

Спин-волновая диагностика многослойных ферритовых пленок

В.В. Тихонов

СГУ им. Н.Г. Чернышевского

Аннотация: Обнаружено высокоинтенсивное импульсное возбуждение обменных спиновых волн в тонком переходном слое на внутренней поверхности эпитаксиальной пленки железиттриевого граната. Показано, что такое возбуждение возможно только при нормальном намагничивании пленки. Измерены дисперсионные характеристики обнаруженных волн. Предложена методика неразрушающего контроля слоистой структуры ферритовой пленки.

Ключевые слова: эпитаксиальная пленка, железиттриевый гранат, слоистая структура, намагниченность насыщения, неразрушающий контроль.

1. Введение

Эпитаксиальные пленки железиттриевого граната (ЖИГ) на немагнитных подложках гадолиний-галлиевого граната (ГГГ) являются наиболее перспективным материалом спин-волновой СВЧ электроники [1], магнитооптики [2] и магнитоакустики [3,4]. Этому способствовали значительные достижения технологии эпитаксиального роста. Однако по некоторым показателям характеристики пленок ЖИГ требуют дальнейшего улучшения.

Наиболее острой проблемой является многослойность пленок ЖИГ, которая неизбежно возникает в процессе эпитаксиального роста. На внутренней поверхности пленки, граничащей с подложкой ГГГ, образуется тонкий переходный слой с пониженной намагниченностью. В тоже время на внешней поверхности пленки образуется слой с повышенной намагниченностью. Это одинаково касается пленок, выращенных методом жидкофазной эпитаксии [5] и методом ионно-лучевого распыления [6,7]. При этом если внешний слой можно просто удалить, используя методы химического травления или механической полировки, то внутренний слой является неустранимым. Можно лишь уменьшить его толщину за счет корректировки режима роста [5]. Но для этого необходимы средства контроля намагниченности внутри переходного слоя. В настоящее время эта проблема решается за счет послойного стравливания и спектрального анализа элементного состава пленки ЖИГ [7]. Однако это дает лишь качественное представление о магнитных свойствах слоев. К тому же сама пленка ЖИГ при этом полностью разрушается.

В тоже время, известно, что наличие тонкого слоя способствует возбуждению в пленке ЖИГ обменных спиновых волн (ОСВ), бегущих в поперечном направлении пленки [8,9]. Также известно, что в случае импульсного возбуждения ОСВ можно наблюдать серии задержанных эхоимпульсов, которые несут в себе информацию о магнитных свойствах пленки. Последнее обстоятельство представляется перспективным для измерения магнитных характеристик многослойных пленок ЖИГ.

В данной работе предложен метод неразрушающего контроля распределения намагниченности по толщине эпитаксиальной пленки ЖИГ. Предложенный метод основан на импульсных измерениях волновых характеристик ОСВ, возбуждаемых в тонком переходном слое на границе пленка-подложка.

2. Подготовка образцов и экспериментальные результаты

Для наблюдения эффектов импульсного возбуждения ОСВ использовалась эпитаксиальная пленка ЖИГ, выращенная методом жидкофазной эпитаксии. Предварительно пленка подвергалась химико-механической полировке на глубину 1-2 μm . Конечная толщина пленки составляла $d = 13 \mu\text{m}$. Экспериментальный образец пленки ЖИГ был выполнен в виде диска диаметром 2.5mm. В качестве преобразователя ОСВ использовалась закороченная на конце микрополосковая линия (МПЛ). Ширина МПЛ составляла 3.0 mm. Образец пленки вместе с преобразователем помещался в постоянное магнитное поле $H_0 = 2350 \text{ Oe}$, ориентированное по нормали к поверхности пленки. На вход МПЛ подавался радиоимпульс длительностью 20ns с частотой заполнения 3GHz. Измерялись характеристики отраженных эхоимпульсов.

Схема измерительной установки представлена на рис.1.а, результаты измерений – на рис.1.б.

