

05

Влияние области затухания спиновых волн в слое закрепления на интенсивность линий спин-волнового резонанса

© А.М. Зюзин, С.Н. Сабаев, А.Г. Бажанов, В.В. Радайкин

Мордовский государственный университет, Саранск

Поступило в Редакцию 2 февраля 2000 г.

В окончательной редакции 12 октября 2000 г.

Обнаружено "аномальное" поведение интенсивности линий мод спин-волнового резонанса в двухслойных пленках. Приведены экспериментальные данные и результаты расчета, доказывающие, что механизм, обуславливающий возрастание интенсивности линий с номером моды, связан с действием области затухания спиновой волны в слое закрепления.

Как следует из теории спин-волнового резонанса (СВР) [1–3], интенсивность I_n линий поглощения спин-волновых (СВ) мод убывает с возрастанием номера моды n . Например, в случае полного закрепления спинов $I_n \sim n^{-2}$ [2]. Нерегулярности в распределении I_n могут возникать из-за несимметрии граничных условий и зависимости степени закрепления от n , когда происходит возбуждение промежуточных мод [4]. В этом случае нерегулярность носит периодический характер.

В настоящей работе обнаружено "аномальное" поведение интенсивности линий поглощения СВ-мод, заключающееся в том, что в некотором интервале волновых чисел с увеличением номера моды происходит не уменьшение, а наоборот, монотонное возрастание интенсивности линий. Исследования проводились на двухслойных монокристаллических пленках феррит-гранатов, в которых доминирующим является динамический механизм закрепления спинов [5]. Пленки были получены методом жидкофазной эпитаксии путем последовательного наращивания слоев из различных растворов в расплаве на подложки из гадолиний-галлиевого граната с плоскостью (111). Первый слой состава $(\text{BiSmTm})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ имел намагниченность $4\pi M = 600$ Gs, параметр затухания Гильберта $\alpha = 0.013$, эффективное поле одноосной анизотропии $H_k = -270$ Oe, второй слой состава $(\text{YSm})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12} - 4\pi M = 1720$ Gs,

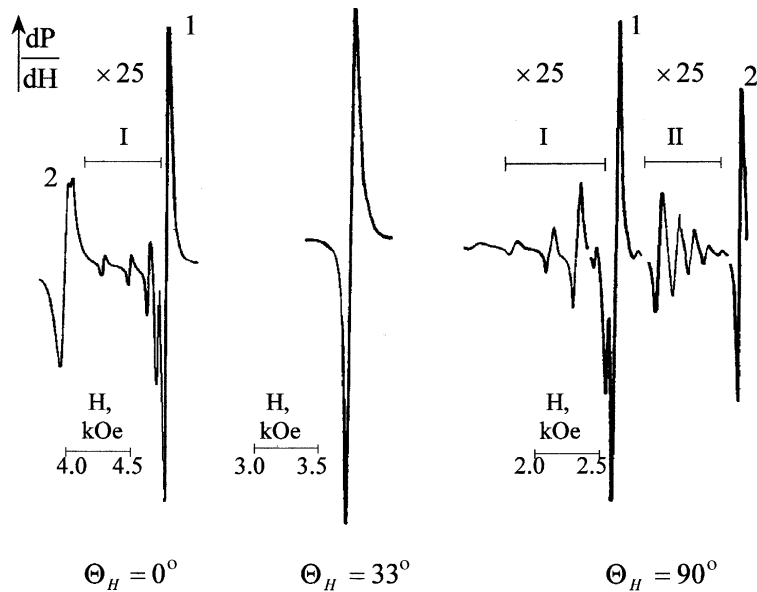


Рис. 1. Спектры СВР при перпендикулярной ($\Theta_H = 0^\circ$), промежуточной ($\Theta_H = 33^\circ$) и параллельной ориентациях \mathbf{H} относительно пленки. Цифрами 1 и 2 обозначены нулевые моды соответствующих слоев. I и II — интенсивности возбуждения.

$\alpha = 0.003$, $H_k = -1680$ Ое. Спектры СВР при различных углах Θ_H между постоянным магнитным полем \mathbf{H} и нормалью к плоскости показаны на рис. 1. При $\Theta_H \approx 33^\circ$ спектр вырождается в единственную моду. Вырождение связано с тем, что поля однородного резонанса в слоях H_{01} и H_{02} при таком значении Θ_H становятся равными и в результате перестает действовать динамический механизм закрепления спинов.

