

Магниторефрактивный эффект и гигантское магнитосопротивление в сверхрешетках $\text{Fe}(t_x)/\text{Cr}$

© И.Д. Лобов, М.М. Кириллова, Л.Н. Ромашев, М.А. Миляев, В.В. Устинов

Институт физики металлов Уральского отделения Российской академии наук,
Екатеринбург, Россия

E-mail: i_lobov@imp.uran.ru

(Поступила в Редакцию 18 марта 2009 г.
В окончательной редакции 6 мая 2009 г.)

На серии образцов с переменной толщиной слоя железа $\text{Fe}(t_x, \text{Å})/\text{Cr}(10 \text{ Å})$ (сверхрешетки, кластерно-слоистые наноструктуры), выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, исследован магниторефрактивный эффект в инфракрасной области спектра $\lambda = 2\text{--}13 \mu\text{m}$ при s - и p -поляризациях световой волны. На этих же образцах выполнены измерения магниторезистивного эффекта в постоянном магнитном поле $H \leq 32 \text{ kOe}$. Установлено, что толщина слоя железа, необходимая для формирования магниторефрактивного отклика, составляет $t_{\text{Fe}} \geq 3 \text{ Å}$. Обсуждается корреляция между величиной магниторефрактивного эффекта в средней ИК-области спектра и магнитосопротивлением.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 07-02-01289), программы Президиума РАН „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“ и проекта НШ РФ.

PACS: 75.70.Cn, 78.20.Ls

1. Введение

Магниторефрактивный эффект (МРЭ) экспериментально обнаружен и теоретически рассмотрен в работе [1]. Эффект характеризует влияние магнитного поля на комплексный показатель преломления гетерогенных магнитных материалов $N^2 = \epsilon$ (ϵ — диэлектрическая проницаемость) и проявляется в изменении их оптических характеристик, в частности коэффициента отражения R , вследствие уменьшения электрического сопротивления во внешнем магнитном поле. Типичные объекты для исследования МРЭ — это металлические мультислойные пленки, спин-туннельные структуры и гранулированные пленки [2–9]. В указанных материалах внешнее магнитное поле H изменяет конфигурацию намагниченностей в соседних ферромагнитных слоях (или частицах) от антиферромагнитной в исходном состоянии ($H = 0$) к ферромагнитной ($H \neq 0$). При этом изменяются условия для спин-зависимого рассеяния электронов проводимости в объеме слоев и в интерфейсах, что приводит к росту электрической проводимости, появлению МРЭ и гигантского магнитосопротивления (ГМС). Теоретическое рассмотрение магниторефрактивного эффекта во взаимосвязи с ГМС выполнено в ряде работ (см., например, [10–12]). Интерес к экспериментальному исследованию МРЭ в последнее время обусловлен возможностью получения на оптических частотах сведений об основных параметрах спин-зависимого рассеяния и перспективой использования эффекта в качестве бесконтактного метода контроля магнитотранспортных свойств материалов. О приборе для контроля магниторезистивных материалов, основанном на измерении МРЭ в средней ИК-области, сообщалось недавно в работе [13].

Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению корреляции между магниторефрактивным эффектом и магнитосопротивлением в сверхрешетках Fe/Cr . Нами выполнены первые сравнительные исследования МРЭ и ГМС на серии сверхрешеток Fe/Cr , различающихся толщиной слоев. Целью работы являлось определение минимальной толщины слоя Fe , необходимой для формирования магниторефрактивного отклика на свободных носителях тока. Кроме того, представляло интерес оценить соотношение между величинами ГМС и МРЭ при s - и p -поляризациях световой волны.

