Письма в ЖЭТФ, том 109, вып. 4, с. 224 – 230

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

Г. А. Крафтмахер[1], *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 невзаимность прохождения микроволн в интерференционных полосах запрета, характеризуемая изменением коэффициента прохождения T при инверсии H. Невзаимность 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 невзаимности 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 невзаимной 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 невзаимных [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 невзаимных эффектов при воздействии ферромагнитного и дипольного резонансов на дисперсионные характеристики – селективно управляемой невзаимности 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

[1] e-mail: gkraft@ms.ire.rssi.ru

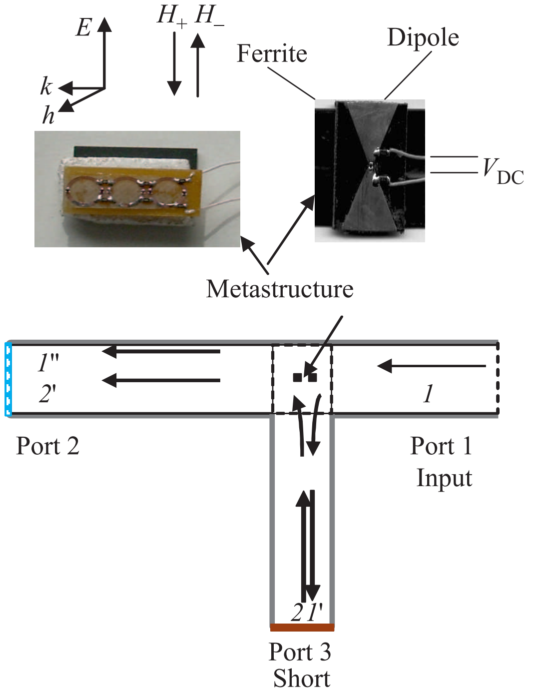

Рис. 1. (Цветной онлайн) Схема мета-интерферометра

h-плечо длиной 250 мм). Исследуются три разных разделителя пучка. Один из них – это ферритовая пластина железо- иттриевого граната ($21\times14\times2$ мм). Другим разделителем пучка является метаструктура в виде сэндвича ферритовая пластина + нагруженный варактором диполь "Бабочка" (22×10 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 MA46H120 (MACOM), 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 *1* (48×24 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 2a, b 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* $\mathrm{F_i}$, i – номер полосы) и широкими полосами прозрачности (*pass-bands* $\mathrm{P_i}$). 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 невзаимности прохождения T как в области FMR, так и в области полос $\mathrm{F_i}$. Для анализа воспользуемся параметром невзаимности $\delta=T(H^-)-T(H^+)$, определяемом как разность коэффициентов прохождения T при противоположных направлениях поля H.

На рисунке 2a приведены результаты измерений при $H_{1\mathrm{b}}=740$ Э, когда FMR возбуждается на частоте $f=3.52$ ГГц, вблизи полосы F_1 (3.619 ГГц) со стороны низких частот. В поле $H_{1\mathrm{b}}$ – прохождение T в полосе F_1 (-8.6 дБ) существенно больше, чем в поле $H_{1\mathrm{b}}+$ (-17 дБ). В этом случае параметр невзаимности $\delta\mathrm{FMR}=-10$ дБ, а параметры невзаимности $\delta\mathrm{F}_1^{1\mathrm{b}}=+8$, $\delta\mathrm{F}_2^{1\mathrm{b}}=+15$, $\delta\mathrm{F}_3^{1\mathrm{b}}=+14.5$, $\delta\mathrm{F}_4^{1\mathrm{b}}=+14$, $\delta\mathrm{F}_5^{1\mathrm{b}}=+15$ дБ. В обозначениях измеренных параметров невзаимности 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 $\delta\mathrm{F}_1^{2\mathrm{b}}$ означает, что речь идет о невзаимности в полосе F_1 при наложении поля, возбуждающего FMR вблизи полосы F_2, ниже частоты F_2 ("*below*", приписываем индекс "b"). Параметр $\delta\mathrm{F}_1^{2\mathrm{a}}$ означает, что речь идет о невзаимности в полосе F_1 при наложении поля, возбуждающего FMR вблизи полосы F_2, выше частоты F_2 ("*above*", приписываем индекс "a").

