

05

Электрически управляемый логический ключ на основе ступенчатого волновода из пленки железо-иттриевого граната и пьезоэлектрического актюатора

© С.Л. Высоцкий,^{1,2} Ю.В. Хивинцев,^{1,2} В.К. Сахаров,¹ Ю.А. Филимонов^{1,2,3}

¹ Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,
410019 Саратов, Россия

² Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
410012 Саратов, Россия

³ Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина,
410054 Саратов, Россия
e-mail: vysotsl@gmail.com

Поступило в Редакцию 16 октября 2018 г.

В окончательной редакции 16 октября 2018 г.

Принято к публикации 12 февраля 2019 г.

Показана возможность выполнения функции логического ключа устройством на основе волновода спиновых волн, содержащего два канала, различающихся толщиной ферритовой пленки. Для переключения состояния ключа использована зависимость типа интерференции (конструктивной или деструктивной) на общем для обоих каналов выходном преобразователе от степени деформации волновода под действием электрически управляемого актюатора.

DOI: 10.21883/JTF.2019.07.47796.366-18

Распространение спиновых волн (СВ) в магнитных средах широко используется для разработки устройств обработки информации. Одним из активно исследуемых направлений является разработка устройств, работа которых основана на использовании принципа интерферометра Маха–Цандера [1] — наблюдении на общем приемном элементе результатов интерференции (конструктивной или деструктивной) сигналов из отдельных каналов с различающимися условиями распространения. Использование в одном или нескольких каналах волноводов СВ может быть использовано для обработки радиосигналов в диапазоне СВЧ [2], магнитометрии [3], однако наиболее активно исследуется применение этой схемы для разработки логических элементов [4–12], когда с помощью воздействия на сигнал в одном из каналов, содержащем волновод СВ, обеспечивается возможность изменения фазы (амплитуды) на приемном элементе, достаточное для выбора между логическими значениями 0 и 1. Изменение условий распространения СВ может достигаться за счет использования сегнетоэлектрика [10,11], наличия доменной стенки [4], локальной неоднородности внутреннего магнитного поля H_{in} в волноводе [12] или изменения величины H_{in} за счет пропускания по волноводу постоянного тока [9]. Результаты экспериментов свидетельствуют о возможности масштабирования размеров спин-волновых устройств, использующих интерференцию спиновых волн, до микронных и нанометровых размеров [6,9].

Отметим, что при использовании в качестве каналов распространения сигнала волноводов СВ требуется, как правило, изготовление отдельных входных преобразова-

телей СВЧ и общего выходного преобразователя, при этом расположение волноводов должно обеспечивать возможность регулировки сигнала только в одном из каналов. В настоящей работе предлагается конструкция устройства, выполненного на основе одного ферритового волновода, содержащего два канала распространения СВ, отличающихся толщиной пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ). Формирование каналов распространения СВ в ферритовом волноводе с помощью неоднородного по его ширине магнитного поля ранее исследовалось в [13], однако вопросы, связанные с интерференцией распространяющихся в каналах волн, не рассматривались.

Эксперименты проводились с использованием волновода шириной 4 мм, длиной 10 мм, вырезанного из пленки ЖИГ толщиной $d_1 = 6 \mu\text{m}$, с намагниченностью насыщения $4\pi M = 1750 \text{ G}$, эпитаксиально выращенной на подложке из гадолиний-галлиевого граната (ГГГ) кристаллографической ориентации (111). Половина ширины этого волновода была химически стравлена до $d_2 = 4.5 \mu\text{m}$. На рис. 1 схематически изображена конструкция макета для проведения измерений. Волновод 1 помещался на входной 2 и выходной 3 микрополосковые преобразователи, расположенные на отдельных платах на расстоянии $L = 3 \text{ mm}$ друг от друга. На расстоянии $L/2$ к поверхности структуры ЖИГ/ГГГ подводился пьезоэлектрический актюатор PSt 150/2 × 3/5 4, положение которого после достижения контакта с поверхностью структуры фиксировалось. Макет помещался в зазор электромагнита так, чтобы постоянное магнитное поле H было направлено касательно к поверхности