2. Образцы

Квазимонокристаллические сверхрешетки Fe/Cr выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на высоковакуумной установке „Катунь-С“. Скорость напыления слоев хрома и железа была одинаковой и составляла примерно один атомный монослой (ML) в минуту. Номинальная (рассчитанная по скорости и времени напыления) толщина слоев железа в образцах варьировалась в интервале $t_{\text{Fe}} \approx 1.2\text{--}15.3 \text{ Å}$. Толщина слоев хрома, равная 10 Å в основной серии образцов $\text{MgO}(001)/\text{Cr}(80 \text{ Å})/[\text{Fe}(t_x, \text{Å})/\text{Cr}(10 \text{ Å})]_n$, соответствовала условиям формирования в сверхрешетках антиферромагнитного упорядочения намагниченностей соседних слоев железа при $H = 0$ и, следовательно, наибольшей величине магнитосопротивления. Для уменьшения вклада шероховатости подложки в структуру слоев сверхрешетки на подложку вначале осаждался буферный слой хрома толщиной 80 Å . Количество би-слоев n в сверхрешетках изменялось (в зависимости

от толщины слоя Fe) от 30 до 50. Дополнительно к этой серии были приготовлены еще два образца: сверхрешетка MgO(001)/Cr(80 Å)/[Fe(3.5 Å)/Cr(20 Å)]₅₀, у которой толщина слоев хрома 20 Å обеспечивала ферромагнитное упорядочение магнитных моментов соседних слоев железа в исходном состоянии (соответственно отсутствие ГМС и МРЭ), и сверхрешетка Al₂O₃(1010)/Fe(36 Å)/[Fe(12 Å)/Cr(15 Å)]₁₂ с неколлинеарной магнитной структурой.

Проведенные в целях аттестации образцов Fe(*t_s*, Å)/Cr(10 Å) эллипсометрические измерения эффективных показателей преломления n_{eff} и поглощения k_{eff} показали, что глубина проникновения световой волны $\delta = c/\omega k_{\text{eff}}$ (c — скорость света в вакууме, ω — циклическая частота световой волны) в исследованной ИК-области спектра не превышает суммарную толщину металлических бислоев. Сверхрешетка, приготовленная на подложке из сапфира, имела суммарную толщину металлических слоев ~ 360 Å. Коэффициент пропускания этого образца, рассчитанный по формулам [14], учитывающим оптические постоянные объемных хрома и железа [15,16], на участке спектра $\lambda = 6\text{--}13$ μm составлял $\sim 1\%$.

3. Экспериментальные методики

Магнитосопротивление (МС) образцов измеряли стандартным четырехконтактным способом в постоянном магнитном поле $H \leq 32$ кОе. Магниторезистивный эффект определялся из выражения

$$r(H) = \frac{\rho(H) - \rho(0)}{\rho(0)}, \quad (1)$$

где $\rho(0) = \rho(H = 0)$, а $\rho(H)$ соответствует электросопротивлению в поле H .

Магниторефрактивный эффект на отражение измерен в геометрии экваториального намагничивания при p - и s -поляризациях падающей световой волны и углах падения света на образец соответственно $\varphi_1 = 70^\circ$ и $\varphi_2 = 10^\circ$. Источником света служил глобар. Для поляризации излучения использовалась решетка-поляризатор на основе полиэтилена со степенью поляризации $\sim 94\%$ при 3 μm . В качестве фотоприемного устройства применялся оптико-акустический приемник ОАП-7М с входным окном из CsI. Спектральный диапазон исследований составил $\lambda = 2\text{--}13$ μm . Измерения проводились модуляционным методом. В качестве намагничивающего устройства использовался малогабаритный электромагнит панцирного типа. Образец перемагничивался с частотой 8 Hz, ток в электромагните имел форму однополярного меандра. Магнитное поле в зазоре изменялось от 0 до 9 кОе. При заданной длине световой волны, угле падения света и поляризации измерялась величина относительного изменения интенсивности отраженного света от образца в отсутствии магнитного поля и в

поле H . В этом случае выражение для МРЭ имеет вид

$$\text{MRE}(H) = \frac{R(0) - R(H)}{R(0)}, \quad (2)$$

где $R(0)$ и $R(H)$ — коэффициенты отражения света от образца без поля и в магнитном поле H соответственно. Измерения экваториального эффекта Керра в нескольких точках по спектральному диапазону показали, что вклад от линейного эффекта незначителен и укладывается в ошибку измерения, не превышающую $\pm 0.06\%$.

Измерения магнитосопротивления и МРЭ выполнены при комнатной температуре.

