

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 539.216.2:537.635:537.611.44

### ФЕРРОМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС И МЕЖСЛОЕВОЕ ОБМЕННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В СВЕРХРЕШЕТКАХ $(\text{Fe}/\text{Cr})_n$

© 2019 г. А. Б. Ринкевич<sup>а</sup>, \*, М. А. Миляев<sup>а</sup>, Л. Н. Ромашев<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт физики металлов УрО РАН, 620108 Россия, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

\*e-mail: rin@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 16.07.2018 г.

После доработки 07.08.2018 г.

Принята к публикации 17.09.2018 г.

Исследовано прохождение электромагнитных волн через образцы сверхрешеток Fe/Cr, в которых ферромагнитный резонанс наблюдается в магнитно ненасыщенном состоянии. Эксперименты выполнены методом прохождения при комнатной температуре на частотах от 26 до 38 ГГц. Получены спектры ферромагнитного резонанса. Из измерения кривых намагничивания сделаны оценки обменных констант межслоевого обмена. Используя значения обменных констант, проведены расчеты спектров акустической ветви ферромагнитного резонанса. Проведено сопоставление экспериментальных и расчетных спектров резонанса.

*Ключевые слова:* магнитные сверхрешетки, электромагнитные волны, ферромагнитный резонанс, обменные константы

DOI: 10.1134/S0015323019030112

#### ВВЕДЕНИЕ

Исследование микроволнового гигантского магниторезистивного эффекта в металлических наноструктурах позволяет определить частотные характеристики этого эффекта. Он был обнаружен в [1] при изучении спектров ферромагнитного резонанса в металлических сверхрешетках. В [2] для изучения микроволнового гигантского магниторезистивного эффекта ( $\mu\text{GMR}$ ) был предложен метод измерения прохождения электромагнитной волны через наноструктуру. Подробно этот метод был описан теоретически и экспериментально в [3]. Специфика одновременного наблюдения  $\mu\text{GMR}$  и ферромагнитного резонанса (ФМР) в одном эксперименте изложена в [4]. Расчету спектра ферромагнитного резонанса в сверхрешетках и трехслойных наноструктурах посвящен целый ряд работ, в частности [5–7]. В [5, 6] предложен метод расчета спектра ФМР сверхрешеток, причем не только акустической, но и других ветвей ФМР, включая неоднородные моды. Расчет ведется для сверхрешеток, в которых присутствует биквадратичное обменное взаимодействие. Если резонанс приходится на область магнитных полей, где не достигнуто полное насыщение, то спектр резонанса зависит от межслоевых обменных констант, и существует возможность определить эти константы по спектрам ФМР. В обзоре [8] содержатся сведения о межслоевом взаимодействии, а также возможных типах магнитного упорядочения в магнитных сверхрешетках и трех-

слойных структурах системы (Fe/Cr). Температурная зависимость обменных констант исследована методом ферромагнитного резонанса в [9–11]. В [5, 6, 8, 10, 11] сделан вывод о том, что модель биквадратичного обмена лучше подходит для описания межслоевого обмена в системе (Fe/Cr). Методом прохождения ФМР в сверхрешетках  $(\text{Fe}/\text{Cr})_n$  с разной толщиной слоев и разным типом магнитного упорядочения изучался в [12]. Там показано, что ФМР наблюдался только при перпендикулярных микроволновом и постоянном магнитных полях. По положению резонансной особенности прохождения волн восстановлены спектры ФМР. С использованием теории, развитой в [5, 6], рассчитаны спектры ФМР. Из кривых намагничивания сделаны оценки констант межслоевого обменного взаимодействия. Получено хорошее согласие рассчитанных и измеренных спектров ФМР.

Цель данной статьи состоит в исследовании ФМР при прохождении электромагнитных волн миллиметрового диапазона через сверхрешетки, магнитные характеристики которых таковы, что резонанс приходится на магнитно ненасыщенное состояние сверхрешетки. Тогда спектр ФМР будет зависеть от констант межслоевого обмена. Эти константы будут определены из характеристик кривой намагничивания. Таким образом, будет показана возможность сопоставить экспериментально полученные и рассчитанные спектры ФМР.

