

Спин-волновые резонансы в неоднородной двухслойной феррит-гранатовой пленке

© Н.К. Даньшин, В.С. Деллалов, А.И. Линник, В.Ф. Шкарь

Донецкий физико-технический институт Академии наук Украины,
340114 Донецк, Украина

E-mail: danshin@host.dipt.donetsk.ua

(Поступила в Редакцию 18 сентября 1998 г.
В окончательной редакции 1 февраля 1999 г.)

Исследовались магнитные резонансы в двухслойных V_i -замещенных феррит-гранатовых пленках, в которых один слой имеет анизотропию типа "легкая ось", а другой — "легкая плоскость". Изучено поведение резонансов в зависимости от толщины пленки, температуры и отжига. Экспериментально показано, что линии резонансного поглощения, наблюдаемые в такой неоднородной структуре, в случае когда внешнее магнитное поле перпендикулярно плоскости пленки, соответствуют ферромагнитным (ФМР) и спин-волновым резонансам (СВР). Причем серия СВР возбуждается в наиболее неоднородной части пленки. Предложена качественная модель, объясняющая совокупность экспериментальных данных и позволяющая получить из эксперимента профиль поля эффективной магнитной анизотропии по толщине пленки.

Исследования ФМР-спектров в слоистых пленочных феррит-гранатовых структурах позволяют получать важную информацию о возбуждении, распространении и взаимодействии различного рода магнитных колебаний. Этому был посвящен ряд работ [1–5], в которых, например, показано, что помимо однородного ФМР в магнитных, в частности двухслойных пленках можно наблюдать и неоднородный СВР или своеобразный резонанс, названный ФМР-дублетом [4]. Интерпретация результатов в [1,2] облегчалась тем обстоятельством, что соответствующие пленки были или считались близкими к модельным. Имелось в виду, что в таких структурах два однородных по магнитным свойствам слоя пленки с существенно различными параметрами разделены относительно тонким пограничным слоем с резким скачком этих параметров. Однако однородность и параметры слоев, граница раздела зависят от состава материала и условий роста пленки. Поэтому интересной задачей, на наш взгляд, является установление определенной связи между спектрами ФМР, СВР и величиной, характером неоднородности материала по толщине. С этой целью было предложено исследование материалов, представленных в работе [3], при другой геометрии эксперимента, частоте, температуре и т.д.

В качестве объекта исследования была выбрана двухслойная пленка, выращенная методом жидкофазной эпитаксии по двугильной технологии [6] на подложке галлий-гадолиниевого граната с ориентацией нормали к плоскости подложки по оси (111). При этом первым на подложку был нанесен слой с составом $(Y\text{GdLa})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ и толщиной $0.1 \mu\text{m}$, который характеризовался плоскостью легкого намагничивания. Второй слой, выращенный поверх первого, имел состав $(Y\text{BiLu})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ и характеризовался осью легкого намагничивания (нормальной к плоскости пленки). Его толщина (вместе с неоднородным пограничным слоем) составляет около $2.0 \mu\text{m}$. Остальные параметры слоев, определенные стандартными методами [7], приведены в таблице.

Измерения производились на отражательном радиоспектрометре прямого усиления с модуляцией магнитного поля. При этом в опытах записывалась производная от мнимой части магнитной восприимчивости по магнитному полю. Измерительной ячейкой служила полосковая линия, на которую своей плоскостью наклеивались образцы в виде дисков диаметром 6 mm .