4. Обсуждение результатов

В области свободных носителей (ИК-диапазон спектра) коэффициент отражения света в многослойных пленках $R(\omega, H = 0) < R(\omega, H)$. Увеличение R во внешнем поле H и отрицательный знак МРЭ обусловлены изменением магнитного упорядочения соседних слоев Fe в сверхрешетке от антиферромагнитного к ферромагнитному и связанным с этим ростом проводимости. Измерения МРЭ проведены в средней ИК-области спектра, в которой вклад от внутризонного механизма поглощения света нарастает с ростом длины волны λ и становится доминирующим в формировании диэлектрической проницаемости ϵ и коэффициента отражения R слоистой структуры.

На рис. 1 представлены графики МРЭ при p - и s -поляризациях падающего излучения для сверхрешетки

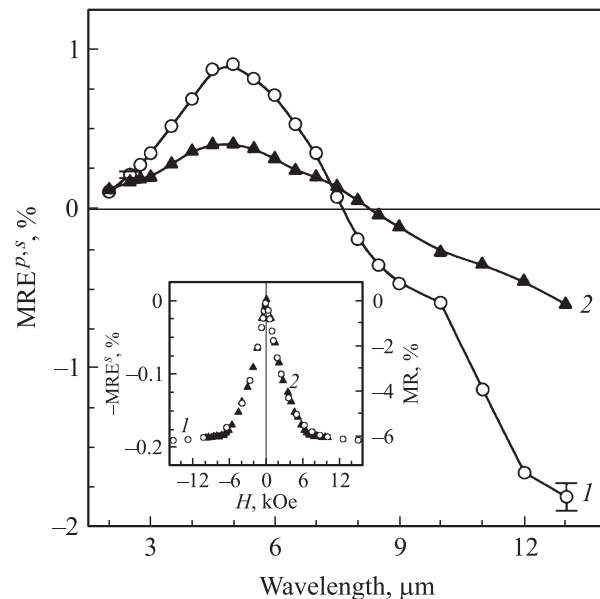


Рис. 1. Магниторефрактивный эффект (МРЕ) в сверхрешетке с бислоем Fe(12 Å)/Cr(15 Å) и неколлинеарной магнитной структурой при p - (1) и s -поляризациях света (2). Магнитное поле насыщения $H_s = 8$ кОе. На вставке — полевая зависимость магнитосопротивления (MR) (1) и МРЭ^s (2), измеренного при $\lambda = 2.75$ μm .

с бислоем Fe(12 Å)/Cr(15 Å). Для этого образца поле магнитного насыщения составляет $H_s = 8$ кОе, а величина ГМС при этом равняется -6.2% . Отметим, что магнитофрактивный эффект в ближней ИК-области имеет положительный знак. С увеличением длины волны эффект изменяет знак на противоположный: при $\lambda = 7.2 \mu\text{m}$ для p -поляризации и $8.3 \mu\text{m}$ для s -поляризации.

Известно, что межзонные переходы электронов играют активную роль в формировании оптических свойств ферромагнитного железа в ИК-области спектра. Специфической особенностью оптического поглощения в Fe является наличие интенсивной низкоэнергетической полосы межзонного поглощения при энергиях фотона $E = 0.15-0.5 \text{ eV}$ ($\lambda \sim 2.5-8 \mu\text{m}$) [15]. Согласно теоретическим расчетам [17], формирование указанной аномалии обусловлено гибридизацией зон с противоположным направлением спинов в условиях спин-орбитального взаимодействия электронов. Недавно на примере многослойной структуры Co/Cu в рамках метода сильной связи было показано, что МРЭ от межзонных переходов электронов имеет положительный знак [18]. Таким образом, немонотонную спектральную зависимость и положительный знак МРЭ в сверхрешетке Fe/Cr можно объяснить влиянием межзонного механизма возбуждения электронов в железе. Отметим, что для сверхрешетки Fe(12 Å)/Cr(15 Å) максимальная величина МРЭ^{*p*} (p -поляризация) и МРЭ^{*s*} (s -поляризация) при $\lambda = 13 \mu\text{m}$ составляет -1.8 и -0.62% соответственно. Из вставки на рис. 1 видно, что магнитосопротивление и МРЭ при намагничивании образца имеют квадратичную зависимость от внешнего поля H . Следует отметить, что наблюдаемый в ближней ИК-области спектра магнитооптический сигнал положительного знака помимо вклада от МРЭ может содержать также вклад от ориентационного магнитооптического эффекта δ_q , обусловленного влиянием магнитного поля (намагниченности) на комплексный показатель преломления магнитно-однородной среды (в данном случае слоев Fe и Cr). Оба эффекта являются негиротропными и квадратичными по намагниченности, и их разделение затруднено. На основе имеющихся экспериментальных данных о величине ориентационного эффекта в переходных d -металлах ($\delta_q \sim 0.04-0.1\%$) [16,19] можно заключить, что основной вклад в формирование квадратичного эффекта, наблюдаемого в сверхрешетках Fe/Cr в ближней ИК-области, вносит магнитофрактивный отклик, связанный с изменением магнитного упорядочения соседних слоев Fe.