**Таблица 1.** Характеристики образцов

№	Образец	$M_s$ , кГс	$M_0$ , кГс	$H_s$ , кЭ	$H$ , кЭ
1	Cr(1 нм)/[Fe(1.06 нм)/Cr(1.1 нм)] <sub>30</sub> /Cr(8 нм)/MgO	1.62		20	5.9
2	[Cr(1.1 нм)/Fe(0.9 нм)] <sub>40</sub> /Cr(8.5 нм)/MgO	1.18	0.26	25	3.3
3	[Cr(1.2 нм)/Fe(2.3 нм)] <sub>16</sub> /Cr(7.7 нм)/MgO	1.7	0.17	12.6	2.7
4	[Cr(1.3 нм)/Fe(2.4 нм)] <sub>8</sub> /Cr(8.2 нм)/MgO	1.65	0.04	12.0	3.2

**ОБРАЗЦЫ СВЕРХРЕШЕТОК И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Исследованные в данной работе сверхрешетки Fe/Cr были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке “Катунь-С” на монокристаллических подложках из оксида магния MgO. На подложки вначале осаждался буферный слой Cr толщиной около 8 нм, а затем последовательно осаждались слои Fe и Cr. Скорость роста слоев составляла около 0.15 нм в минуту. Подробные сведения о технологии получения сверхрешеток Fe/Cr, их магнитных и магниторезистивных свойствах приведены в ранее опубликованных нами работах [12, 13]. Исследование образцов сверхрешеток методом малоугловой дифракции рентгеновских лучей показало их периодическую структуру. Магнитосопротивление на постоянном токе измерялось по стандартной четырехконтактной схеме, а расчет относительного магнитосопротивления проводили по формуле

$$r = \frac{R(H) - R(0)}{R(0)} \times 100\%, \quad (1)$$

где  $R(H)$  – сопротивление образца в магнитном поле  $H$ . Магнитное поле прикладывалось к пленке параллельно ее плоскости. Магнитные измерения выполнены на сквид-магнитометре MPMS-5. Кривые намагничивания и петли гистерезиса измерялись при комнатной температуре. Характеристики исследованных в работе образцов приведены в табл. 1. О магнитных характеристиках этих образцов будет сказано в следующем разделе.

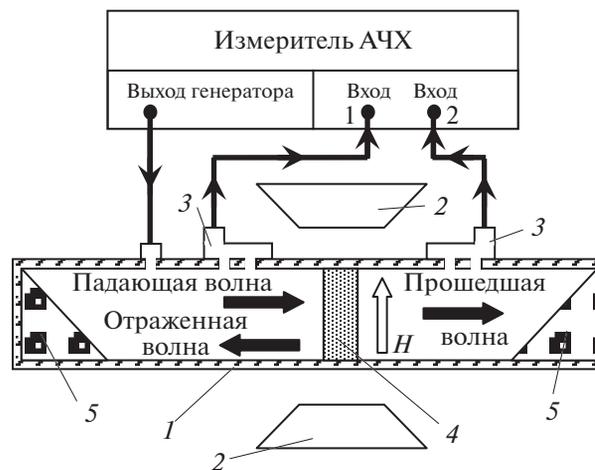
Исследования проникновения электромагнитного поля выполнены в интервале частот (26–38) ГГц по методике, изложенной в статьях [14, 15]. Образец сверхрешетки помещался в поперечное сечение прямоугольного волновода, как показано на рис. 1. Изучалась зависимость модуля коэффициента передачи  $D$  от напряженности внешнего постоянного магнитного поля  $H$  (до 12 кЭ) при комнатной температуре. Относительное изменение модуля коэффициента передачи определялось как  $d_m = [D(H) - D(0)]/D(0) \times 100\%$ . Магнитное поле прикладывалось в плоскости сверхрешетки параллельно узкой стороне волновода. При этом вектор постоянного магнитного

поля  $H$  был направлен перпендикулярно вектору переменного магнитного поля волны  $H_{\perp}$ .

**ОБМЕННЫЕ КОНСТАНТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ИЗ КРИВЫХ НАМАГНИЧИВАНИЯ**

На рис. 2 показаны кривые намагничивания четырех образцов сверхрешеток. Все кривые имеют насыщение в полях не менее 12 кЭ. Для наших целей важно, чтобы поле ФМР на используемых частотах приходилось на магнитно ненасыщенное состояние сверхрешеток. Однако поле ФМР должно значительно превосходить коэрцитивную силу, для того, чтобы образец находился в однодоменном состоянии, и был применим расчет спектра ФМР, развитый в [5, 6]. На рис. 3а показана петля гистерезиса, измеренная для образца 2. Видно, что восходящая и нисходящая ветви петли гистерезиса сходятся в полях, меньших 1 кЭ. Далее будет видно, что поля ФМР на частотах от 26 до 38 ГГц превышают 5 кЭ. Так что условия применимости теории [5, 6] в наших экспериментах обеспечены. Магниторезистивные зависимости для нескольких сверхрешеток приведены на рис. 3б.

Для определения констант межслоевого обмена сверхрешеток мы используем упрощенный ме-



**Рис. 1.** Схема микроволновых измерений: волновод (1); электромагнит (2); направленный ответвитель (3); образец (4); поглопитель (5).

