

## Линия задержки на обменных спиновых волнах

**В.В. Тихонов, В.А. Губанов, А.В. Садовников**

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

**Аннотация:** Предлагается конструкция миниатюрной управляемой линии задержки на основе коротковолновых обменных спиновых волн (ОСВ), возбуждаемых в трехслойной эпитаксиальной структуре диэлектрик-феррит-диэлектрик. Прямое и обратное преобразование электромагнитного сигнала в ОСВ осуществляется в тонких переходных слоях на границах диэлектрик-феррит и феррит-диэлектрик. Задержка СВЧ сигнала определяется длиной пробега ОСВ в поперечном направлении слоя феррита. Задержка СВЧ сигнала регулируется величиной намагничивающего поля.

**Ключевые слова:** спиновые волны, железоиттриевый гранат (ЖИГ), гадолиний-галлиевый гранат (ГГГ), задержка СВЧ сигнала.

### 1. Введение

Современный этап развития микро- и нанoeлектроники характеризуется широким применением квантовых явлений в твердых телах. Это послужило основанием для бурного развития прикладных исследований в области микро- и наноманетизма. В плане практического применения наибольший интерес представляют исследования спин-волновых возбуждений в магнитоупорядоченных ферритовых средах. На базе этих исследований сформировались новые научные направления такие, как спин-волновая электроника, спинтроника и магноника. Дальнейшее развитие этих направлений было связано с практическим освоением сверхкоротких обменных спиновых волн (ОСВ) с длинами волн порядка 100nm и менее.

Существование обменных спиновых волн было предсказано в 1930 году в знаменитой работе Блоха [1]. Однако их практическое освоение началось сравнительно недавно. Это стало возможным благодаря созданию высококачественных эпитаксиальных пленок железоиттриевого граната (ЖИГ), выращенных на немагнитных подложках гадолиний-галлиевого граната (ГГГ). Пленки ЖИГ оказались наиболее благоприятной средой распространения спиновых волн. Однако для возбуждения столь коротких волн требовалась недостижимо высокая локализация возбуждающих СВЧ полей.

О первом наблюдении бегущих ОСВ было сообщено в работах [2,3]. Волны возбуждались в тонком имплантированном слое на поверхности пленки ЖИГ, распространялись вглубь пленки и отражались от ее противоположной поверхности. В импульсном режиме их можно было наблюдать в виде серии задержанных эхоимпульсов. При этом эффективность возбуждения ОСВ оказалась достаточно высокой, до 80% и более.

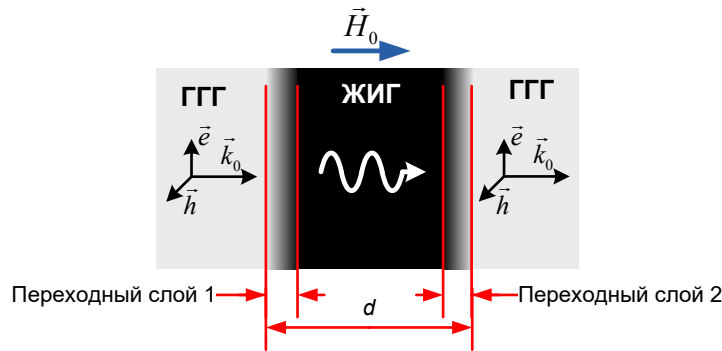
В недавних работах [4,5] было показано, что ОСВ могут эффективно возбуждаться в серийных образцах пленок ЖИГ. Этому способствовало наличие на границе пленка-подложка тонкого переходного слоя, в котором намагниченность

пленки плавно изменялась от нуля до намагниченности чистого ЖИГ. При этом волновые числа ОСВ спадали до нуля, что обеспечивало выполнение условия фазового синхронизма (гибридизации) ОСВ с падающей электромагнитной волной (ЭМВ). В пределах толщины переходного слоя электромагнитная волна плавно трансформировалась в ОСВ, которая излучалась вглубь однородной пленки ЖИГ. Аналогичным образом отраженная ОСВ трансформировалась в ЭМВ.

На основании выявленной возможности прямого и обратного преобразования коротковолновых ОСВ была предложена конструкция миниатюрной линии задержки СВЧ сигнала [6].

