

*Никитин Ан.А., Никитин Ал.А.,
Устинов А. Б., Калинин Б. А.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»*

Спин-волновой интерферометр на основе тонкопленочной мультиферроидной структуры

Предложен и описан новый интерферометр типа Маха-Цендера на основе тонкопленочной мультиферроидной структуры феррит-сегнетоэлектрик-феррит. Отличительными особенностями предлагаемого интерферометра являются высокая эффективность и малые размеры по сравнению с другими спин-волновыми логическими элементами.

Ключевые слова: интерферометр, фазовращатель, мультиферроники, электромагнитно-спиновые волны.

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к изучению перестраиваемых логических элементов для их применения в современных информационных и телекоммуникационных системах. Существуют различные способы реализации таких элементов, включающие использование комплементарной металл-оксид-полупроводниковой (КМОП) структуры [1], а также оптических [2], молекулярных [3] или магнетонных [4] структур. Последний способ недавно стал активно рассматриваться в качестве замены стандартной КМОП технологии вследствие более эффективного механизма обработки информации [5] - [7]. Принцип работы магнетонных логических элементов заключается в том, что квант спиновой волны выполняет функции заряда в традиционной электронике [5], [8]. Такой подход позволяет передавать и обрабатывать информацию с учетом особенностей спин-волновых явлений. К существующим недостаткам магнетонных логических элементов, препятствующим их широкому распространению в современной микроэлектронике, можно отнести размеры и недостаточно эффективное энергопотребление устройств на их основе. Для устранения перечисленных недостатков мы предлагаем новую конструкцию миниатюрного перестраиваемого интерферометра Маха-Цендера на основе тонкопленочной структуры феррит-сегнетоэлектрик-феррит.

Схематический вид исследуемого интерферометра Маха-Цендера показан на рис. 1.а. Он состоит из двух плечей. В первом плече находится перестраиваемый фазовращатель на основе тонкопленочной мультиферроидной структуры феррит-сегнетоэлектрик-феррит, а во втором плече – аттенюатор. Рассмотрим подробнее принцип работы фазовращателя, который представляет собой тонкопленочную многослойную структуру, состоящую из двух слоев феррита (2) и (4), разделенных сегнетоэлектрической пленкой (3) (см. Рис.1.б). В качестве ферритовых волноводов были выбраны пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) на диэлектрических подложках (1), намагниченные до насыщения вдоль оси z . В качестве сегнетоэлектрической пленки были выбраны пленки твердого раствора титаната бария-стронция $Ba_{0,5}Sr_{0,5}TiO_3$ (БСТ).

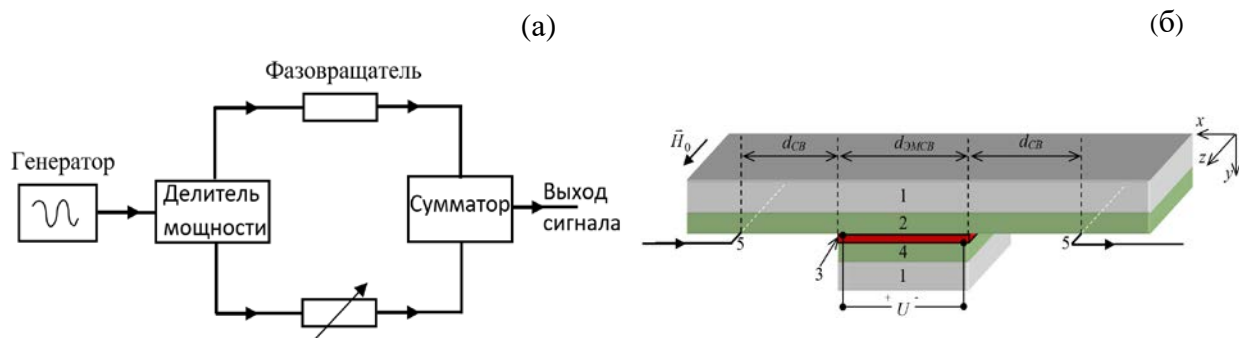


Рис. 1. Схема интерферометра (а); схема тонкопленочного фазовращателя на структуре феррит-сегнетоэлектрик-феррит (б).

Рассмотрим принцип работы интерферометра. СВЧ сигнал подается на вход и равномерно делится между двумя плечами, как показано на Рис.1.а. В первом плече СВЧ сигнал подается в тонкопленочный мультиферроидный фазовращатель (см. Рис.1.б). Микрополосковая антенна (5) возбуждает спиновую волну в пленке ЖИГ (2), которая, пройдя короткое расстояние, попадает в мультиферроидную структуру, образованную тонкопленочной структурой ЖИГ-БСТ-ЖИГ (2-3-4). На границе этой области спиновая волна преобразуется в электромагнитно-спиновую волну. После прохождения слоистой структуры электромагнитно-спиновая волна попадает в пленку ЖИГ, в которой она преобразуется обратно в спиновую волну и принимается выходной микрополосковой антенной. На выходе интерферометра сигналы от разных плечей складываются. Мощность выходного сигнала рассчитывается следующим образом

$$P_{вых} = P_{вых1} + P_{вых2} + 2\sqrt{P_{вых1}P_{вых2}} \cos(\varphi_2 - \varphi_1), \quad (1)$$