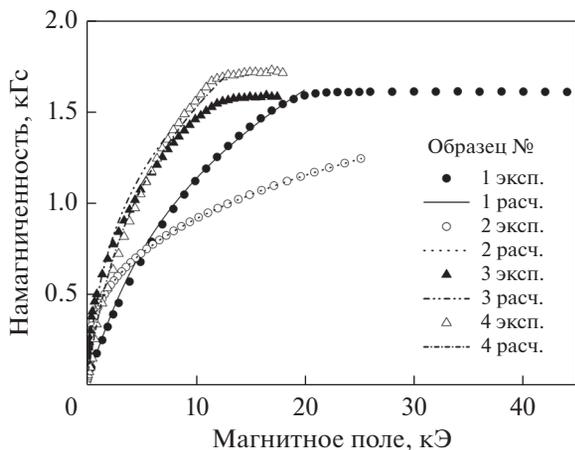


Рис. 2. Кривые намагничивания сверхрешеток и их аппроксимация.

год, изложенный в работе [12]. Энергия взаимодействия в сверхрешетке двух ферромагнитных слоев, разделенных тонкой “немагнитной” прослойкой, представляется в виде

$$E = -J_1 \frac{(M_1 M_2)}{M_1 M_2} - J_2 \frac{(M_1 M_2)^2}{(M_1 M_2)^2}, \quad (2)$$

где  $M_1$  и  $M_2$  – намагниченность во взаимодействующих слоях. В зависимости от величины и знака константы  $J_1$  может реализоваться либо ферромагнитное, либо антиферромагнитное, либо неколлинеарное упорядочение слоев. Слагаемое, содержащее обменную константу  $J_2$ , вводится в модели биквадратичного обмена [16]. Для нахождения численного значения констант  $J_1$  и  $J_2$  воспользуемся простым аналитическим выражением для кривых намагничивания сверхрешеток с учетом биквадратичного межслоевого обмена, полученным в [6]:

$$\begin{aligned} H &= AM + BM^3, \quad H \leq H_s, \\ M &= M_s, \quad H > H_s, \end{aligned} \quad (3)$$

где коэффициенты  $A$  и  $B$  можно выразить через поле насыщения  $H_s$  и поле  $H_{1/2}$ , соответствующее намагниченности, равной половине намагниченности насыщения  $M_s$ , т.е.  $M(H_{1/2}) = 1/2 M_s$ :

$$A = \frac{8H_{1/2} - H_s}{3M_s}, \quad B = \frac{4H_s - 2H_{1/2}}{3M_s^3}. \quad (4)$$

Коэффициенты  $A$  и  $B$  для сверхрешетки с бесконечным числом периодов в приближении, когда поле анизотропии  $H_a \ll M_s$ , следующим образом связаны с обменными константами  $J_1$  и  $J_2$  [5]:

$$A = -\frac{4J_1 - 8J_2}{dM_s^2}, \quad B = -\frac{16J_2}{dM_s^4}. \quad (5)$$

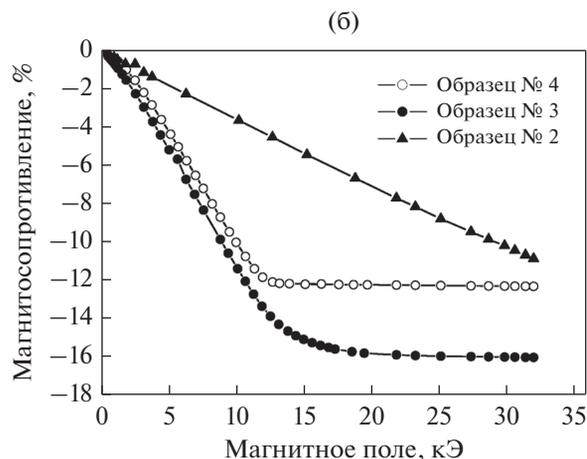
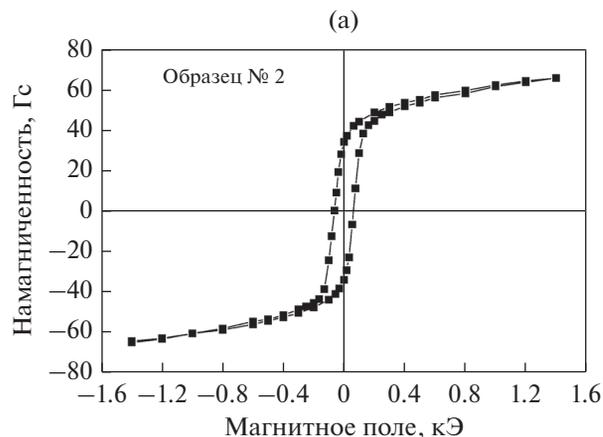


Рис. 3. Петля гистерезиса сверхрешетки № 2 – а; магниторезистивная зависимость сверхрешеток № 2, № 3, № 4 – б.