На рис. 1, а показаны записи линий поглощения, связанного с магнитными колебаниями в такой структуре для нормально намагниченной пленки, выполненные при температуре 295 K . Здесь и далее под линией поглощения на самом деле подразумевается производная от мнимой части магнитной восприимчивости по магнитному полю. Цифры в конце каждой записи обозначают суммарную толщину всех магнитных слоев в μm . Колебание под номером 1 соответствует однородному ФМР в первом слое, под номером 6 — во втором слое, линии 2, 3, 4, 5 обычно отождествляют с СВР в первом слое. Изучению такого рода спектров посвящена работа [2]. В ней, в частности показано, что возбуждение СВР между двумя однородного ФМР от разных слоев пленки объясняется явлением скин-эффекта (аналогично плоскости поворота спиновой волны [8]) на границе раздела. А это означает, что если удалить второй слой (например, методом последовательного травления), то исчезнет закрепление спинов на границе раздела, которое в рамках такого объяснения является

Параметры слоев пленки

№ слоя	$4\pi M$	$A, 10^{-7} \text{ erg/cm}$	$\gamma \cdot 10^{-7} \text{ Oe} \cdot \text{s}$	$\Delta H, \text{ Oe}$	$H_0^*, \text{ Oe}$
1	400	2.6	1.69	10	–330
2	171	2.6	1.5	20	1470

Примечание. $4\pi M$ — намагниченность насыщения; A — константа обменного взаимодействия; γ — гиромагнитное отношение; ΔH — ширина линии ФМР; $H_0^* = 2K/M - 4\pi M$ — поля эффективной анизотропии однородных слоев исходной пленки (K — константа одноосной анизотропии).

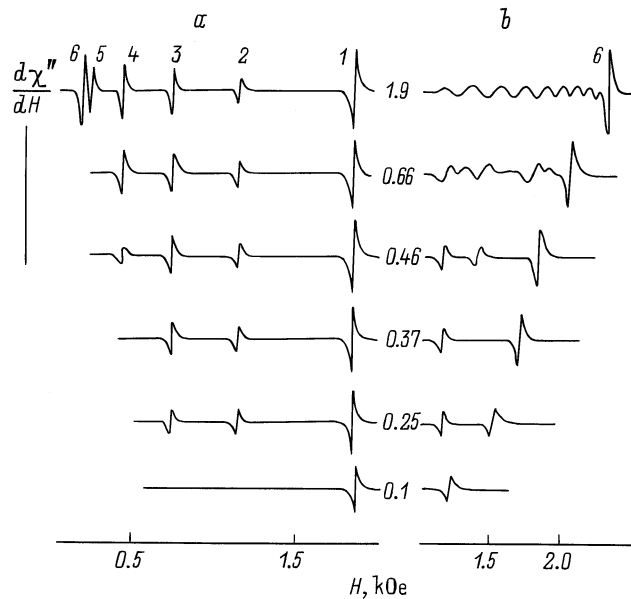


Рис. 1. Линия резонансного поглощения в исходном образце при стравливании второго слоя пленки до толщины, указанной возле каждой записи (в μm), в магнитном поле, перпендикулярном (*a*) и параллельном (*b*) плоскости пленки на частоте $\nu = 4.07 \text{ GHz}$ при температуре $T = 295 \text{ K}$. Обозначения линий поглощения: 1 — ФМР в 1-м слое; 2, 3, 4, 5 — СВР с $n = 1, 2, 3, 4$; 6 — ФМР от однородной части 2-го слоя.

необходимым условием возбуждения СВР. Причем при полном стравливании второго слоя все моды СВР первого слоя должны исчезнуть одновременно [1]. Именно это фундаментальное свойство СВР не обнаружено в наших экспериментах на указанных выше пленочных структурах. Как видно из рис. 1, *a*, по мере стравливания второго слоя линии 6, 5, 4, 3, 2 исчезают поочередно. Это означает, что обнаруженный спектр колебаний не может быть объяснен на основе представлений о закреплении спинов на резко выраженной границе раздела пленок.