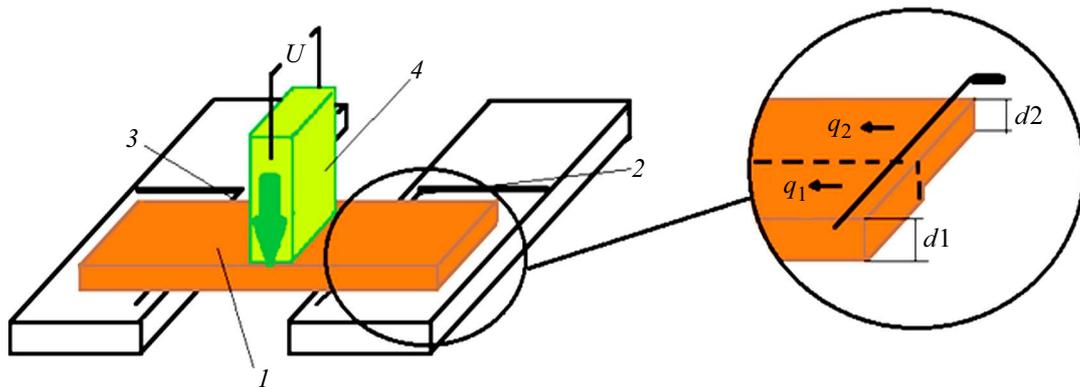


Рис. 1. Схема измерительного макета: 1 — пленка ЖИГ, 2, 3 — микрополосковые преобразователи, 4 — пьезоэлектрический актуатор.

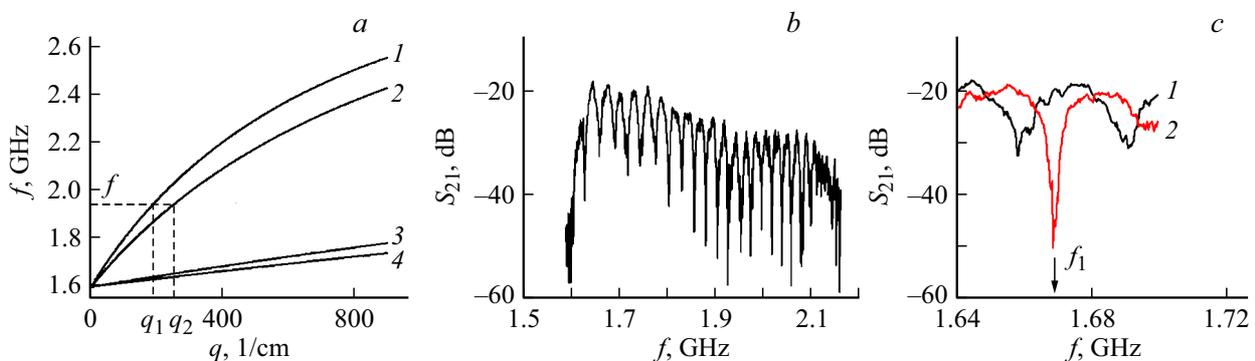


Рис. 2. Дисперсионные зависимости ПМСВ в пленках ЖИГ толщиной 6, 4.5, 0.6 и 0.45 μm (кривые 1, 2, 3, 4 соответственно), $H = 168 \text{ Oe}$ (a); вид зависимости $S_{21}(f)$ (b) и ее участка (c) при изменении величины U .

