

УДК 537.635

Спин-волновой резонанс в мультислойных структурах

$\text{Co}_{1-x}\text{P}_x/\text{Co}_{1-y}\text{P}_y$

Рауф С. Исхаков*

Сергей В. Столяр

Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН,
Академгородок, 50/38, Красноярск, 660036.

Сибирский федеральный университет,
Свободный 79, Красноярск, 660041,

Россия

Михаил В. Чижик†

Сибирский федеральный университет,
Свободный 79, Красноярск, 660041,

Россия

Лидия А. Чеканова

Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН,
Академгородок 50/38, Красноярск, 660036.

Сибирский федеральный университет,
Свободный 79, Красноярск, 660041,

Россия

Получена 1.09.2011, окончательный вариант 27.11.2011, принята к печати 10.01.2012

Методом СВР в мультислойных структурах $(\text{Co}_{98}\text{P}_2/\text{Co}_{95}\text{P}_5)_N$ обнаружена модификация спектра обменных спиновых волн, обусловленная образованием первой, второй, третьей зон Бриллюэна в одномерном магнетном кристалле, сформированном периодической модуляцией обмена. Измерены величины запрещенных зон при волновом векторе $k_b = \pi/(d_1 + d_2)$ и $2k_b$.

Ключевые слова: мультислойные пленки, магнетный кристалл, ферромагнитный и спин-волновой резонанс, запрещенная зона.

Введение

Спектр волн любой природы в периодических структурах имеет зонный характер. В нем проявляются зоны разрешенных и запрещенных значений энергии ε . В обратном пространстве формируются зоны Бриллюэна, края этих зон определяются волновыми векторами $k_b = m\pi/2$ ($m = 1, 2, 3, \dots$), где m — номер зоны, вектор обратной решетки $q = 2\pi/(d_1 + d_2)$, $d_1 + d_2$ — период одномерной модуляции. При значениях k_b на графике функции $\varepsilon(k)$ возникают щели (запрещенные зоны $\Delta\varepsilon_m$). К таким структурам относятся фотонные и магнетные кристаллы, изучению которых в настоящее время уделяется много внимания. Развиваемая в настоящее время теория волнового спектра в сверхрешетках ориентирована на два класса экспериментов. Первый, многочисленный, имеет дело с изучением распространяющихся волн, с использованием мультислойных структур в качестве диэлектрических зеркал и фильтров, обусловленных появлением полос непропускания, и с измерением таких параметров, как коэффициенты отражения и прохождения волн. Второй, малочисленный, имеет

*rauf@iph.krasn.ru

†chizhikmihail@gmail.com

© Siberian Federal University. All rights reserved

дело непосредственно с законом дисперсии волн $\varepsilon(k)$. В эксперименте исследуются либо стоячие обменные волны (метод СВР, см., например, [1]), либо бегущие магнитостатические волны (метод Бриллюэн-Мандельштамовского рассеяния света, см. [2]). Волновой спектр мультислойных структур существенно зависит от неоднородностей сверхрешетки (толщина границы между слоями, неоднородности слоев и т.д.), что было убедительно показано в теоретических работах [3–5]. Для экспериментальной проверки этих теоретических выводов, как и для иллюстрации общих физических принципов, в мультислойной структуре спектральными методами необходимо измерять несколько мини-зон.

В работах [1, 6] методом спин-волнового резонанса (СВР) был исследован дисперсионный закон обменных спиновых волн $[\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_x(18 \text{ nm})/\text{Ni}_{1-y}\text{Fe}_y(18 \text{ nm})]_5$ в мультислойных пленках, полученных методом химического осаждения. Здесь была обнаружена энергетическая щель $\Delta\varepsilon_1$ при $k_5 = 5\pi/L = 5\pi/5(d_1 + d_2) = \pi/(d_1 + d_2) = k_b$, где L — толщина всей пленки. При анализе спектра СВР, содержащего десять спин-волновых мод, в [1, 6] было введено понятие обменного дублета при $n = 5$; этот дублет представляет собой пики поглощений краев запрещенной зоны спектра обменных спиновых волн, описываемого модами: $n = 1, 2, 3, 4, 5, 5, 6, 7$, где $k_5 = k_b$. Регистрация второй брегговской щели при $k = 2k_b$ на структурах $[\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_x/\text{Ni}_{1-y}\text{Fe}_y]_5$ оказалась невозможной в силу следующих причин. Во-первых, для надежной регистрации второй брегговской щели в спектре спиновых волн общее количество регистрируемых пиков СВР (тригонометрических мод) должно быть не менее $n \geq 13$ (при условии, что число пар слоев в пленке $N=5$; при $N=4$, $n \geq 11$). Для наблюдения такого количества резонансных пиков общая толщина пленки должна составлять $L > 350 \text{ nm}$. Во-вторых, в свежеприготовленных мультислойных пленках $[\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_x/\text{Ni}_{1-y}\text{Fe}_y]_5$ ширина первой брегговской щели в полевых единицах составляет $\Delta\varepsilon_1 \approx 1 \text{ kOe}$. Используемая нами частота СВЧ-поля при измерении СВР равна $f=9,2 \text{ GHz}$, поэтому полевой развертки для регистрации такой особенности спектра СВР недостаточно (в нашем случае она составляет 3–3,5 kOe).