Чтобы убедиться, что мы действительно имеем дело с СВР, а не с однородными ФМР от отдельных слоев многослойной структуры (а Bi -содержащие пленки действительно могут быть многослойными, если не принять специальных мер при их выращивании [7]), образец был подвергнут высокотемпературному отжигу в течение 10 часов при температуре 1320 К. Известно, что такая обработка приводит к изменению параметров материала пленки, в том числе и к уменьшению наведенной в процессе роста одноосной магнитной анизотропии [7]. Проведенный отжиг в самом деле уменьшил эффективную одноосную анизотропию пленки. При этом, как и следовало ожидать [7], линии 6 и 1 (рис. 2, *a, b*) однородного ФМР в каждом слое сместились в область высоких полей. В то же время линии 2, 3, 4 и 5 сместились в область низких полей. Причем резонансное поле линии 5 стало меньше, чем резонансное поле линии 6 (ФМР второго слоя), поэтому, в соответствии с [2], данная мода СВР не возбуждается.

Серия пиков поглощения, появившихся в отожженном образце возле линии 6 со стороны меньшего поля, связана, по-видимому, с тем, что в поверхностном слое (в результате непосредственного контакта с воздухом при отжиге) эффективная анизотропия стала больше, чем таковая во внутренних слоях. Это могло привести к закреплению спинов в этом слое и к возбуждению серии новых СВР в однородной части второго слоя. Как видно из рис. 3, *a*, при стравливании этого приповерхностного слоя исчезает и указанная серия резонансов.

Таким образом, можно считать установленным, что линии 2, 3, 4, 5 — это СВР, а не ФМР от разных слоев многослойной структуры. Однако их необычное поведение при травлении образца — последовательное исчезновение с уменьшением толщины пленки — позволяет предположить, что между практически однородными первым и вторым слоями исходной пленки существует неоднородная область, куда может проникать спиновая волна. Смоделируем физическую картину возникновения серии СВР для такого случая. Для этого воспользуемся выражением для резонансного поля СВР с номером n [5]

$$H_n = \omega/\gamma_1 - H_0^* - 2A(\pi n/h)^2/M, \quad (1)$$

где γ_1 — гиромагнитное отношение для слоя 1, $\omega = 2\pi\nu$ — круговая частота колебаний вектора намагниченности M , h — толщина слоя, в котором разрешается серия СВР, H_0^* — поле эффективной анизотропии слоя 1. Как известно [1], двухслойной пленке серия СВР может возбуждаться в слое 1 или 2 в зависимости от направления внешнего магнитного поля. Причем положение серии линий СВР по полю всегда ограничено полем однородного ФМР соседнего слоя, в котором

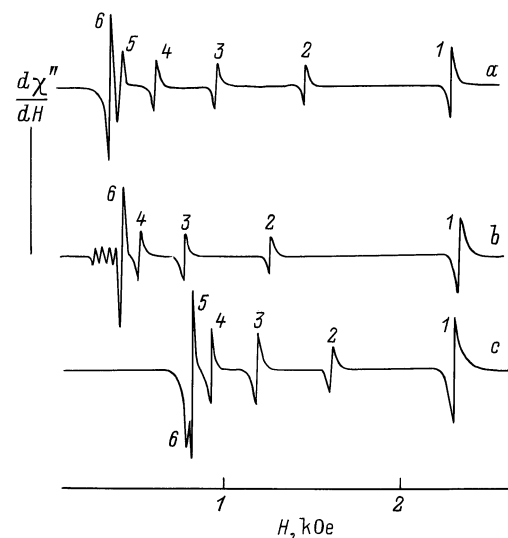


Рис. 2. Записи линий резонансного поглощения в магнитном поле, перпендикулярном плоскости пленки, для исходного (*a*), отожженного (*b*) и исходного при температуре 305 К (*c*) образцов на частоте $\nu = 4.99 \text{ GHz}$. Обозначения линий поглощения: 1 — ФМР в 1-м слое; 2, 3, 4, 5 — СВР с $n = 1, 2, 3$; 6 — ФМР от однородной части 2-го слоя.