## 2. Конструкция линии задержки на ОСВ.

Линия задержки выполнена на основе трехслойной эпитаксиальной структуры ГГГ-ЖИГ-ГГГ, представленной на рисунке 1.



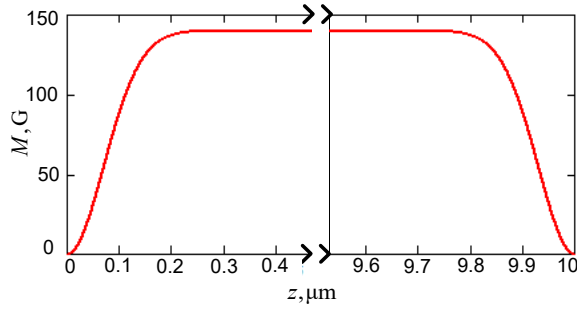
**Рисунок 1.** Трехслойная эпитаксиальная структура ГГГ-ЖИГ-ГГГ.

Особенность эпитаксиальной структуры ГГГ-ЖИГ-ГГГ состоит в том, что на противоположных поверхностях пленки ЖИГ всегда образуются тонкие переходные слои, который формируются в процессе эпитаксиального роста за счет диффузии немагнитных ионов  $Gd^{3+}$ ,  $Ga^{3+}$  подложки ГГГ ( $Gd_3Ga_5O_{12}$ ), частично замещающих магнитные ионы  $Y^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$  пленки ЖИГ ( $Y_3Fe_5O_{12}$ ).

Согласно теории диффузии в твердых телах, распределение концентрации магнитных ионов в пленке ЖИГ адекватно описывается функцией Гаусса  $N(z) \sim \exp(-z^2/\sigma^2)$ , где  $\sigma$  - феноменологический параметр распределения,  $z$  - координата в поперечном направлении пленки ЖИГ. С учетом этого распределение спонтанной намагниченности по толщине пленки ЖИГ описывается формулой

$$M(z) = M_0 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{z^2}{\sigma^2}\right) - \exp\left[-\frac{(z-d)^2}{\sigma^2}\right] \right\}, \quad (1)$$

где  $M_0$  - однородная намагниченность пленки вне переходного слоя,  $d$  - толщина пленки ЖИГ. График расчета функции распределения намагниченности  $M(z)$  представлен на рисунке 2.



**Рисунок 2.** Функция распределения намагниченности, рассчитанная при следующих параметрах пленки ЖИГ:  $M_0 = 140 \text{ G}$ ,  $d = 10 \mu\text{m}$ ,  $\sigma = 10^{-5} \text{ cm}$ .

Заданные параметры пленки ЖИГ использовались для расчета дисперсии ОСВ. Для этого совместно решались система уравнений Максвелла и уравнение Ландау-Лифшица, записанное с учетом неоднородного обмена. Рассматривался случай нормального намагничивания пленки ЖИГ. Диссипативные процессы и кристаллографическая анизотропия пленки ЖИГ не учитывались.

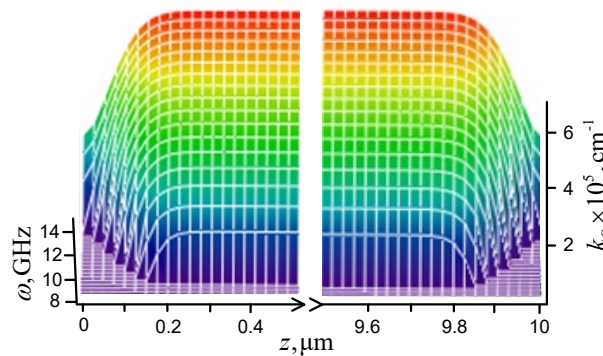
В результате было получено дисперсионное уравнение

$$\omega = \omega_H + \eta k_z^2, \quad (2)$$

из которого следовало выражение для волнового числа ОСВ

$$k_z(\omega, z) = \text{Re} \left( \sqrt{\frac{\omega - \omega_H(z)}{\eta}} \right), \quad (3)$$

где  $\omega$  - частота СВЧ сигнала,  $\omega_H(z) = \gamma H_0 - 4\pi\gamma M(z)$ . Результаты расчета волнового числа ОСВ представлены на 3d-графике рисунка 3.



