

## Магнито- и электрически-управляемая микроволновая интерферограмма в мета-интерферометре

Г. А. Крафтмахер<sup>1</sup>), В. С. Бутылкин, Ю. Н. Казанцев, В. П. Мальцев

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, 125009 Москва, Россия

Поступила в редакцию 9 ноября 2018 г.

После переработки 3 декабря 2018 г.

Принята к публикации 11 декабря 2018 г.

В модифицированном интерферометре на основе волноводного тройника с метаструктурой “ферритовая пластина + нагруженные варакторами проводящие элементы в виде диполя или колец” в качестве управляемого разделителя пучка в диапазоне 3–6 ГГц впервые экспериментально обнаружено специфическое селективное воздействие ферромагнитного и дипольного резонансов на интерферограмму. Наблюдается зависимость формы, ширины, интенсивности и частоты интерференционной полосы от величины и знака магнитостатического поля  $H$ , взаимоположения ферромагнитного резонанса и полосы, а также от электрического напряжения  $V_{DC}$  на варакторах. Обнаружена невязимость прохождения микроволн в интерференционных полосах запрета, характеризуемая изменением коэффициента прохождения  $T$  при инверсии  $H$ . Невязимость увеличивается при возбуждении ферромагнитного резонанса вблизи полосы. В этом случае с изменением знака  $H$  наблюдается скачок  $T$  на 2 порядка до уровня полос прозрачности. Знак невязимости зависит от взаимоположения ферромагнитного резонанса и полосы запрета и может меняться при небольшом изменении величины  $H$ . С изменением  $V_{DC}$  в пределах 0–10 В наблюдается селективно управляемое сужение невязимой полосы в несколько раз и смещение на 0.2 ГГц.

DOI: 10.1134/S0370274X19040040

Неослабевающий интерес к микроволновой интерферометрии поддерживается новыми применениями и подходами в измерениях, обработке и передаче сигналов [1–3]. Управление, стимулируемое разработкой искусственных материалов и структур, могло бы расширить функциональные свойства и сферы применения интерферометрии. В настоящее время успешно развивается управляемая оптическая интерферометрия. Управление интерферограммой в оптике основано на электромеханических, электрооптических, акустических методах изменения оптического пути. Появились также работы, в которых управление достигнуто в оптическом интерферометре Маха–Цендера благодаря применению управляемого электрооптического разделителя пучка [4]. Публикации по управляемой микроволновой интерферометрии практически отсутствуют; существующие проблемы и трудности обсуждаются в [5]. В то же время, на микроволнах известны управляемые магнитоэлектрические материалы [6], метаструктуры, метаповерхности и мета-атомы, совместимые с элементами управления [7]. Методы управления в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне основаны на электромеханических [8], магнитных с использованием

ферритов [9], а также электрических эффектах с использованием полупроводниковых варакторов [10]. Возможность управления поддерживает интерес к исследованиям метаструктур в сфере практических применений для разработки управляемых поглотителей [11–13], управляемых фильтров [14–17], в том числе невязимых [18, 19], магнито-управляемых антенн [20, 21], сенсоров [22], в селективном управлении [23], в магнитной резонансной спектроскопии [24], топологической фотонике [25, 26].

В данной работе обнаружено, что применение предложенной метаструктуры в качестве разделителя пучка в модифицированном интерферометре, названном нами “мета-интерферометр”, приводит к новому проявлению невязимых эффектов при воздействии ферромагнитного и дипольного резонансов на дисперсионные характеристики – селективно управляемой невязимости прохождения микроволн в интерференционных полосах запрета. Продемонстрировано использование этого эффекта для управления интерферограммой внешним магнитостатическим полем и электрическим напряжением на варакторе.

На рисунке 1 представлена схема предлагаемого мета-интерферометра, фото метаструктур на вставке (Port 1 – вход, Port 2 – выход, Port 3 – закороченное