Одна из ярких особенностей состояла в том, что при перпендикулярной ориентации ($\Theta_H = 0^\circ$) в спектре СВР наблюдалась одна серия пиков поглощения (в интервале II), при параллельной ($\Theta_H = 90^\circ$) две серии I и II. При той и другой ориентациях серия II соответствует СВ-модам, возбуждаемым во втором слое. Об этом свидетельствуют практически одинаковый наклон дисперсионных кривых при обеих ориентациях (см.

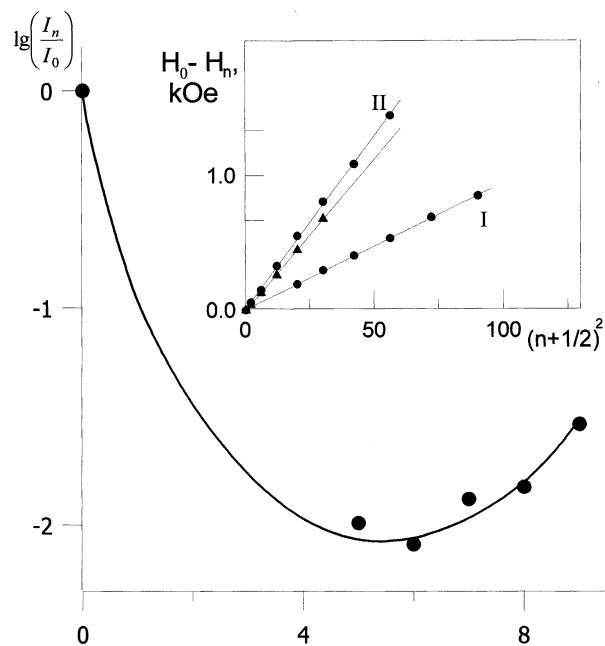


Рис. 2. Зависимость интенсивности I_n от n . На вставке: I и II — дисперсионные зависимости для соответствующих серий. \times — перпендикулярная, ∇ — параллельная ориентации.

вставку на рис. 2), а также результаты экспериментов по послойному сравливанию. Распределение интенсивности пиков в серии II соответствует известным моделям, уменьшаясь по мере возрастания номера СВ-моды. Особый интерес представляет серия пиков I, наблюдающихся при $\Theta_H = 90^\circ$, природа которых не является очевидной. Интенсивность пиков убывает по мере удаления от нулевой моды второго слоя. В тоже время ясно, что они не могут быть обусловлены гармоническими СВ-модами, возбуждаемыми в этом слое, так как в данной области магнитных полей второй слой является для спиновых волн реактивной (упругой) средой. На первый взгляд представляется, что они не связаны и с первым слоем, поскольку их интенсивность возрастает с увеличением n . Однако, как удалось установить экспериментально, а также показал

проведенный анализ, наблюдаемая серия пиков I соответствует гармоническим СВ-модам, возбуждаемым именно в первом слое. Данный вывод подтверждается следующими результатами. При изменении угла Θ_H от 90 до 33° происходило уменьшение интервала полей между нулевыми модами. При этом расстояние по шкале полей от наблюдаемых пиков СВ-мод серии I до нулевой моды первого слоя не изменялось, но плавно изменялось расстояние до нулевой моды второго слоя. В результате пики поочередно исчезали, начиная от наиболее близких к пику нулевой моды второго слоя. Это свидетельствует о том, что волновые числа СВ-мод серии I определяются параметрами первого слоя. Данный вывод подтверждается и характером эволюции спектра СВР, происходящей при уменьшении толщины второго слоя. Уменьшение толщины путем химического травления приводило к изменению резонансных полей пиков серии II и увеличению угла наклона соответствующей дисперсионной кривой. Каких-либо изменений с пиками поглощения серии I при этом не происходило. Лишь начиная с некоторого ($\sim 0.08 \mu\text{m}$) значения толщины второго слоя их интенсивность начинала постепенно уменьшаться. Последнее связано с тем, что толщина второго слоя становится меньше глубины проникновения (длины пробега) l спиновой волны в этот слой и, следовательно, происходит уменьшение степени закрепления спинов.

Заметим, что в случае двухслойной пленки с однородными слоями зависимость разности резонансных полей нулевой и n -й мод $H_0 - H_n$ от $(n + 1/2)^2$ должна быть линейной (см. вставку на рис. 2). Ошибка в нумерации пиков СВ-мод как в одну, так и в другую сторону приводит к отклонению упомянутой зависимости от линейной. В соответствии с этим критерием и определялись номера пиков поглощения СВ-мод в серии I.

