

07;13

Сверхвысокочастотный интерферометр на феррит-сегнетоэлектрической слоистой структуре

© И.А. Устинова¹, А.А. Никитин^{1,2,3}, А.В. Кондрашов^{1,2},
Д.А. Попов¹, А.Б. Устинов¹, E. Lähderanta²

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина), Россия

² Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland

³ Международная лаборатория „MultiferrLab“, университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: ustinovairin@yahoo.com

Поступило в Редакцию 12 апреля 2016 г.

Впервые разработан сверхвысокочастотный интерферометр на электромагнитно-спиновых волнах. Проведено теоретическое и экспериментальное исследование его характеристик. Интерферометр представляет собой мостовую схему, в одном из плеч которой содержится фазовращатель, изготовленный на основе планарной мультиферроидной структуры, состоящей из слоев феррита и сегнетоэлектрика. Устройство может рассматриваться как прототип электромагнитно-спиновой логики.

В последнее десятилетие значительно возрос интерес к исследованию феррит-сегнетоэлектрических или, как теперь их принято называть, искусственных мультиферроидных слоистых структур [1,2]. В таких структурах могут распространяться сверхвысокочастотные (СВЧ) гибридные электромагнитно-спиновые волны (ЭСВ) [3–6]. Интерес к искусственным мультиферроидным структурам вызван тем, что свойствами ЭСВ в них можно управлять как магнитным, так и электрическим полями смещения. Вследствие этого приборы, построенные на мультиферроидных структурах, обладают двойным магнитным и электрическим управлением. Преимущество электрического управления в сопоставлении с магнитным управлением состоит в том, что оно потенциально более быстрое и требует меньших затрат энергии.

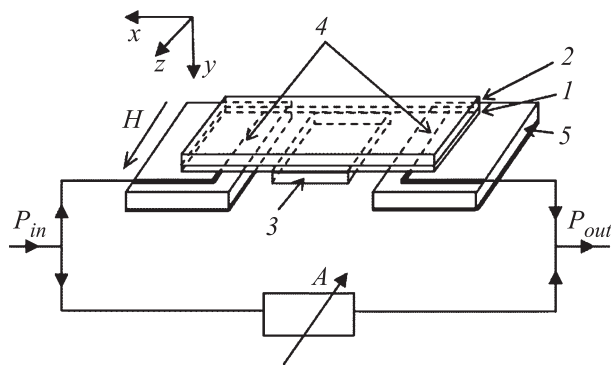


Рис. 1. Схематическое изображение феррит-сегнетоэлектрического интерферометра.

Одним из перспективных направлений применения мультиферроиков для обработки СВЧ-сигналов могут быть волноводные СВЧ-интерферометры, схема которых подобна интерферометру Маха—Цендера. Ранее по подобной схеме с использованием ферритовых пленок были созданы линейные спин-волновые интерферометры, которые при наличии обратной связи демонстрируют бистабильное поведение [7]. Линейные интерферометры явились также основой для создания спин-волновых логических элементов [8–10]. Нелинейные интерферометры были использованы для амплитудно-селективного подавления [11,12] и для нелинейного переключения радиоимпульсов [13]. Несмотря на то, что спин-волновые интерферометры известны сравнительно давно [7,11], интерес к их исследованиям не ослабевает до сих пор [14].

Целью настоящей работы является теоретическое и экспериментальное исследование СВЧ-интерферометра на основе феррит-сегнетоэлектрической (ФС) слоистой структуры. Его блок-схема приведена на рис. 1. Устройство имеет вид двухплечевой мостовой схемы. В первом плече интерферометра содержится ФС-фазовращатель. Он выполнен в виде волноведущей ФС-структуры, состоящей из нескольких слоев: ферромагнитной пленки 1, диэлектрической подложки 2 и сегнетоэлектрической пластины 3. Во второе плечо, называемое опорным, помещен переменный аттенюатор.

