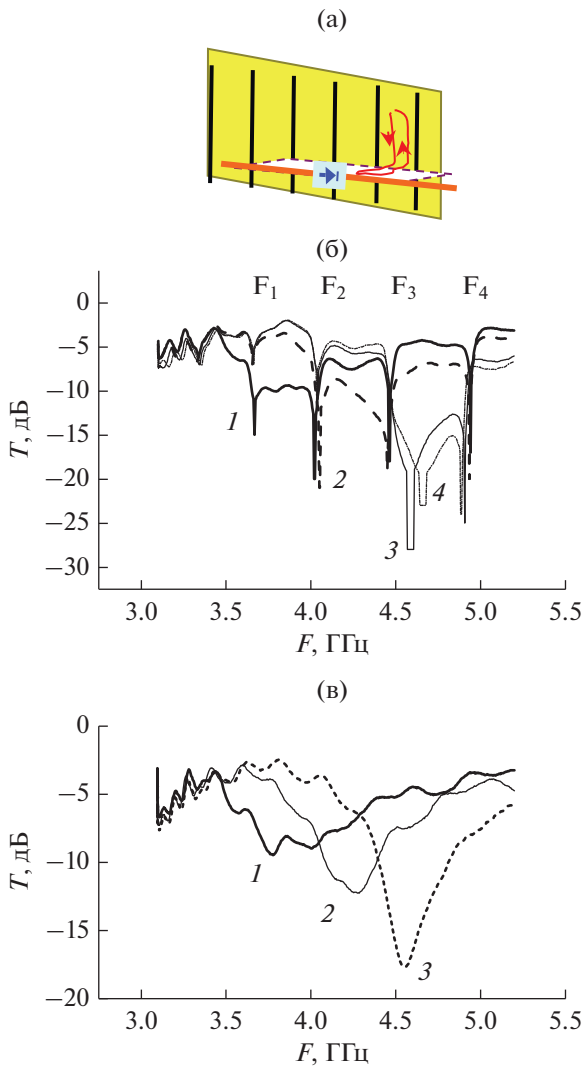
возникает режим связанных резонансов и проявляется влияние  $V_{OC}$  на ФМР.

### 2.3. Метаструктура на основе резонансных проводов

В качестве разделителя пучка предлагается метаструктура [35], которая очень просто реализуется в любом диапазоне микроволн. Она представляет собой частопериодическую решетку  $P$  (см. рис. 2е) параллельных медных проводов, внедренных в диэлектрическую пленку, в комбинации с ортогонально асимметрично расположенной медной полоской МП с разрывом, нагруженным варактором  $V$ . Полоска расположена на текстолитовой 2-мм подложке. Микроволновые свойства подобной метаструктуры в волноводе обуславливаются тремя резонансными эффектами. Один из них – это дипольный резонанс в проводах решетки (при длине провода  $\lambda/2$ ), возбуждаемый микроволновым электрическим полем  $E$ . Другой резонансный эффект связан с возбуждением индукционных антипараллельных токов в пространственных  $LC$ -контурках, образованных парой соседних проводов решетки и соответствующей секцией медной полоски МП, возбуждаемых микроволновым магнитным полем  $H$ , направленным перпендикулярно плоскости решетки  $P$ . 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 в частотно-амплитудной зависимости  $T$ . Разные типы резонансов можно возбуждать отдельно в разных заданных диапазонах длин волн, выбирая необходимые размеры проводов и полоски. Резонанс в полоске можно смещать, подавая напряжение обратного смещения  $V_{OC}$  на варактор, внедренный в разрыв.

Рассмотрим некоторые результаты исследования состояния интерферограммы при следующих размерах метаструктуры: длина провода решетки 18 мм, ширина 0.1 мм, расстояние между проводами 0.2 мм, длина медной полоской 25 и ширина 2 мм. Размеры выбраны так, чтобы в заданном диапазоне 3–6 ГГц возбуждался управляемый резонанс в медной полоске, а ДР и резонанс в контурках возбуждались бы за пределами диапазона на более высоких частотах и не увеличивали бы потери в интерферометре.

Измеренные частотные зависимости коэффициента прохождения  $T$  в мета-интерферометре при изменении  $V_{OC}$  в пределах 0–23 В (рис. 5а) свидетельствуют о возможности специфического электрического управления интерферограммой с изменением глубины, ширины, частоты полос запрета. Наблюдаемая динамика связана с влиянием управляемого резонансного отклика от мед-



**Рис. 5.** Фото структуры (а) и динамика (б) измеренной интерферограммы с метаструктурой на основе резонансных проводов в комбинации с ортогонально и асимметрично расположенной медной полоской в зависимости от напряжения:  $V_{OC} = 0$  (1), 10 (2), 20 (3), 23 В (4); в) – резонансный отклик прохождения  $T$  медной полоски, измеренный в прямоугольном волноводе с метаструктурой, при  $V_{OC} = 0$  (1), 10 (2), 20 (3).