На рисунке 2b видно, что при $H_{1\mathrm{a}}=780$ 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 $H_{1\mathrm{a}}-$ (-32 дБ). При изменении знака H происходит скачок T до уровня полос прозрачности в поле $H_{1\mathrm{a}}+$. В этом случае наблюдается смена знака и увеличение невзаимности F_1 ($\delta\mathrm{F}_1^{1\mathrm{a}}=-27$ дБ) при небольшом сдвиге частоты, а также смена знака и уменьшение невзаимности FMR ($\delta\mathrm{FMR}=+1.1$ дБ). Невзаимность же остальных полос меняется незначительно ($\delta\mathrm{F}_2^{1\mathrm{a}}==+12.5$, $\delta\mathrm{F}_3^{1\mathrm{a}}=+12.5$, $\delta\mathrm{F}_4^{1\mathrm{a}}=+14$, $\delta\mathrm{F}_5^{1\mathrm{a}}=+14$ дБ). Аналогичные эффекты наблюдались при возбуждении FMR вблизи F_2, F_3, F_4, F_5. Например, когда FMR возбуждался при $H_{2\mathrm{b}}=830$ Э (ниже частоты F_2), невзаимность полос составляла $\delta\mathrm{F}_1^{2\mathrm{b}}=-5$,

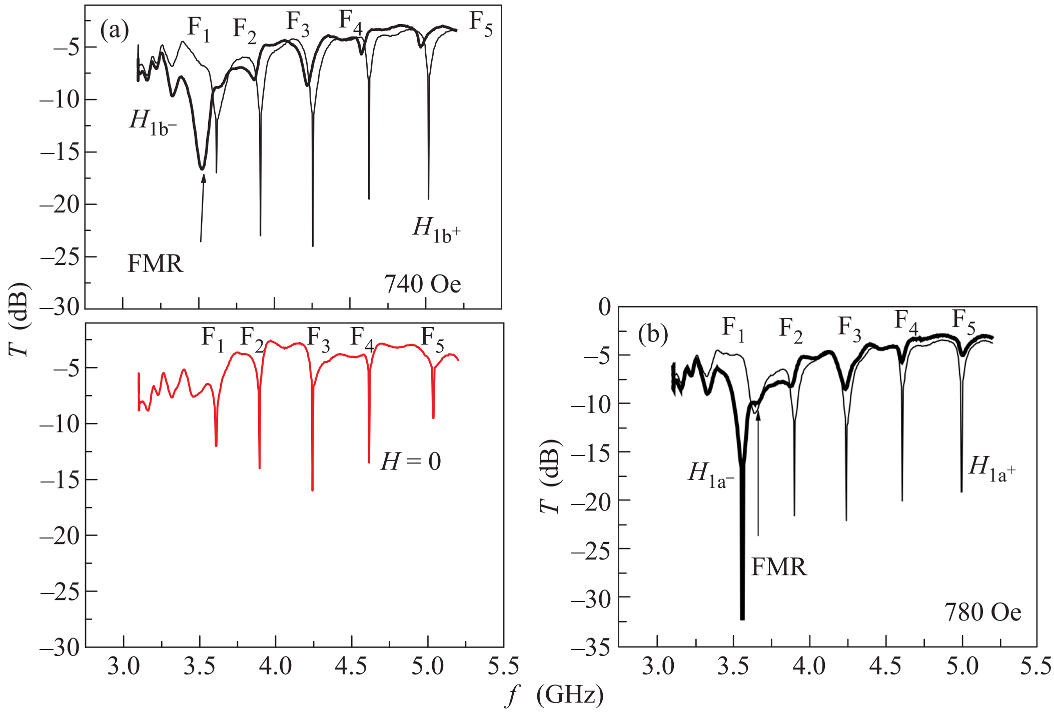

Рис. 2. (Цветной онлайн) Измеренные частотные зависимости коэффициента прохождения T, дБ при использовании ферритовой пластины в качестве разделителя пучка при разных величинах H^+, H^- (a, b): 740 Э в сравнении с $H = 0$ (a), 780 Э (b)

$\delta F_2^{2b} = +18$, $\delta F_3^{2b} = +16$, $\delta F_4^{2b} = +16$, $\delta F_5^{2b} = +14$ 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 δ 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 δ 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 δ. 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 3a 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 δ для полос F_i и усиление невзаимности T в полосе F_4. Действительно, прохождение T_{Fi} 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,