Рассмотрим кратко принцип действия ФС-интерферометра. Сверхвысокочастотный сигнал, поданный на вход, разделяется на два сигнала, которые распространяются в плечах интерферометра, приобретая разные фазовые набег. На выходе СВЧ-сигналы складываются и интерферируют. Интенсивность выходного сигнала зависит от их разности фаз. Аттенуатор служит для изменения соотношения между амплитудами сигналов, которые складываются на выходе интерферометра.

Фазовый набег СВЧ-сигнала в первом плече определяется в основном фазовым набегом спиновых и электромагнитно-спиновых волн (ЭСВ) в ФС-фазовращателе. Микрополосковые антенны 4 осуществляют возбуждение и прием спиновых волн (СВ) в ферромагнитной пленке. Возбужденная СВ бежит в сторону сегнетоэлектрической пластины и, достигая ее, входит в область мультиферроидной структуры, преобразуясь в ЭСВ. Эту область волноведущей структуры можно назвать активной частью устройства, так как именно в ней осуществляется управление фазовым набегом СВЧ-сигнала за счет изменения поляризации сегнетоэлектрического слоя. Пройдя мультиферроидную структуру, ЭСВ трансформируется обратно в СВ, которая затем принимается выходной антенной. Фаза сигнала на выходе фазовращателя зависит от величины напряженности электрического поля E , прикладываемого к сегнетоэлектрику. Фазовый набег СВЧ-сигнала во втором плече остается неизменным.

Построение теоретической модели описываемого интерферометра основывалось на законах дисперсии ЭСВ, распространяющихся в ФС-структуре [5], и СВ, распространяющихся в свободной ферромагнитной пленке [15]. Предполагалось, что мультиферроидная структура намагничена однородным магнитным полем H вдоль оси z , а ЭСВ распространяются в сторону, противоположную оси x (рис. 1). Такая ориентация поля соответствует распространению квазиповерхностных ЭСВ [4], причем максимум распределения поля лежит на границе раздела феррит-сегнетоэлектрик.

Фазовый набег СВЧ-сигнала в первом плече интерферометра рассчитывался как

$$\varphi_1 = k_{SW}d_{SW} + k_{SEW}d_{SEW} + \varphi_{01}, \quad (1)$$

где k_{SW} и k_{SEW} — волновые числа соответственно СВ и ЭСВ, d_{SW} и d_{SEW} — расстояния, пройденные соответственно СВ и ЭСВ, а φ_{01} —

фазовый набег в СВЧ-цепях первого плеча. Фазовый набег СВЧ-сигнала во втором плече обозначался как φ_2 .

Сегнетоэлектрик рассматривался в параэлектрической фазе как нелинейный диэлектрик с высокой диэлектрической проницаемостью. Поэтому изменение диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика при приложении к нему электрического поля E описывалось квадратичным законом

$$\varepsilon(E) = \varepsilon_1 - bE^2, \quad (2)$$

где ε_1 — диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика при $E = 0$, а b — феноменологический параметр, который зависит от материала сегнетоэлектрика и определяется экспериментально.

Мощность СВЧ-сигнала на выходе интерферометра рассчитывалась по стандартной формуле

$$P_{out} = P_{out1} + P_{out2} + 2\sqrt{P_{out1}P_{out2}} \cos(\Delta\varphi), \quad (3)$$

где P_{out1} и P_{out2} — мощности интерферирующих сигналов, а $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ — их разность фаз.

Моделирование характеристик интерферометра проводилось для различных параметров его конструкции. На рис. 2 показаны теоретические результаты, рассчитанные для случая экспериментальных параметров устройства: толщина ферритовой пленки $L_f = 5.2 \mu\text{m}$, ее намагниченность насыщения $4\pi M_S = 1750 \text{ G}$, диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_f = 14$, параметр диссипации $\Delta H = 0.5 \text{ Oe}$; толщина сегнетоэлектрической пластины $L_d = 200 \mu\text{m}$, тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta = 10^{-2}$, диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_1 = 2868$, коэффициент $b = 6.25 \text{ cm}^2/\text{kV}^2$; поле подмагничивания структуры $H = 754 \text{ Oe}$. В экспериментальном макете ФС-фазовращателя расстояние между антеннами составляло 6.75 mm , из которого $d_{SW} = 2.75 \text{ mm}$ и $d_{SEW} = 4 \text{ mm}$.