На рис. 2, *a, b* представлены графики МРЭ при p - и s -поляризациях падающего излучения для сверхрешеток с различной толщиной слоя железа. Отметим, что с увеличением длины волны от $\lambda = 5.3 \mu\text{m}$ для образца с толщиной слоя $t_{\text{Fe}} = 15.3 \text{ \AA}$ до $\lambda = 7.4 \mu\text{m}$ для образца с $t_{\text{Fe}} = 3.2 \text{ \AA}$ эффект меняет знак на противоположный (p -поляризация). Аналогично ведут себя спектры МРЭ при s -поляризации света. Выше уже отмечалось, что

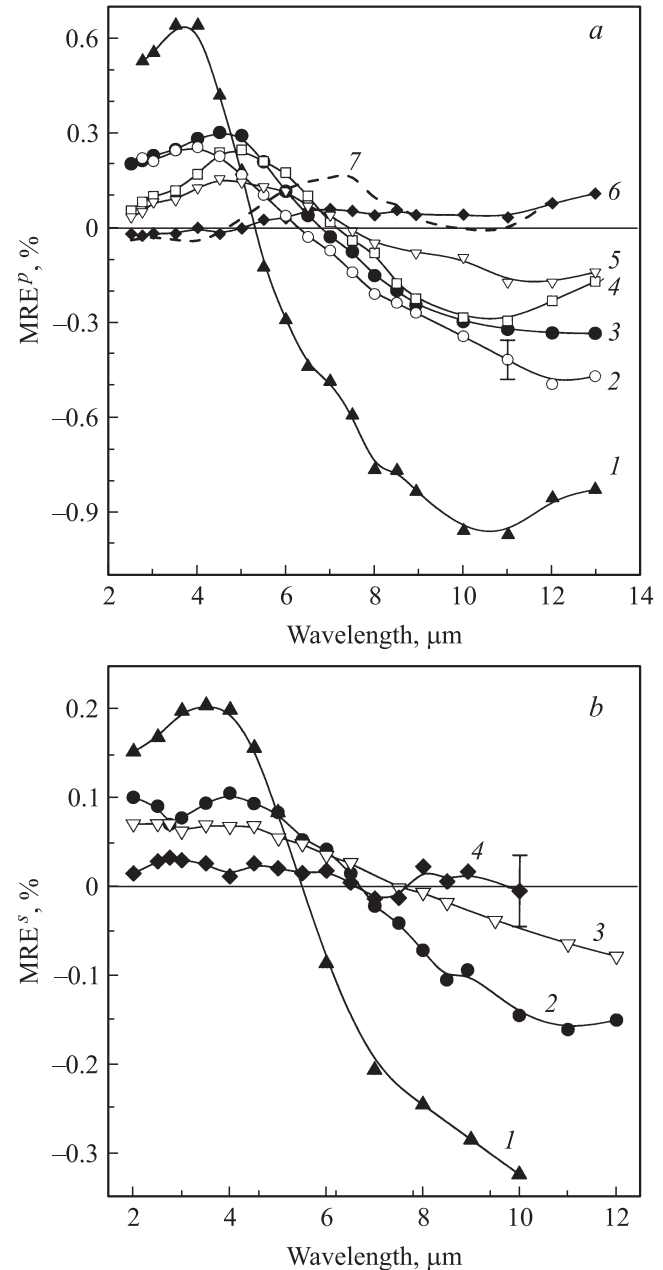


Рис. 2. *a*) Спектры МРЭ сверхрешеток Fe($t_x, \text{\AA}$)/Cr(10 Å) ($t_x, \text{\AA}$: 1 — 15.3, 2 — 10.6, 3 — 7.2, 4 — 5.2, 5 — 3.2, 6 — 1.2) и Fe(3.5 Å)/Cr(20 Å) (7), p -поляризация, $\varphi_1 = 70^\circ$. *b*) Спектры МРЭ сверхрешеток Fe($t_x, \text{\AA}$)/Cr(10 Å), s -поляризация, $\varphi_2 = 10^\circ$. $t_x, \text{\AA}$: 1 — 15.3, 2 — 7.2, 3 — 3.2, 4 — 1.2. Магнитное поле $H = 9$ кОе. Вертикальными отрезками показаны ошибки измерений.

положительный знак МРЭ обеспечивается вкладом в оптические свойства сверхрешеток от межзонных переходов электронов в железе.

Магнитные и магнитооптические (экваториальный эффект Керра (ЭЭК)) свойства сверхрешеток Fe($t_x, \text{\AA}$)/Cr(10 Å) изучались нами ранее [20]. Было установлено, что спектры ЭЭК образцов с $t_{\text{Fe}} \geq 7 \text{ \AA}$ сохраня-

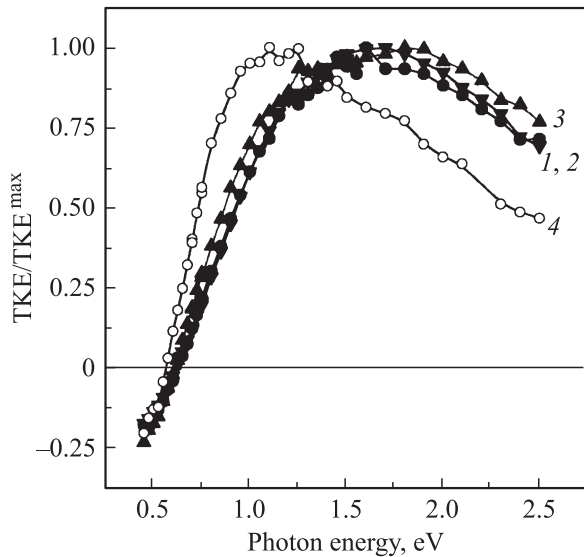