В формулах (5)  $d$  – толщина ферромагнитного слоя сверхрешетки. В модели биквадратичного обмена поле насыщения также связано с обменными константами,  $H_s = 4(J_1 + J_2)/dM_s$  [13]. Из (4), (5) легко выразить обменные константы через поля  $H_s$  и  $H_{1/2}$ :

$$\begin{aligned} J_1 &= \frac{1}{12}(H_s + 4H_{1/2})dM_s, \\ J_2 &= \frac{1}{12}(H_s - 2H_{1/2})dM_s. \end{aligned} \quad (6)$$

Величина намагниченности насыщения  $M_s$  и поля насыщения  $H_s$ , а также поля  $H_{1/2}$  образцов приведены в табл. 1. Представление кривых намагничивания по формуле (3) было выполнено для сверхрешеток в интервале полей до  $H_s$ , оно показано на рис. 2 линиями. Можно видеть, что совпадение между экспериментальными и рассчитанными зависимостями вполне удовлетворительное. По формулам (6) был выполнен расчет численных значений констант  $J_1$  и  $J_2$ . Результаты для параметров  $A$  и  $B$ , а также обменных кон-

**Таблица 2.** Коэффициенты аппроксимации и обменные константы

Номер образца	$A$ , Э/Гс	$B$ , Э/Гс <sup>3</sup>	$J_1$ , эрг/см <sup>2</sup>	$J_2$ , эрг/см <sup>2</sup>	$J_1/J_2$	$p$
1	5.6	$2.57 \times 10^{-6}$	0.75	0.12	0.16	0.3
2	0.33	$12.9 \times 10^{-6}$	0.35	0.17	0.48	0.13
3	1.75	$1.96 \times 10^{-6}$	0.76	0.24	0.31	0.21
4	2.8	$1.64 \times 10^{-6}$	0.82	0.18	0.22	0.27

стант, приведены в табл. 2. Из формул (6) отношение обменных констант  $J_2/J_1$  можно выразить через соотношение полей  $p = H_{1/2}/H_s$ :

$$\frac{J_2}{J_1} = \frac{1 - 2p}{1 + 4p}. \quad (7)$$

В данном подходе отношение обменных констант не зависит от параметра  $d$ , что дает возможность сравнивать результаты, полученные для сверхрешеток с различной толщиной ферромагнитных слоев. На рис. 4а зависимость (7) показана линией. На этом же рисунке круглыми символами показаны данные обработки магнитных измерений по формулам (6) большого количества сверхрешеток Fe/Cr. На этом же рисунке треугольными символами и звездочками приведены данные из опубликованных работ [5, 6, 8], где обменные константы получены из спектров ФМР. Видно вполне удовлетворительное совпадение результатов, полученных из спектров ФМР с рассчитанной зависимостью. Анализ расположения экспериментальных точек, соответствующих разным сверхрешеткам, на графике рис. 4а показывает, что большие значения  $p \sim 0.35$  и малые значения  $J_2/J_1$  соответствуют сверхрешеткам с малой толщиной слоев железа. Малым значениям  $p \sim 0.05$  и большим значениям  $J_2/J_1 \sim 0.8$  соответствуют сверхрешетки двух типов: с малой толщиной слоев Cr около 0.6–0.8 нм, а также с большей толщиной слоев  $\sim 1.8$  нм. Можно заметить, что большим значениям  $J_2/J_1$  соответствует отношение полей

$$p = \frac{H_{1/2}}{H_s} \sim 1. \quad (8)$$

Зависимость констант  $J_1$  и  $J_2$  от толщины слоев хрома (спейсера) показана на рис. 4б. Данные на рис. 4б получены для сверхрешеток с заведомо сплошными слоями Fe толщиной от 1.6 до 2.8 нм. Из этих зависимостей можно видеть, что соотношение  $p \leq 1$  действительно выполняется для толщин слоев Cr  $\sim 0.7$  и 1.8 нм. Максимум обменной константы  $J_1$  при толщинах спейсера  $\sim 1$ –1.1 нм — это хорошо известный факт, следствие осцилляций билинейной обменной константы в зависимости от толщины спейсера. Зависимость отно-

