

*Устинова И.А., Никитин А.А., Устинов А.Б.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»*

Теоретическое исследование сверхвысокочастотного интерферометра на основе феррит-сегнетоэлектрической слоистой структуры

Разработана теоретическая модель сверхвысокочастотного интерферометра на электромагнитно-спиновых волнах. Проведено моделирование его рабочих характеристик. Интерферометр представляет собой мостовую схему, в одном из плеч которой содержится фазовращатель на основе мультиферроидной структуры, состоящей из слоев феррита и сегнетоэлектрика. Показано, что исследуемый интерферометр является прототипом электромагнитно-спиновой логики.

Ключевые слова: Электромагнитно-спиновые волны, мультиферроники, слоистые феррит-сегнетоэлектрические структуры.

В последнее десятилетие значительно возрос интерес к исследованию феррит-сегнетоэлектрических (ФС) или, как теперь их принято называть, искусственных мультиферроидных слоистых структур [1,2]. В таких структурах могут распространяться сверхвысокочастотные (СВЧ) гибридные электромагнитно-спиновые волны (ЭСВ) [3,4]. Интерес к искусственным мультиферроидным структурам вызван тем, что дисперсионными свойствами ЭСВ являются управляемыми 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 скорости перестройки и меньших затратах энергии.

Одним из перспективных направлений применения мультиферроиков для обработки СВЧ сигналов являются волноводные СВЧ-интерферометры, схема которых подобна интерферометру Маха-Цендера. Ранее на основе такой схемы с использованием ферритовых пленок были созданы линейные спин-волновые интерферометры, демонстрирующие бистабильное поведение при наличии обратной связи демонстрируют [5]. Линейные интерферометры явились также основой для создания спин-волновых логических элементов [6]. Нелинейные спин-волновые интерферометры были использованы для амплитудно-селективного подавления [7] и нелинейного переключения радиоимпульсов [8]. Несмотря на то, что спин-волновые интерферометры известны сравнительно давно, интерес к их исследованиям не ослабевает до сих пор [9].

Целью настоящей работы является теоретическое исследование СВЧ-интерферометра на основе феррит-сегнетоэлектрической 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 набеги. На выходе СВЧ-сигналы складываются и интерферируют. Интенсивность выходного сигнала зависит от их разности фаз. Атенюатор 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 в ФС-фазовращателе. Микрополосковые антенны (4) нанесенные на диэлектрическую подложку (5) выполняют функции возбуждения и приема спиновых волн (СВ) в ферромагнитной пленке. Возбужденная СВ распространяется 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 путем изменения поляризации сегнетоэлектрического слоя. После мультиферроидной структуры ЭСВ трансформируется обратно в СВ, которая принимается выходной микрополосковой 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.

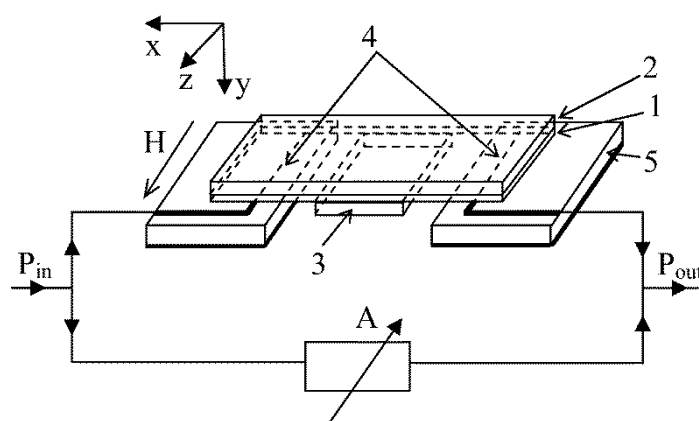


Рис. 1. Схематическое изображение феррит-сегнетоэлектрического интерферометра.

Теоретическая модель описываемого интерферометра основана на законах дисперсии ЭСВ, распространяющихся в ФС структуре [4], и СВ в свободной ферромагнитной пленке [10]. Предполагалось, что мультиферроидная структура намагничена однородным магнитным полем H вдоль оси z , а ЭСВ распространяются в сторону, противоположную оси x (см. рис. 1). Такая ориентация поля соответствует распространению квази-поверхностных ЭСВ, 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 СВ и ЭСВ, соответственно, d_{SW} и d_{SEW} – расстояния, пройденные СВ и ЭСВ, соответственно, 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. Изменение диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика при приложении к нему электрического поля E описывалось квадратичным законом