Целью данной работы является изготовление мультислойных структур, пригодных для регистрации второй брегговской щели в спектре спиновых волн мультислойных пленок при $k = 2k_b$.

1. Эксперимент

Стоячие спиновые волны в тонких ферромагнитных пленках (толщиной L) возбуждаются однородным переменным полем \mathbf{h} . Эту экспериментальную методику называют методом спин-волнового резонанса (СВР), в настоящее время она хорошо разработана (см. например [7, 8]). Регистрируемые пики поглощений являются резонансами на стоячих волнах длиной $\frac{\lambda}{2} = L \div \frac{L}{n}$, где n — номер моды. Условием резонанса служит киттелевское соотношение

$$H_n = \frac{\omega}{\gamma} + 4\pi M_{eff} - \frac{2A}{M_s} k^2 \quad (1)$$

для случая ортогональной ориентации внешнего магнитного поля H относительно плоскости пленки ($\mathbf{H} \perp \mathbf{h}$). В (1) ω — фиксированная частота микроволнового поля, величина намагниченности M_{eff} отличается от намагниченности насыщения M_s на вклад, обусловленный внутренними напряжениями пленки и ее полем анизотропии, k — волновое число спиновой волны ($k = n\pi/L$), A — константа обменного взаимодействия, $A = \frac{\alpha M_s^2}{2}$. Если имеет место полное закрепление спинов на поверхности пленки (узлы стоячих волн), то в СВЧ-спектре проявляются только нечетные моды ($n = 1, 3, 5, \dots$). Если же закрепление неполное, то становится возможным появление четных мод. Кроме того, в зависимости

от знака закрепления (закрепление описывается поверхностной анизотропией K_s) в спектре возможны поверхностные спиновые волны при $K_s < 0$. СВР используется в настоящее время для измерения, прежде всего, обменной константы, в том числе и в пленках неоднородных ферромагнетиков, таких как аморфные и нанокристаллические сплавы. Определение величины эффективной спин-волновой жесткости для пленок неоднородных сплавов проводится по формуле

$$\tilde{\eta} = \frac{2A}{M_s} \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 = \frac{H_1 - H_i}{n_i^2 - 1}. \quad (2)$$

Исследуемые в работе мультислойные пленки на основе сплавов Co-P были получены методом химического осаждения. На внешней поверхности ферромагнитных пленок, полученных данным способом (граница металл / воздух), без специальных ухищрений формируется поверхностная анизотропия типа «легкая плоскость» $K_s \approx 1 \text{ erg/cm}^2$. Величину и знак поверхностного закрепления для вектора намагниченности в приподложечной части пленки формировали нанесением дополнительного ферромагнитного слоя, обменносвязанного с основной частью пленки [9]. В работе [9] было показано, что нанесение на ферромагнитную пленку дополнительного тонкого обменносвязанного с пленкой ферромагнитного слоя (меньшей толщины) с намагниченностью меньшей, чем намагниченность пленки, приводит к формированию поверхностной анизотропии типа «легкая ось» ($K_s > 0$). Нанесение же на ферромагнитную пленку дополнительного обменносвязанного с пленкой ферромагнитного слоя с большей намагниченностью, чем намагниченность пленки, приводит к формированию поверхностной анизотропии типа «легкая плоскость» ($K_s < 0$). Величина поверхностной анизотропии определяется толщиной дополнительного слоя и величиной обменного взаимодействия между слоями.