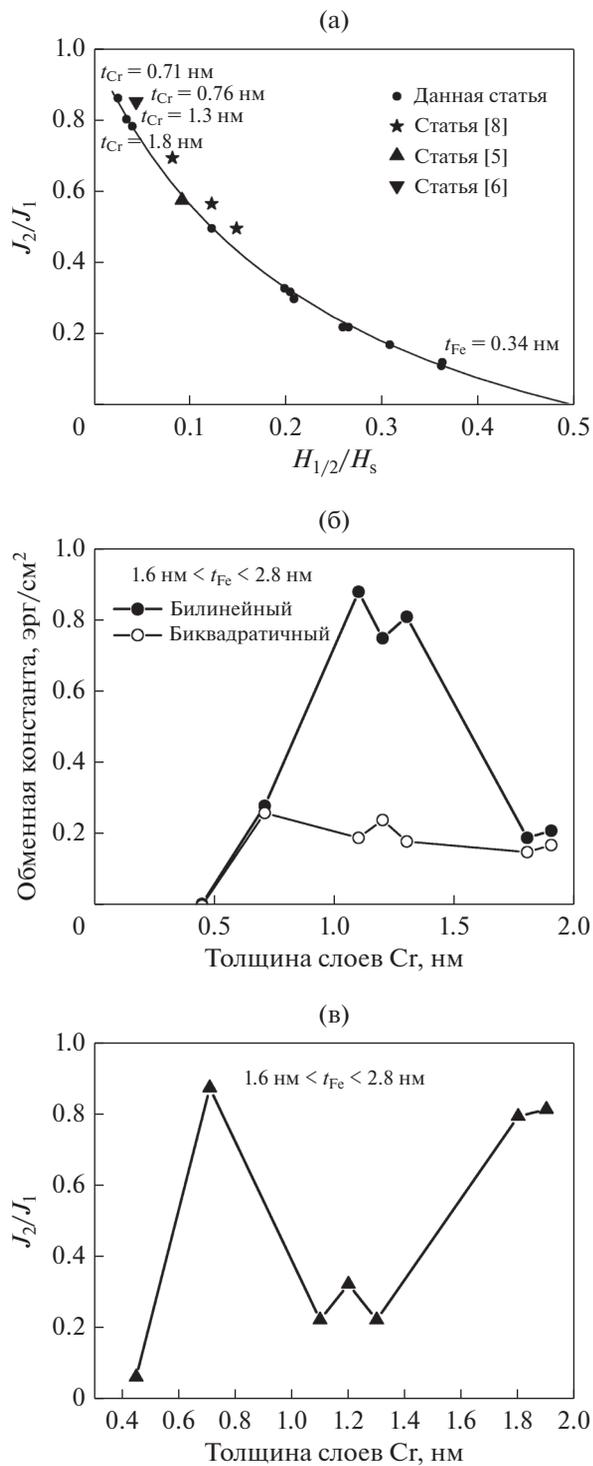
шения обменных констант  $J_2/J_1$  от толщины слоев хрома показана на рис. 4в. Линии на рис. 4б и 4в проведены для удобства наблюдения. Разумеется, максимумы на рис. 4в приходятся на области на рис. 4б, где  $J_1 \approx J_2$ . Резкое уменьшение отношения  $J_2/J_1$  для малой толщины слоев хрома  $\leq 0.5$  нм связано с резким ослаблением обмена при нарушении сплошности слоев Cr.

### ИЗМЕРЕНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ МИКРОВОЛН ЧЕРЕЗ СВЕРХРЕШЕТКИ

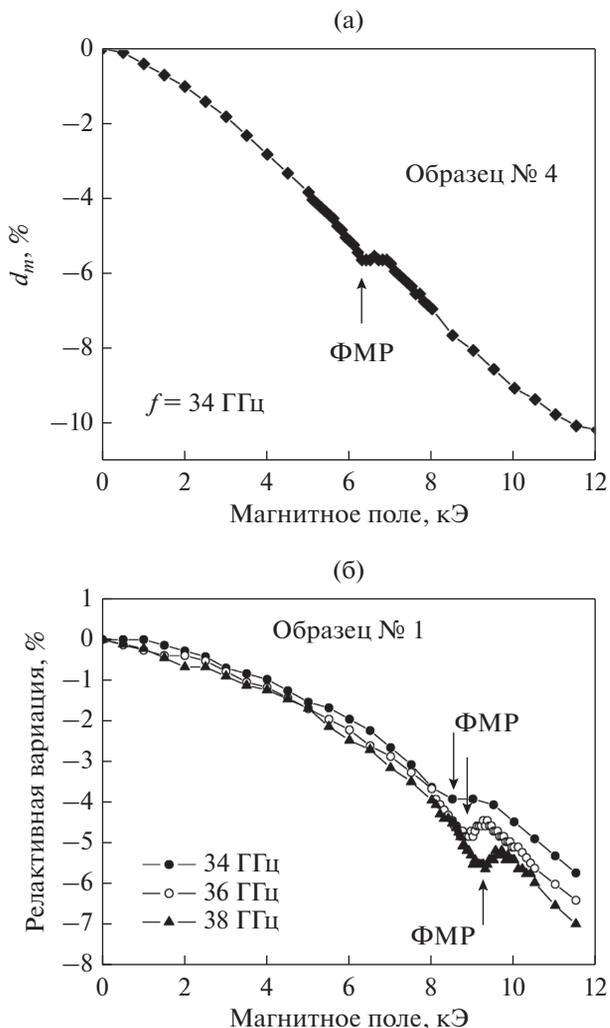
Образцы сверхрешеток 1–4 выбраны таким образом, что ФМР осуществляется в ненасыщенном магнитном состоянии сверхрешетки. Поэтому в прохождении микроволн в одном эксперименте наблюдаются два эффекта: микроволновое магнитосопротивление  $\mu$ GMR и собственно ФМР. Эффект  $\mu$ GMR по форме полевой зависимости, знаку и величине совпадает с гигантским магнитосопротивлением, измеренным на постоянном токе [2, 3]. ФМР в прохождении микроволн проявляется в виде минимума коэффициента прохождения, из-за поглощения микроволн при резонансе. Результаты измерений коэффициента прохождения микроволн в образце № 4 на частоте  $f = 34$  ГГц приведены на рис. 5а. Стрелкой отмечено положение ФМР. Монотонное уменьшение  $d_m$  связано с гигантским магниторезистивным эффектом. Подобные результаты для образца № 1 приведены на рис. 5б. На этом рисунке показаны результаты измерений на нескольких частотах. Разумеется, при увеличении частоты ФМР сдвигается в сторону более сильных магнитных полей, как и должно быть для акустической ветви ФМР. Из положения полей ФМР на разных частотах можно восстановить спектры резонанса. Эти спектры проанализированы в следующем разделе.

### СПЕКТРЫ ФЕРРОМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

Обменное взаимодействие и магнитная структура оказывают на спектр самое существенное влияние. В [5, 6] на основании решения уравнения движения магнитного момента был рассчитан



**Рис. 4.** Межслоевые обменные константы в сверхрешетках: зависимость соотношения констант биквадратичного и билинейного обмена от характеристики  $p = H_{1/2}/H_s$  кривой намагничивания – а; зависимость констант биквадратичного и билинейного обмена от толщины слоя хрома – б; зависимость соотношения констант биквадратичного и билинейного обмена от толщины слоя хрома – в.



**Рис. 5.** Зависимость коэффициента прохождения микроволн от магнитного поля для сверхрешеток № 4 – а; № 1 – б.

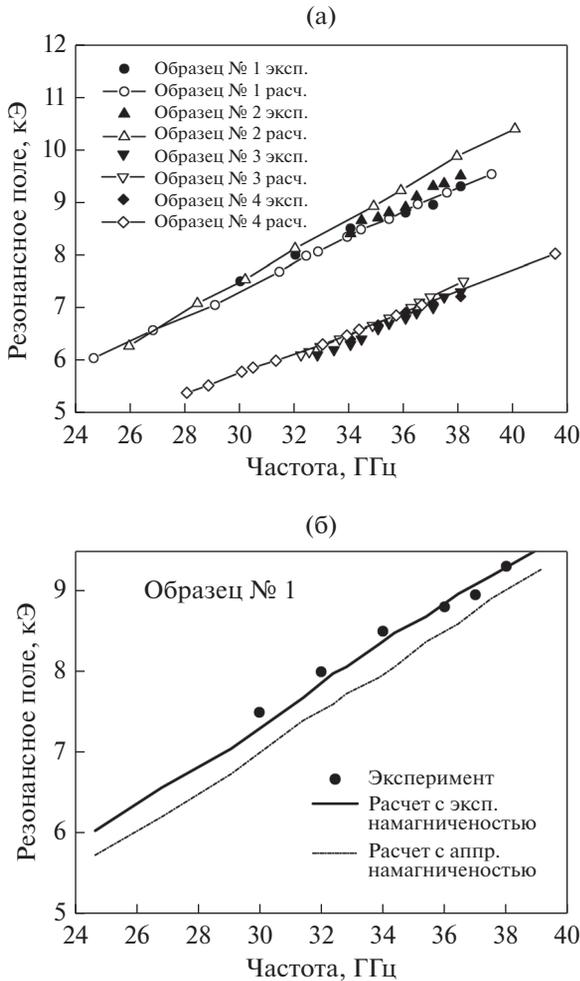
спектр ФМР. Уравнения спектра частот акустической моды записываются различным образом для насыщенного и ненасыщенного состояний:

$$\begin{aligned} \omega &= \gamma M [2C(2C + K_{\text{eff}})]^{1/2}, \quad H \leq H_s; \\ \omega &= \gamma [H(H + K_{\text{eff}}M_s)]^{1/2}, \quad H > H_s. \end{aligned} \tag{9}$$