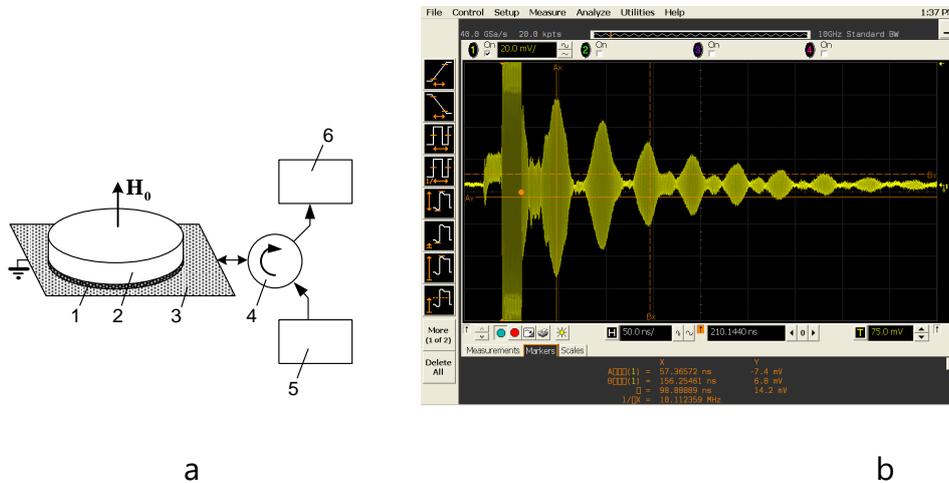


Рисунок 1. Результаты эксперимента: а – схема экспериментальной установки (1 – пленка ЖИГ, 2 – подложка ГГГ, 3 – микрополосковый преобразователь ОСВ, 4 – ферритовый циркулятор, 5 – импульсный генератор СВЧ, 6 – измерительный осциллограф); б - осциллограмма эхоимпульсов ОСВ.

На осциллограмме рис.1б наблюдалась серия задержанных эхоимпульсов, которые следовали с равными интервалами времени $\tau = 49.45 \text{ ns}$. Всего наблюдалось не менее 9 эхоимпульсов. Задержка последнего эхоимпульса достигала $0.5 \mu\text{s}$.

Появление эхоимпульсов было вызвано возбуждением обменных спиновых волн в тонком переходном слое на внутренней поверхности пленки ЖИГ. Волны излучались вглубь пленки и отражались от ее противоположной поверхности. В переходном слое отраженные волны частично преобразовывались в СВЧ сигнал и вновь излучались вглубь пленки ЖИГ. Эти процессы повторялись многократно. Учитывая, что толщина пленки составляла $d = 13 \mu\text{m}$, нетрудно было посчитать групповую скорость ОСВ. В нашем случае она составляла $v_g = 5.31 \cdot 10^4 \text{ sm/s}$, что на порядок меньше скорости звука.

По результатам измерений амплитуд эхоимпульсов были сделаны оценки коэффициента преобразования k и декремента q'' ОСВ. Для этого измерялись амплитуды первого A_1 второго A_2 и третьего A_3 эхоимпульсов, которые были связаны между собой следующими соотношениями:

$$A_2 = A_1 k^2 \exp(-2q''d), \quad A_3 = A_2 (1-k) \exp(-2q''d) \quad (1)$$

Из выражений (1) нетрудно было получить расчетные формулы:

$$k = \frac{A_2^2}{A_1 A_3} \left[\sqrt{1 + \frac{2A_1 A_3}{A_2^2}} - 1 \right], \quad q'' = -\frac{1}{2d} \ln \left[\frac{A_3}{A_2} \left(\sqrt{1 + \frac{2A_1 A_3}{A_2^2}} - 1 \right) \right] \quad (2)$$

В нашем случае эффективность преобразования ОСВ составляла $k \approx 70\%$, а декременты $q'' \approx 220 \text{ см}^{-1}$. С учетом измеренной групповой скорости нетрудно было посчитать временные декременты ОСВ $\omega'' = 10 \cdot \log(v_g q'') \approx 12 \text{ dB/ms}$, которые оказались сравнимыми и даже меньше декрементов магнитостатических волн [1].

По результатам измерений времени задержки эхоимпульсов τ были сделаны оценки экспоненциального распределения намагниченности насыщения по толщине пленки ЖИГ $M(\lambda, z) = M_0 [1 - \exp(-\lambda z)]$, где z - координата ($0 \leq z \leq d$), λ - параметр функции распределения, $M_0 = 140 \text{ G}$ - намагниченность насыщения чистого ЖИГ.