**Рисунок 3.** Координатная зависимости волнового числа ОСВ, рассчитанная в пределах толщин переходных слоев при намагничивании пленки ЖИГ полем  $H_0 = 5 \text{ KOe}$ .

Видно, что в пределах толщин адгезионных слоев волновые числа ОСВ плавно возрастают (уменьшаются) на пять-шесть порядков. При этом на границах пленки ЖИГ, при  $z = 0$  и  $z = d$  выполняется условие согласования ОСВ с падающей и прошедшей электромагнитной волной.

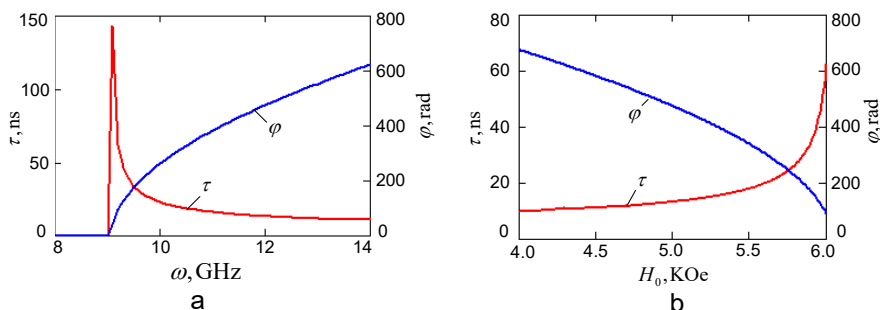
Используя выражение (3), нетрудно было рассчитать время задержки

$$\tau(\omega, H_0) = \int_0^d \frac{\partial}{\partial \omega} k_s(\omega, H_0, z) dz \quad (4)$$

и набег фазы прошедшего сигнала

$$\varphi(\omega, H_0) = \int_0^d k_S(\omega, H_0, z) dz. \quad (5)$$

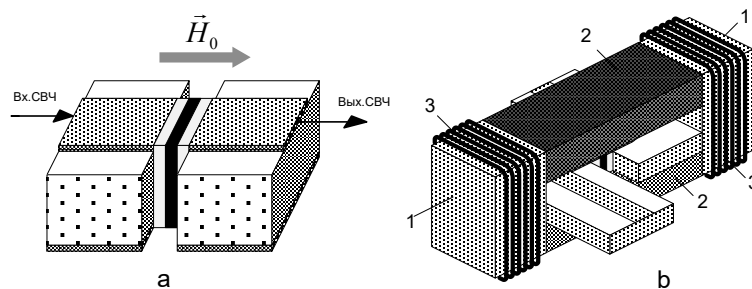
На рисунке 4 представлены результаты расчета выражений (4), (5) при длине пробега ОСВ равной толщине пленки ЖИГ  $d = 10 \mu\text{m}$ .



**Рисунок 4.** **а** – частотная зависимость времени задержки  $\tau(\omega)$  и набега фазы  $\varphi(\omega)$  ОСВ при фиксированном значении поля  $H_0 = 5 \text{ kOe}$ , **б** – полевая зависимость  $\tau(H_0)$ ,  $\varphi(H_0)$  при фиксированном значении частоты  $\omega = 12 \text{ GHz}$ .

На рисунке 4.а хорошо видно, что в пределах полосы частот возбуждения ОСВ задержка СВЧ сигнала монотонно спадает, при этом фаза монотонно возрастает. Пределы регулировки характеристик линии задержки показаны на рисунке 4.

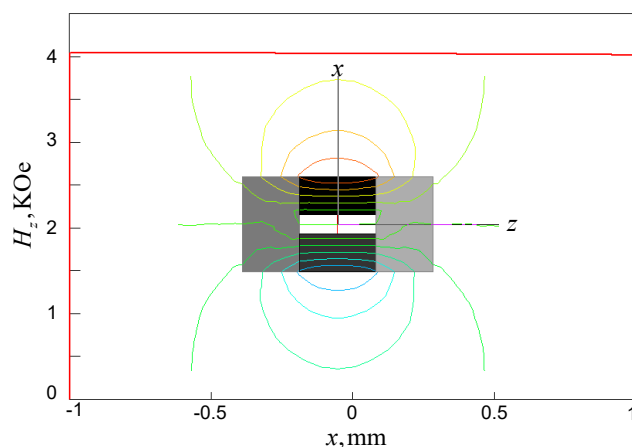
На рисунке 5 приведен пример реализации линии задержки. Образец структуры ГТГ-ЖИГ-ГТГ устанавливается в зазоре микрополосковых линий (МПЛ), как показано на рисунке 5.а. Образец структуры вместе с входным и выходным МПЛ преобразователями помещается в рабочий зазор портативной магнитной системы, как показано на рисунке 5.б.



