

## Волноводные моды обменных спиновых волн в переходном слое эпитаксиальной пленки ЖИГ

В.В. Тихонов, А.С. Пташенко, А.В. Садовников

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

**Аннотация:** Показано, что в пределах толщины переходного слоя эпитаксиальной пленки железиттриевого граната (ЖИГ) могут возбуждаться коротковолновые обменные спиновые волны (ОСВ). Возбуждение ОСВ наблюдалось в виде узкополосных резонансных пиков на частотах возбуждения спин-волновых резонансов (СВР). Показано, что неоднородность намагниченности в переходном слое не препятствует возбуждению СВР и волноводных мод ОСВ, но вносит свои особенности, которые проявляются в виде отклонения от синусоидальности амплитуды колебаний вектора прецессии и неравномерности набега фазы волноводных мод ОСВ.

**Ключевые слова:** обменные спиновые волны (ОСВ), железиттриевый гранат (ЖИГ), гадолиний-галлиевый гранат (ГГГ), магнитоакустические резонансы.

### 1. Введение

Спиновые волны представляют практический интерес в плане разработки управляемых устройств аналоговой обработки СВЧ сигналов. В основном использовались дипольные спиновые волны (в литературе их чаще называют магнитостатические волны (МСВ)). В то же время было известно о существовании сверх коротковолновых обменных спиновых волн (ОСВ). Однако из-за трудностей возбуждения столь коротких типов волн они были практически не освоены.

В недавних работах [1-4] было обнаружено эффективное возбуждение ОСВ, которое наблюдалось в эпитаксиальных пленках ЖИГ. Это стало возможным, благодаря наличию тонкого переходного слоя на внутренней поверхности пленки ЖИГ, граничащей с подложкой гадолиний-галлиевого граната (ГГГ). Неоднородность намагниченности в переходном слое обеспечивала выполнение условия синхронизма (гибридизации) ОСВ с падающей электромагнитной волной. Обменная волна распространялась вглубь пленки ЖИГ и отражалась от ее противоположной поверхности. При этом наблюдалось возбуждение резонансов ОСВ (спин-волновых резонансов (СВР)), а также волноводных мод ОСВ, распространяющихся в плоскости пленки. По измеренным частотам СВР, рассчитывалось распределение намагниченности по толщине переходного слоя.

В данной работе было обнаружено возбуждение спин-волновых резонансов и волноводных мод ОСВ, которые наблюдались в пределах толщины переходного слоя. Предложена методика расчета намагниченности и моделирования мод ОСВ в переходном слое.

### 2. Эксперименты и методика расчета

Пленка ЖИГ была выращена на подложке ГГГ с ориентацией поверхности (111). Для возбуждения СВР использовался электромагнитный СВЧ сигнал, излучаемый открытым торцом коаксиального волновода. Торцы коаксиала примыкал к поверхности пленки ЖИГ, как показано на рис. 1.а. На частотах СВР возникали пики поглощения, которые наблюдались на амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) отраженного СВЧ сигнала. Для измерения АЧХ использовался векторный анализатор

цепей. Результаты измерений представлены на рис.2.b.

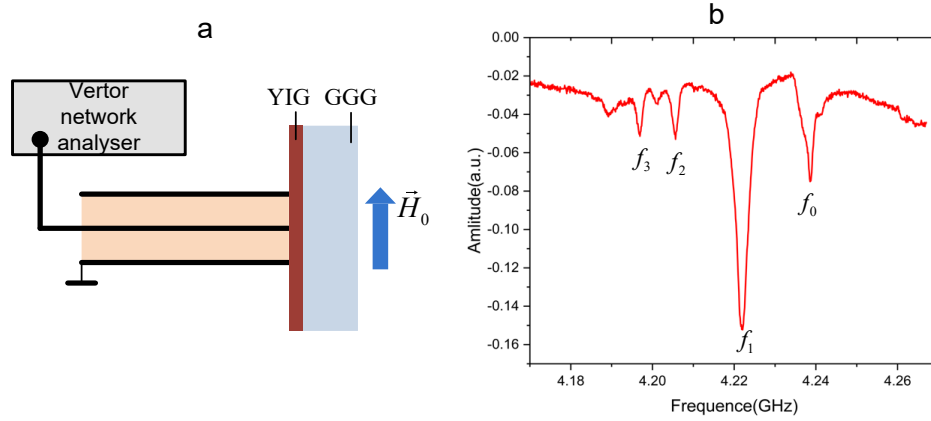


Рис.2. Схема измерений (a) и АЧХ отраженного сигнала (b).

Были измерены частоты резонансных пиков  $f_n$  ( $f_0 = 4.23857$  GHz,  $f_1 = 4.22206$  GHz,  $f_2 = 4.20564$  GHz,  $f_3 = 4.19693$  GHz), которые использовались для расчета намагниченности в переходном слое пленки ЖИГ.