<sup>1</sup>)e-mail: gkraft@ms.ire.rssi.ru

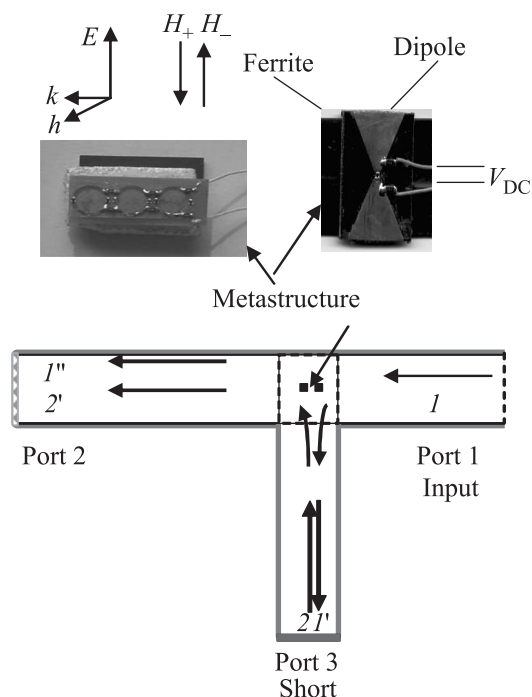


Рис. 1. (Цветной онлайн) Схема мета-интерферометра

$h$ -плечо длиной 250 мм). Исследуются три разных разделителя пучка. Один из них – это ферритовая пластина железо- иттриевого граната ( $21 \times 14 \times 2$  мм). Другим разделителем пучка является метаструктура в виде сэндвича ферритовая пластина + нагруженный варактором диполь “Бабочка” ( $22 \times 10$  мм) на текстолитовой подложке толщиной 2 мм, возбуждаемый микроволновым электрическим полем  $E$ , и третий – это метаструктура ферритовая пластина + ряд из 3 нагруженных варакторами дважды разомкнутых колец (диаметр 6.6 мм), возбуждаемых микроволновым магнитным полем  $h$ . Размеры проводящих элементов выбраны так, чтобы резонансный отклик коэффициента прохождения  $T$  наблюдался в диапазоне 3–6 ГГц панорамного измерителя КСВН. Используется варактор МА46Н120 (МАСОМ), емкость которого меняется от 1 до 0.15 пФ при подаче напряжения обратного смещения  $V_{DC}$  от 0 до 10 В. Метаструктуру располагаем вдоль оси входного прямоугольного волновода  $l$  ( $48 \times 24$  мм) напротив закороченного  $h$ -плеча. Измеряем частотную зависимость  $T$  при разных величинах поперечного магнитостатического поля  $H$  и противоположных направлениях ( $H^+$  и  $H^-$ ) и разных величинах напряжения  $V_{DC}$ .

На рисунке 2а, б приведены результаты измерений  $T$  с ферритовой пластиной при разных величинах  $H^+$  и  $H^-$ . При  $H = 0$  наблюдается интерференционная зависимость  $T$  от частоты с узкими

полосами запрета  $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5$  (*stop-bands*  $F_i$ ,  $i$  – номер полосы) и широкими полосами прозрачности (*pass-bands*  $P_i$ ). С наложением  $H$  и возбуждением ферромагнитного резонанса (*Ferromagnetic resonance* – FMR) в ферритовой пластине в спектре  $T$  появляется резонансный минимум, связанный с FMR. При этом зависимость  $T(H^-)$ , жирная кривая, существенно отличается от  $T(H^+)$ , что может свидетельствовать о проявлении невязимности прохождения  $T$  как в области FMR, 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  $H$ .

На рисунке 2а приведены результаты измерений при  $H_{1b} = 740$  Э, когда FMR возбуждается на частоте  $f = 3.52$  ГГц, вблизи полосы  $F_1$  (3.619 ГГц) со стороны низких частот. В поле  $H_{1b}$  – прохождение  $T$  в полосе  $F_1$  (–8.6 дБ) существенно больше, чем в поле  $H_{1b}+$  (–17 дБ). В этом случае параметр невязимности  $\delta FMR = -10$  дБ, а параметры невязимности  $\delta F_1^{1b} = +8$ ,  $\delta F_2^{1b} = +15$ ,  $\delta F_3^{1b} = +14.5$ ,  $\delta F_4^{1b} = +14$ ,  $\delta F_5^{1b} = +15$  дБ. В обозначениях измеренных параметров невязимности используем индексы. Верхние индексы относятся к приложенному магнитному полю, цифры отмечают номер полосы, вблизи которой возбуждается FMR. Нижние индексы соответствуют номеру исследуемой интерференционной полосы. Параметр  $\delta F_1^{2b}$  означает, что речь идет о невязимности в полосе  $F_1$  при наложении поля, возбуждающего FMR вблизи полосы  $F_2$ , ниже частоты  $F_2$  (“below”, приписываем индекс “b”). Параметр  $\delta F_1^{2a}$  означает, что речь идет о невязимности в полосе  $F_1$  при наложении поля, возбуждающего FMR вблизи полосы  $F_2$ , выше частоты  $F_2$  (“above”, приписываем индекс “a”).

На рисунке 2б видно, что при  $H_{1a} = 780$  Э с возбуждением FMR на 3.64 ГГц вблизи  $F_1$ , но со стороны высоких частот, наблюдается уменьшение  $T$  практически до полного запрета в поле  $H_{1a}$  (–32 дБ). При изменении знака  $H$  происходит скачок  $T$  до уровня полос прозрачности в поле  $H_{1a}+$ . В этом случае наблюдается смена знака и увеличение невязимности  $F_1$  ( $\delta F_1^{1a} = -27$  дБ) при небольшом сдвиге частоты, а также смена знака и уменьшение невязимности FMR ( $\delta FMR = +1.1$  дБ). Невязимность же остальных полос меняется незначительно ( $\delta F_2^{1a} = +12.5$ ,  $\delta F_3^{1a} = +12.5$ ,  $\delta F_4^{1a} = +14$ ,  $\delta F_5^{1a} = +14$  дБ). Аналогичные эффекты наблюдались при возбуждении FMR вблизи  $F_2, F_3, F_4, F_5$ . Например, когда FMR возбуждался при  $H_{2b} = 830$  Э (ниже частоты  $F_2$ ), невязимность полос составляла  $\delta F_1^{2b} = -5$ ,