**Рисунок 5.** **а** – схема установки структуры ГТГ-ЖИГ-ГТГ в зазоре входной и выходной МПЛ, **б** – конструкция портативной системы намагничивания.

В состав магнитной системы входят пара прямоугольных неодимовых магнитов марки NdFe35 размером 8x4x10мм 1 и пара прямоугольных стальных полюсов из стали Ст.1008 размером 6x10x10мм 2. Полюсы магнитов примыкают к стальным полюсам. В промежутке между полюсами образуется рабочий зазор, достаточный для размещения структуры ГТГ-ЖИГ-ГТГ вместе с преобразователями. Катушки управления 3 обеспечивают плавную регулировку поля в зазоре.

Конструкция магнитной системы обеспечивает высокую однородность поля в рабочем зазоре. Это подтверждается численным расчетом топологии поля, представленной на рисунке 6. На вставке рисунка 6 представлена картина силовых линий поля в рабочем зазоре и вне его.



**Рисунок 6.** Топология намагничивающего поля. На вставке: картина силовых линий поля внутри и вне рабочего зазора магнитной системы.

Важно отметить, что катушки электрического управления магнитной системы не нарушают однородность поля в рабочем зазоре.

### 3. Заключение

Таким образом, показано, что на основе трехслойной эпитаксиальной структуры ГГГ-ЖИГ-ГГГ может быть реализована конструкция сверхминиатюрной управляемой линии задержки на обменных спиновых волнах. Возбуждение и прием ОСВ осуществляется в тонких переходных слоях, которые формируются самопроизвольно в процессе эпитаксиального роста структуры ГГГ-ЖИГ-ГГГ. Время задержки СВЧ сигнала определяется длиной пробега ОСВ в поперечном направлении пленки ЖИГ и может достигать десятков наносекунд при толщине пленки 10 мкм.

Линии задержки на ОСВ может применяться в системах формирования и обработки радиосигналов СВЧ, также может применяться в качестве управляемого фазовращателя в фазированных антенных решетках.

Исследование выполнено за счет **гранта Российского научного фонда (проект № 23-79-30027)**.

#### Список литературы

1. Bloch F. Zur theorie des ferromagnetismus //Zeitschrift für Physik. – 1930. – Т. 61. – №. 3-4. – С. 206-219..
2. Гуляев Ю. В., Зильберман П. Е., Тихонов В. В. Линейное возбуждение импульсов обменных спиновых волн в пленках железо-иттриевого граната //Письма в Журнал технической физики. – 1988. – Т. 14. – №. 10. – С. 884-888.
3. Тихонов В. В., Толкачев А. В. Линейное возбуждение обменных спиновых волн в имплантированных пленках ЖИГ //ФТТ. – 1994. – Т. 36. – №. 1. – С. 185.
4. Tikhonov V. V., Litvinenko A. N. Spin-wave diagnostics of the magnetization distribution over the thickness of a ferrite film //Applied Physics Letters. – 2019. – Т. 115. – №. 7. – С. 072410.
5. Tikhonov V., Litvinenko A. N. Exchange spin waves and their application for diagnostics of the layered structure of epitaxial YIG films //Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2020. – Т. 515. – С. 167241.
6. Пат. 2 786 486 Российская Федерация, МПК H03H 9/30. Управляемая линия задержки на обменных спиновых волнах / Садовников А.В., Тихонов В.В., Губанов В.А., Никитов С.А.; заявитель и патентообладатель СГУ им. Н.Г. Чернышевского". – № 2022126285; заявл. 10.10.2022; опублик. 21.12.2022, Бюл. № 36.