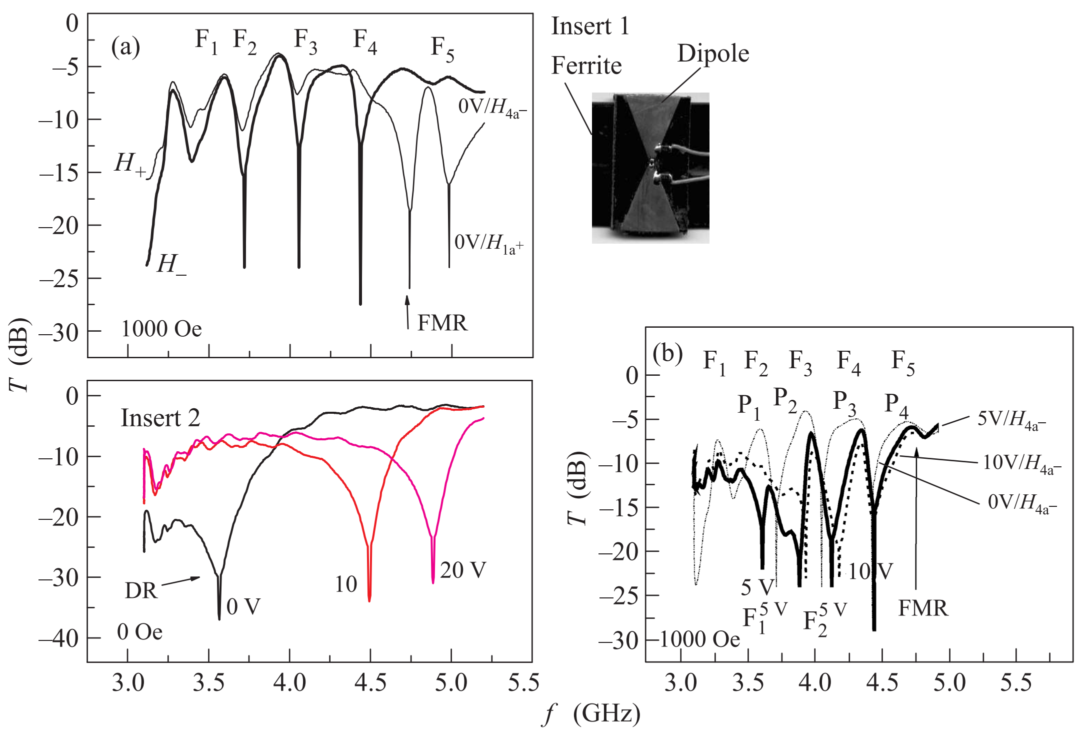

Рис. 3. (Цветной онлайн) Измеренные частотные зависимости коэффициента прохождения T, дБ с метаструктурой ферритовая пластина + диполь "Бабочка", $H = 1000$ Э: (a) – $V_{\mathrm{DC}} = 0$ В; H^+, H^-, вставка 1 (insert 1): фото метаструктуры (феррит + диполь), вставка 2 (insert 2): частотные характеристики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

$T_{\mathrm{F2}}(H_{4\mathrm{a}}+) = -11$ дБ; $T_{\mathrm{F3}}(H_{4\mathrm{a}}-) = -24$ дБ, $T_{\mathrm{F3}}(H_{4\mathrm{a}}+) = -8$ дБ; $T_{\mathrm{F4}}(H_{4\mathrm{a}}-) = -27.5$ дБ, $T_{\mathrm{F4}}(H_{4\mathrm{a}}+) = -6$ дБ. Невзаимность полос $\delta\mathrm{F}_1^{4\mathrm{a}} = -3$, $\delta\mathrm{F}_2^{4\mathrm{a}} = -13$, $\delta\mathrm{F}_3^{4\mathrm{a}} = -16$, $\delta\mathrm{F}_4^{4\mathrm{a}} = -22$ дБ.