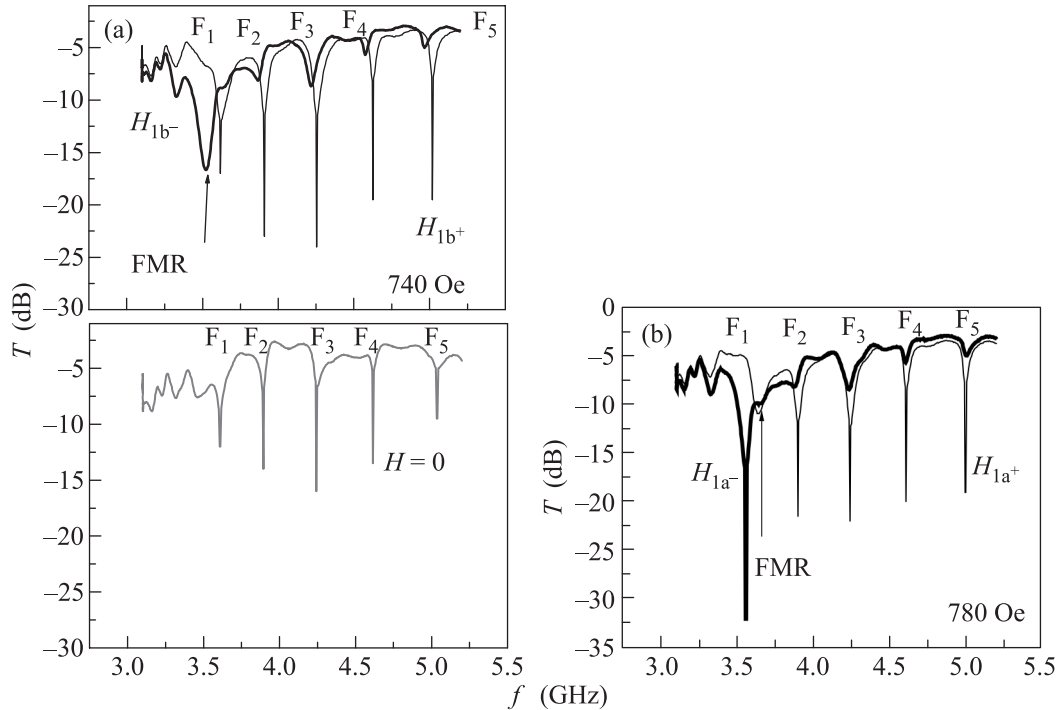


Рис. 2. (Цветной онлайн) Измеренные частотные зависимости коэффициента прохождения  $T$ , дБ при использовании ферритовой пластины в качестве разделителя пучка при разных величинах  $H^+$ ,  $H^-$  (а, б): 740 Э в сравнении с  $H = 0$  (а), 780 Э (б)

$\delta F_2^{2b} = +18$ ,  $\delta F_3^{2b} = +16$ ,  $\delta F_4^{2b} = +16$ ,  $\delta F_5^{2b} = +14$  дБ, а если выше  $F_2$  ( $H_{2a} = 880$  Э), то происходила смена знака и увеличение невзаимности прохождения в полосе  $F_2$ . При этом относительно  $H_{2b} = 830$  Э невзаимность других полос менялась незначительно. Параметры невзаимности прохождения составляли  $\delta F_1^{2a} = -9$ ,  $\delta F_2^{2a} = -27$ ,  $\delta F_3^{2a} = +14$ ,  $\delta F_4^{2a} = +17$ ,  $\delta F_5^{2a} = +16$  дБ. Данные о состоянии интерферограммы (частота  $f$ , глубина  $T$  ( $T_{\min}$ ), невзаимность  $\delta$  полос запрета при разных величинах поля  $H^+$  и  $H^-$  в сравнении  $H = 0$ ) приведены в табл. 1.

Таким образом, при возбуждении FMR вблизи полосы запрета невзаимность увеличивается. Отрицательный знак  $\delta$  наблюдается для полос  $F_i$  при возбуждении FMR выше их частоты (в поле  $H_a$ ). При возбуждении же FMR ниже частоты  $F_i$  (в поле  $H_b$ ) наблюдается положительный знак  $\delta$ . При этом FMR может оказывать влияние на каждую полосу поочередно при сближении с соответствующей полосой по мере продвижения к высоким частотам с увеличением поля. При небольшом изменении  $H$  с переходом FMR через частоту полосы  $F_i$  в поле  $H_{ia}$  наблюдается смена знака при сохранении невзаимности других полос в сравнении со спектром в поле  $H_{ib}$ . В этом

случае наблюдается скачок  $T$  на 2 порядка от полного запрета до уровня полос прозрачности с изменением знака  $H$ .