Дисперсионные характеристики ЭСВ в слоистой ФС-структуре, построенные с использованием дисперсионного уравнения [5] для различных значений ε , показаны на рис. 2, а. Как видно из рисунка, область сильной дисперсии ЭСВ для исследуемой структуры лежит в диапазоне волновых чисел $25\text{--}50 \text{ rad/cm}$. В этой области наблюдается высокая степень гибридизации СВ ферритовой пленки и ЭСВ сегнетоэлектрической пластины, поэтому в ней возникает сравнительно большое изменение фазового набегу ЭСВ при поляризации сегнетоэлектрика.

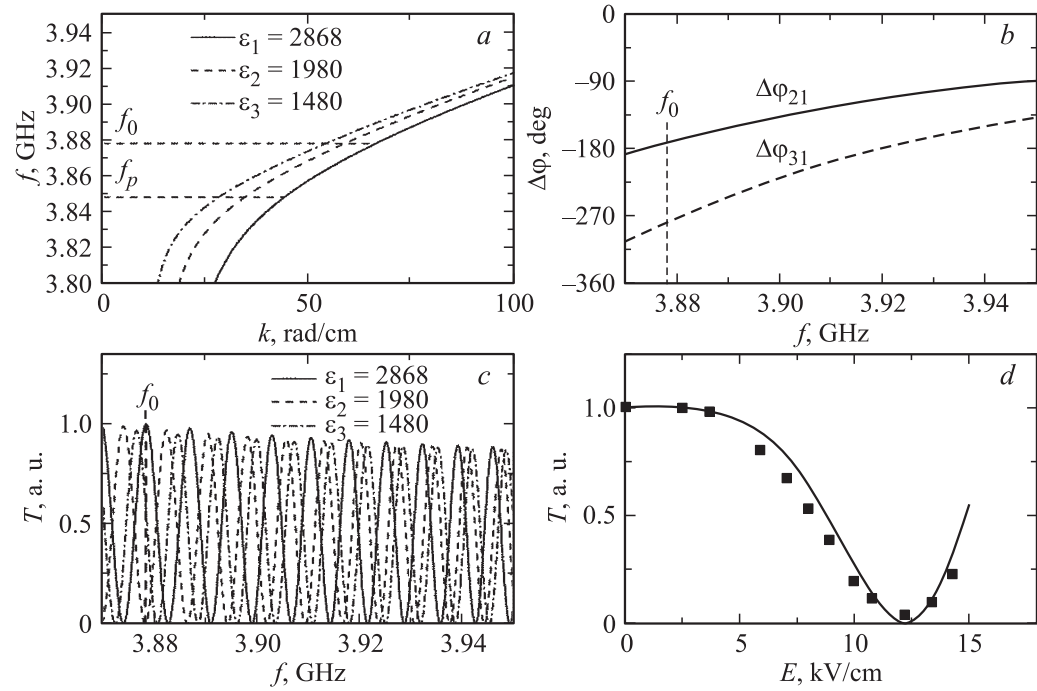


Рис. 2. Дисперсионные характеристики электромагнитно-спиновых волн в структуре феррит–сегнетоэлектрик при различных значениях диэлектрической проницаемости ε сегнетоэлектрика (*a*). Зависимость изменения разности фаз интерферирующих СВЧ-сигналов от частоты при уменьшении ε от $\varepsilon_1 = 2868$ до $\varepsilon_2 = 1980$ (сплошная линия) и от ε_1 до $\varepsilon_3 = 1480$ (пунктирная линия) (*b*). АЧХ интерферометра (*c*) и его коэффициент передачи на частоте $f_0 = 3.8785$ GHz как функция напряженности электрического поля смещения сегнетоэлектрика (*d*).