Для определения параметра λ решалось уравнение Ландау-Лифшица с учетом неоднородного обмена [1]. Рассматривался случай распространения волны вдоль направления намагничивающего поля, совпадающего с нормалью к поверхности пленки. Было получено дисперсионное выражение для волнового числа ОСВ

$$q(\omega, \lambda, z) = \sqrt{\frac{\omega - \gamma H_0 + 4\pi\gamma M(\lambda, z)}{\gamma\alpha M(\lambda, z)}} \quad (3)$$

где $\omega = 2\pi f$ - круговая частота, $\gamma = 2.83 \text{ MHz/Oe}$ - гиромагнитное отношение, $\alpha = 3.5 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2$ - постоянная неоднородного обмена. Из уравнения (3) было получено выражение для группового времени задержки ОСВ на длине пробега эхоимпульса $l = 2d$

$$\tau(\omega, \lambda) = \int_0^l \text{Re} \left[\frac{d}{d\omega} q(\omega, \lambda, z) \right] dz. \quad (4)$$

Расчеты проводились численными методами. На рис.2.a представлена зависимость $\tau(\lambda)$, рассчитанная при заданном значении частоты $\omega = 3 \text{ GHz}$. Из графика зависимости $\tau(\lambda)$ было получено значение параметра $\lambda = 82093 \text{ см}^{-1}$, который соответствовал измеренному времени задержки эхоимпульсов $\tau = 49.45 \text{ ns}$. На рис.2.b представлена функция распределения намагниченности $M(z)$, рассчитанная с учетом найденного значения λ . Видно, что переходный слой на границе пленка-подложка не имеет четкой границы. Его толщину можно было оценить только визуально. В нашем случае она составляла приблизительно $0.5 \text{ }\mu\text{m}$, что совпадало с результатами работы [5].

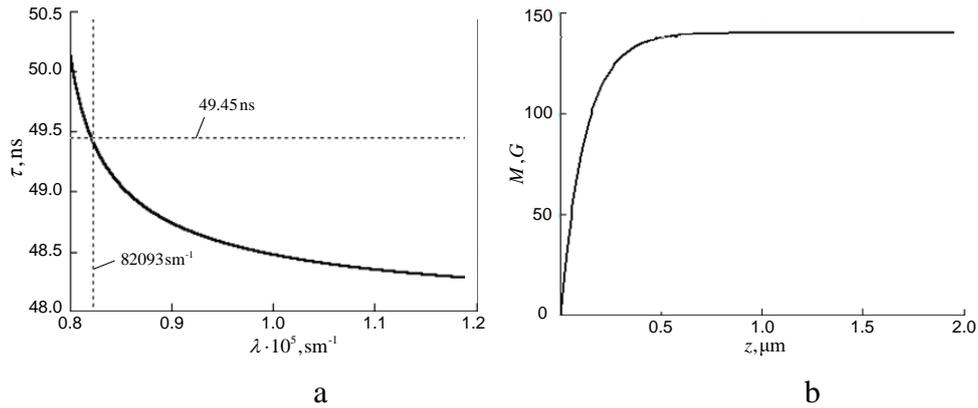


Рисунок 2. Результаты расчета: а – зависимость времени задержки эхоимпульсов от параметра экспоненциального распределения; б – функция распределения намагниченности по толщине пленки ЖИГ.

С учетом найденного значения λ нетрудно было рассчитать волновые характеристики излучаемых волн. На рис.3.а представлена дисперсионная зависимость волнового числа ОСВ $q'(\omega, z) = \text{Re}[q(\omega, z)]$, рассчитанная пределах толщины переходного слоя. На рис.3.б представлены частотные зависимости групповой v_g и фазовой v_p скоростей, рассчитанные вдали от переходного слоя.

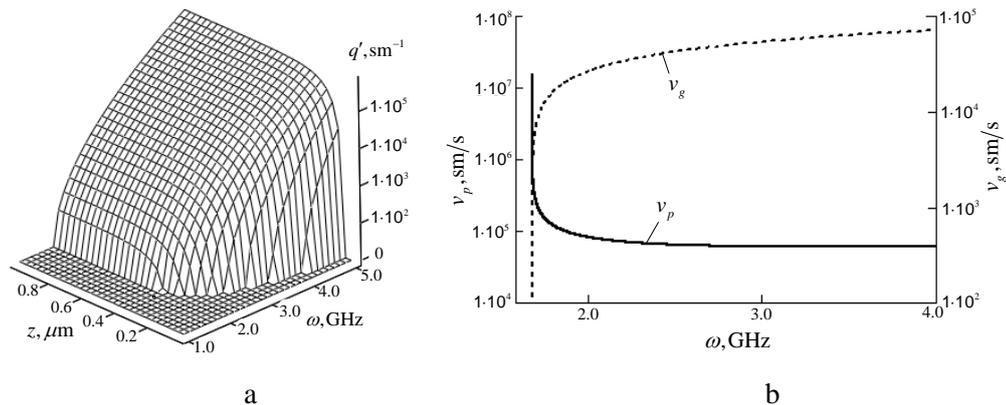


Рисунок 3. Волновые характеристики обменных спиновых волн: а – дисперсия ОСВ в пределах толщины переходного слоя; б – частотные зависимости групповой и фазовой скоростей.