Для проведения расчетов совместно решались уравнение Ландау-Лифшица с учетом неоднородного обмена и система уравнений Максвелла. Решения искались в виде плоских монохроматических волн прецессии намагниченности  $\vec{m} \sim \exp[i(\omega t - k_x x)]$ , где  $\vec{k}_x \perp \vec{H}_0 \parallel \vec{M} \parallel \vec{z}$  - волновой вектор,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  - частота возбуждения. В результате было получено дисперсионное уравнение в безграничном феррите

$$(\omega_H + \eta k_x^2)^2 + \omega_M (\omega_H + \eta k_x^2) - \omega^2 = 0, \quad (1)$$

которое имело простое аналитическое решение

$$k_x = \sqrt{\frac{1}{\eta} \left( \sqrt{\frac{\omega_M^2}{4} + \omega^2} - \frac{\omega_M}{2} - \omega_H \right)}. \quad (2)$$

Помимо этого, было получено выражение параметра эллиптичности волны прецессии

$$\theta = \frac{m_y}{m_x} = \sqrt{1 + \frac{\omega_M}{(\omega_H + \eta k^2)}}, \quad (3)$$

где  $\omega_H = \gamma H_0$  и  $\omega_M = 4\pi\gamma M_0$ . Использование параметра  $\theta$  сводило задачу к отысканию только одной составляющей вектора прецессии, например  $m_x$ .

Намагниченность в переходном слое пленки ЖИГ описывалась функцией распределения

$$M = M_0 \left[ 1 - \exp(-x^2/\sigma^2) \right] \quad (4)$$

где  $M_0$  - намагниченность насыщения чистой пленки ЖИГ,  $\sigma$  - феноменологический параметр распределения. Согласно (3), на границе пленка-подложка, при  $x=0$ , намагниченность пленки обращалась в ноль. При этом прецессия намагниченности также обращалась в ноль  $m_x|_{x=0} = 0$ . С учетом этого

амплитуда волны прецессии приводилась к виду  $m_x = C \sin[k_x(f, x, \sigma)x]$ .

Для возбуждения СВР требовалось выполнение условия набега фазы волны прецессии

$$\varphi = \int_0^{x_n(\sigma)} k_x(f_n, x, \sigma) dx = \pi, \quad n = 1, 2, 3, 4, \quad (5)$$

где верхний предел интегрирования

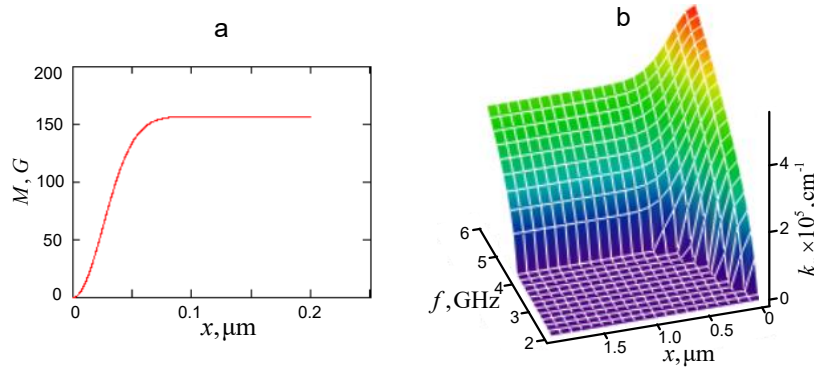
$$x_n(\sigma) = \sigma \sqrt{\ln \left( \frac{\omega_{M0} \omega_H}{\omega_{M0} \omega_H + \omega_H^2 - (2\pi f_n)^2} \right)} \quad (6)$$

определялся из условия синхронизма с внешним однородным СВЧ полем  $k_x(f_n, x_n, \sigma) = 0$ , где  $\omega_{M0} = 4\pi\gamma M_0 = [(2\pi f_0)^2 - \omega_H^2] / \omega_H$ .

В результате численного решения уравнений (4) было получено значение параметров  $\sigma = 3.585 \cdot 10^{-6}$  см и  $M_0 = 157$  Г.

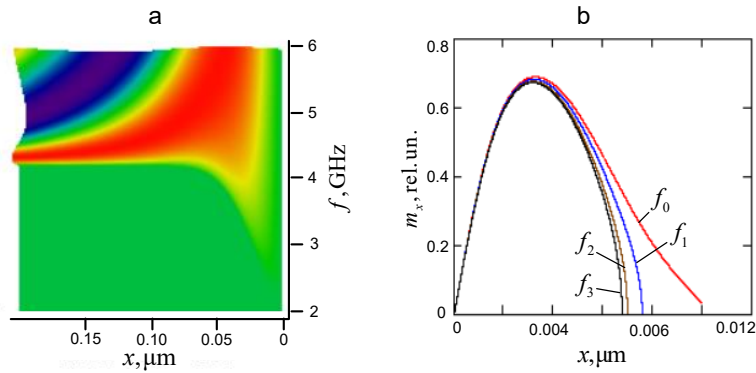
### 3. Обсуждение

Полученные параметры использовались для расчета характеристик волн прецессии в переходном слое экспериментального образца пленки ЖИГ. На рис.2.a представлен график координатной зависимости намагниченности пленки  $M(x)$ . Там же, на рис.2.b, представлен 3d-график дисперсионной поверхности волны прецессии  $k_x(f, x)$ .