$$\varepsilon(E) = \varepsilon(E_1) - bE^2, \quad (2)$$

где $\varepsilon(E_1)$ – диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика при $E_1 = 0$, 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 следующих параметров устройства: толщина ферритовой пленки $L_f = 5.2$ мкм, ее намагниченность насыщения $4\pi M_S = 1750$ Гс, диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_f = 14$, параметр диссипации $\Delta H = 0.5$ Э; толщина сегнетоэлектрической пластины $L_d = 200$ мкм, тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta = 10^{-2}$, диэлектрическая проницаемость $\varepsilon(E_1) = 2868$, коэффициент $b = 6.25$ см²/кВ²; поле подмагничивания структуры $H = 754$ Э. В экспериментальном макете ФС-фазовращателя расстояние между антеннами составляло 6.75 мм, из которого $d_{SW} = 2.75$ мм и $d_{SEW} = 4$ мм.

Дисперсионные характеристики ЭСВ в слоистой ФС структуре, построенные с использованием дисперсионного уравнения [5] для различных значений напряженности электрического поля E , показаны на рис. 2,а. Как видно из данного рисунка, область сильной дисперсии ЭСВ для исследуемой структуры лежит в диапазоне волновых чисел 25–50 рад/см. В этой области наблюдается высокая степень гибридизации СВ в ферритовой пленке и электромагнитных волн в сегнетоэлектрической пластине, вследствие чего возникает сравнительно большое изменение фазового набега ЭСВ при поляризации сегнетоэлектрика. На графике отмечена частота f_p , соответствующая нижней границе спектра поверхностных СВ.

Изменение разности фаз интерферирующих сигналов, возникающее при поляризации сегнетоэлектрика, как показано на рис. 2,б. Видно, что для принятых параметров изменение разности фаз может достигать 304 градусов. На частоте $f_0 = 3.8785$ ГГц увеличение приложенного электрического поля с $E_1 = 0$ до $E_2 = 12$ кВ/см ведет к уменьшению диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от $\varepsilon(0) = 2868$ до $\varepsilon(E_2) = 1980$, рассчитанной в соответствии с формулой (2). При этом разность фаз интерферирующих сигналов изменяется на $\Delta\varphi_{21} = 180$ градусов. При увеличении поля до $E_3 = 15$ кВ/см диэлектрическая проницаемость уменьшается до $\varepsilon(E_3) = 1480$, а изменение разности фаз достигнет $\Delta\varphi_{31} = 278$ градусов. Изменение $\Delta\varphi$ приводит к сдвигу амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) интерферометра, как показано на рис. 2,с. Так, при $E_1 = 0$ на частоте f_0 наблюдается максимум коэффициента передачи. Приложение поля E_2 приводит сдвигу АЧХ вверх по частоте таким образом, что на частоте f_0 наблюдается минимум коэффициента передачи. Дальнейшее увеличение поля ведет к большему сдвигу АЧХ. На рис. 2,д сплошной линией приведена зависимость коэффициента передачи интерферометра от напряженности электрического поля E , прикладываемого к пластине сегнетоэлектрика, рассчитанная для частоты $f_0 = 3.8785$ ГГц.