где $P_{вых1}$, φ_1 и $P_{вых2}$, φ_2 мощность и фазовый набег на выходе из первого и второго плеча соответственно. Набег фазы в первом плече определяется следующим образом:

$$\varphi_1 = k_{CB}d_{CB} + k_{ЭМСВ}d_{ЭМСВ} + \varphi_0, \quad (2)$$

где k_{CB} и $k_{ЭМСВ}$ - волновые числа спиновых и электромагнитно-спиновых волн соответственно, d_{CB} и $d_{ЭМСВ}$ являются длинами участка свободной пленки ЖИГ и структуры ЖИГ-БСТ-ЖИГ (см. рис.1.б), а φ_0 - набег фазы в остальных цепях схемы, который предполагается равным φ_2 . Волновые числа спиновых волн (k_{CB}) были найдены в соответствии с известным дисперсионным соотношением для поверхностных спиновых волн [9]. Волновые числа электромагнитно-спиновых волн ($k_{ЭМСВ}$) в структурах феррит-сегнетоэлектрик-феррит могут быть получены в соответствии с теоретической моделью, описывающей волновые процессы в тонкопленочных многослойных мультиферроиках [10].

Численное моделирование передаточных характеристик интерферометра проводилось с использованием рассмотренной теоретической модели. Для расчетов использовались типичные параметры экспериментальных мультиферроидных структур на основе пленок ЖИГ и БСТ. В частности, расстояние между микрополосковыми антеннами составляло 3,75 мм, при этом $d_{CB} = 2,75$ мм и $d_{ЭМСВ} = 1$ мм. Толщины верхней и нижней пленок ЖИГ составляли $L_2 = 6$ мкм и $L_4 = 20$ мкм соответственно. Эти материалы имели

намагниченности насыщения $M_2 = 1713$ Гс и $M_4 = 1750$ Гс и диэлектрические проницаемости $\epsilon_2 = \epsilon_4 = 14$. Внешнее магнитное поле H составляло 1500 Э. Для описания зависимости диэлектрической проницаемости пленки БСТ от внешнего электрического поля использовалась модель, представленная в работе [11], со следующими параметрами: $\epsilon_3(0) = 1500$, $E_n = 40$ В/мкм и $\epsilon_{00} = 300$. Толщина пленки БСТ составляла $L_3 = 1$ мкм.

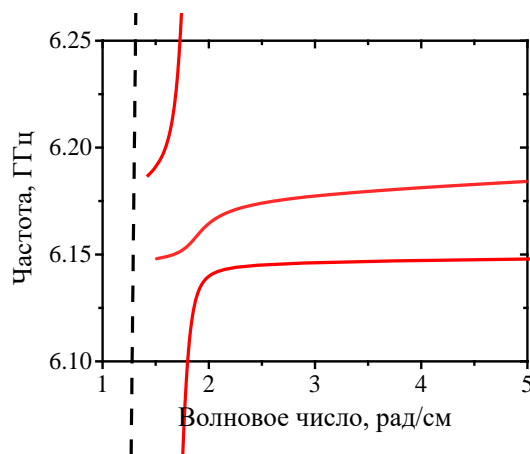


Рис. 2. Спектр гибридных электромагнитно-спиновых волн (сплошные линии). Пунктирная линия представляет зависимость $\omega = ck$, где c – скорость света в вакууме.

Выбранные параметры слоев обеспечивали двойную гибридизацию электромагнитно-спиновых волн, происходящую в результате пересечения двух спин-волновых мод в пленках ЖИГ с электромагнитной модой TE_1 в диэлектрической структуре на основе пленки БСТ (см. Рис.2) [12]. Полученный спектр состоит из трех дисперсионных ветвей. Сильное расталкивание дисперсионных ветвей электромагнитно-спиновых волн в результате магнитодипольного взаимодействия обеспечивает значительно снижение групповой скорости нижней дисперсионной ветви, что усиливает эффективность электрической перестройки волновых чисел в относительно узкой полосе частот.

На рисунке 3.а показана нижняя ветвь электромагнитно-спиновой волны, рассчитанная для $U = 0$ В (сплошная линия) и $U = 6,57$ В (пунктирная линия). Частотная зависимость фазового сдвига, возникающего в структуре феррит-сегнетоэлектрик-феррит длиной 1 мм при приложении напряжения $U = 6,57$ В, показана на Рис. 3.б. Как видно, управляющее напряжение обеспечивает фазовый сдвиг СВЧ сигнала более 180 градусов. На рисунке 3.в показана передаточная характеристика интерферометра на структуре феррит-сегнетоэлектрик-феррит длиной 1 мм. Как видно, передаточная характеристика состоит из полос пропускания и загораживания. В случае нулевого напряжения один из максимумов наблюдается на частоте $f_0 = 6,1522$ ГГц (сплошная линия Рис.3.в). Приложение управляющего напряжения к тонким электродинамически-прозрачным металлическим электродам, расположенным на обеих поверхностях сегнетоэлектрической пленки, приводит к изменению фазового набега СВЧ-сигнала в первом плече интерферометра, а следовательно, к перестройке его передаточной характеристики. Так, приложение напряжения 6,57 В обеспечивает фазовый сдвиг π радиан на частоте 6.1521 ГГц, вследствие чего на этой частоте выполняется условие противофазной интерференции, что обеспечивает полосу загораживания (пунктирная линия Рис 3.в).