Динамика свойств мета-интерферометра, реализованного добавлением к ферритовой пластине нагруженного варактором диполя “Бабочка”, представлена на рис. 3, фото диполя см. на вставке 1 рис. 3. При  $H = 0$  и  $V_{DC} = 0$  возбуждается дипольный резонанс (*dipole resonance* – DR) на частотах около 3 ГГц. Это приводит к изменению вида интерференционных полос, полосы  $F_i$  становятся шире, а полосы прозрачности  $P_i$  сужаются. С наложением поля  $H$  и возбуждением FMR полосы  $F_i$  становятся невзаимными и могут управляться как полем  $H$ , так и напряжением  $V_{DC}$ . На рисунке 3а приведены частотные зависимости  $T$  при наложении  $H_{4a-} = H_{4a+} = 1000$  Э в отсутствие  $V_{DC}$ . В этом случае FMR возбуждается выше  $F_4$  (и заодно выше  $F_1, F_2, F_3$ ), наблюдается отрицательный знак  $\delta$  для полос  $F_i$  и усиление невзаимности  $T$  в полосе  $F_4$ . Действительно, прохождение  $T_{F_i}$  в поле  $H_{4a-}$  существенно меньше, чем в поле  $H_{4a+}$ . При этом,  $T_{F1}(H_{4a-}) = -14$  дБ,  $T_{F1}(H_{4a+}) = -11$  дБ;  $T_{F2}(H_{4a-}) = -24$  дБ,

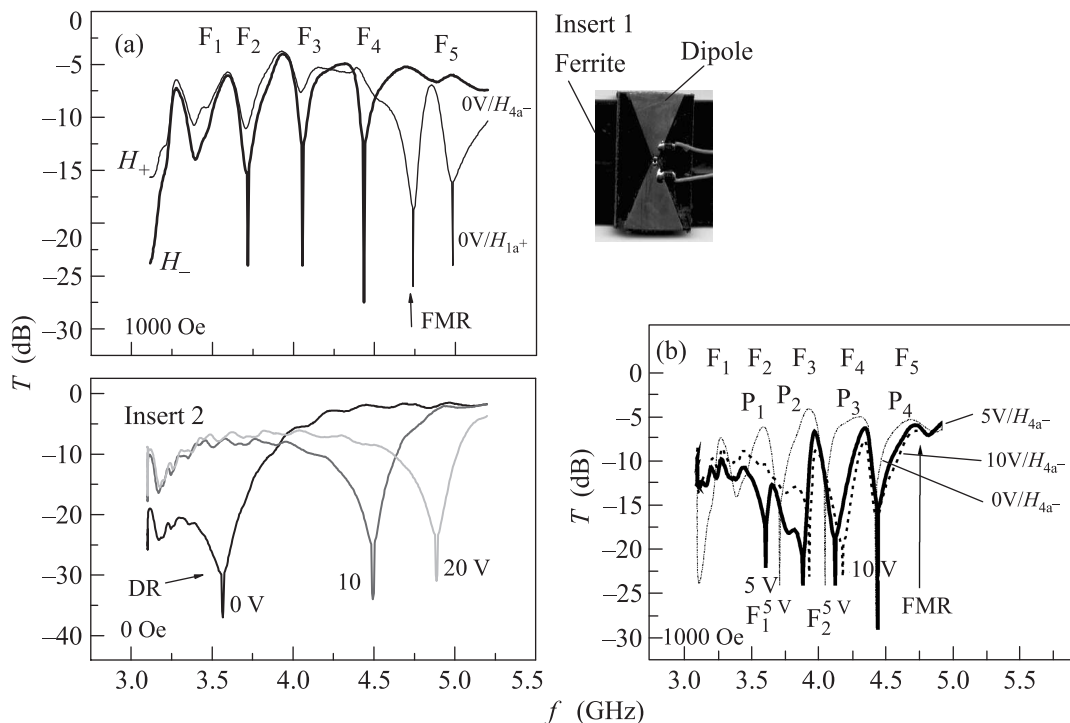


Рис. 3. (Цветной онлайн) Измеренные частотные зависимости коэффициента прохождения  $T$ , дБ с метаструктурой ферритовая пластина + диполь “Бабочка”,  $H = 1000$  Э: (a) –  $V_{DC} = 0$  В;  $H^+$ ,  $H^-$ , вставка 1 (insert 1): фото метаструктуры (феррит + диполь), вставка 2 (insert 2): частотные характеристики диполя; (b) –  $V_{DC} = 0; 5; 10$  В;  $H^-$

$$\begin{aligned}
 T_{F_2}(H_{4a+}) &= -11 \text{ дБ}; & T_{F_3}(H_{4a-}) &= -24 \text{ дБ}, \\
 T_{F_3}(H_{4a+}) &= -8 \text{ дБ}; & T_{F_4}(H_{4a-}) &= -27.5 \text{ дБ}, \\
 T_{F_4}(H_{4a+}) &= -6 \text{ дБ}. & \text{Невзаимность полос } \delta F_1^{4a} &= -3, \\
 \delta F_2^{4a} &= -13, & \delta F_3^{4a} &= -16, & \delta F_4^{4a} &= -22 \text{ дБ}.
 \end{aligned}$$

