УДК 537.624:537.632

## О ВОЗМОЖНОСТИ НЕИСКАЖЕННОЙ ПЕРЕДАЧИ ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА С ПОМОЩЬЮ ПОВЕРХНОСТНЫХ СПИНОВЫХ ВОЛН В СТРУКТУРЕ МЕТАЛЛ-ФЕРРИТ-ДИЭЛЕКТРИК-МЕТАЛЛ

© 2022 г. Э. Г. Локк<sup>1, \*</sup>, С. В. Герус<sup>1</sup>, А. Ю. Анненков<sup>1</sup>, А. В. Луговской<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук", Фрязинский филиал, Фрязино, Россия

**\****E-mail: edwin@ms.ire.rssi.ru* **\****E-mail: edwin@ms.ire.rssi.ru* Поступила в редакцию 18.04.2022 г. После доработки 13.05.2022 г. Принята к публикации 23.05.2022 г.

Исследованы характеристики поверхностной спиновой волны, распространяющейся перпендикулярно направлению однородного магнитного поля в касательно-намагниченной плоскопараллельной структуре металл—феррит—диэлектрик—металл. Установлено, что при определенных параметрах структуры на дисперсионной зависимости этой волны возникают квазилинейные участки, которые могут обеспечить неискаженную передачу полезного сигнала, модулирующего поверхностную спиновую волну.

DOI: 10.31857/S0367676522090174

В касательно-намагниченной ферритовой пленке могут возбуждаться и распространяться с малыми потерями дипольные спиновые волны (СВ), впервые описанные в магнитостатическом приближении в работе [1]. Несмотря на многообразие физических эффектов, возникающих при распространении СВ [2], разработка и применение приборов с использованием этих волн не получили заметного распространения в технике СВЧ по ряду причин, одной из которых является нелинейный характер дисперсионных зависимостей СВ в свободной ферритовой пленке и структурах на ее основе. То есть, для СВ нельзя получить линейную дисперсионную зависимость в широком диапазоне частот, подобную дисперсионным зависимостям, которыми обладают акустические волны в акустических кристаллах. Однако в некотором интервале частот на дисперсионной зависимости СВ в ряде ферритовых структур можно создать квазилинейный участок, степень линейности которого, определяемая параметрами структуры, будет удовлетворять техническим требованиям, предъявляемым к устройствам обработки сигналов. Ниже исследована возможность линеаризации дисперсионных зависимостей СВ с помощью расположения вблизи поверхностей ферритовой пленки металлических плоскостей.

Очевидно, что самой простой и применяемой на практике является структура, в которой над ферритовой пленкой расположен металлический экран, параллельный плоскости пленки, а между ферритом и металлом имеется зазор воздуха (или вакуума) шириной w (такая структура будет выглядеть также, как и структура на рис. 1 при отсутствии верхнего металлического экрана). Пусть в данной структуре металл-диэлектрик-феррит (МДФ) в направлении оси y распространяется поверхностная CB (ПСВ) с частотой  $\omega_0 = 2\pi f_0$  и волновым числом  $k_{y0}$ . Как показали эксперименты и расчеты [3, 4], дисперсионные зависимости ПСВ  $f(k_y)$  в данной структуре могут иметь точки перегиба, в которых  $\partial^2 \omega / \partial k_y^2 = \partial U / \partial k_y = 0$ , где Uвеличина групповой скорости ПСВ.



**Рис. 1.** Геометрия задачи: *1* – идеально проводящий металл, *2* – ферритовая пленка, *3* – промежуток ди-электрика (или вакуума).

Как было показано в работе [5], расстояние S, которое полезный сигнал, модулирующий ПСВ с частотой  $f_0$ , может пробежать в такой структуре вдоль оси y без искажений (сохраняя свою форму), ограничено условием

$$\frac{\pi}{U} \frac{\partial U}{\partial \lambda}\Big|_{\lambda=\lambda_0} S \leqslant 1, \tag{1}$$

в которое входят модуль U вектора групповой скорости модулируемой волны, длина модулируемой волны  $\lambda_0 = 2\pi/k_{y0}$  и значение производной  $\partial U/\partial \lambda$ , вычисляемое при  $\lambda = \lambda_0$ .