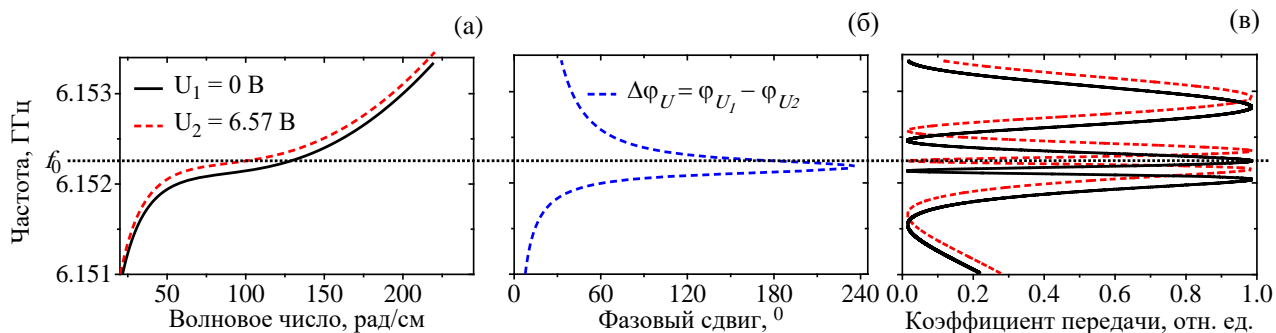


Рис. 3. Нижняя ветвь гибридных электромагнитно-спиновых волн в структуре феррит-сегнетоэлектрик-феррит при различных значения управляющего напряжения (а), фазовый сдвиг, возникающий при приложении напряжения 6,57 В к пленке сегнетоэлектрика (б) и передаточная характеристика интерферометра при различных значения управляющего напряжения (в).

Возможное ограничение применения предложенной конструкции интерферометра, связано с узкой полосой частот, в которой происходит эффективная электрическая перестройка. Частотный диапазон может быть значительно расширен путем изменения внешнего магнитного поля. Так, изменение магнитного поля в диапазоне от 500 Э до 2500 Э позволяет реализовать высокоэффективную электрическую настройку для любой желаемой частоты в диапазоне от 3 до 9 ГГц.

Таким образом, использование тонкопленочных структур феррит-сегнетоэлектрик-феррит приводит не только к миниатюризации интерферометра Маха-Цендера, но и позволяет снизить управляющее напряжение, необходимое для изменения его состояния.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (Грант № 14-12-01296-Р).

Библиографический список

1. M. A. A. Hafiz, L. Kosuru, and M. I. Younis, "Microelectromechanical reprogrammable logic device," *Nature communications*, vol. 7, p. 11137, Mar. 2016.
2. V. Ferlet-Cavrois, L. W. Massengill, and P. Gouke, "Single event transients in digital CMOS—A review," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 60(3), pp. 1767-1790, Jun. 2013.
3. Q. Xu and R. Soref, "Reconfigurable optical directed-logic circuits using microresonator-based optical switches," *Optics Express*, vol. 19(6), pp. 5244-5259, Mar. 2011.
4. H. Sun, J. Ren, and X. Qu. "Carbon nanomaterials and DNA: From molecular recognition to applications." *Accounts of chemical research*, vol. 49(3), pp. 461-470, Mar. 2016.
5. A. Khitun, M. Bao, and K. L. Wang, "Magnonic logic circuits," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 43(26), p. 264005, Jul. 2010.
6. A. Khitun, M. Bao, and K. L. Wang, "Spin wave magnetic nanofabric: A new approach to spin-based logic circuitry," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44(9), pp. 2141-2152, Aug. 2008.
7. A. V. Chumak, A. A. Serga, and B. Hillebrands. "Magnon transistor for all-magnon data processing," *Nature communications*, vol. 5, p. 4700, Aug. 2014.
8. G. Csaba, A. Papp, and W. Porod. "Perspectives of using spin waves for computing and signal processing," *Physics Letters A*, vol. 381(17), p. 1471-1476, Feb. 2017.
9. D. D. Stancil and A. Prabhakar, *Spin Waves: Theory and Applications*, Springer, 2009.
10. A. A. Nikitin et al., "Spin-electromagnetic waves in planar multiferroic multilayers," *Journal of Applied Physics*, vol. 122(1), p. 014102, Jul. 2017.
11. Н. Н. Антонов, И. М. Бузин, О. Г. Вендик, *Сегнетоэлектрики в технике СВЧ*, М.: Сов. Радио, 1979.
12. A. A. Nikitin et al., "Dual Tuning of Doubly Hybridized Spin-Electromagnetic Waves in All-Thin-Film Multiferroic Multilayers," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53(11), pp. 1-5, Nov. 2017