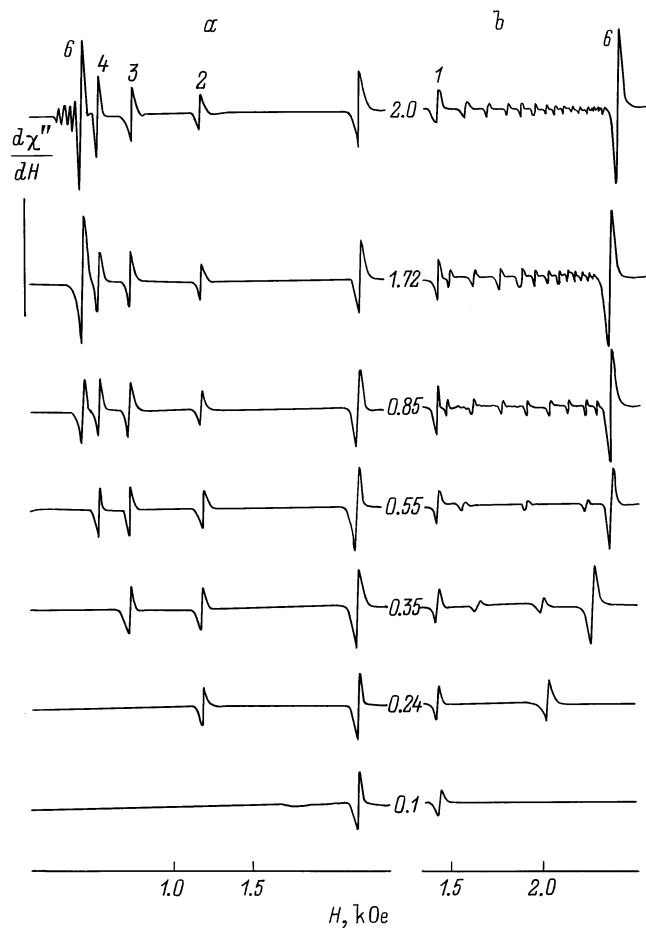


Рис. 3. Линии резонансного поглощения в отожженном образце при стравливании второго слоя пленки до толщины, указанной возле каждой записи (в μm), в магнитном поле, перпендикулярном (*a*) и параллельном (*b*) плоскости пленки на частоте $\nu = 4.99$ GHz при температуре $T = 295$ K. Обозначение линий поглощения: 1 — ФМР в 1-м слое; 2, 3, 4 — СВР с $n = 1, 2, 3$; 5 — ФМР от однородной части 2-го слоя.

спиновая волна не распространяется — затухает на глубине скин-слоя, что формально соответствует случаю $k^2 < 0$ (где k — волновой вектор). Если бы пленки по толщине были однородны и имели резко выраженную границу раздела слоев, то, во-первых, наблюдаемая в эксперименте серия СВР описывалась приведенным выражением (1) для H_n , т.е. выполнялся бы квадратичный закон (1). Во-вторых, при последовательном травлении сохранялась бы вся серия линий СВР до тех пор, пока не исчезнет граница раздела между указанными слоями. В нашем случае ни первое, ни второе не наблюдается. Кроме того, резонансные поля однородного ФМР во втором слое при ориентации внешнего поля в плоскости пленки начинают уменьшаться по мере его стравливания (рис. 1, *b*). Особенно резкое уменьшение резонансного поля происходит, начиная с толщины $\approx 0.6 \mu\text{m}$ и вплоть до $\approx 0.1 \mu\text{m}$. Это означает, что второй слой содержит переходную область толщиной около $0.5 \mu\text{m}$, в которой

поле эффективной анизотропии плавно уменьшается по мере утончения этого слоя.