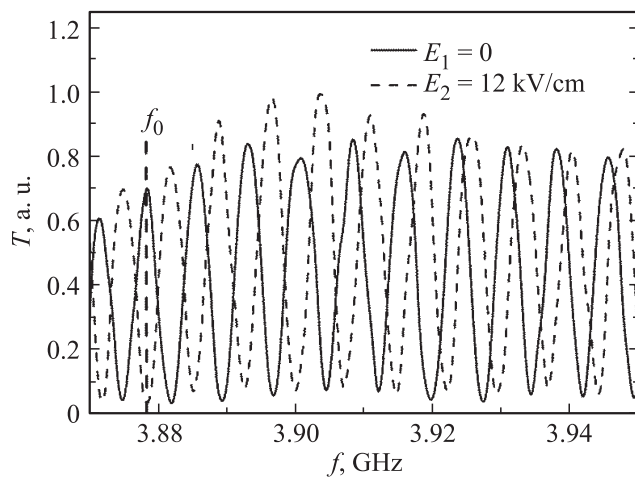


Рис. 3. Экспериментальные АЧХ феррит-сегнетоэлектрического интерферометра.

На графике отмечена частота f_p , соответствующая нижней границе спектра поверхностных СВ.

Изменение разности фаз интерферирующих сигналов, возникающее при поляризации сегнетоэлектрика, показано на рис. 2, *b*. Видно, что для принятых параметров изменение разности фаз может достигать 304° . На частоте $f_0 = 3.8785$ GHz приложение электрического поля $E_2 = 12$ kV/cm ведет к уменьшению диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от $\epsilon_1 = 2868$ до $\epsilon_2 = 1980$ в соответствии с формулой (2). При этом разность фаз интерферирующих сигналов изменяется на $\Delta\varphi_{21} = 180^\circ$. Если поле увеличить до $E_2 = 15$ kV/cm, то диэлектрическая проницаемость станет $\epsilon_3 = 1480$, а изменение разности фаз достигнет $\Delta\varphi_{31} = 278^\circ$ градусов. Изменение $\Delta\varphi$ приводит к сдвигу амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) интерферометра, как показано на рис. 2, *c*. Так, при $E = 0$ на частоте f_0 наблюдается максимум коэффициента передачи. Приложение поля E_2 приводит к такому сдвигу АЧХ вверх по частоте, что теперь на частоте f_0 наблюдается минимум коэффициента передачи. Дальнейшее увеличение поля ведет к дальнейшему сдвигу АЧХ. На рис. 2, *d* сплошной линией

приведена зависимость коэффициента передачи интерферометра от напряженности электрического поля E , прикладываемого к пластине сегнетоэлектрика, рассчитанная для частоты $f_0 = 3.8785$ GHz.

Результаты численных расчетов подтверждаются экспериментальными исследованиями. В экспериментальном макете фазовращателя (рис. 1) использовалась пластина сегнетоэлектрика 3, изготовленного из твердого раствора титаната бария-стронция. В качестве ферритового слоя 1 была использована монокристаллическая пленка железитриевого граната, эпитаксиально выращенная на подложке галлий-гадолиниевый граната 2. Для поляризации сегнетоэлектрической пластины на обе ее поверхности были нанесены хромовые электроды с толщиной много меньше глубины скин-слоя, оцененного для СВЧ-полей рабочей частоты. Благодаря малой толщине электроды не влияли на распространение ЭСВ в мультиферроидной структуре [16]. Микрополосковые антенны 4 имели длину 2 mm и ширину $50 \mu\text{m}$. Они запитывались микрополосковыми линиями передачи с волновым сопротивлением 50Ω . Описанная микрополосковая структура была сформирована на подложке из поликора 5 толщиной $500 \mu\text{m}$.