Рис. 3. Нормированные спектры экваториального эффекта Керра (ТКЕ) сверхрешеток $\text{Fe}(t_x, \text{\AA})/\text{Cr}(10 \text{\AA})$ [20]. $t_x = 15.3$ (1), 10.6 (2), 7.2 (3) и 5.2 \AA (4).

ют „железоподобную“ форму с максимумом при энергии фотона $E = 1.85 \text{ eV}$, что свидетельствует о неизменной величине обменного расщепления спиновых подзон (\uparrow) и (\downarrow) d -типа ($2\Delta_{\text{exch}} \sim 2 \text{ eV}$) в ферромагнитных слоях железа. Дальнейшее уменьшение толщины слоя железа приводит не только к снижению амплитуды ЭЭК, но и к изменению его спектрального профиля. Толщины железа $t_{\text{Fe}} \sim 5\text{--}6.6 \text{\AA}$ ($\sim 3\text{--}4 \text{ ML}$) оказались критическими, начиная с которых магнитные и магнитооптические свойства образцов изменяются. Это связано с нарушением сплошности пленки железа и образованием кластеров, состоящих из микрообластей ОЦК-Fe и сплавов FeCr. Нормированные значения ЭЭК (т.е. отнесенные к их максимальной величине для данной толщины слоев железа) демонстрируют рост магнитооптического отклика при энергиях фотона в районе 1 eV (рис. 3). Таким образом, можно заключить, что в узком интервале толщин Fe порядка $6 \pm 1 \text{\AA}$ происходит переход от слоистой к кластерно-слоистой структуре. В этой связи интересно проследить за эволюцией спектров МРЭ в ИК-диапазоне спектра с уменьшением толщины слоев железа.