Предположим, что положение линий поглощения 1, 2, 3, 4, 5 описывается выражением (1) для серии колебаний с номерами $n = 0, 1, 2, 3, 4$. Причем мода $n = 0$ соответствует возбуждению, близкому к однородному ФМР. Тогда остальные линии поглощения можно связать с неоднородными колебаниями, которые возникают в результате отражения спиновой волны от плоскости поворота (где $k = 0$). Эта плоскость поворота, совпадая поначалу с границей раздела между первым и вторым слоями, с уменьшением внешнего магнитного поля углубляется в переходную область второго слоя. Как только плоскость поворота достигнет толщины, на которой может уложиться мода с $n = 1$, возникает первый пик СВР, а при дальнейшем проникновении спиновой волны в переходную область будут проявляться моды СВР со все более высокими номерами, пока эта область не закончится. Если за переходной областью существует однородная часть пленки, то в ней наблюдается однородный ФМР. Как известно, для однородного ФМР волновой вектор k также равен нулю. Следовательно, резонансные поля, в которых наблюдаются соответствующие линии СВР, по своей величине равны полям $H_{\text{ФМР}}$ однородного ФМР в плоскости поворота. Таким образом, $H_n = H_{\text{ФМР}}^n$, причем $H_{\text{ФМР}}^n = \omega/\gamma_2 - H_n^*$, где γ_2 — гиромагнитное отношение для слоя 2, H_n^* — поле эффективной анизотропии пленки в плоскости поворота спиновой волны для n -й моды СВР. Заметим, что указанная плоскость поворота спиновой волны в переходном слое лишь по своему функциональному признаку соответствует классической плоскости закрепления спинов, например, на резкой границе двух однородных пленок. На самом же деле она носит виртуальный характер, а соответствующая ей и меняющаяся с полем толщина h является не чем иным, как подгоночным параметром, удовлетворяющим выражению (1).

Таким образом, по величине поля СВР можно рассчитать толщину, удовлетворяющую возбуждению соответствующей спин-волновой моды, а по значению поля однородного ФМР (которое, как видим, в точности равно значению поля СВР этой моды) определить поле эффективной анизотропии пленки [8] на заданной толщине. Это позволяет построить зависимость поля анизотропии пленки от толщины. При этом следует иметь в виду, что расчет по формуле (1) должен проводиться с учетом изменения параметров пленки, когда спиновая волна начинает углубляться в неоднородный слой. На рис. 4 приведены зависимости полей анизотропии для исходного и отожженного образцов, а также дополнительно нанесены толщины пленок, при которых исчезают соответствующие моды СВР (в процессе послойного травления). Видно, что точки, соответствующие расчетному значению H^* и толщине исчезновения соответствующих мод СВР, достаточно хорошо ложатся на общие кривые. На этом же рисунке в качестве аргумента, подтверждающего правильность принятой модели, представлена

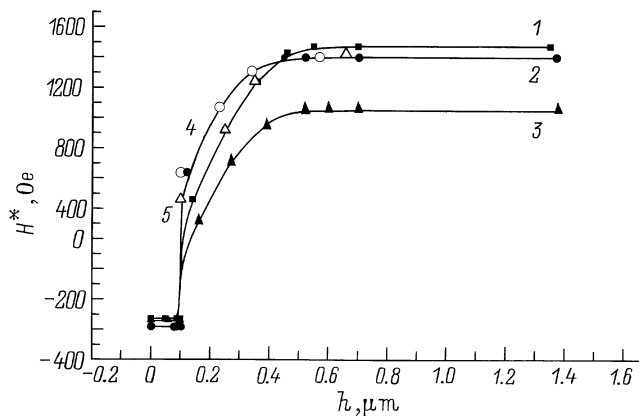


Рис. 4. Зависимость поля эффективной анизотропии, измеренной при $T = 295$ К, от толщины для исходного (1), отожженного (2) и исходного, нагретого до $T = 305$ К (3), образцов; 4, 5 — точки исчезновения пиков СВР при травлении соответственно отожженного и исходного образцов.