ной полоски, который можно легко проследить, измерив  $T$  в прямоугольном волноводе с этой метаструктурой (рис. 5б).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложено новое применение метаструктуры с проводящими резонансными элементами (метаповерхность или метаатом) в качестве оригинального управляемого разделителя пучка в модифицированном интерферометре на основе волноводного тройника. Обнаружено, что можно управлять интерферограммой с помощью внешне-

го магнитного поля и электрического напряжения, используя различные метаструктуры: ферритовую пластину, нагруженный варактором диполь “бабочка” в комбинации с ферритом, структуру из линейных резонансных проводов. Измерена динамика интерферограммы в диапазоне 3–6 ГГц при внешнем воздействии магнитоэлектрического поля в пределах 0–1000 Э и электрического напряжения в пределах 0–20 В.

Обнаружена невзаимность прохождения микроволн в интерференционных полосах запрета, характеризуемая изменением коэффициента прохождения  $T$  при инверсии  $H$ . Применение ферритовой пластины в качестве разделителя пучка в модифицированном интерферометре, названном нами “метаинтерферометр”, приводит к новому проявлению невзаимных эффектов при воздействии ФМР на дисперсионные характеристики – селективно управляемой невзаимности прохождения микроволн в интерференционных полосах запрета. При этом ФМР может оказывать влияние на каждую полосу поочередно при сближении с соответствующей полосой по мере продвижения к высоким частотам с увеличением поля  $H$ . Невзаимность увеличивается при возбуждении ФМР вблизи полосы. В этом случае с изменением знака  $H$  наблюдается скачок  $T$  на два порядка до уровня полос прозрачности. Знак невзаимности зависит от взаимоположения ФМР и полосы запрета и может меняться при небольшом изменении величины  $H$ . Показано изменение знака невзаимности не путем перемагничивания, как обычно, а с помощью небольшого изменения величины поля  $H$ , необходимого для изменения взаимоположения ФМР и полосы запрета, что может повысить быстродействие. Продемонстрировано селективное электрическое управление, охватывающее несколько полос запрета, при использовании диполя “бабочка” (сужение полосы запрета в несколько раз и смещение на 0.2 ГГц, а также перекрытие полос запрета на полосы прозрачности с изменением  $V_{OC}$  в пределах 0–10 В или магнитное и электрическое управление с метаструктурой на основе ферритовой пластины в комбинации с диполем). Использование дважды разомкнутых магнито-возбуждаемых колец дает возможность электрического управления одной полосой, поскольку в кольцах возбуждается довольно узкий магнитный резонанс в отличие от диполя “бабочка”. При подаче  $V_{OC}$  может меняться поочередно форма и ширина отдельной полосы запрета почти без смещения и изменения спектра других полос.

Показано, что простейшая метаструктура, выполненная только из линейных проводов резонансного размера, может быть использована для управления многополосной фильтрацией.

Наблюдаемые в интерферометре потери (4–5 дБ) связаны с потерями в феррите, в варакторе при



низких напряжениях, и во многом с большими отражениями в сторону генератора. К уменьшению отражения, помимо согласования, может привести выбор более подходящих метаструктур среди большого разнообразия. Из исследованных метаструктур уменьшение потерь можно достигнуть с киральными дважды разомкнутыми кольцами и структурами на основе линейных проводов.

Таким образом, в работе исследована интерферограмма при использовании разных разделителей пучка: ферритовой пластины, диполя или киральных колец, решетки из резонансных линейных проводов, комбинации ферритовой пластины с диполем. Показано, что применение ферритовой пластины приводит к специфическому проявлению невзаимных эффектов и возможности селективного магнитного управления, а структур на основе феррита и диполя – к магнитному и электрическому управлению при воздействии ферромагнитного и дипольного резонансов на дисперсионные характеристики – селективно управляемой невзаимности прохождения микроволн в интерференционных полосах запрета. Продемонстрировано управление интерферограммой внешним магнитостатическим полем и электрическим напряжением на варакторе.

