

# Возбуждение гиперзвука в переходном слое эпитаксиальной пленки ЖИГ

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

СГУ им. Н.Г. Чернышевского

**Аннотация:** Показано, что в переходном слое эпитаксиальной пленки железиттриевого граната (ЖИГ) выполняются условия фотон-магнонного и вторичного магнон-фононного преобразования, результатом которого является интенсивное возбуждение гиперзвука, излучаемого вглубь подложки гадолиний-галлиевого граната (ГГГ). При этом в пленочной структуре ЖИГ-ГГГ возбуждаются высокодобротные магнитоакустические резонансы, которые представляют интерес для создания высокостабильных СВЧ генераторов. Установлено, что высокая эффективность возбуждения гиперзвука обусловлена коллинеарным взаимодействием связанных волн.

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

## 1. Введение

Эпитаксиальные пленки ЖИГ являются наилучшей средой распространения связанных электромагнитных волн (фотонов), спиновых волн (магнонов) и акустических волн (фононов). Однако из-за огромной разницы скоростей их взаимодействие имеет мгновенный характер, что проявлялось в виде слабого вносимого затухания распространяющихся волн. Длительное взаимодействие (гибридизация) было возможно только при условии фазового синхронизма связанных волн.

Эффекты магнон-фононной гибридации ранее наблюдались на частотах синхронизма магнитоакустических волн (МСВ) с акустическими модами Лэмба в подложке ГГГ. Были обнаружены «быстрые» магнитоупругие волны, которые наблюдались в спектре МСВ в виде регулярной серии узкополосных магнитоакустических резонансных пиков [1]. Высокая добротность магнитоакустических резонансов представляла значительный интерес в плане разработки высокостабильных СВЧ генераторов. На их основе был создан образец магнитоакустического генератора с рекордно низким уровнем фазовых шумов [2].

Однако механизм возбуждения магнитоакустических резонансов оставался не до конца выясненным. Трудность состояла в том, что интенсивность накачки упругих колебаний в подложке ГГГ оказалась существенно выше той, которую можно было ожидать при слабом неколлинеарном излучении гиперзвука. Это обстоятельство требовало более детального исследования механизма возбуждения акустических волн.

С этой целью в данной работе исследовались особенности процессов гибридации электромагнитных, обменных спиновых и акустических волн в тонком переходном слое на внутренней границе эпитаксиальной пленки ЖИГ.

## 2. Методика расчета

Полагалось, что переходный слой на границе пленка-подложка был сформирован в процессе эпитаксиального роста пленки ЖИГ. В пределах толщины переходного слоя намагниченность пленки описывалась функцией распределения  $M = M_0 \left[ 1 - \exp\left(-z^2/\sigma^2\right) \right]$ , где  $M_0$  - намагниченность насыщения чистого ЖИГ,  $z$  -

координата точки в направлении толщины пленки,  $\sigma$  - феноменологический параметр распределения.

Рассматривался случай нормального намагничивания пленки ЖИГ. Совместно решались уравнение Ландау-Лифшица с учетом неоднородного обмена, система уравнений Максвелла и уравнение движения упругой среды. Решения искали в виде право поляризованных монохроматических волн  $e_+, h_+, m_+, u_+ \sim \exp[-i(\omega t - kz)]$ , где  $e_+, h_+$  - составляющие электромагнитной волны (ЭМВ),  $m_+$  - волна прецессии намагниченности (обменная спиновая волна (ОСВ)),  $u_+$  - волна упругого смещения (акустическая волна (АВ)). Диссипативные процессы и кристаллографическая анизотропия не учитывались.