Использованные сплавы при изготовлении однослойных и мультислойных пленок характеризовались следующими параметрами [10]: Co^{ГЦК}– ГЦК, состав Co₉₅P₅, поле локальной анизотропии $H_a = 2 \text{ кОе}$, $M_s = 890 \text{ Г}$, $\alpha = 2,4 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2$; Co^{ГПУ}– ГПУ, состав Co₉₈P₂, $H_a = 7 \text{ кОе}$, $M_s = 950 \text{ Г}$, $\alpha = 1,3 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2$. Толщины индивидуальных слоев в мультислойных структурах отличались незначительно. Число пар слоев составляло $N = 4, 5, 7$. Измерения спектров ФМР и СВР проводились на стандартном спектрометре ЭПА-2М с частотой 9,2 GHz, температура измерений комнатная. На однослойных пленках Co₉₈P₂ толщиной 300 nm наблюдалось единственное поглощение с шириной линии ферромагнитного резонанса $\Delta H = 700 \text{ Ое}$.

2. Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведен спектр СВР однослойной пленки Co₉₅P₅ толщиной $L = 300 \text{ nm}$. Спектр СВР содержит восемь пиков, что позволяет провести полный анализ указанного спектра. Видно, что в спектре данной пленки имеется поглощение, резонансное поле которого больше, чем поле наиболее интенсивного поглощения. Данный пик (поверхностный) обусловлен поверхностным колебанием намагниченности. Последнее означает, что волновые векторы k стоячих спиновых волн определяются уравнениями (см. [7, 8]), полученными из обменных граничных условий при произвольных параметрах закрепления намагниченности на нижней и верхней поверхностях пленки d_1^S и d_2^S :

$$tg(kL) = \frac{(d_1^s + d_2^s)k}{k^2 - d_1^s d_2^s}, \quad \text{если } k \text{ реально}, \quad (3)$$

$$th(k_s L) = \frac{-(d_1^s + d_2^s)k_s}{k_s^2 + d_1^s d_2^s}, \quad \text{если } k = ik_s \text{ мнимо}. \quad (4)$$

Здесь параметр закрепления $d_i^s = K_{is}/A$. Величина A/K_s указывает на фиктивное смещение узла стоячей волны с поверхностью пленки. Обнаружение поверхностной моды, обозначенной на рис. 1 как S, свидетельствует о реализации либо на внешней, либо на приподложечной поверхностях данной пленки анизотропии типа «легкая плоскость». Регистрация полевой координаты моды S позволяет непосредственно измерить величину K_s : $|K_s| = 6,2 \text{ erg/cm}^2$. Уравнение (3) для объемных мод в случае сильного закрепления ($A/K_s L \rightarrow 0$) имеет киттелевское решение $kL = n\pi$ с возбуждением только нечетных n . Для случая $|A/K_s L| < 1$, получаем решение

$$kL = n\pi(1 - A/K_s L) = n\beta, \tag{5}$$

где $n = 1, 2, 3, 4, 5 \dots$, т.е. в спектре возбуждаются моды как нечетные (симметричные относительно центра пленки), так и четные (антисимметричные относительно центра пленки). Вследствие антисимметричности четные моды имеют меньшую интенсивность по сравнению с интенсивностями окружающих их нечетных мод. И действительно, для $n = 4$: $I_4 \ll I_3, I_4 < I_5$; для $n = 6$: $I_6 \ll I_5, I_6 < I_7$ (четные пики с $n = 2, 8$ на данном спектре не проявляются). Для однослойной пленки Co_{95}P_5 толщиной $L = 300 \text{ nm}$ параметр $\beta \approx 3,124$. Так как ширина спин-волновых мод ($\sim 200 \text{ Oe}$) на порядок превышает величину смещения резонансных полей, то для определения волновых векторов k_n можно пользоваться решением Киттеля.

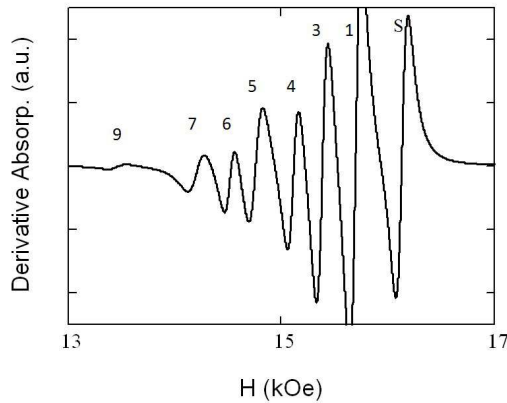


Рис. 1. Спектр СВР однослойной пленки Co_{95}P_5 толщиной 300 nm

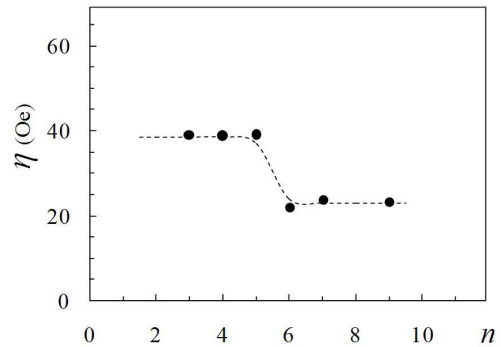


Рис. 2. Зависимость величины эффективной спин-волновой жесткости η от номера моды n в спектре СВР пленки Co_{95}P_5 толщиной 300 nm