Полученные результаты могут быть полезны при разработке управляемых многополосных фильтров, востребованных в многофункциональных многофункциональных телекоммуникационных системах.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования (государственное задание по теме 0030-2019-0014).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cameron R, Kudsia C., Mansour R.* Microwave Filters for Communication Systems: Fundamentals, Design, and Applications. Hoboken: John Wiley & Sons, 2018.
2. *Entesari K., Rebeiz G.M.* // IEEE Trans. 2005. V. MTT-53. № 3. P. 1103.
3. *Геворкян В., Кочемасов В., Устинов А.* // Компоненты и технологии. 2017. № 3. С. 16.
4. *Srinivasan G., Tatarenko A.S., Bichurin M.I.* // Electron. Lett. 2005. V. 41. № 10. P. 596.
5. *Brown A.R., Rebeiz G.M.* // IEEE Trans. Microwave Theory Tech, 2000. V. MTT-48. № 7. P. 1157.
6. *Замешаева Е.Ю., Туральчук П.А., Тургалиев В.М. и др.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. № 18. С. 87.
7. *Fok M.P., Ge J.* // Photonics. 2017. V. 4. № 4. P. 45.
8. *Пятаков А.П., Звездин А.К.* // Успехи физ. наук. 2012. Т. 182. С. 593.
9. *Glybovski S.B., Tretyakov S.A., Belov P.A. et al.* // Phys. Rep. 2016. V. 634. P. 1.
10. *Гуляев Ю.В., Лагарьков А.Н., Никитов С.А.* // Вест. РАН. 2008. Т. 78. № 5. С. 438.
11. *Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В.* Одномерные СВЧ фотонные кристаллы: новые области применения. М.: Физматлит, 2018.
12. *Банков С.В.* Электромагнитные кристаллы. М.: Физматлит, 2010.
13. *Lindell I.V., Sihvola A.H., Tretyakov S.A., Viitanen A.J.* Electromagnetic Waves in Chiral and Bi-isotropic Media. Norwood: Artech House, 1994.
14. *Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. № 18. P. 4184.
15. *Pendry J., Pendry J., Holden A. et al.* // IEEE Trans. 1999. V. MTT-47. № 11. P. 2075.
16. *Веселаго В.Г.* // Успехи физ. наук. 1967. Т. 92. № 3. С. 517.
17. *Tretyakov S.A.* // Top. Rev. J. Opt. 2017. V. 19. № 1. P. 013002.
18. *Kostin M.V., Shevchenko V.V.* // Proc. 3rd Int. Workshop on Chiral, Bi-isotropic Media (Chiral'94), Perigueux, France, May 18–20, 1994 (French Atomic Energy Commission (CEA/CESTA), ENSCP Bordeaux). P. 49.
19. *Костин М.В., Шевченко В.В.* // РЭ. 1998. Т. 43. № 8. С. 921.
20. *Каценеленбаум Б.З., Коршунова Е.Н., Сивов А.Н., Шатров А.Д.* // Успехи физ. наук. 1997. Т. 167. № 11. С. 1201.
21. *Анютин А.П., Коршунов И.П., Шатров А.Д.* // ЖЭТФ. 2014. Т. 146. № 3. С. 429.
22. *Шатров А.Д.* // РЭ. 2007. Т. 52. № 12. С. 1430.
23. *Шевченко В.В.* // Журн. радиоэлектроники. 2007. № 6. <http://jre.cplire.ru/jre/jun07/5/text.html>.
24. *Банков С.В.* // РЭ. 2010. Т. 55. № 2. С. 133.
25. *Бутылкин В.С., Крафтмахер Г.А.* // РЭ. 2008. Т. 53. № 1. С. 5.
26. *Бутылкин В.С., Крафтмахер Г.А., Мальцев В.П.* // РЭ. 2009. Т. 54. № 7. С. 1184.
27. *Gil I., Garcia-Garcia J., Bonache J. et al.* // Electron. Lett. 2004. V. 40. № 21. P. 1347.
28. *Genc A., Baktur R.* // Microwave Optical Technol. Lett. 2009. V. 51. № 10. P. 2394.
29. *Zhao Ya-juan, Zhou Bi-cheng, Zhang Ze-kui I. et al.* // Optoelectron. Lett. 2017. V. 13. № 2. P. 120.
30. *Vendik I., Kholodnyak D., Kapitanova P. et al.* // Proc. 3rd Intern. Congr. on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics. London, 2009. P. 181.
31. *Крафтмахер Г.А., Бутылкин В.С., Казанцев Ю.Н.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. № 6. С. 505.
32. *Ma Xiao-song, Zotter S., Tetik N. et al.* // Opt. Express. 2011. V. 19. № 23. P. 22723.
33. *Крафтмахер Г.А., Бутылкин В.С., Казанцев Ю.Н., Мальцев В.П.* Журн. радиоэлектроники. 2018. № 9. <http://jre.cplire.ru/jre/sep18/19/text.pdf>
34. *Крафтмахер Г.А., Бутылкин В.С., Казанцев Ю.Н., Мальцев В.П.* // Письма в ЖЭТФ. 2019. Т. 109. № 4. С. 224.
35. *Kraftmakher G., Butylkin V., Kazantsev Y., Mal'tsev V.* // Electron. Lett. 2017. V. 53. № 18. P. 1264.