Моделирование процессов возбуждения гиперзвука осуществлялось в два этапа. На первом этапе рассматривались эффекты гибридизации электромагнитных и обменных спиновых волн [3]. Было получено выражение закона дисперсии

$$k_{M,E} = \pm \sqrt{\frac{1}{2}(k_{M0}^2 + k_{E0}^2)} \pm \sqrt{\frac{1}{4}(k_{M0}^2 - k_{E0}^2)^2 + \frac{\omega_M}{\eta} k_{E0}^2}, \quad (1)$$

где знак (+) под радикалом соответствовал дисперсии гибридизованной ОСВ  $k_M$ , знак (-) соответствовал дисперсии гибридизованной ЭМВ  $k_E$ , и выражения потоков мощности, переносимых электромагнитной  $P_E$  и обменной составляющей  $P_M$  гибридной электромагнитно-спиновой волны

$$P_E = \frac{4\pi\omega k_{E0}^2 k_M}{\varepsilon(k_M^2 - k_{E0}^2)^2} |m_+|^2, \quad P_M = \frac{4\pi\eta k_{E0}^2 k_M}{k_M^2 - k_{E0}^2} |m_+|^2 \quad (2)$$

Здесь  $k_{M0} = \sqrt{(\omega - \omega_H)/\eta}$  и  $k_{E0} = \sqrt{\varepsilon} k_0$  - парциальные законы дисперсии обменных спиновых и электромагнитных волн,  $\omega_H = \gamma(H_0 - 4\pi M)$ ,  $\omega_M = 4\pi\gamma M$ ,  $\gamma = 1,76 \times 10^7 \text{ Ое}^{-1}\text{s}^{-1}$  - гиромангнитное отношение,  $\eta = 7.64 \times 10^{-2} \text{ см}^2\text{s}^{-1}$  - постоянная неоднородного обмена,  $\varepsilon = 14$  - относительная диэлектрическая проницаемость ЖИГ,  $k_0 = \omega/c$  - волновое число электромагнитной волны в вакууме,  $\omega = 2\pi f$  - круговая частота,  $c = 3 \times 10^{10} \text{ см/с}$  - скорость света.

На втором этапе рассматривались эффекты вторичной гибридизации обменных спиновых и акустических волн [4]. Было получено выражение закона дисперсии

$$k_{M1,S} = \pm \sqrt{\frac{1}{2}\left(k_M^2 + k_{S0}^2 + \xi \frac{\omega_M}{\eta}\right)} \pm \sqrt{\frac{1}{4}\left(k_M^2 + k_{S0}^2 + \xi \frac{\omega_M}{\eta}\right)^2 - k_M^2 k_{S0}^2}, \quad (3)$$

где знак (+) под радикалом соответствовал дисперсии вторично гибридизованной ОСВ  $k_{M1}$ , знак (-) соответствовал дисперсии гибридизованной АВ  $k_S$ , и выражения потоков мощности акустической  $P_S$  и магнитной составляющей  $P_{M1}$  гибридной магнитоакустической волны

$$P_S = \frac{1}{2} \rho \omega^2 v_t |u_+|^2, \quad P_M = -\frac{\rho v_t^2 \omega_H (k_S^2 - k_{S0}^2) k_{M1}}{2\eta (k_{M1}^2 - k_M^2) k_S} v_{M1G} |u_+|^2. \quad (4)$$

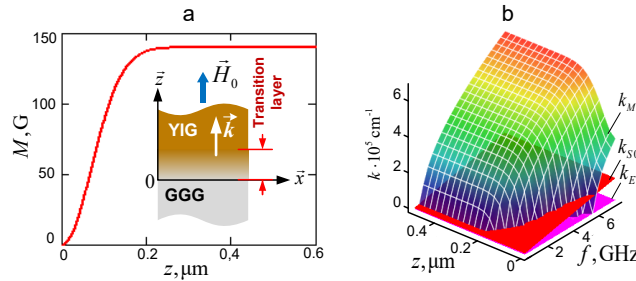
Здесь  $k_{S0} = \omega/v_t$  - волновое число парциальной АВ,  $v_t = 3.84 \times 10^5$  cm/s - скорость сдвиговой упругой волны,  $\xi = B_2^2 / (\rho v_t^2 M_0^2) = 2.58 \cdot 10^{-4}$  - безразмерный параметр магнитоупругой связи,  $B_2 = 6.96 \times 10^6$  erg/cm<sup>3</sup> - релятивистская магнитоупругая постоянная,  $\rho \approx 5.17$  g/cm<sup>3</sup> - плотность ЖИГ,  $v_{M1G} = (\partial k_{M1} / \partial \omega)^{-1}$  - групповая скорость вторично гибридной ОСВ.