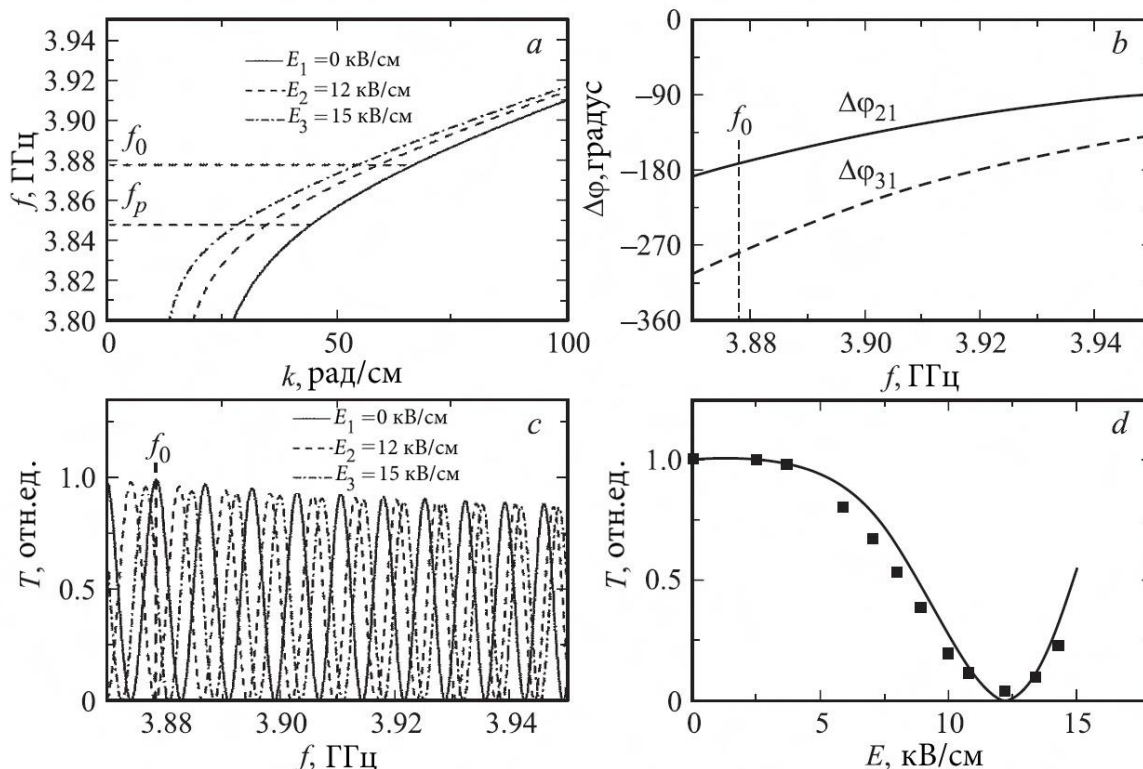


Рис. 2. Дисперсионные характеристики ЭСВ в структуре феррит-сегнетоэлектрик при различных значениях напряженности электрического поля E (a). Зависимость изменения разности фаз интерферирующих СВЧ-сигналов от частоты при приложении электрического поля $E_2 = 12$ кВ/см (сплошная линия) и $E_3 = 15$ кВ/см (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).

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, возможна реализация таких электрически управляемых логических функций, как И-НЕ, исключаящее 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.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ (НШ-9296.2016.2).

Библиографический список

1. M.M. Vopson Fundamentals in multiferroic materials and their possible applications // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 2015. – Vol. 40. N. 4. P. 223-250.
2. C.A.F. Vaz Electric field control of magnetism in multiferroic heterostructures // J. Phys.: Condens. Matter, 2012. – Vol. 24. N. 33. P. 333201.

3. В.Б. Анфиногенов, Т.Н. Вербицкая, Ю.В. Гуляев, П.Е. Зильберман, С.В. Мериакри, Ю.Ф. Огрин, В.В. Тихонов Гибридные электромагнитно-спиновые волны в контактирующих слоях феррита и сегнетоэлектрика // Радиотехника и Электроника. 1988. – Т. 30. №. 7. С. 2032-2039.
4. A.A. Nikitin, A.B. Ustinov, V.V. Vitko, A.A. Semenov, P.Yu. Belyavskiy, I.G. Mironenko, A.A. Stashkevich, B.A. Kalinikos, E. Lähderanta Dispersion characteristics of spin-electromagnetic waves in planar multiferroic structures // J. Appl. Phys. 2015. – Vol. 118. N. 18. P. 183901.
5. Y.K. Fetisov, C.E. Patton Microwave bistability in a magnetostatic wave interferometer with external feedback // IEEE Trans. on Magnetics. 1999. – Vol. 35. N. 2. P. 1024-1036.
6. M.P. Kostylev, A.A. Serga, T. Schneider, B. Leven, B. Hillebrands Spin waves logic gates // Appl. Phys. Lett. – 2005. Vol. 87. P. 153501.
7. А.Б. Устинов, Б.А. Калиникос Нелинейный спин-волновой сверхвысокочастотный интерферометр // Письма в ЖТФ. – 2001. Т. 27. Вып. 10. С. 20-25.
8. A.B. Ustinov, B.A. Kalinikos Power-dependent switching of microwave signals in a ferrite-film nonlinear directional coupler // Appl. Phys. Lett. – 2006. Vol. 89. P. 172511.
9. O. Rousseau, B. Rana, R. Anami, M. Yamada, K. Miura, S. Ogawa, Y. Otani Realization of a micrometer-scale spin-wave interferometer // Scientific reports. – 2015. Vol. 5. Article number 9873.
10. R.W. Damon, J.R. Eshbach Magnetostatic modes of a ferromagnet slab // J. Phys. Chem. Sol. – 1961. Vol. 19. P. 308-320.