С подачей напряжения  $V_{DC}$  происходит электрическое управление невзаимным интерференционным спектром (смещение и изменение вида интерференционных полос), обусловленное специфическим воздействием резонанса в диполе (дипольным резонансом – DR), в зависимости от его электрически управляемых свойств (ширины, интенсивности и частоты резонанса). При увеличении напряжения  $V_{DC}$  и, соответственно, уменьшении емкости варактора дипольный резонанс смещается к высоким частотам внутри диапазона 3–6 ГГц (см. частотные характеристики диполя, помещенного вдоль оси прямоугольного волновода, – вставка 2 рис. 3а). Поскольку для DR характерна довольно широкая полоса, его влияние охватывает несколько полос, при этом разные полосы подвергаются разному влиянию DR и управляются по-разному. Динамика показана на рис. 3б в условиях  $H_{4a-} = 1000$  Э. С изменением  $V_{DC}$  меняется частота, глубина и ширина полос запрета. В таблице 2 приведены соответствующие данные при наложении напряжения  $V_{DC} = 0, 5, 10$  В. Частота полосы ( $f$ , ГГц) определяется частотой минимального про-

хождения  $T_{min}$ , глубина – величиной  $T_{min}$ , дБ, ширина ( $\nabla f$ , ГГц) – разностью частот в соответствующей полосе на уровне  $T = -15$  дБ. В отсутствие напряжения ( $V_{DC} = 0$ ) полосы  $F_1, F_2, F_3, F_4$  наблюдаются соответственно на частотах 3.4, 3.72, 4.06, 4.43 ГГц. При  $V_{DC} = 5$  В полоса  $F_1$ , углубляется и смещается на 0.21 ГГц к частоте  $f(F_1^{5V}) = 3.61$  ГГц. При этом полоса  $F_2$  расширяется и смещается на 0.17 ГГц к  $f(F_2^{5V}) = 3.89$  ГГц, полоса  $F_3$  расширяется и смещается незначительно на 0.07 ГГц к  $f(F_3^{5V}) = 4.1$  ГГц, а полоса  $F_4$  практически не смещается,  $f(F_4^{5V}) = 4.45$  ГГц. Отметим, что в этом случае полосы запрета  $F_1^{5V}, F_2^{5V}, F_3^{5V}$  занимают частотное положение полос прозрачности  $P_1^{0V}, P_2^{0V}, P_3^{0V}$ , соответствующее  $V_{DC} = 0$ . При дальнейшем повышении напряжения ( $V_{DC} = 10$  В) существенно увеличивается прохождение  $T$  в полосе  $F_1^{10V}$ , полоса  $F_2^{10V}$  сужается в несколько раз и незначительно смещается на 0.05 ГГц к  $f(F_2^{10V}) = 3.94$  ГГц, полоса  $F_3^{10V}$  незначительно смещается на 0.05 ГГц к  $f(F_3^{10V}) = 4.18$  ГГц, а полоса  $F_4^{10V}$  практически остается без изменений. Таким образом, из табл. 2 и рис. 3а, б видно, что с изменением  $V_{DC}$  наблюдается синхронное, но неодинаковое, изменение формы, интенсивности, ширины, частоты нескольких полос  $F_i$  и переключение полос  $F_i$  на полосы  $P_i$ . Состояние интерферограммы, меня-

**Таблица 1.** Состояние интерферограммы (частота  $f$ , глубина  $T^-$  и  $T^+$ , невязанность  $\delta$  полос запрета) при разных величинах поля  $H^+$  и  $H^-$  в сравнении с  $H = 0$

	$H = 740 \text{ Э}$	$780 \text{ Э}$	$830 \text{ Э}$	$880 \text{ Э}$	$H = 0$	
	$f_{\text{FMR}}, \text{ГГц}$ 3.52	$f_{\text{FMR}}, \text{ГГц}$ 3.64	$f_{\text{FMR}}$ 3.81	$f_{\text{FMR}}$ 3.95		
F <sub>1</sub>	$f$	3.6	3.55	3.6	3.6	3.61
	$T^-$	-8.6	-32	-11	-7	
	$T^+$	-17	-5	-6	-16	-12
	$\delta$	+8	-27	-5	-9	
F <sub>2</sub>	F	3.9	3.9	3.92	3.84	3.89
	$T^-$	-8	-8.5	-7	-5	
	$T^+$	-23	-21.5	-25	-32	-14
	$\delta$	+15	+12.5	+18	-27	
F <sub>3</sub>	$f$	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
	$T^-$	-9.5	-8.5	-9	-9	
	$T^+$	-24	-21	-25.5	-23	-16
	$\delta$	+14.5	+12.5	+16.5	+14	
F <sub>4</sub>	$f$	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6
	$T^-$	-5.5	-5.7	-6	-5	
	$T^+$	-19.5	-20	-22.5	-22	-13.5
	$\delta$	+14	+14.3	+16.5	+17	
F <sub>5</sub>	$f$	5	5	5	5	5
	$T^-$	-4.5	-5	-5	-5	
	$T^+$	-19.5	-19	-19	-21	-9.5
	$\delta$	+15	+14	+14	+16	