Представленная на рис. 1 идентификация номеров спин-волновых мод позволяет по формуле (2) определить для нанокристаллического ферромагнетика Co_{95}P_5 константу неоднородного обменного взаимодействия, которая характеризует дополнительную обменную энергию, возникающую в спиновой волне. Вычисленные (по выражению (2)) величины $\tilde{\eta}_i$ приведены на рис. 2. Видно, что обменные спиновые волны с длиной волны $\frac{\lambda}{2} = L \div \frac{L}{5}$ характеризуются большей величиной $\tilde{\eta}$, а короткие спиновые волны с $\frac{\lambda}{2} = \frac{L}{6} \div \frac{L}{9}$ — меньшей величиной $\tilde{\eta}$. Этот эффект обусловлен влиянием коррелированных неоднородностей на спектр спиновых волн. Он был теоретически предсказан в работе [11] и неоднократно подтвержден в последующих теоретических работах (см. например [12, 13]). Главный результат цитируемых работ заключается в том, что в окрестности корреляционного волнового числа ($1/r_c$) должна наблюдаться модификация законов дисперсии (и затухания) и эта модификация имеет различную форму для неоднородностей разных физических параметров. На

основе этой теории был развит экспериментальный метод корреляционной спин-волновой спектроскопии, с помощью которого были измерены корреляционные радиусы неоднородностей для многих аморфных и нанокристаллических сплавов (см., например, обзор [14] и недавние работы [15, 16]). Представленная на рис. 2 зависимость $\tilde{\eta}(k)$ обусловлена неоднородностями обменного параметра, и регистрация критической длины спиновой волны λ_c ($\frac{\lambda_c}{2} = \frac{L}{6} = 50$ nm) позволяет для нанокристаллического сплава Co_{95}P_5 определить пространственный масштаб этой неоднородности ($2r_c \approx 50$ nm).

На рис. 3 приведен спектр СВР мультислойной пленки $[\text{Co}_{98}\text{P}_2(30 \text{ nm})/\text{Co}_{95}\text{P}_5(20 \text{ nm})]_5$. Здесь же представлена идентификация регистрируемых резонансных поглощений. Видно, что первое резонансное поглощение является суперпозицией двух пиков — поверхностного колебания, обозначенного на рис. 3 буквой S, и поглощения $n = 1$, обусловленное первой тригонометрической модой. Последнее указывает на возможность появления в спектре четных мод, т.е. необходимая идентификация $n = 1, 2, 3, 4, 5$. Для мультислойной пленки $[\text{Co}_{98}\text{P}_2(30 \text{ nm})/\text{Co}_{95}\text{P}_5(20 \text{ nm})]_5$ с $|K_s| = 1,2 \text{ erg/cm}^2$, параметр $\beta \approx 3,04$. Поэтому для определения волновых векторов k_n можно пользоваться решением Киттеля (смещение резонансных полей спин-волновых мод меньше их ширины линии).

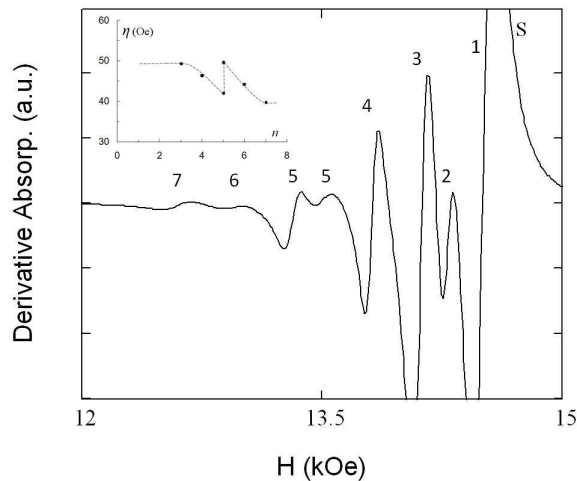


Рис. 3. Спектр СВР мультислойной пленки $[\text{Co}_{98}\text{P}_2(30 \text{ nm})/\text{Co}_{95}\text{P}_5(20 \text{ nm})]_5$