Как следует из экспериментальных результатов, представленных на рис. 2, *a, b*, с изменением в $\text{Fe}(t_x, \text{\AA})/\text{Cr}(10 \text{\AA})$ толщины слоя железа до $t_{\text{Fe}} = 3.2 \text{\AA}$ включительно спектральное поведение МРЭ сохраняет знакопеременный вид. При $t_{\text{Fe}} < 3.2 \text{\AA}$ величина эффекта в области внутризонного механизма поглощения света ($\lambda = 8\text{--}13 \mu\text{m}$) резко уменьшается и изменяет знак на противоположный, что указывает на исчезновение МРЭ. Это означает, что в кластерно-слоистых наноструктурах Fe/Cr происходит значительное ослабление межслоевого обменного взаимодействия. Последнее может быть вызвано действием нескольких причин, в частности нарушением сплошности магнитного

слоя (приводящим к суперпарамагнитному поведению ансамбля кластеров Fe в матрице Cr) и увеличением расстояний между кластерами в соседних магнитных слоях.

Для сравнения нами была исследована сверхрешетка с бислоем $\text{Fe}(3.5 \text{\AA})/\text{Cr}(20 \text{\AA})$, в которой толщина слоя хрома соответствует ферромагнитному упорядочению намагниченностей соседних слоев железа в исходном состоянии ($H = 0$). По этой причине в данной сверхрешетке отсутствует ГМС и должен отсутствовать магнито-рефрактивный эффект как его высокочастотный аналог. Действительно, графики МРЭ наноструктур с бислоями $\text{Fe}(3.5 \text{\AA})/\text{Cr}(20 \text{\AA})$ и $\text{Fe}(1.2 \text{\AA})/\text{Cr}(10 \text{\AA})$ отличаются по спектральной зависимости от остальных образцов положительными значениями магнитооптического отклика при длинах волн, больших $7 \mu\text{m}$ (рис. 2, *a*), т.е. магнито-рефрактивный эффект на свободных носителях тока в этих наноструктурах не наблюдается. Поэтому можно утверждать, что при толщинах $t_{\text{Fe}} \leq 1.2 \text{\AA}$ (комнатная температура) отсутствуют также условия для проявления ГМС. Слабый магнитооптический отклик, зарегистрированный в указанных выше образцах, мы относим к ориентационному квадратичному магнитооптическому эффекту [19].

На рис. 4 показаны полевые зависимости магнитосопротивления сверхрешеток $\text{Fe}(t_x, \text{\AA})/\text{Cr}(10 \text{\AA})$, а на рис. 5 проведено сопоставление величин МРЭ и МС в магнитном поле $H = 9 \text{ kOe}$ для p -поляризации. При сравнении были использованы максимальные по величине в пределах длинноволнового участка спектра ($\lambda \sim 8\text{--}13 \mu\text{m}$) значения $|\text{МРЭ}|$, где межзонный вклад в оптическую проводимость железа практически отсутствует, а МРЭ имеет отрицательный знак, характерный для области свободных носителей тока. Как следует из