пленка ЖИГ и параллельно микрополосковым преобразователям, т.е. в геометрии поверхностной магнитостатической волны (ПМСВ). Закон дисперсии такой волны имеет вид [14]:

$$f = \sqrt{f_H(f_H + f_m) + \frac{f_m^2}{4}[1 - \exp(-2qd)]}, \quad (1)$$

где q — волновое число, $f_H = \gamma H$, $f_m = \gamma 4\pi M$, $\gamma = 2.8 \text{ MHz/kOe}$ — магнитомеханическое отношение. Из (1) следует, что на фиксированной частоте f в волноводах толщиной d_1 и d_2 (играющих роль каналов распространения сигнала) будут возбуждаться ПМСВ с волновыми числами q_1 и q_2 (рис. 2, a, на котором кривые 1 и 2 представляют результаты расчета дисперсионной зависимости ПМСВ в пленках ЖИГ толщиной 6 μm и 4.5 μm соответственно $H = 168 \text{ Oe}$). При распространении на расстояние L на выходном преобразователе происходит интерференция сигналов с фазовыми набегами $\varphi_1 = q_1 L$ и $\varphi_2 = q_2 L$. Так, например, на частоте $f_1 = 1.67 \text{ GHz}$ разница фазовых набегов составляет $\Delta\varphi_1 = (49 - 38 \text{ cm}^{-1}) \times 0.3 \text{ cm} = \pi$, на частоте $f_2 = 1.72 \text{ GHz}$ $\Delta\varphi_2 = (80 - 60 \text{ cm}^{-1}) \times 0.3 \text{ cm} = 2\pi$ и т.д. В результате частотная зависимость коэффициента передачи макета $S_{21}(f)$ принимает вид, представленный на рис. 2, b, при этом величина сигнала ПМСВ

превышает уровень прямой электромагнитной наводки более чем на 30 dB. Подача на актуатор постоянного напряжения U приводила к изменению его размеров, что вызывало изгиб структуры ЖИГ/ГТГ. На рис. 2, c приведен участок зависимости $S_{21}(f)$ для случаев $U = 0$ (1) и $U = 80 \text{ V}$ (2), $H = 168 \text{ Oe}$. Видно, что на частоте f_1 изменение уровня прохождения при подаче напряжения составляет примерно 30 dB, что может служить заметным различием состояний 0 и 1 и, следовательно, использоваться в качестве логического ключа. Отметим, что при размещении на преобразователях ферритового волновода постоянной толщины (6 μm) чувствительность фазы по управляющему напряжению более чем в два раза ниже (при максимально допустимом для выбранного актуатора $U = 150 \text{ V}$ сдвиг фазы выходного сигнала составил 150°).

Отметим, что возможности миниатюризации устройств на СВ связываются с использованием тонких пленок ЖИГ, обеспечивающих возбуждение и распространение СВ с малыми длинами. Оценим возможность применения предлагаемого принципа работы логического ключа для субмикронных пленок. На рис. 2, a кривые 3 и 4 изображают дисперсионные зависимости пленок ЖИГ толщиной 0.6 и 0.45 μm соответственно. На частоте 1.67 GHz волновые числа ПМСВ в каналах

равны $q_1 = 374 \text{ cm}^{-1}$, $q_2 = 498 \text{ cm}^{-1}$, при этом фазовый набег величиной π достигается при длине пробега $L^* = \pi/(q_2 - q_1) = 0.025 \text{ cm}$.

В приближении $2qd \ll 1$ оценку параметров эксперимента, при которых на расстоянии L обеспечивается набег фазы π , можно получить, записав дисперсионное уравнение (1) в виде:

$$\omega \approx \omega_0 + V_g q_i, \quad (2)$$

где $\omega_0 = 2\pi\sqrt{f_H(f_H + f_m)}$, $V_g = \frac{\omega_m^2 d}{4\omega_0}$. Тогда расстояние L , при котором для частоты ω разность фаз ПМСВ в волноводах толщиной d_1 и d_2 составит π , можно оценить с помощью выражения

$$L \approx \frac{\pi\omega_m^2}{4(\omega - \omega_0)\omega_0} \frac{d_1 d_2}{(d_1 - d_2)}, \quad (3)$$

что при выбранных выше параметрах для волноводов $d_1 = 0.6 \mu\text{m}$ и $d_2 = 0.45 \mu\text{m}$ дает значение $L \approx 0.029 \text{ cm}$, которое отличается от расчетов с помощью (1) на 14%. Отметим, что в субмикронных пленках ЖИГ могут эффективно возбуждаться и приниматься ПМСВ с волновыми числами $q \approx 10^3 - 10^4 \text{ cm}^{-1}$ [15–17].