**Таблица 2.** Состояние интерферограммы (частота  $f$ , глубина  $T^-$  и  $T^+$ , невязанность  $\delta$ , ширина  $\nabla f$  полос запрета) при наложении  $H^+$  и  $H^- = 1000 \text{ Э}$  ( $V_{\text{DC}} = 0 \text{ В}$ ) и  $H^- = 1000 \text{ Э}$  ( $V_{\text{DC}} = 5$  и  $10 \text{ В}$ )

		0 В	5 В	10 В
F <sub>1</sub>	$f$	3.4	3.61	
	$T^-$	-14	-22	
	$T^+$	-11		
	$\delta$	-3		
	$\nabla f$		0.06	
F <sub>2</sub>	$f$	3.72	3.89	3.94
	$T^-$	-24	-24	-23
	$T^+$	-11		
	$\delta$	-13		
	$\nabla f$	0.024	0.21	0.04
F <sub>3</sub>	$f$	4.06	4.13	4.18
	$T^-$	-24	-24	-23
	$T^+$	-8		
	$\delta$	-16		
	$\nabla f$	0.01	0.11	0.13
F <sub>4</sub>	$f$	4.43	4.45	4.44
	$T^-$	27.5	-29	-27
	$T^+$	-6		
	$\delta$	-22		
	$\nabla f$	0.01	0.01	0.05

ющееся с изменением  $V_{\text{DC}}$ , зависит от взаимоположения ферромагнитного и дипольного резонансов. При сближении их частот возникает режим связанных резонансов и проявляется влияние  $V_{\text{DC}}$  на FMR.

При использовании метаструктуры ферритовая пластина + три нагруженных варакторами дважды разомкнутых магнито-возбуждаемых кольца появляется возможность электрического управления одной полосой, поскольку в кольцах возбуждается довольно узкий магнитный резонанс в отличие от диполя “Бабочка”. При подаче  $V_{\text{DC}}$  может меняться поочередно форма и ширина отдельной полосы  $F_i$  без смещения и изменения практически спектра других полос (рис. 4).

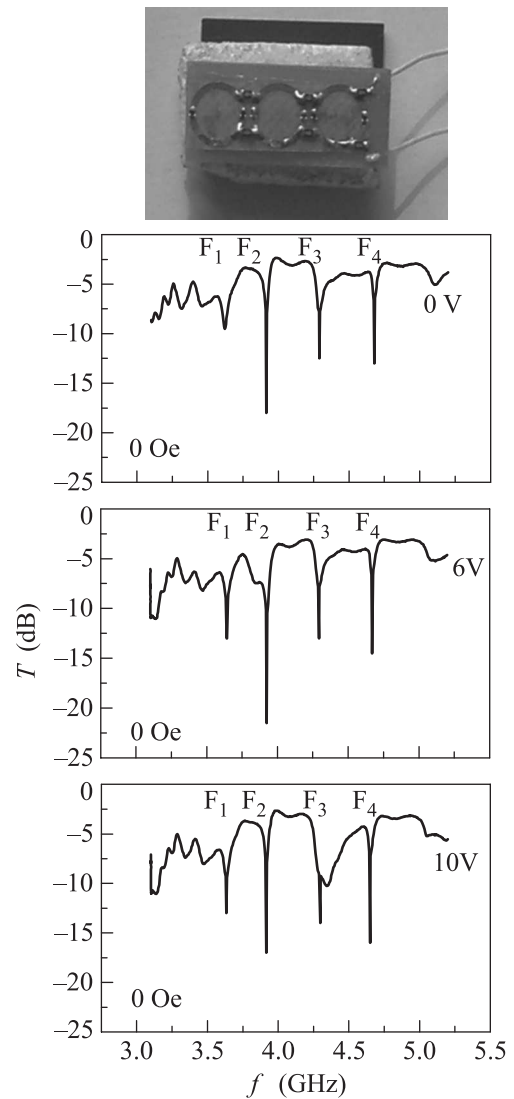


Рис. 4. (Цветной онлайн) Измеренные частотные зависимости коэффициента прохождения  $T$ , дБ с метаструктурой ферритовая пластина + ряд дважды разомкнутых колец,  $H = 0 \text{ Э}$ ;  $V_{\text{DC}} = 0; 6; 10 \text{ В}$

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 поиск среди большого разнообразия метаструктур более подходящих.