Результаты измерений АЧХ интерферометра приведены на рис. 3. По величине смещения АЧХ можно определить фазовый сдвиг электромагнитно-спиновых волн. Видно, что на частоте f_0 приложение $E_2 = 12$ kV/cm изменяет синфазную интерференцию на противофазную, что соответствует $\Delta\varphi_{21} = 180^\circ$. Экспериментальные значения нормированного коэффициента передачи на этой частоте при различных напряженностях электрического поля E показаны точками на рис. 2, d. Таким образом, полученные результаты подтверждают адекватность разработанной теоретической модели феррит-сегнетоэлектрического интерферометра.

Из проведенного исследования следует, что разработка ФС-интерферометров открывает широкие возможности для построения на их основе электромагнитно-спиновых логических элементов. По аналогии со спин-волновыми логическими элементами, управляемыми током [8–10], возможна реализация таких электрически управляемых логических функций, как И–НЕ, исключающее ИЛИ–НЕ и др. В частности, из характеристики передачи, показанной на рис. 2, d, ясно, что разработанный в настоящей работе ФС-интерферометр представляет собой логический элемент, выполняющий логическую операцию НЕ.

Кроме логических элементов предложенная интерференционная схема может найти различные области применения. В качестве примеров можно назвать модуляторы СВЧ-сигналов, ячейки для измерения параметров ферритовых и сегнетоэлектрических материалов и др.

Авторы выражают свою благодарность Б.А. Калиникосу за обсуждение работы.

Теоретическая часть работы выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 16-12-10440), а экспериментальная — при частичной поддержке РФФИ (гранты № 14-02-00496 А, 15-32-20357 мол_а_вед), Министерства образования и науки РФ (проект „Госзадание“ и грант 074-U01), а также Academy of Finland.

Список литературы

- [1] *Vopson M.M.* // Critic. Rev. Solid State Mater. Sci. 2015. V. 40. N 4. P. 223–250.
- [2] *Vaz C.A.F.* // J. Phys.: Condens. Matter. 2012. V. 24. N 33. P. 333 201.
- [3] *Анфиногенов В.Б., Вербицкая Т.Н., Гуляев Ю.В.* и др. // Радиотехника и электроника. 1988. Т. 30. № 7. С. 2032–2039.
- [4] *Demidov V.E., Kalinikos B.A., Edenhofer E.* // J. Appl. Phys. 2002. V. 91. N 12. P. 10 007.
- [5] *Nikitin A.A., Ustinov A.B., Vitko V.V.* et al. // J. Appl. Phys. 2015. V. 118. N 18. P. 183 901.
- [6] *Sadovnikov A.V., Beginin E.N., Bublikov K.V.* et al. // J. Appl. Phys. 2015. V. 118. N 20. P. 203 906.
- [7] *Fetisov Y.K., Patton C.E.* // IEEE Trans. Magn. 1999. V. 35. N 2. P. 1024–1036.
- [8] *Kostylev M.P., Serga A.A., Schneider T.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 87. P. 153 501.
- [9] *Vasiliev S.V., Kruglyak V.V., Sokolovskii M.L., Kuchko A.N.* // J. Appl. Phys. 2007. V. 101. N 11. P. 113 919.
- [10] *Khitun A., Bao M., Wang K.L.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. V. 43. P. 264 005.
- [11] *Устинов А.Б., Калиникос Б.А.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 10. С. 20–25.
- [12] *Ustinov A.B., Kalinikos B.A.* // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. P. 252 510.
- [13] *Ustinov A.B., Kalinikos B.A.* // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 172 511.
- [14] *Rousseau O., Rana B., Anami R.* et al. // Scientific Rep. 2015. V. 5. Art. N 9873.
- [15] *Damon R.W., Eshbach J.R.* // J. Phys. Chem. Sol. 1961. V. 19. P. 308–320.
- [16] *Ustinov A.B., Srinivasan G., Kalinikos B.A.* // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. N 3. P. 031 913.