Условие (1) удобно записать также в виде  $S \ll S_{cr}$ , где критическое расстояние  $S_{cr}$  вычисляется по формуле [6]

$$S_{cr} = 2k_{y}^{-2} \frac{\left| \frac{\partial \omega}{\partial k_{y}} \right|_{k_{y}=k_{y0}}}{\left| \frac{\partial^{2} \omega}{\partial k_{y}^{2}} \right|_{k_{y}=k_{y0}}} \quad \text{или} \quad S_{cr}/\lambda = (\pi k_{y})^{-1} \left| \frac{\partial \omega}{\partial k_{y}} \right|_{k_{y}=k_{y0}}}{\left| \frac{\partial^{2} \omega}{\partial k_{y}^{2}} \right|_{k_{y}=k_{y0}}}, \tag{2}$$

в которую входят первая и вторая производные дисперсионной зависимости исследуемой структуры.

Отметим, что для оценки линейности дисперсионной зависимости структуры удобно вычислять не абсолютные значения величины  $S_{cr}$ , а отношение  $S_{cr}/\lambda$ , которое показывает, сколько длин волн  $\lambda$  может пробежать полезный сигнал, сохраняя свою форму (оставаясь практически неискаженным) при различных значениях волнового числа  $k_y$  и соответствующих значениях несущей частоты  $f_0$  модулируемой волны. Формулы (1)–(3) справедливы для волн различной природы в анизотропных средах и структурах.

Очевидно, что если ПСВ имеет частоту  $f_0$  и волновое число  $k_{y0}$ , соответствующие одной из точек перегиба (в которой  $\partial^2 \omega / \partial k_y^2 = 0$ ), то, в соответствии с (2), при модуляции этой ПСВ полезным сигналом отношение  $S_{cr}/\lambda_0 \to \infty$ . Как показано в [4], в структуре МДФ вблизи таких значений  $k_{y0}$  и  $f_0$  возникают небольшие интервалы волнового числа шириной 5–10 см<sup>-1</sup> и интервалы частоты шириной 3–10 МГц, которые можно использовать при разработке спинволновых приборов для реализации неискаженной передачи полезного сигнала.

Казалось бы, изменяя толщину диэлектрика в структуре МДФ, можно реализовать более близкое расположение точек перегиба друг к другу и таким способом увеличить указанные интервалы волнового числа и частоты. Действительно, при изменении толщины диэлектрика точки перегиба немного приближаются друг к другу, но затем опять начинают удаляться друг от друга [4]. В итоге, при наибольшем сближении точек перегиба отношение  $S_{cr}/\lambda$  между ними имеет величину порядка 12, в то время как в самих точках перегиба  $S_{cr}/\lambda \rightarrow \infty$ . Таким образом, в структуре МДФ нельзя значительно увеличить интервалы волнового числа и частоты, внутри которых отношение  $S_{cr}/\lambda$  было бы больше 50 или 100.

Можно предположить, что для "сближения" точек перегиба следует выбрать структуру, имеющую более сложное дисперсионное уравнение и не один варьируемый параметр, а больше. То есть, необходимо исследовать, например, изменение отношения  $S_{cr}/\lambda$  в структуре металл-диэлектрик-феррит-диэлектрик-металл (МДФДМ), где можно варьировать толщины обеих диэлектрических слоев. Дисперсионные зависимости ПСВ, распространяющихся в структуре МДФДМ вдоль оси v. исследовались ранее как с использованием магнитостатического приближения [7-10], так и без него [11]. Опираясь на полученные результаты, для намеченной цели можно использовать структуры МДФДМ с такими параметрами, при которых на дисперсионной зависимости ПСВ появятся достаточно широкие квазилинейные участки. Рассмотрим ниже наиболее простой случай структуры МДФДМ, у которой один из слоев диэлектрика отсутствует и металлический экран расположен непосредственно на поверхности феррита (рис. 1), то есть, рассмотрим структуру МФДМ. Дисперсионные зависимости для такой структуры, рассчитанные для величины  $H_0 = 300 \ \Im$ , толщины и намагниченности пленки *s* = 10 мкм и  $4\pi M_0 = 1750$  Гс, показаны на рис. 2, а зависимости отношения  $S_{cr}/\lambda$  от волнового числа ПСВ  $k_v$  – на рис. 3. Расчеты, представленные на рис. 2 и 3, выполнены без использования магнитостатического приближения на основе дисперсионного уравнения, полученного в [11].

Как видно из рис. 2 и 3 при приближении снизу к ферритовой пленке второй металлической поверхности, характеристики ПСВ изменяются таким образом, что при толщине диэлектрика *w* примерно 6–9 мкм на дисперсионной зависимости волны  $f(k_y)$  вблизи малых значений  $k_y$  возникает квазилинейный участок, на котором ПСВ имеет почти постоянное значение групповой ско-



**Рис. 2.** Дисперсионные зависимости ПСВ  $f(k_y)$  в структуре МФДМ при следующих значениях толшины диэлектрика *w*: 5, 6, 8, 12, 20 мкм и  $\infty$  (кривые *1*-6).