Используя выражения (2), (4), нетрудно было рассчитать эффективность преобразования мощности ЭМВ→ОСВ  $\chi_{EM} = P_M / (P_M + P_E)$  и ОСВ→АВ  $\chi_{M1S} = P_S / (P_S + P_{M1})$ .

### 3. Обсуждение

Ниже приведены результаты численного моделирования процессов гибридизации и преобразования мощности связанных волн. Расчеты проводились при фиксированном поле  $H_0 = 2.1$  Oe и заданном значении параметра  $\sigma = 10^{-5}$  sm.

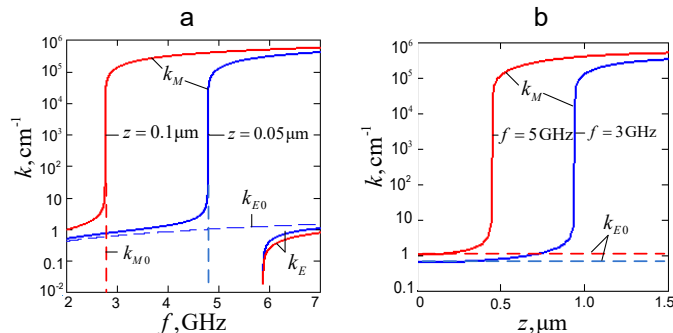
На графике рисунка 1.a представлена функция распределения намагниченности в пределах толщины переходного слоя. На рисунке 2.b представлены 3d-графики законов дисперсии парциальных обменных спиновых  $k_{M0}(f, z)$ , электромагнитных  $k_{E0}(f, z)$  и акустических волн  $k_{S0}(f, z)$ .



**Рисунок 1.** Функция распределения спонтанной намагниченности пленки ЖИГ (на вставке геометрия задачи) (a). Дисперсия парциальных ОСВ, АВ и ЭМВ (b).

На рисунке 1.b хорошо видно, что в пределах толщины переходного слоя волновые числа ОСВ плавно спадали до нуля, что обеспечивало возможность фазового синхронизма парциальных волн. Эффекты гибридизации ЭМВ-ОСВ и ОСВ-АВ возникали в окрестностях точек на линии пересечения дисперсионных поверхностей.

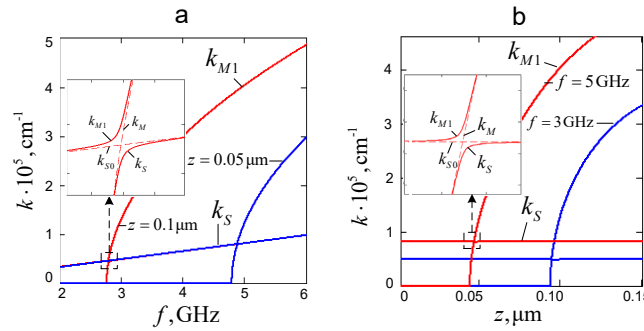
Дисперсия электромагнитно-спиновых волн представлена на рисунке 2.



**Рисунок 2.** Дисперсия гибридных ОСВ и ЭМВ, рассчитанная при фиксированных значениях координат (а), координатные зависимости волновых чисел ОСВ, рассчитанные при фиксированных значениях частоты (b).