**Рис.2.** Распределение намагниченности по толщине пленки ЖИГ (а) и дисперсия волны прецессии вблизи границы пленка-подложка (б).

Видно, что в нашем образце толщина переходного слоя не превышала  $0.1 \mu\text{m}$ . Неоднородность намагниченности в переходном слое существенно искажала закон дисперсии. При этом область возбуждения волны прецессии  $m_x(f, x)$  существенно продвигалась в область низких частот, как показано на 3d-графике рис.3.a.

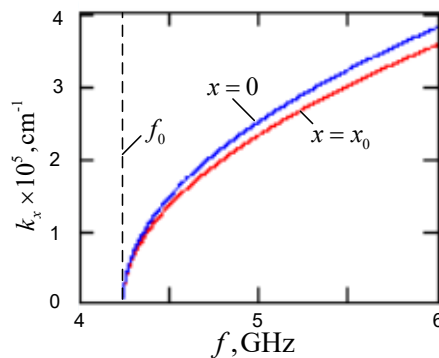


**Рис.3.** Область возбуждения волны прецессии (a) и эпоры колебаний вектора прецессии на частотах возбуждения спин-волновых резонансов (b).

Возбуждение волны прецессии обуславливалась возможность возбуждения спин-волновых резонансов в пределах толщины переходного слоя. Именно эти резонансы мы наблюдали в наших экспериментах.

Важно отметить, что неоднородность намагниченности переходного слоя вносила свои особенности. Это хорошо видно на рис.3.b, где представлены эпоры колебаний вектора прецессии на частотах возбуждения спин-волновых резонансов. Видно, что распределение амплитуд по толщине переходного слоя не совпадало с синусоидальным законом распределением, что, однако, не препятствовало возбуждению спин-волновых резонансов.

Существование СВР в переходном слое обуславливало возможность возбуждения волноводных мод ОСВ, распространяющихся в плоскости пленки ЖИГ. Для примера на рис.4 представлены расчеты дисперсии  $k_y(f, x)$  нулевой моды ОСВ, распространяющейся в переходном слое в направлении  $\vec{k}_y \perp \vec{H}_0$  (геометрия возбуждения поверхностных МСВ). Расчеты проводились в крайних точках координат  $x = 0$  и  $x = x_0$ . Для прочих мод ОСВ графики дисперсии практически не отличались.



**Рис.4.** Дисперсия нулевой моды ОСВ в переходном слое пленки ЖИГ.

Несовпадение дисперсионных кривых означало, что в пределах толщины переходного слоя набеги фазы мод ОСВ неоднородны. Это означает, что на длине пробега будет возникать расфазировка плотности потоков мощности мод ОСВ.

### 3. Заключение

Таким образом было показано, что тонкий переходный слой эпитаксиальной пленки ЖИГ обеспечивает возможность эффективного возбуждения коротковолновых

обменных спиновых волн. При этом, несмотря на сильную неоднородность он обладает собственными резонансными и волноводными свойствами. Неоднородность намагниченности вносит свои особенности, которые проявляются в виде искажений дисперсионной зависимости ОСВ, в виде искажения эпюры колебаний по толщине слоя и расфазировки плотности потоков мощности мод ОСВ. Существование переходного слоя существенно расширяет семейство спиновых волн, возбуждаемых в пленке ЖИГ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (**проект № 23-79-30027**).

#### Список литературы

1. V.V. Tikhonov, A.N. Litvinenko, Spin-wave diagnostics of the magnetization distribution over the thickness of a ferrite film, *Appl. Phys. Lett.* 115 (2019) 072410
2. V.V. Tikhonov, A.N. Litvinenko, Exchange spin waves and their application for diagnostics of the layered structure of epitaxial YIG films, *J. Magn. Magn. Mater.* 515 (2020) 167241
3. V.V. Tikhonov, V.A. Gubanov, S.A. Nikitov, A.V. Sadovnikov, Spin-wave diagnostics of ultrathin ferrite films, *J. Magn. Magn. Mater.* 562 (15) (2022) 169763
4. V.V. Tikhonov, A.S. Ptashenko, A.V. Sadovnikov, Waveguide modes of exchange spin waves in epitaxial YIG films, *J. Magn. Magn. Mater.* 605 (2024) 172331