Особый интерес вызывает 5-я мода, так как она характеризуется волновым вектором $k_5 = 5\pi/L = 5\pi/5(d_1 + d_2) = \pi/(d_1 + d_2) = k_b$, т.е. этот пик поглощения регистрируется на низкоэнергетическом краю запрещенной зоны спектра спиновых волн. Тогда идентификация n низкополевых пиков СВР данной пленки должна быть продолжена следующим образом: $n = 5, 6, 7$. Об этом свидетельствуют интенсивности наблюдаемых мод. Таким образом, как и в работах [1, 6], вводится обменный дублет при $n = 5$, который представляет собой пики поглощений краев запрещенной зоны спектра обменных спиновых волн, описываемого модами: $n = 1, 2, 3, 4, 5, 5, 6, 7$, где $k_5 = k_b$. Моды $n = 1, 2, 3, 4, 5$ характеризуют первую зону Бриллюэна магнетного кристалла, а моды $n = 5, 6, 7$ — вторую зону (см. вставку рис. 3). Ширина запрещенной зоны измеряется в полевых координатах, как разница величин постоянных полей, характеризующих 5-е моды; для пленки $[\text{Co}_{98}\text{P}_2(30 \text{ nm})/\text{Co}_{95}\text{P}_5(20 \text{ nm})]_5$ она равна 180 Oe. Данное значение величины запрещенной зоны существенно меньше величины щели, наблюдаемой нами в работах [1, 6] при изучении спектра СВР мультислойной пленки $[\text{Ni}_{65}\text{Fe}_{35}(18 \text{ nm})/\text{Ni}_{60}\text{Fe}_{40}(18 \text{ nm})]_5$. Причина отличий обусловлена различием модулирующего магнитного параметра. В мультислойной структуре $[\text{Ni}_{65}\text{Fe}_{35}(18 \text{ nm})/\text{Ni}_{60}\text{Fe}_{40}(18 \text{ nm})]_5$

химические составы используемых слоев были подобраны таким образом, чтобы основным модулирующим параметром выступала намагниченность насыщения. В изучаемых мультислойных структурах на основе сплавов Co-P основным модулирующим параметром является величина обменного взаимодействия (а также величина поля локальной анизотропии).

На рис. 4 приведен спектр СВР мультислойной пленки $[\text{Co}_{98}\text{P}_2(20 \text{ nm})/\text{Co}_{95}\text{P}_5(20 \text{ nm})]_7$. Здесь же приведена идентификация спин-волновых мод. Видно, что первое резонансное по-

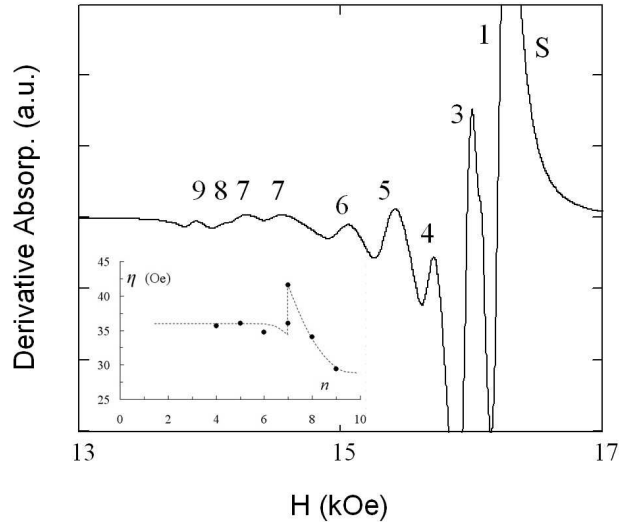


Рис. 4. Спектр СВР мультислойной пленки $[\text{Co}_{98}\text{P}_2(20 \text{ nm})/\text{Co}_{95}\text{P}_5(20 \text{ nm})]_7$

глощение является суперпозицией поверхностного колебания S с первой объемной модой, а на 3-ю моду накладывается 2-я. Поверхностная мода S определяет порядок идентификации $n = 1, 2, 3, 4, 5 \dots$ с условием неравенства интенсивностей нечетных (больших) и четных (маленьких) мод. Величина поверхностной анизотропии $|K_s| = 3 \text{ erg/cm}^2$, что приводит к параметру $\beta \approx 3,1$ в формуле (5), т.е. волновой вектор k_n может быть определен решением Киттеля. Согласно виду спектра (см. рис. 4) вводится обменный дублет на седьмой моде: $n = 7, k_7 = k_b$. В этом случае интенсивности пиков СВР удовлетворяют сформулированным выше правилам. На вставке рис. 4 представлена зависимость $\tilde{\eta}(k)$, определенная по формуле (2). Видно, что длинные спиновые волны описываются большей величиной $\tilde{\eta}$, а короткие — меньшей (как и на рис. 3). Величина запрещенной зоны, определяемая по разнице координат 7-х мод, в полевых координатах равна $\Delta\varepsilon = 285 \text{ Oe}$.