Влияние внешних факторов можно пояснить, вводя для описания метаструктуры S-матрицу с элементами  $S_{mn} = s_{mn} \exp(i\varphi_{mn})$ , модули  $|S_{mn}| = s_{mn}$  и фазы  $\varphi_{mn}$  которых могут зависеть от частоты излучения и параметров воздействующих магнитного поля и напряжения. Примем во внимание, что метаинтерферометр, по существу, является модификацией интерферометра Майкельсона в сочетании с интерферометром Фабри–Перо (переотражения между короткозамыкателем (*short*) и метаструктурой). Коэффициент отражения от короткозамыкателя (*short*)  $R = r \exp(i\varphi_R)$ ; далее  $\varphi_R = \pi$ .

Нетрудно получить нормированную амплитуду сигнала на выходе интерферометра (коэффициент передачи по амплитуде)

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

Здесь  $k_m = k'_m - ik''_m$  – волновое число  $m$ -го плеча интерферометра,  $L_m$  – путь, пройденный в нем излучением. В качестве примера рассмотрим ситуацию, когда в закороченном плече отражение от метаструктуры мало ( $|S_{33}| \ll 1$ ). В этом случае коэффициент передачи по мощности равен

$$|t|^2 = T = (s_{21} + s_{23}s_{31}r \exp(-2k''_3L_3))^2 - 4s_{21}s_{23}s_{31}r \exp(-2k''_3L_3) \cos^2 \Phi, \quad (2)$$

где  $\Phi - k'_3L_3 = (\varphi_{21} - \varphi_{31} - \varphi_{23})/2 = \delta\varphi/2$ . Из (2) следует, что при неизменных абсолютных величинах элементов S-матрицы у коэффициента передачи вблизи частот, удовлетворяющих условию

$$\omega n'_3(\omega)L_3/c + \delta\varphi(\omega, V_{DC}, H)/2 = \pi p, \quad (3)$$

могут наблюдаться минимумы, а вблизи частот, определяемых из

$$\omega n'_3(\omega)L_3/c + \delta\varphi(\omega, V_{DC}, H)/2 = \pi(p + 1/2), \quad (4)$$

– максимумы ( $p$  – целое число;  $n'_3$  – показатель замедления 3-го волновода;  $V_{DC}$ ,  $H$  – напряжение на варакторе и приложенное магнитостатическое поле).

При этом максимальные и минимальные значения  $T$ , соответственно, есть

$$T_{\max/\min} = [s_{21} \pm s_{23}s_{31}r \exp(-2k''_3L_3)]^2. \quad (5)$$

Из (1), (2) следует, что вид интерферограммы зависит от частотной дисперсии элементов S-матрицы и от воздействия на них внешних факторов (электрического напряжения на варакторах, включенных в мета-атомы, или магнитостатического поля на феррит). В рассмотренном примере отметим возможность смещения минимумов и максимумов, а также изменения контрастности интерференционной картины, определяемой отношением  $T_{\max}/T_{\min}$ , см. (3)–(5).

Таким образом, предложен метаинтерферометр, в котором достигнуто управление интерферограммой с помощью магнитного поля и электрического напряжения благодаря проявлению селективно управляемого не взаимного прохождения микроволн в интерференционных полосах запрета при воздействии ферромагнитного и дипольного резонансов на дисперсионные характеристики. Возможна роль магнитоэлектрических взаимодействий, проявление которых обнаруживается в виде зависимости магнитных свойств (не взаимности прохождения микроволн) от электрического поля, аналогично тому, как изменение угла фарадеевского вращения под действием электрического поля объясняется проявлением магнитоэлектрических взаимодействий в оптике [6].

Обнаружены особенности не взаимности прохождения микроволн, связанные с влиянием взаимоположения FMR и полосы запрета (усиление и смена знака не взаимности при возбуждении FMR вблизи полосы). Продемонстрировано селективное управление величиной и знаком не взаимности. Показано изменение знака не взаимности не путем перемагничивания, как обычно, а с помощью небольшого изменения величины поля, необходимого для изменения взаимоположения FMR и полосы запрета, что может повысить быстродействие. Продемонстрировано селективное электрическое управление не взаимным спектром (сужение и смещение полосы).

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

1. И. А. Устинова, А. А. Никитин, А. В. Кондрашов, Д. А. Попов, А. Б. Устинов, Е. Lähderanta, Письма в ЖТФ **42**(17), 20 (2016) [I. A. Ustinova, A. A. Nikitin, A. V. Kondrashov, D. Popov, A. Ustinov, and E. Lähderanta, Tech. Phys. Lett. **42**(9), 891 (2016)].
2. V. M. Muravev, A. A. Fortunatov, A. A. Dremin, and I. V. Kukushkin, Письма в ЖЭТФ **103**, 428 (2016) [V. M. Muravev, A. A. Fortunatov, A. A. Dremin, and