Величина  $C$  выражается через постоянные  $A$  и  $B$  выражения для кривой намагничивания, или через обменные константы  $J_1$  и  $J_2$

$$C = \frac{A + BM^2}{2} = \frac{2}{dM_s^2} \left[ J_1 - 2J_2 \left( 1 - 2 \frac{M^2}{M_s^2} \right) \right]. \tag{10}$$

В численных расчетах спектра мы пренебрегаем влиянием одноосной анизотропии и полагаем  $K_{\text{eff}} = 4\pi$ . Возможность такого упрощения для сверхрешеток Fe/Cr следует из данных [6], где константа  $K_{\text{eff}}$  была экспериментально определена.



**Рис. 6.** Экспериментальные и расчетные спектры ферромагнитного резонанса для четырех сверхрешеток – а; экспериментальный спектр ФМР (символы) образца № 1, расчетный спектр с намагниченностью, взятой из кривой намагничивания (сплошная линия), расчетный спектр с намагниченностью, взятой из аппроксимации кривой намагничивания (штрихпунктирная линия) – б.

на, и она оказалась близкой к  $4\pi$ . Выражение (9) для спектра акустической моды ФМР можно переписать в виде:

$$\omega = 4\gamma \left[ \frac{J_1 + 2J_2}{dM_s} \left( \frac{J_1 + 2J_2}{dM_s} + \pi M_s \right) \right]^{1/2}, \quad H \leq H_s; \quad (11a)$$

$$\omega = \gamma [H(H + 4\pi M_s)]^{1/2}, \quad H > H_s. \quad (11б)$$

При построении расчетных спектров использовалось предположение об однородной прецессии магнитных моментов во всех слоях и во всех частях образца.

На рис. 6а показаны спектры ФМР четырех образцов сверхрешеток Fe/Cr, указанных в табл. 1.

Заполненными символами обозначены экспериментально измеренные спектры, а линиями – рассчитанные по формулам (9), (11а). Намагниченность сверхрешетки взята из экспериментальной кривой намагничивания, а обменные константы  $J_1$  и  $J_2$  взяты из табл. 2. Из рис. 6а можно заключить, что рассчитанные спектры хорошо соответствуют экспериментальным. Поэтому можно полагать, что значения межслоевых обменных констант, полученные из анализа кривых намагничивания, дают разумное согласие для спектров ФМР. Из сопоставления положения треугольных символов и звездочек на рис. 4а с расчетной линией можно заключить, что данные об обменных константах из опубликованных работ по ФМР в сверхрешетках Fe/Cr вполне соответствуют данным, следующим из кривых намагничивания. Кроме этого можно отметить, что описанный выше упрощенный метод нахождения обменных констант из кривых намагничивания находит подтверждение данными ФМР.

На рис. 6б, помимо экспериментального спектра ФМР образца № 1, показанного символами, показаны линиями два расчетных спектра. Один из них, показанный сплошной линией, построенной с использованием экспериментально измеренной намагниченностью, очень хорошо соответствует эксперименту. Вторая расчетная зависимость, показанная штрихпунктирной линией, получена с намагниченностью, взятой из расчетной зависимости (3) с коэффициентами  $A$  и  $B$  из табл. 2. Ясно видно, что расчет, использующий экспериментально измеренную намагниченность, дает лучшую аппроксимацию спектра.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При комнатной температуре измерены кривые намагничивания сверхрешеток Fe/Cr и упрощенным методом определены билинейная  $J_1$  и биквадратичная  $J_2$  константы межслоевого обмена. Упрощенный метод состоит в расчете обменных констант, используя значения поля магнитного насыщения  $H_s$  и поля  $H_{1/2}$ , при котором намагниченность принимает значение, равное половине намагниченности насыщения. Построена зависимость отношения обменных констант  $J_2/J_1$  от отношения полей  $H_{1/2}/H_s$ .

Выполнены измерения зависимости коэффициента прохождения электромагнитных волн миллиметрового диапазона от напряженности магнитного поля. Наблюдались микроволновой гигантский магниторезистивный эффект и на его фоне изменения коэффициента прохождения, вызванные ФМР. Восстановлены спектры ФМР для образцов сверхрешеток, в которых резонанс наблюдается до достижения магнитного насыщения. Проведено сопоставление экспериментальных и

расчетных спектров ФМР. В расчетах использованы обменные константы, полученные из магнитных измерений. Установлено хорошее соответствие рассчитанных и экспериментальных спектров.

