

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 539.12.043:538.977.1:537.621.2

РАДИАЦИОННАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ СВЕРХРЕШЕТОК Fe/Cr И CoFe/Cu ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ АРГОНА ($E = 10$ кэВ)

© 2020 г. Н. В. Гущина^а, *, К. В. Шаломов^а, В. В. Овчинников^а, Н. С. Банникова^б, М. А. Миляев^б

^аИнститут электрофизики УрО РАН, ул. Амундсена, 106, Екатеринбург, 620016 Россия

^бИнститут физики металлов УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620108 Россия

*e-mail: guscha@rambler.ru

Поступила в редакцию 04.08.2020 г.

После доработки 10.08.2020 г.

Принята к публикации 19.08.2020 г.

Исследованы магниторезистивные характеристики магнитных металлических сверхрешеток Fe/Cr и Co₉₀Fe₁₀/Cu, подвергнутых воздействию пучков ускоренных ионов Ar⁺ с энергией 10 кэВ, значения флюенсов $F = 10^{13} - 10^{16}$ см⁻². Установлено, что при $F \leq 6 \times 10^{14}$ см⁻² изученные сверхрешетки сохраняют свои функциональные характеристики. Обсуждаются причины уменьшения магнитосопротивления сверхрешеток при дальнейшем росте флюенса. Сделан вывод о более высокой радиационной стойкости перспективных современных сверхрешеток Co₉₀Fe₁₀/Cu по сравнению с модельными Fe/Cr.

Ключевые слова: ионное облучение, магнитные сверхрешетки, гигантский магниторезистивный эффект, магнитосопротивление

DOI: 10.31857/S0015323020120062

ВВЕДЕНИЕ

Многослойные металлические магнитные наногетероструктуры, состоящие из чередующихся слоев ферромагнитного и антиферромагнитного металлов нанометровой толщины, являются перспективными объектами научных исследований благодаря их уникальным магнитным и электрическим свойствам. Такие сверхрешетки являются востребованными материалами для микро- и наноэлектроники вследствие характерного для них эффекта гигантского магнитосопротивления (ГМР-эффекта), заключающегося в значительном (на десятки процентов) уменьшении электросопротивления при приложении постоянного магнитного поля.

Сверхрешетки с ГМР-эффектом – чувствительны к воздействию ионизирующих излучений. В литературе имеется значительное количество данных, которые, в частности, относятся к воздействию ионного облучения на сверхрешетки Fe/Cr [1–5]. Однако наноструктуры Fe/Cr – по большей части модельные объекты, у которых, несмотря на большое магнитосопротивление, имеется ряд недостатков. Так, например, для них характерны большие поля магнитного насыщения и, следовательно, маленькая чувствительность к магнитному полю (порядка 0.001%/Э), большой магнитный гистерезис. В совокупности с относи-

тельно долгим процессом выращивания сверхрешеток Fe/Cr их применение в современных магниточувствительных устройствах оказывается затруднено.

В настоящее время разработаны более перспективные сверхрешетки с ГМР-эффектом на основе кобальта и его сплавов (например, Co/Cu и Co₉₀Fe₁₀/Cu) [6–8]. Перспективные для применений сверхрешетки Co₉₀Fe₁₀/Cu, обладающие, как и Fe/Cr, большими значениями магнитосопротивления, но сравнительно меньшим магнитным гистерезисом [9] и более высокой температурной стабильностью [10], выбраны нами в качестве объектов исследования. Сведения о поведении современных магнитных сверхрешеток в условиях радиационных нагрузок практически отсутствуют, в силу чего исследования в этом направлении представляют существенный фундаментальный и практический интерес. Это касается, в частности, поиска возможности управления магнитными и магнито-транспортными свойствами сверхрешеток путем их облучения пучками ускоренных ионов различных инертных газов. Известно, что ионное облучение при малых флюенсах может способствовать увеличению ГМР-эффекта в сверхрешетках [3, 5], но чаще всего приводит к уменьшению магнитосопротивления.

В данной работе исследовано воздействие пучков ионов Ar^+ с энергией 10 кэВ на магниторезистивные свойства магнитных металлических сверхрешеток $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}$ на трех типах подложек (стекло, сапфир и кремний). Для сравнения было проведено также облучение в аналогичных режимах модельных сверхрешеток Fe/Cr .

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сверхрешетки $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}$ являются поликристаллическими пленками с ГЦК-структурой и острой аксиальной текстурой $\langle 111 \rangle$, с осью текстуры перпендикулярной плоскости подложки [8, 10, 11].

Формула сверхрешетки $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}$ следующая: Подложка// $\text{Ta}(100 \text{ \AA})/(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}(50 \text{ \AA})/[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}(14 \text{ \AA})/\text{Cu}(23 \text{ \AA})]_{12}/\text{Ta}(30 \text{ \AA})$, где подложка – это либо монокристаллический сапфир Al_2O_3 , либо стекло, либо монокристаллический Si. Три типа объектов выбрано в связи с тем, что они обладают близкими значениями магнитосопротивления, но имеют различную стойкость к термическому отжигу [10] и, возможно, к ионному облучению.