Результаты, представленные на рис. 2 и 4 позволяют сделать следующее заключение: для наблюдения в спектре СВР второй щели при $2k_b$, экспериментальная величина k_b , определяемая условиями получения (толщины индивидуальных слоев) должна быть уменьшена. Также должна быть уменьшена величина N (но с учетом известного ограничения на общую толщину пленок, так как в пленках с $L \approx 450 \div 600 \text{ nm}$ первые моды СВР не разрешаются). И действительно, экспериментальные исследования спектра СВР в мультислойных пленках, выполненные ранее (см., например, [17–21]), данному условию не удовлетворяли, в этих работах измеряемый волновой диапазон был существенно ниже волнового вектора края зоны $k_b = \pi/(d_1 + d_2)$ (исключение — работа [22], где изучен СВР мультислойной пленки Co/Pd). Так, в [17] спектр СВР заканчивается модой $n = 10$ при $N = 50$, в [18, 19] волновой вектор определялся $n = 6$ при $N = 10$, в [20] спектр СВР ограничивался модой $n = 7$ при $N = 10$, в [21] — модой $n = 7$ при $N = 12$. Существенным результатом этих исследований было экспериментальное доказательство применимости соотношения (1) для описания стоячих

спиновых волн в многослойных пленках.

Спектр СВР многослойной структуры $[\text{Co}_{98}\text{P}_2(40 \text{ nm})/\text{Co}_{95}\text{P}_5(50 \text{ nm})]_4$ представленный на рис. 5 содержит тринадцать пиков, что позволяет провести полный анализ указанных спектров.

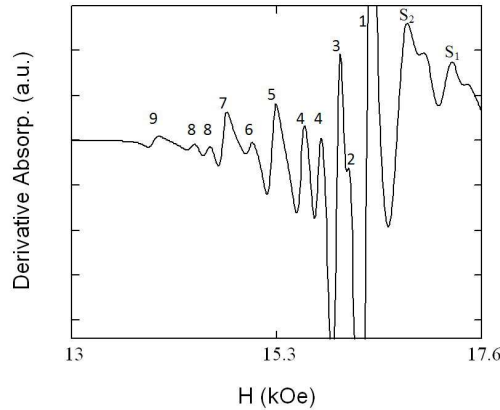


Рис. 5. Спектр СВР многослойной пленки $[\text{Co}_{98}\text{P}_2(40 \text{ nm})/\text{Co}_{95}\text{P}_5(50 \text{ nm})]_4$

В спектре данной пленки имеются два пика, резонансные поля которых больше, чем поле наиболее интенсивного максимума. Данные пики соответствуют возбуждению двух поверхностных мод ($n = 0$), обозначенных на рисунке как S_1 , S_2 . Данные пики свидетельствуют о реализации на внешней и приподложечной поверхностях этой многослойной пленки обменных граничных условий с поверхностными анизотропиями типа "легкая плоскость". Последнее указывает, что моды в спектральной кривой являются как нечетными (большой интенсивности), так и четными (малой интенсивности), т.е. идентификация спин-волновых мод $n = 1, 2, 3, 4, \dots$

Для многослойной пленки $[\text{Co}_{98}\text{P}_2(40 \text{ nm})/\text{Co}_{95}\text{P}_5(50 \text{ nm})]_4$ с константами поверхностных анизотропий $|K_{s1}| = 15 \text{ erg/cm}^2$, $|K_{s2}| = 5,9 \text{ erg/cm}^2$ величина параметра $\beta \approx 3,13$. Поэтому для определения волновых векторов также можно пользоваться решением Киттеля (ошибка не превышает 1%).

Особый интерес вызывают дублеты 4 и 8-й мод, так как они характеризуются волновым вектором $k_4 = k_b$ и $k_8 = 2k_b$ соответственно.