На графике рис.3.а хорошо видно, что в пределах толщины переходного слоя волновые числа ОСВ плавно возрастают от нуля до максимального значения, характерного для пленки чистого ЖИГ. При этом нулевые значения волнового числа достигались внутри переходного слоя. В частности, на частоте $\omega = 3.0 \text{ GHz}$ волновое число обращалось в ноль при $z \approx 0.14 \mu\text{m}$. В той же точке намагниченность слоя составляла $\sim 100 \text{ G}$. На рис.3.б видно, что вдали от частоты отсечки фазовая и групповая скорости ОСВ различались незначительно, что характерно для спиновых волн с квадратичной дисперсией в безграничном феррите. Вблизи частоты отсечки возникали резкие скачки скоростей. Как и ожидалось, эти скачки имели противоположную направленность. Из графика рис.3.б было получено значение групповой скорости $v_g = 5.37 \cdot 10^4 \text{ sm/s}$, которое с хорошей точностью совпадало с измеренной скоростью распространения импульсов ОСВ.

Высокая интенсивность возбуждения обменных спиновых волн объяснялась

синхронизмом ОСВ с внешним однородным СВЧ полем, который выполнялся при нулевых значениях волнового числа. В переходном слое происходило уменьшение длин ОСВ. При этом переходный слой с плавно нарастающей намагниченностью выполнял функции согласующего элемента ОСВ с внешним СВЧ трактом.

3. Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований было показано, что при нормальном намагничивании эпитаксиальной пленки ЖИГ можно наблюдать импульсное возбуждение обменных спиновых волн, бегущих вглубь пленки и отражающихся от ее противоположной поверхности. Возбуждение и прием эхоимпульсов ОСВ возникает в тонком переходном слое, который всегда присутствует на границе раздела пленка ЖИГ - подложка ГГГ. Показано, что волновые характеристики излучаемых ОСВ существенно зависят от распределения намагниченности по толщине переходного слоя. Показана возможность построения функции распределения намагниченности по толщине пленки ЖИГ. Для этого используются результаты измерения времени задержки эхоимпульсов ОСВ. Предложенная методика может применяться для неразрушающего контроля распределения намагниченности по толщине эпитаксиальных ферритовых пленок.

Список литературы

1. Калиникос Б.А. Спин-волновые устройства и эхо-процессоры/ Б.А. Калиникос, [и др.] — М: изд. «Радиотехника», 2013. — 216 с.
2. Звездин А.К., Магнитооптика тонких пленок. /А.К. Звездин, В.А. Котов —М.: изд. «Наука». 1988. —192 с.
3. Беляева О.Ю. Магнитоакустика ферритов и магнитоакустический резонанс/О.Ю. Беляева, [и др.] //УФН. —1992. — Т.162, —№2. — С.107-138.
4. Тихонов В.В. Параметрическая магнон-фононная неустойчивость в пленочных структурах железиттриевого граната/ В.В.Тихонов, С.А. Никитов // Изв. РАН. Серия физическая. —2017. — Т.8. —№8. — С.1073–1082.
5. Ющук С.И. Слоистая структура эпитаксиальных пленок железо-иттриевого граната/С.И. Ющук //ЖТФ. —1999. —Т.69. —№12. —С.62-64.
6. Кириченко В.Г. Исследование элементного состава и диффузии компонент тонких пленок железиттриевого граната/ В.Г. Кириченко, О.В. Коваленко // ВАНТ. —2014. —№1(89). — С.133-140.
7. Мокляк В. В. Исследования магнитных и электрических сверхтонких взаимодействий в эпитаксиальной пленке железиттриевого граната методом конверсионной электронной мессбауэровской спектроскопии/ В. В. Мокляк // Изв. ВУЗов. Материалы электронной техники. 2015. —Т.18. — №1. —С.62-68.
8. Тихонов В.В. Линейное возбуждение обменных спиновых волн в имплантированных пленках ЖИГ / В.В. Тихонов, А.В. Толкачев // ФТТ. —1994. —Т.36. —№1. —С.185-193.
9. Тихонов В.В. Резонансный механизм возбуждения обменных спиновых волн в двухслойной феррит-ферритовой структуре / В.В. Тихонов, А.Н. Литвиненко // Изв. РАН. Серия физическая. — 2014. —Т.78. —№2. — С. 192-197.