зависимость анизотропии от толщины в исходной (не отожженной) пленке, нагретой до 305 К. Она рассчитана по записям поглощения, представленным на рис. 2, с. Как известно [7], константа одноосной анизотропии пленки довольно быстро уменьшается с повышением температуры, поэтому неудивительно именно такое изменение профиля анизотропии с температурой. Из рис. 4 можно также заключить, что после отжига толщина переходной области пленки уменьшилась. Это можно объяснить увеличением однородности слоев пленки, что не противоречит известным представлениям о процессах, происходящих во время отжига.

Теперь становится понятным, почему не выполняется квадратичный закон распределения мод СВР (1) и почему эти моды исчезают не все одновременно, а поочередно. Причина — наличие между однородными слоями пленки неоднородной переходной области. Глубина проникновения в нее спиновых волн зависит от величины внешнего магнитного поля. Это означает, что необходимая для возбуждения СВР толщина пленки может задаваться полем. Именно на этой толщине возникают стоячие спиновые волны (СВР) с различными n , проявляющиеся на записях поглощения, представленных на рис. 1–3. Как только при последовательном травлении убирается не только однородная, но и переходная (неоднородная) часть 2-го слоя пленки, тотчас исчезают условия возникновения плоскостей поворота спиновых волн, а, следовательно, и возбуждения соответствующих мод СВР. Финал этой эволюции, как видно из рис. 1 и 3, происходит при стравливании пленки до толщины $h \cong 0.1 \mu\text{m}$, когда на записях поглощения остается только линия ФМР от первого однородного слоя.

Таким образом, выполненные исследования показывают, что в данной двухслойной пленочной структуре (а в общем случае, по-видимому, и в любой другой) необычные свойства ФМР-спектров обусловлены существованием наряду с однородными по анизотропии слоями

также некоторой переходной области, где эффективная анизотропия монотонно меняется. Внешним признаком того, что СВР имеет классическую природу, является выполнение квадратичного закона дисперсии (1) в расположении пиков поглощения СВР по полю. При этом подразумевается, что наблюдаемый СВР обусловлен интерференцией спиновых волн в однородной по анизотропии пленке при закреплении спинов на ее резко выраженных границах. В общем же случае, при наличии неоднородного переходного слоя, анизотропия которого меняется по произвольному закону (который может зависеть от состава и технологии приготовления пленки), нет оснований ожидать выполнения формулы (1). И всякий раз, когда обнаруживается невыполнение этого закона, следует искать альтернативное объяснение опытных данных, одно из которых и представлено в данной работе. Основное утверждение сводится к тому, что условия для возбуждения СВР могут реализоваться не только в однородной, но также и в неоднородной части пленочной структуры. Глубина проникновения спиновой волны в неоднородную область пленки (положение плоскости поворота волны) зависит от внешнего магнитного поля — с уменьшением поля глубина проникновения волны увеличивается.

Работа поддержана Фондом фундаментальных исследований Миннауки Украины.

Список литературы

- [1] А.М. Гришин, В.С. Деллалов, В.Ф. Шкар, Е.И. Николаев, А.И. Линник. Phys. Lett. **A140**, 133 (1989).
- [2] А.М. Гришин, В.С. Деллалов, В.Ф. Шкар, С.В. Ямпольский. ФНТ **22**, 1056 (1996).
- [3] В.С. Деллалов, А.И. Линник, В.Ф. Шкар, С.В. Ямпольский. JMMM **172**, 74 (1997).
- [4] А.М. Гришин, В.С. Деллалов, Е.И. Николаев, В.Ф. Шкар, С.В. Ямпольский. ЖЭТФ **104**, 4, 3450 (1993).
- [5] В. Hoekstra, R.P. van Staple, J.M. Robertson. J. Appl. Phys. **48**, 382 (1977).
- [6] Е.И. Николаев, И.А. Красин. Кристаллография **33**, 478 (1988).
- [7] А.М. Балбашов, Ф.В. Лисовский, В.К. Раев и др. Элементы и устройства на ЦМД. Радио и связь, М. (1987).
- [8] А.Г. Гуревич, Г.А. Мелков. Магнитные колебания и волны. Наука, М. (1994). 464 с.