рости *U* в более широком интервале частот и волновых чисел, чем при других значениях *w* (см. кривые 2 и 3 на рис. 2). Такое изменение зависимости  $f(k_y)$  возникает из-за того, что при  $w \sim 6-9$  мкм две точки, в которых отношение  $S_{cr}/\lambda \to \infty$ , оказываются расположены достаточно близко друг к другу (см. кривые 2 и 3 на рис. 3), что и позволяет увеличить интервал волновых чисел  $\Delta k_y$  и интервал частоты  $\Delta f$ , в которых  $S_{cr}/\lambda > 100$ , до значений порядка 130 см<sup>-1</sup> и 130 МГц соответственно, то есть, существенно увеличить эти интервалы по сравнению со структурой МДФ, описанной в [4].

Следует, однако, отметить, что внутри интервалов  $\Delta k_y$  и  $\Delta f$  находится небольшой участок дисперсионной зависимости (вблизи начальной части спектра ПСВ, где  $k_y \sim 2 \text{ см}^{-1}$  и меньше), внутри которого дисперсионное уравнение, описывающее ПСВ без магнитостатического приближения, не имеет решений [11]. Этот факт необходимо учитывать при проектировании приборов спинволновой электроники с использованием структуры МДФДМ (зависимости ПСВ на рис. 2 и 3 представлены в таком масштабе, что эти участки не заметны).

Таким образом, установлено, что при определенных параметрах структуры МДФДМ на дисперсионной зависимости ПСВ возникают квазилинейные участки, которые могут обеспечить неискаженную передачу полезного сигнала с помощью ПСВ.

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.



**Рис. 3.** Зависимости отношения  $S_{cr}/\lambda$  от волнового числа  $k_y$  для поверхностной спиновой волны в структуре МФДМ при следующих значениях толщины диэлектрика *w*: 5, 6, 8, 12, 20 мкм и  $\infty$  (кривые *1*–*6*).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Damon R.W., Eshbach J.R. // J. Phys. Chem. Solids. 1961. V. 19. No. 3/4. P. 308.
- 2. Локк Э.Г. // УФН. 2008. Т. 178. № 4. С. 397; Lock E.H. // Phys. Usp. 2008. V. 51. No. 4. P. 375.
- Bongianni W.L. // J. Appl. Phys. 1972. V. 43. No. 6. P. 2541.
- 4. Герус С.В., Локк Э.Г., Анненков А.Ю. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 2. С. 178; Gerus S.V., Lock E.H., Annenkov A.Y. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 2. P. 138.
- Мандельштам Л.И. Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике. М.: Наука, 1972. 440 с.
- Локк Э.Г. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 8. С. 1080; Lock E.H. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. No. 8. P. 978.
- Yukawa T., Yamada J., Abe K. et al. // JJAP. 1977. V. 16. No. 12. P. 2187.
- Локк Э.Г. // Радиотехн. и электрон. 2007. Т. 52. № 2. С. 202; Lokk E.G. // J. Commun. Technol. Electron. 2007. V. 52. No. 2. Р. 189.
- 9. Анненков А.Ю., Герус С.В., Локк Э.Г. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 8. С. 1037; Annenkov A.Y., Gerus S.V., Lock E.H. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. No. 8. P. 935.
- 10. Локк Э.Г., Герус С.В., Анненков А.Ю. // Радиотехн. и электрон. 2018. Т. 63. № 10. С. 1089; Lokk E.H., Gerus S.V., Annenkov A.Y. // J. Commun. Technol. Electron. 2018. V. 63. No. 10. Р. 1197.
- Локк Э.Г. // Радиотехн. и электрон. 2014. Т. 59. № 7. C. 711; Lokk E.G. // J. Commun. Technol. Electron. 2014. V. 59. No. 7. P. 767.

ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ том 86 № 9 2022

## On the possibility of undistorted transmission of useful signal using surface spin waves in a metal-ferrite-dielectric-metal structure

E. H. Lock<sup>a, \*</sup>, S. V. Gerus<sup>a</sup>, A. Yu. Annenkov<sup>a</sup>, A. V. Lugovskoi<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Fryazino Branch, Fryazino, 141190 Russia \*e-mail: edwin@ms.ire.rssi.ru

The characteristics of a surface spin wave propagating perpendicular to the direction of a uniform magnetic field in a tangentially magnetized plane-parallel metal—ferrite—dielectric—metal structure are investigated. It is found that, at certain parameters of the structure, there are appeared quasilinear intervals on the dispersion dependence of this wave, that can provide undistorted transmission of the useful signal modulating the surface spin wave.