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. 3a). 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. 3b в условиях $H_{4\mathrm{a}}- = 1000$ Э. С изменением V_{DC} меняется частота, глубина и ширина полос запрета. В таблице 2 приведены соответствующие данные при наложении напряжения $V_{\mathrm{DC}} = 0$, 5, 10 В. Частота полосы (f, ГГц) определяется частотой минимального прохождения $T_{\min}$, глубина – величиной $T_{\min}$, дБ, ширина (∇f, ГГц) – разностью частот в соответствующей полосе на уровне $T = -15$ дБ. В отсутствие напряжения ($V_{\mathrm{DC}} = 0$) полосы F_1, F_2, F_3, F_4 наблюдаются соответственно на частотах 3.4, 3.72, 4.06, 4.43 ГГц. При $V_{\mathrm{DC}} = 5$ В полоса F_1, углубляется и смещается на 0.21 ГГц к частоте $f(\mathrm{F}_1^{5\mathrm{V}}) = 3.61$ ГГц. При этом полоса F_2 расширяется и смещается на 0.17 ГГц к $f(\mathrm{F}_2^{5\mathrm{V}}) = 3.89$ ГГц, полоса F_3 расширяется и смещается незначительно на 0.07 ГГц к $f(\mathrm{F}_3^{5\mathrm{V}}) = 4.1$ ГГц, а полоса F_4 практически не смещается, $f(\mathrm{F}_4^{5\mathrm{V}}) = 4.45$ ГГц. Отметим, что в этом случае полосы запрета $\mathrm{F}_1^{5\mathrm{V}}$, $\mathrm{F}_2^{5\mathrm{V}}$, $\mathrm{F}_3^{5\mathrm{V}}$ занимают частотное положение полос прозрачности $\mathrm{P}_1^{0\mathrm{V}}$ $\mathrm{P}_2^{0\mathrm{V}}$ $\mathrm{P}_3^{0\mathrm{V}}$, соответствующее $V_{\mathrm{DC}} = 0$. При дальнейшем повышении напряжения ($V_{\mathrm{DC}} = 10$ В) существенно увеличивается прохождение T в полосе $\mathrm{F}_1^{10\mathrm{V}}$, полоса $\mathrm{F}_2^{10\mathrm{V}}$ сужается в несколько раз и незначительно смещается на 0.05 ГГц к $f(F_2^{10\mathrm{V}}) = 3.94$ ГГц, полоса $\mathrm{F}_3^{10\mathrm{V}}$ незначительно смещается на 0.05 ГГц к $f(\mathrm{F}_3^{10\mathrm{V}}) = 4.18$ ГГц, а полоса $\mathrm{F}_4^{10\mathrm{V}}$ практически остается без изменений. Таким образом, из табл. 2 и рис. 3a, b видно, что с изменением V_{DC} наблюдается синхронное, но неодинаковое, изменение формы, интенсивности, ширины, частоты нескольких полос $\mathrm{F_i}$ и переключение полос $\mathrm{F_i}$ на полосы $\mathrm{P_i}$. Состояние интерферограммы, меня-

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

		$H = 740$ Э f_{FMR}, ГГц 3.52	780 Э f_{FMR}, ГГц 3.64	830 Э f_{FMR} 3.81	880 Э f_{FMR} 3.95	$H = 0$
F_1	f	3.6	3.55	3.6	3.6	3.61
	T^-	−8.6	−32	−11	−7	
	T^+	−17	−5	−6	−16	−12
	δ	+8	−27	−5	−9	
F_2	F	3.9	3.9	3.92	3.84	3.89
	T^-	−8	−8.5	−7	−5	
	T^+	−23	−21.5	−25	−32	−14
	δ	+15	+12.5	+18	−27	
F_3	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
	δ	+14.5	+12.5	+16.5	+14	
F_4	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
	δ	+14	+14.3	+16.5	+17	
F_5	f	5	5	5	5	5
	T^-	−4.5	−5	−5	−5	
	T^+	−19.5	−19	−19	−21	−9.5
	δ	+15	+14	+14	+16	

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

		0 В	5 В	10 В
F_1	f	3.4	3.61	
	T^-	−14	−22	
	T^+	−11		
	δ	−3		
	∇f		0.06	
F_2	f	3.72	3.89	3.94
	T^-	−24	−24	−23
	T^+	−11		
	δ	−13		
	∇f	0.024	0.21	0.04
F_3	f	4.06	4.13	4.18
	T^-	−24	−24	−23
	T^+	−8		
	δ	−16		
	∇f	0.01	0.11	0.13
F_4	f	4.43	4.45	4.44
	T^-	27.5	−29	−27
	T^+	−6		
	δ	−22		
	∇f	0.01	0.01	0.05

ющееся с изменением V_{DC}, зависит от взаимоположения ферромагнитного и дипольного резонансов. При сближении их частот возникает режим связанных резонансов и проявляется влияние V_{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_{DC} может меняться поочередно форма и ширина отдельной полосы F_i без смещения и изменения практически спектра других полос (рис. 4).