- I. V. Kukushkin, JETP Lett. **103**(6), 380 (2016)]; DOI: 10.7868/S0370274X16060035.
3. G. Kraftmakher, V. Butylkin, Yu. Kazantsev, and V. Mal'tsev, J. of Radioelectronics (ZHURNAL RADIOELEKTRONIKI) **9**, 1684 (2018); DOI: 10.30898/1684-1719.2018.9.19.
  4. X. S. Ma, S. Zotter, N. Tetic, A. Qarry, T. Jennewein, and A. Zellinger, Opt. Express **19**(23), 22723 (2011).
  5. M. P. Fok and J. Ge, Photonics **4**(4), 45 (2017); DOI: 10.3390/photonics4040045.
  6. А. П. Пятаков, А. К. Звездин, УФН **182**, 593 (2012) [A. P. Pyatakov and A. K. Zvezdin, Physics-Uspokhi **55**, 557 (2012)]; DOI:10.3367/UFNr.0182.201206b.0593.
  7. S. A. Tret'yakov, Topical Review, J. Opt. **19**, 013002 (2017); DOI:10.1088/2040-8986/19/1/013002.
  8. K. Entesari and G. M. Rebeiz, IEEE Trans. Microwave Theory Tech. **53**(3), 1103 (2005).
  9. В. С. Бутылкин, Г. А. Крафтмахер, Письма в ЖТФ **32**(17), 88 (2006) [V. S. Butylkin and G. A. Kraftmakher, Tech. Phys. Lett. **32**(9), 775 (2006)].
  10. I. Gil, J. Garcia-Garcia, J. Bonache, F. Martin, M. Sorolla, and R. Marques, Electron. Lett. **40**(21), 1347 (2004); DOI: 10.1049/el:20046389.
  11. H. Yuan, B. O. Zhu, and Y. Feng, J. of Appl. Phys. **117**(17), 173103 (2015); DOI: 10.1063/1.4919753.
  12. W. Wang, J. Wang, M. Yan, J. Wang, H. Ma, M. Feng, and Sh. Qu, J., Phys. D: Appl. Phys. **51**, 315001 (2018).
  13. D. Zhirihin, C. Simovski, P. Belov, and S. Glybovski, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters **16**, 2626 (2017); DOI: 10.1109/LAWP.2017.2736506.
  14. R. J. Cameron, C. M. Kudsia, and R. R. Mansour, *Microwave Filters for Communication Systems: Fundamentals, Design, and Applications*, 2-nd ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA (2018), p. 928.
  15. Y. J. Zhao, B. C. Zhou, Z. K. Zhang, R. Zhang, and B. Y. Li, Optoelectronics Letters **13**(2), 120 (2017); DOI: 10.1007/s11801-017-7008-7.
  16. A. R. Brown and G. M. Rebeiz, IEEE Trans Microwave Theory Tech. **48**(7), 1157 (2000); DOI: 10.1109/22.848501.
  17. A. Genc and R. Baktur, Microw. Opt. Technol. Lett. **51**(10), 2394 (2009); DOI: 10.1002/mop.24641.
  18. V. Butylkin, Yu. Kazantsev, G. Kraftmakher, and V. Mal'tsev, Appl. Phys. A **123**(1), 57 (2017); DOI: 10.1007/s00339-016-0705-4.
  19. D. Bensafieddine, F. Djerfaf, F. Chouireb, and D. Vincent, Appl. Phys. A: Materials Science & Processing **124**(9), 581 (2018); DOI: 10.1007/s00339-018-2004-8.
  20. N. Apaydin, K. Sertel, and J. L. Volakis, IEEE Trans. Antennas & Propag. **62**(6), 2954 (2014).
  21. F. A. Ghaffar, J. R. Bray, and A. Shamim, IEEE Trans. Antennas & Propag. **62**(3), 1238 (2014); DOI: 10.1109/TAP.2013.2295833.
  22. V. Rawat, S. Dhobale, and S. N. Kale, J. Appl. Phys. **116**(16), 164106 (2014).
  23. T. C. Tan, Y. K. Srivastava, M. Manjappa, E. Plum, and R. Sing, Appl. Phys. Lett. **112**(20), 201111 (2018).
  24. E. A. Brui, A. V. Shchelokova, A. V. Sokolov, A. P. Slobozhanyuk, A. E. Andreychenko, V. A. Fokin, P. A. Belov, and I. V. Melchakov, Письма в ЖЭТФ **108**(6), 445 (2018) [E. A. Brui, A. V. Shchelokova, A. V. Sokolov, A. P. Slobozhanyuk, A. E. Andreychenko, V. A. Fokin, P. A. Belov, and I. V. Melchakov, JETP Lett. **108**(6), 423 (2018)].
  25. D. A. Dobrykh, A. V. Yulin, A. P. Slobozhanyuk, A. N. Poddubny, and Yu. S. Kivshar, Phys. Rev. Lett. **121**, 163901 (2018); DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.163901.
  26. M. A. Gorlach, X. Ni, D. A. Smirnova, D. Korobkin, D. Zhirihin, A. P. Slobozhanyuk, P. A. Belov, A. Ali, and A. B. Khanikaev, Nat. Commun. **9**, 909 (2018); DOI: 10.1038/s41467-018-03330-9.