Спектр СВР серии I и его особенности, в частности отсутствие пиков с малыми номерами и "аномальное" возрастание интенсивности линий СВ-мод с увеличением их номера, можно объяснить следующим. Из-за сравнительно большой толщины первого слоя расстояние между пиком, соответствующим нулевой моде этого слоя и пикам СВ-мод с малыми номерами ($H_0 - H_n \approx \frac{2A}{M}(n + \frac{1}{2})^2 \frac{\pi^2}{h^2}$ [4]), является весьма малым и не превышает ширину линии поглощения $2\Delta H$, которая в этом слое составляет 115 Ое. Поэтому, несмотря на то что интенсивность пиков СВ-мод с малыми номерами еще достаточно велика, они, из-за

наложения пика нулевой моды, не регистрируются [6]. С увеличением номера моды, хотя и происходит уменьшение суммарного переменного магнитного момента гармонической части спиновой волны в первом слое, одновременно существенно увеличивается глубина проникновения l спиновой волны во второй слой, а следовательно и переменный магнитный момент, обусловленный областью экспоненциального затухания. Поскольку намагниченность во втором слое примерно в 3 раза больше, а параметр затухания, наоборот, меньше, чем в первом слое, влияние области затухания на I_n становится определяющим.

Для количественного описания наблюдаемого спектра СВР двухслойной пленки был проведен расчет интенсивности линий СВ-мод. При параллельной ориентации для интервала полей $H_{01} \div H_{02}$ спиновая волна аппроксимировалась гармонической в первом слое и экспоненциально затухающей во втором:

$$m_1(z) = B \cos(k_1 z), \quad m_2(z) = C \exp[-k_2''(z - h_1)]. \quad (1)$$

Здесь B и C — постоянные, k_1 — волновое число спиновой волны в первом слое, $k_2'' = (1/l)$ — во втором, h_1 и h_2 — толщины первого и второго слоев, $z = 0$ соответствует свободной поверхности первого слоя; k_1 и k_2'' рассчитывали с помощью дисперсионного соотношения, записанного для одного и другого слоев [5]. Набор допустимых значений k_1 определяли с помощью обменных граничных условий. Расчет интенсивности пиков СВ-мод проводили, пользуясь соотношением [7]:

$$I_n \sim \frac{\left(\int_0^{h_1} m_1(z) dz \right)^2 + \left(\int_{h_1}^{h_1+h_2} m_2(z) dz \right)^2}{\int_0^{h_1} \frac{\alpha_1}{\gamma_1 M_1} m_1^2(z) dz + \int_{h_1}^{h_1+h_2} \frac{\alpha_2}{\gamma_2 M_2} m_2^2(z) dz}. \quad (2)$$

Расчетные и экспериментальные зависимости $I(n)$ приведены на рис. 2. Видно, что имеет место удовлетворительное соответствие теоретических и экспериментальных результатов. До некоторого номера интенсивность СВ-мод уменьшается, затем определяющим и все более возрастающим становится вклад от области затухания спиновой волны во втором слое, что приводит к возрастанию интенсивности линий СВ-мод с увеличением n . Ярко выраженная дискретность спектра

СВР в серии I в то же время свидетельствует о том, что, несмотря на доминирующий вклад области экспоненциального затухания в суммарный переменный магнитный момент, набор волновых чисел возбуждаемых СВ-мод определяется параметрами слоя (первого), в котором локализована гармоническая часть стоячей спиновой волны. Это подтверждается, в частности, линейным характером дисперсионной зависимости для СВ-мод серии I (рис. 2).

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 98-02-03320).

Список литературы

- [1] *Kittel C.* // Phys. Rev. 1958. V. 110. N 6. P. 1295–1297.
- [2] *Гуревич А.Г., Мелков Г.А.* Магнитные колебания и волны. М.: Наука, 1994. 464 с.
- [3] *Ахиезер А.И., Барьяхтар В.Г., Пелетминский С.В.* Спиновые волны. М.: Наука, 1967. 368 с.
- [4] *Зюзин А.М., Бажанов А.Г.* // ЖЭТФ. 1997. Т. 112. В. 10. С. 1430–1439.
- [5] *Wiltis C.H., Prasad S.* // IEEE Trans. Magn. 1981. MAG-17. P. 2405–2414.
- [6] *Зюзин А.М., Радайкин В.В.* XIII Всесоюз. школа-семинар "Новые магнитные материалы микроэлектроники": Тез. докл. в 2 ч. Астрахань, 1992. Ч. 1. С. 253–254.
- [7] *Саланский Н.М., Ерухимов М.Ш.* Физические свойства и применение магнитных пленок. Новосибирск: Наука, 1975. 223 с.