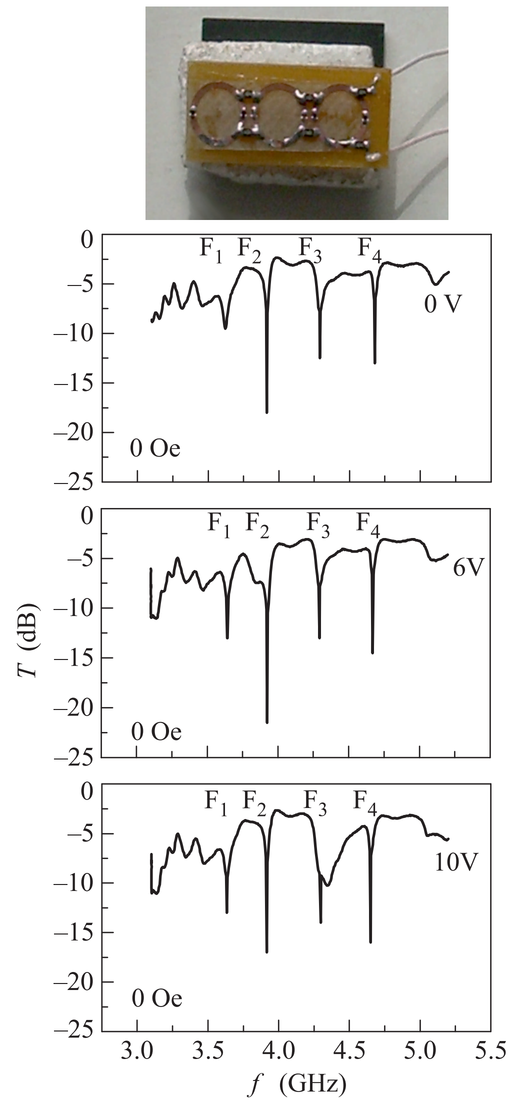

Рис. 4. (Цветной онлайн) Измеренные частотные зависимости коэффициента прохождения T, дБ с метаструктурой ферритовая пластина + ряд дважды разомкнутых колец, $H = 0$ Э: $V_{\text{DC}} = 0$; 6; 10 В

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 $S_{mn} = s_{mn}\exp(\mathrm{i}\varphi_{mn})$, модули $|S_{mn}| = s_{mn}$ и фазы φ_{mn} которых могут зависеть от частоты излучения и параметров воздействующих магнитного поля и напряжения. Примем во внимание, что мета-интерферометр, по существу, является модификацией интерферометра Майкельсона в сочетании с интерферометром Фабри–Перо (переотражения между короткозамыкателем (*short*) и метаструктурой). Коэффициент отражения от короткозамыкателя (*short*) $R = r\exp(\mathrm{i}\varphi_R)$; далее $\varphi_R = \pi$.

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

$$T = \left[S_{21} + \frac{S_{23}RS_{31}\exp(-2\mathrm{i}k_3L_3)}{1 - RS_{33}\exp(-2\mathrm{i}k_3L_3)}\right]\exp(-\mathrm{i}k_2L_2). \tag{1}$$

Здесь $k_m = k'_m - \mathrm{i}k''_m$ – 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

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

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

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

могут наблюдаться минимумы, а вблизи частот, определяемых из

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

– 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

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

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 мета-интерферометр, в котором достигнуто управление интерферограммой с помощью магнитного поля и электрического напряжения благодаря проявлению селективно управляемого невзаимного 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 (невзаимности 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 невзаимности прохождения микроволн, связанные с влиянием взаимоположения FMR и полосы запрета (усиление и смена знака невзаимности при возбуждении FMR вблизи полосы). Продемонстрировано селективное управление величиной и знаком невзаимности. Показано изменение знака невзаимности 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 невзаимным 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, E. 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-Uspekhi **55**, 557 (2012)]; DOI:10.3367/UFNr.0182.201206b.0593.
7. S. A. Tretyakov, 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 Sciemce & 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. Alü, and A. B. Khanikaev, Nat. Commun. **9**, 909 (2018); DOI: 10.1038/s41467-018-03330-9.