Таким образом, исследовано влияние изгибных деформаций на результат интерференции ПМСВ в ступенчатом волноводе на основе пленки ЖИГ, сформированном травлением части пленки ЖИГ по толщине и формированием ступеньки по всей длине волновода. Показано, что деформация волновода приводит к изменению характера интерференции ПМСВ на выходной антенне с конструктивного на деструктивный, что проявляется в изменении амплитуды сигнала на величину $\approx 30 \text{ dB}$. Эффект достигается за счет изменения разности набег фаз ПМСВ $\Delta\varphi$ в пленочных ЖИГ волноводах разной толщины на величину $\Delta\varphi \approx \pi$. Данный эффект может быть использован для разработки магнитострикционно-перестраиваемого устройства типа логического ключа [4–8].

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 16-29-14058.

Список литературы

- [1] Francon M. Optical Interferometry. NY: Academic Press Inc., 1966. P. 97.
- [2] Ustinov A.B., Kalinikos B.A. // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 89. P. 172511.
- [3] Balynsky M., Gutierrez D., Chiang H., Kozhevnikov A., Dudko G., Filimonov Y., Balandin A.A., Khitun A. // Sci. Rep. 2017. Vol. 7. P. 11539.
- [4] Kostylev M.P., Serga A.A., Schneider T., Leven B., Hillebrands B. // Appl. Phys. Lett. 2005. Vol. 87. P. 153501.
- [5] Schneider T., Serga A.A., Leven B., Hillebrands B., Stamps R.L., Kostylev M.P. // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 92. P. 022505.
- [6] Wu Y., Bao M., Khitun A., Kim J.-Y., Hong A., Wang Kang L. // J. Nanoelectron. Optoe. 2009. Vol. 4. N 3. P. 394–397.
- [7] Lee K.-S., Kim S.-K. // J. Appl. Phys. 2008. Vol. 104. P. 053909. DOI: 10.1063/1.2975235
- [8] Kanazawa P.N., Goto T., Sekiguchi K., Granovsky A.B., Ross C.A., Takagi H., Nakamura Y., Inoue M. // Sci. Rep. 2016. Vol. 6. 30268. DOI: 10.1038/srep30268
- [9] Rousseau O., Rana B., Anami R., Yamada M., Miura K., Ogawa S., Otani Y. // Sci. Rep. 2015. Vol. 5. P. 9873. DOI: 10.1038/srep09873
- [10] Устинова И.А., Никитин А.А., Устинов А.Б. // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2017. Т. 1. № 1 (1). С. 543–547.
- [11] Никитин А.А., Никитин А.А., Устинов А.Б., Калинин Б.А. // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2018. № 1 (1). С. 676–679.
- [12] Vasiliev S.V., Kruglyak V.V., Sokolovskii M.L., Kuchko A.N. // J. Appl. Phys. 2007. Vol. 101. P. 113919.
- [13] Анненков А.Ю., Васильев И.В., Герус С.В., Ковалев С.И. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 4. С. 71–82.
- [14] Гуревич А.Г., Мелков Г.А. Магнитные колебания и волны. М.: Физматлит, 1994. 464 с.
- [15] Khivintsev Y.V., Nikitov S.A., Filimonov Y.A. // Appl. Phys. Lett. 2015. Vol. 106. P. 052407. DOI: 10.1063/1.4907626
- [16] Sakharov V., Khivintsev Y., Vysotskii S., Stognij A., Filimonov Y. // IEEE Magn. Lett. 2017. Vol. 8. P. 3704105. DOI: 10.1109/LMAG.2017.2659638
- [17] Хивинцев Ю.В., Сахаров В.К., Высоцкий С.Л., Филимонов Ю.А., Стогний А.И., Никитов С.А. // ЖТФ. 2018. Т. 88. Вып. 7. С. 1060–1064.