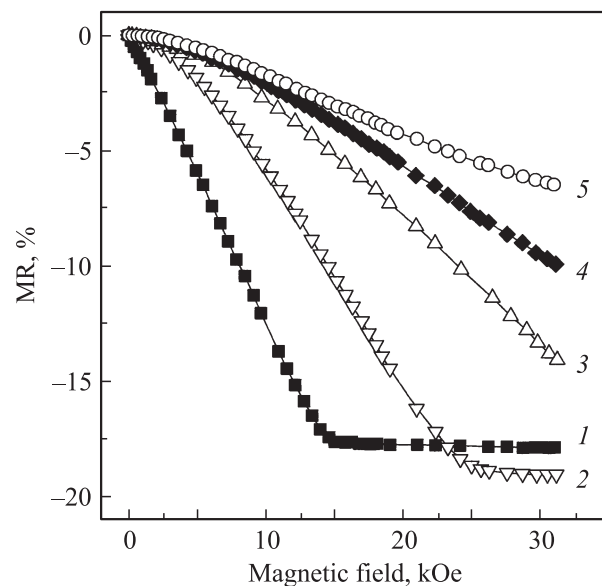


Рис. 4. Магнитосопротивление сверхрешеток $\text{Fe}(t_x, \text{\AA})/\text{Cr}(10 \text{\AA})$ с различной толщиной слоев железа. $t_x = 15.3$ (1), 10.6 (2), 7.2 (3), 5.2 (4) и 3.2 \AA (5).

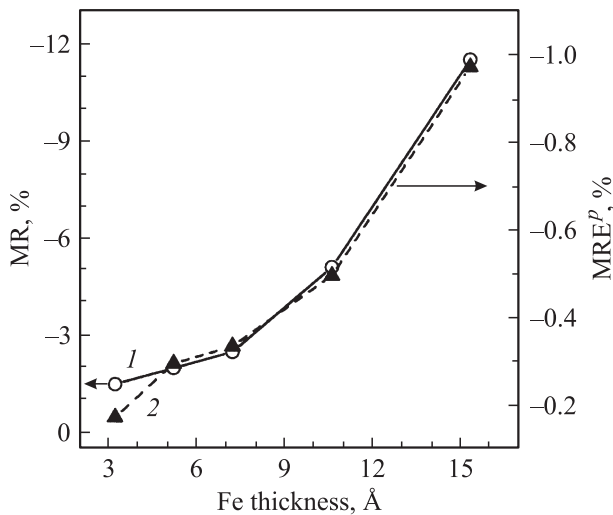


Рис. 5. Корреляция между зависимостями магнитосопротивления (1) и МРЭ^р ($\varphi = 70^\circ$) (2) в Fe($t_x, \text{\AA}$)/Cr(10 \AA) от толщины слоев железа. Магнитное поле $H = 9 \text{ kOe}$.

рис. 5, наблюдается хорошее совпадение полученных толщинных зависимостей МРЭ и магнитосопротивления. В поле $H = 9 \text{ kOe}$ максимальные значения МРЭ^р на ИК-частотах (p -поляризация световой волны, $\varphi_1 = 70^\circ$) составляют -1% — Fe(15.3 \AA)/Cr(10 \AA), -0.50% — Fe(10.6 \AA)/Cr(10 \AA), -0.34% — Fe(7.2 \AA)/Cr(10 \AA), -0.3% — Fe(5.2 \AA)/Cr(10 \AA) и -0.2% — Fe(3.2 \AA)/Cr(10 \AA). В случае s -поляризации величина эффекта уменьшается в 2–3 раза. Для этих образцов с антиферромагнитным упорядочением магнитных моментов соседних слоев железа в исходном состоянии мы имеем $\text{МС}(H = 9 \text{ kOe})/\text{МРЭ}^p \sim 7.5\text{--}11$. В сверхрешетке Fe(12 \AA)/Cr(15 \AA) с неколлинеарной магнитной структурой отношение $\text{ГМС}/\text{МРЭ}^p = 3.5$. Отметим, что при изучении мультислойной пленки Co/Cu получено отношение $\text{ГМС}/\text{МРЭ}^p \sim 9.8$ ($\varphi = 75^\circ$, $\lambda = 20 \mu\text{m}$) [6]. Причины, вызывающие различие коэффициента пропорциональности между магнитосопротивлением и МРЭ в сверхрешетках Fe/Cr, приготовленных на подложках из MgO и Al₂O₃ с различными буферными слоями, нам пока не ясны. Экспериментальные исследования в более длинноволновой области спектра на дополнительных сериях образцов будут весьма полезными.