На рисунке 2.а хорошо видно, что в переходном слое пленки ЖИГ гибридная ЭМВ и ОСВ характеризуются широкой раздвижкой дисперсионных ветвей. На рисунке 2.б иллюстрируются процессы трансформации ЭМВ→ОСВ. Видно, что при  $z = 0$  волновые числа ОСВ в точности совпадают с волновыми числами ЭМВ. Это обеспечивало хорошее согласование с внешним СВЧ трактом.

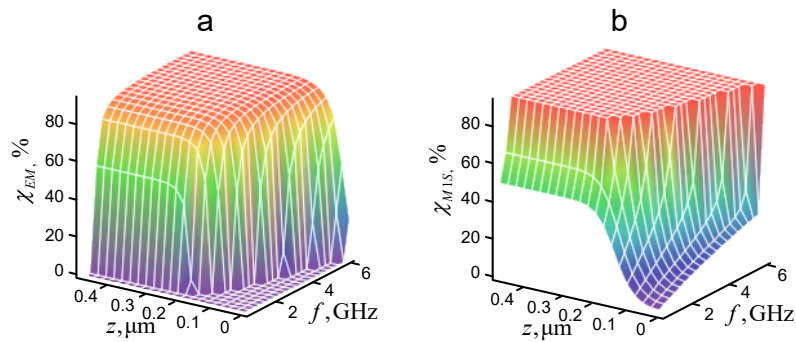
Дисперсия магнитоакустических волн представлена на рисунке 3.



**Рисунок 3.** Дисперсия вторично гибридных ОСВ и АВ (а), координатные зависимости волновых чисел гибридных ОСВ и АВ (b).

Видно, что ширина щелей, вызванных раздвижкой ветвей дисперсии гибридных ОСВ и АВ, оказалась значительно уже, что объяснялось слабой магнитоупругой связью. Существенно, что вдали от точек синхронизма волны распространялись независимо друг от друга. При этом акустическая волна могла беспрепятственно излучаться вглубь подложки ГТГ.

В обоих случаях эффекты гибридации сопровождались перераспределением потоков мощности, как показано на рисунке.4.



**Рисунок 4.** Эффективность преобразования мощности ЭМВ→ОСВ (а) и ОСВ→АВ (b).

Видно, что в обоих случаях эффективность СВЧ возбуждения ОСВ и АВ превышала 80%. На границе пленка-подложка доля обменной мощности гибридной магнитоакустической волны обращалась ноль. При этом волна, излучаемая вглубь подложки ГТГ, становилась чисто акустической.

### 3. Заключение

Высокая интенсивность преобразования ЭМВ→ОСВ и вторичного преобразования ОСВ→АВ была обусловлена коллинеарным взаимодействием

связанных волн в переходном слое пленки ЖИГ. При этом мощность излучаемой АВ оказывалась достаточной для возбуждения высокочастотных магнитоакустических резонансов в пленочной структуре ЖИГ-ГГГ.

Предложенная методика расчета может быть полезной для оптимизации структуры высокочастотных магнитоакустических резонаторов с целью повышения стабильности частоты твердотельных СВЧ генераторов.

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

#### Список литературы

1. Казаков Г.Т., Тихонов В.В., Зильберман П.Е. Резонансное взаимодействие магнитодипольных и упругих волн в пластинах и пленках железо-иттриевого руната. // ФТТ. – 1983. – Т.25, №8. – С.2307-2312.
2. Litvinenko A.N., Khymyn R.S., Tyberkevych V.S., Tikhonov V.V., Slavin A.N, Nikitov S.A. Tunable magnetoacoustic oscillator with low phase noise. // Physical Review Applied. – 2021. – V.15, No.3. – P.034057
3. Tikhonov V.V., Gubanov V.A., Nikitov S.A., Sadovnikov A.V. // Spin-wave diagnostics of ultrathin ferrite films. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2022. – V.526. – P.169763/
4. Тихонов В.В., Губанов В.А., Садовников А.В. Магнон-фононное взаимодействие в переходном слое эпитаксиальной пленки ЖИГ. // Физика твердого тела. – 2021.- Т.63, №9 – С.1335-1339.