Работа выполнена в рамках темы “Спин” № АААА-А18-118020290104-2. Разделы 3 и 4 выполнены при поддержке гранта РФФИ № 17-12-01002.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Krebs J.J., Lubitz P., Chaiken A., Prinz G.A.* Magnetoresistance origin for nonresonant microwave absorption in antiferromagnetically coupled epitaxial Fe/Cr/Fe(001) sandwiches // *J. Appl. Phys.* 1991. V. 69. № 8. Pt. II. P. 4795–4797.
2. *Ustinov V.V., Rinkevich A.B., Romashev L.N., Minin V.I.* Correlation between microwave transmission and giant magnetoresistance in Fe/Cr superlattices // *JMMM*. 1998. V. 177–181. P. 1205–1206.
3. *Ринкевич А.Б., Ромашев Л.Н., Устинов В.В.* Высокочастотное магнитосопротивление сверхрешеток Fe/Cr // *ЖЭТФ*. 2000. Т. 117. Вып. 5. С. 960–968.
4. *Rinkevich A.B., Romashev L.N., Ustinov V.V., Kuznetsov E.A.* High frequency properties of magnetic multilayers, *JMMM*. 2003. V. 254–255С. P. 603–607.
5. *Дровосеков А.Б., Крейнес Н.М., Холин Д.И., Мещеряков В.Ф., Миляев М.А., Ромашев Л.Н., Устинов В.В.* Ферромагнитный резонанс в многослойных структурах  $[\text{Fe/Cr}]_n$  с неколлинеарным магнитным упорядочением // *Письма в ЖЭТФ*. 1998. Т. 67. С. 690–695.
6. *Дровосеков А.Б., Жотикова О.В., Крейнес Н.М., Мещеряков В.Ф., Миляев М.А., Ромашев Л.Н., Устинов В.В., Холин Д.И.* Неоднородные моды ферромагнитного резонанса в сверхрешетках  $[\text{Fe/Cr}]_n$  с большой величиной биквадратичного обменного взаимодействия // *ЖЭТФ*. 1999. Т. 116. Вып. 5(11). С. 1817–1833.
7. *Bebenin N.G.* Ferromagnetic resonance in a magnetic trilayer with biquadratic exchange and unidirectional anisotropy // *JMMM*. 1995. V. 161. P. 65–69.
8. *Крейнес Н.М.* Исследование межслоевого взаимодействия в магнитных многослойных структурах  $[\text{Fe/Cr}]_n$  методом ферромагнитного резонанса // *ФНТ*. 2002. Т. 28. № 8/9. С. 807–821.
9. *Kuanr B.K., Kuanr A.V., Grunberg P., Nimitz G.* Swept-Frequency FMR on Fe/Cr Trilayer Ultrathin Films – Microwave Giant Magnetoresistance // *Physics Letters*. 1996. V. 221A. № 3–4. P. 245–252.
10. *Демокритов С.О., Дровосеков А.Б., Крейнес Н.М., Нембах Х., Рикарт М., Холин Д.И.* Межслойное взаимодействие в системе Fe/Cr/Fe: зависимость от толщины прослойки хрома и температуры // *ЖЭТФ*. 2002. Т. 122. Вып. 6(12). С. 1233–1246.
11. *Demokritov S.O., Drovosekov A.B., Kholin D.I., Kreines N.M., Nembach H., Rickart M.* Temperature dependence of interlayer coupling in Fe/Cr/Fe wedge samples: static and dynamic studies // *J. Magn. and Mater.* 2004. V. 272–276. P. e963–e965.
12. *Устинов В.В., Ринкевич А.Б., Ромашев Л.Н., Миляев М.А., Бурханов А.М., Сидун Н.Н., Кузнецов Е.А.* Проникновение электромагнитных волн сквозь мультислойные и кластерно-слоистые наноструктуры Fe/Cr // *ФММ*. 2005. Т. 99. Вып. 5. С. 486–497.
13. *Ustinov V.V., Bebenin N.G., Romashev L.N., Minin V.I., Milyaev M.A., Del A.R., Semerikov A.V.* Magnetoresistance and magnetization of Fe/Cr (001) superlattices with noncollinear magnetic ordering // *Phys. Rev. B*. 1996-I. V. 54. № 22. P. 19958–19966.
14. *Rinkevich A.B., Samoilovich M.I., Klescheva S.M., Perov D.V., Burkhanov A.M., Kuznetsov E.A.* Millimeter-Wave Properties and Structure of Gradient Co–Ir Films Deposited on Opal Matrix // *IEEE Trans. on Nanotechnology*. 2014. V. 13. № 1. P. 3–9.
15. *Kostylev M.* Waveguide-based ferromagnetic resonance measurements of metallic ferromagnetic films in transmission and reflection // *J. of Appl. Phys.* 2013. V. 113. P. 053908(1–5).
16. *Bruno P.* Theory of interlayer magnetic coupling // *Phys. Rev. B*. 1995. V. 52. P. 411–439.