5. Заключение

Впервые изучены спектры магниторефрактивного эффекта в сверхрешетках Fe/Cr с переменной толщиной слоев железа и хрома. Установлено, что минимальная толщина слоя Fe, необходимая для возникновения магниторефрактивного эффекта, составляет $t_{\text{Fe}} \sim 3 \text{ \AA}$. В кластерно-слоистых наноструктурах Fe($t_x, \text{\AA}$)/Cr(10 \AA) с $t_{\text{Fe}} < 3 \text{ \AA}$ в ИК-диапазоне спектра зафиксирован только ориентационный квадратичный магнитооптический эффект. Показано, что зависимости магнитосопротивления

и МРЭ от толщины слоя железа ($t_{\text{Fe}} = 3.2\text{--}15.3 \text{ \AA}$) нелинейны и схожи между собой.

Список литературы

- [1] J.C. Jacquet, T. Valet. In: Magnetic ultrathin films, multilayers and surfaces. MRS Symp. Proc. **384**, 477 (1995).
- [2] S. Uran, M. Grimsditch, E.E. Fullerton, S.D. Bader. Phys. Rev. B **57**, 2705 (1998).
- [3] И.В. Быков, Е.А. Ганьшина, А.Б. Грановский, В.С. Гуцин. ФТТ **42**, 487 (2000).
- [4] V.G. Kravets, D. Bozec, J.A.D. Matthew, S.M. Thompson, H. Menard, A.B. Horn, A.F. Kravets. Phys. Rev. B **65**, 054 415 (2002).
- [5] А. Грановский, В. Гуцин, И. Быков, А. Козлов, N. Kobayashi, S. Ohnuma, T. Masumoto, M. Inoue. ФТТ **45**, 867 (2003).
- [6] M. Vopsaroiu, D. Bozec, J.A.D. Matthew, S.M. Thompson, C.H. Marrows, M. Perez. Phys. Rev. B **70**, 214 423-1 (2004).
- [7] Jian-Qing Wang, M.T. Sidney, J.D. Rokitowski, Nam H. Kim, Keqiang Wang. J. Appl. Phys. **103**, 07F316 (2008).
- [8] R.T. Mennicke, D. Bozec, Y.G. Kravets, M. Vopsaroiu, J.A.D. Matthew, S.M. Thompson. J. Magn. Mater. **303**, 92 (2006).
- [9] R.T. Mennicke, J.A.D. Matthew, S.M. Thompson. IEEE Trans. Magn. **42**, 2627 (2006).
- [10] Н.Ф. Кубраков, А.К. Звездин, К.А. Звездин, В.А. Котов. ЖЭТФ **114**, 1101 (1998).
- [11] А.Б. Грановский, В.М. Кузьмичев, Ж.П. Клерк. ЖЭТФ **116**, 1762 (1999).
- [12] В.И. Белотелов, А.К. Звездин, В.А. Котов, А.П. Пятаков. ФТТ **45**, 1862 (2003).
- [13] T. Stanton, M. Vopsaroiu, S.M. Thompson. Meas. Sci. Technol. **19**, 125 701 (2008).
- [14] В.М. Маевский. Деп. № 2461-В93. ВИНТИ, М. (1993).
- [15] В.П. Широковский, М.М. Кириллова, Н.А. Шилкова. ЖЭТФ **82**, 784 (1982).
- [16] И.Д. Лобов, М.М. Кириллова, В.М. Маевский, Л.Н. Ромашев. ЖЭТФ **132**, 932 (2007).
- [17] С.В. Халилов, Ю.А. Успенский. ФММ **66**, 1097 (1988).
- [18] R.J. Baxter, D.G. Pettifor, E.Y. Tsymbal, D. Bozec, J.A.D. Matthew, S.M. Thompson. J. Phys.: Cond. Matter **15**, L 695 (2003).
- [19] Г.С. Кринчик, Е.А. Ганьшина, В.С. Гуцин. ЖЭТФ **60**, 209 (1971).
- [20] I.D. Lobov, M.M. Kirillova, L.N. Romashev, V.V. Ustinov, V.M. Maevskii, M.A. Milyaev. J. Magn. Mater. **300**, e359 (2006).