На рис. 6а приведены вычисленные по выражению (2) величины $\tilde{\eta}_i$. Видно, что обменный параметр $\tilde{\eta}_i$ для стоячих спиновых волн, проявляющихся в 1, 2, 3, 5, 6, 7, 9-й модах, описывается зависимостью $\tilde{\eta}(k)$, обусловленной неоднородностями обменного параметра (штриховая кривая рис. 6а аналогична кривой $\eta(k)$ рис. 2). Последнее позволяет ввести критическую длину спиновой волны $\lambda_c = \lambda_6$: спиновые волны с $\lambda > \lambda_c$ характеризуются большей величиной $\tilde{\eta}_i$, а волны с $\lambda < \lambda_c$ имеют меньшую величину $\tilde{\eta}_i$ ($\frac{\lambda_c}{2} = 2r_c = 60 \text{ nm}$).

Дублеты 4-й моды спектральной кривой проявляют себя двумя ординатами $\tilde{\eta}_4^{(I,II)}$ для спиновой волны $\frac{\lambda_b}{2} = d_1 + d_2 = 90 \text{ nm}$, а дублеты 8-й моды — двумя ординатами $\tilde{\eta}_8^{I,II}$ для спиновой волны с $\frac{\lambda_b}{2} = \frac{d_1 + d_2}{2} = 45 \text{ nm}$. Этим волнам соответствуют волновые векторы $k_4 = k_b$ и $k_8 = 2k_b$, т.е. границы зон Бриллюэна магнетонного кристалла (см. рис. 6б). На рис. 6б схематично представлен дисперсионный закон обменных спиновых волн в многослойной пленке. Штриховая линия описывает дисперсионный закон в однородной ферромагнитной пленке.

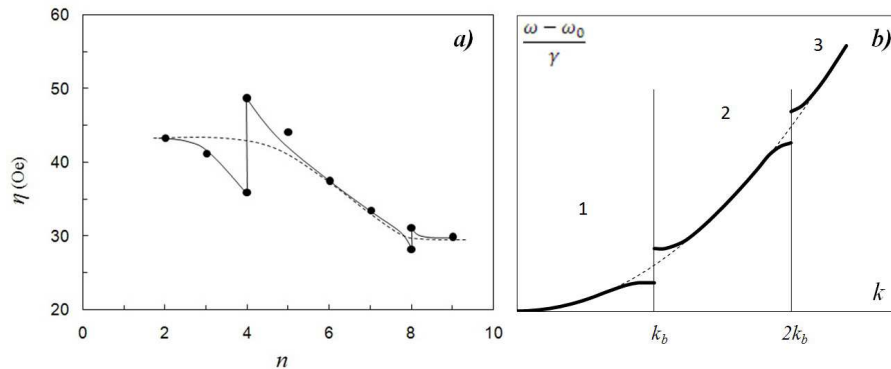


Рис. 6. *a* — зависимость величины эффективной спин-волновой жесткости от номера моды спектра СВР пленки $[\text{Co}_{98}\text{P}_2(40 \text{ nm})/\text{Co}_{95}\text{P}_5(50 \text{ nm})]_4$; *b* — дисперсионный закон спиновых волн в мультислойной структуре (схематично)

В спектре СВР мультислойной пленки $[\text{Co}_{98}\text{P}_2/\text{Co}_{95}\text{P}_5]_4$ (рис. 5) моды $n = 1, 2, 3, 4$ характеризуют первую зону Бриллюэна магнетонного кристалла, моды 4, 5, 6, 7, 8 — вторую, а моды 8, 9 — третью зону. Интенсивности наблюдаемых спин-волновых мод удовлетворяют сформулированным выше правилам. Ширина запрещенной зоны измеряется в полевых координатах как разница полей, характеризующих дублеты спин-волновых мод. Для этой мультислойной структуры Co/Co ширины запрещенных зон $\Delta\varepsilon_1$ и $\Delta\varepsilon_2$ оказались равными 200 и 180 Oe соответственно. Результаты, представленные на рис. 6, указывают на то, что наблюдаемая модификация зависимости $\eta(k)$ обязана своим происхождением совместному действию двух факторов: изотропным флуктуациям обменного параметра и одномерной периодической модуляции обмена в мультислойной системе $[\text{Co}_{98}\text{P}_2/\text{Co}_{95}\text{P}_5]_N$.

Заключение

Таким образом, в одномерных магнетонных кристаллах, полученных в виде мультислойных структур «ферромагнетик/ферромагнетик» методом спин-волнового резонанса для обменных спиновых волн, обнаружена модификация спектра спиновых волн, обусловленная образованием первой, второй и третьей зон Бриллюэна. Измеренные величины запрещенных зон в полевых координатах в спектре обменных спиновых волн мультислойной пленки $[\text{Co}_{98}\text{P}_2/\text{Co}_{95}\text{P}_5]_N$: $\Delta\varepsilon_1 = 200$ Oe, $\Delta\varepsilon_2 = 180$ Oe — в пять, семь раз меньше величин аналогичной характеристики мультислойных пленок $[\text{NiFe}/\text{NiFe}]_N$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Целевой программы "Развитие научного потенциала высшей школы" (2011) и в рамках программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы.

Список литературы

- [1] Р. С. Исхаков, Л. А. Чеканова, С. В. Столяр, В сб.: Труды 12 Международного симпозиума *Упорядочение в минералах и сплавах*, Ростов-на-Дону, 2009, том 1, 214.
- [2] Z. K. Wang, V. L. Zhang, H. S. Lim, et al, *Appl. Phys. Lett.*, **94**(2009), 083112.
- [3] V. A. Ignatchenko, Yu. I. Mankov, A. A. Maradudin, *Phys. Rev. B*, **62**(2000), 2181.

- [4] V. V. Kruglyak, A. N. Kuchko, *Physica B*, **339**(2003), 130.
- [5] В. А. Игнатченко, Ю. И. Маньков, Д. С. Цикалов, *ЖЭТФ*, **134**(2008), 706.
- [6] R. S. Iskhakov, S. V. Stolyar, L. A. Chekanova, M. V. Chizhik, *Solid State Phenomena*, **168-169**(2011), 73 .
- [7] Н. М. Саланский, М. Ш. Ерухимов, *Физические свойства и применение магнитных пленок*, Н., Наука, 1975.
- [8] А. Г. Гуревич, *Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках*, М., Наука, 1973.
- [9] Р. Г. Хлебопрос, *Размерные и кинетические эффекты в слоистых ферромагнитных структурах*, Автореф. дисс. докт. физ.-мат. наук, Красноярск, 1975.
- [10] Р. С. Исхаков, Г. В. Попов, М. М. Карпенко, *ФММ*, **56**(1983), 85.
- [11] В. А. Игнатченко, Р. С. Исхаков, *ЖЭТФ*, **72**(1977), 1005.
- [12] М. В. Медведев, *ФТТ*, **23**(1980), 1943.
- [13] K. Handrich, R. Ottking, *Phys. Stat. Sol. (b)*, **216**(1999), 1073.
- [14] В. А. Игнатченко, Р. С. Исхаков, В сб.: *Магнитные свойства кристаллических и аморфных сред*/Под ред. В.А.Игнатченко, Н.: Наука, 1989, С.128.
- [15] Р. С. Исхаков, С. В. Столяр, Л. А. Чеканова, В. С. Жигалов, *ФТТ*, **43**(2001), 1072.
- [16] Р. С. Исхаков, Д. Е. Прокофьев, Л. А. Чеканова, В. С. Жигалов, *Письма в ЖТФ*, **27**(2001), 81.
- [17] R. P. van Staple, F.J.A.M. Greidanus and J. W. Smits, *J. Appl. Phys.*, **57** (1985), 1282.
- [18] R. Kordecki, R. Meckenstock, J. Pelzl and others, *J. Appl. Phys.*, **70**(1991), 6418.
- [19] R. Kordecki, R. Meckenstock, J. Pelzl and others, *J. Magn. Magn. Mater.*, **121**(1993), 524.
- [20] Р. С. Исхаков, Ж. М. Мороз, Л. А. Чеканова и др., *ФТТ*, **45**(2003), 846.
- [21] Р. С. Исхаков, Н. А. Шепета, С. В. Столяр и др., *Письма в ЖЭТФ*, **83**(2006), 31.
- [22] Р. С. Исхаков, И. В. Гавришин, Л. А. Чеканова, *Письма в ЖЭТФ*, **63**(1996), 938.

Spin-wave Resonance in $\text{Co}_{1-x}\text{P}_x/\text{Co}_{1-y}\text{P}_y$ Multilayer Structures

Rauf S. Iskhakov
Sergey V. Stolyar
Mihail V. Chizhik
Lidiya A. Chekanova

Modification of spectrum of spin waves is found out in multilayer structures $(\text{Co}_{98}\text{P}_2/\text{Co}_{95}\text{P}_5)_N$ by SWR technique. It is caused by formation of the first, the second and the third Brillouin zones in magnon crystal, which formed by periodic modulation of an exchange. Band gap sizes are measured at the wave vector $k_b = \pi/(d_1 + d_2)$ and $2k_b$.

Keywords: multilayer films, magnon crystal, ferromagnetic and spin-wave resonance, band gap.