Многослойные магнитные наногетероструктуры $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}$ были получены на высоковакуумной напылительной установке MPS-4000-C6 (ULVAC, Япония). Напыление каждого слоя производили с готовой мишени чистого металла или сплава соответствующего состава при мощности магнетронов 100 Вт; давлении аргона 0.1 Па; частоте вращения подложки 7 об./мин; комнатной температуре подложки. Давление остаточных газов в камере перед напылением составляло 3×10^{-7} Па, чистота аргона соответствовала 99.9998%.

Многослойная наноструктура Fe/Cr : Ситалл/ $\text{Cr}(18 \text{ \AA})/\text{Cr}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}(23 \text{ \AA})/[\text{Fe}(17 \text{ \AA})/\text{Cr}(13 \text{ \AA})/\text{Fe}(17 \text{ \AA})/\text{Cr}(16 \text{ \AA})]_8$ была выращена методом молекулярно-лучевой эпитаксии с помощью модернизированной высоковакуумной установки молекулярно-лучевой эпитаксии “Катунь-С”. Температура подложки при росте была 150°C , вакуум перед напылением в камере установки составлял $\sim 10^{-8}$ Па.

Наноструктура имеет составной буферный слой $\text{Cr}(18 \text{ \AA})/\text{Cr}_{0.4}\text{Fe}_{0.6}(23 \text{ \AA})$ и основную часть, состоящую из чередующихся по толщине четных и нечетных слоев Cr в паре Fe/Cr : $[\text{Fe}(17 \text{ \AA})/\text{Cr}(t_1 \text{ \AA})/\text{Fe}(17 \text{ \AA})/\text{Cr}(t_2 \text{ \AA})]_8$, $t_1 = 13 \text{ \AA}$, $t_2 = 16 \text{ \AA}$. Толщина t_1 выбрана близкой к толщине, при которой наблюдается первый максимум РККИ обменного взаимодействия в сверхрешетке, и $t_2 > t_1$. При переходе от обычных по конфигурации слоев сверхрешеток $[\text{Fe}/\text{Cr}]_n$, имеющих равные по толщине немагнитные слои, к наноструктуре $[\text{Fe}(17 \text{ \AA})/\text{Cr}(t_1 \text{ \AA})/\text{Fe}(17 \text{ \AA})/\text{Cr}(t_2 \text{ \AA})]_8$, имеющей увеличенные по тол-

щине четные немагнитные слои Cr, в несколько раз уменьшаются поля магнитного насыщения такой сверхрешетки, а величина магнитосопротивления остается достаточно большой.

Для исследований из полученных пластин сверхрешеток Fe/Cr и $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}$ подготовлены образцы размером $3 \times 8 \text{ мм}^2$, необходимые для измерения магнитосопротивления.

Ионно-лучевую обработку образцов проводили непрерывными пучками ионов Ar^+ на установке ИЛМ-1, оснащенной технологическим ионным источником “ПУЛЬСАР-1М” на основе тлеющего разряда низкого давления с холодным полым катодом [12]. Использованы ионы аргона с энергией $E = 10 \text{ кэВ}$, плотность ионного тока составляла $j = 100 \text{ мкА/см}^2$, флюенс ионов $F = 1.25 \times 10^{13} - 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Из пучка ионов Ar^+ круглого сечения с помощью коллиматора вырезали ленточный пучок сечением $0.5 \times 10 \text{ см}^2$ либо $2 \times 10 \text{ см}^2$, под которым с помощью специального устройства перемещали образцы со скоростью 2 и 3 см/с. Это позволило избежать существенного интегрального нагрева мишеней в ходе облучения. Низкий флюенс ионов $1.25 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ набирался с помощью экспозиционной диафрагмы с электромагнитным приводом с целью задания малых экспозиций (0.001–1 с).

Магнитосопротивление сверхрешеток Fe/Cr и CoFe/Cu в исходном состоянии и после облучения различными флюенсами ионов аргона измеряли с помощью автоматизированной установки АВМ-1 “Центра технологий новых магнитных материалов” ФТИК ИФМ УрО РАН.

Электросопротивление образцов исследуемых сверхрешеток в магнитном поле (до 19.5 кЭ) измеряли четырех-контактным методом с прижимными контактами. Вектор напряженности магнитного поля и ток при измерениях были направлены в плоскости слоев пленки взаимно перпендикулярно. Измерения проводили при комнатной температуре.

Величина магнитосопротивления представляет собой относительное изменение электрического сопротивления материала (R) при включении магнитного поля (H): $\Delta R/R(H) = [(R(H) - R_s)/R_s] \times 100\%$, где R_s – сопротивление образца в поле магнитного насыщения, когда магнитные моменты ферромагнитных слоев параллельны, $R(H)$ – электрическое сопротивление в некотором заданном магнитном поле H . Максимальное значение на полевой зависимости магнитосопротивления $\Delta R/R(H)$ обозначим как r .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты измерения магнитосопротивления сверхрешеток Fe/Cr и $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}$ в исходном со-

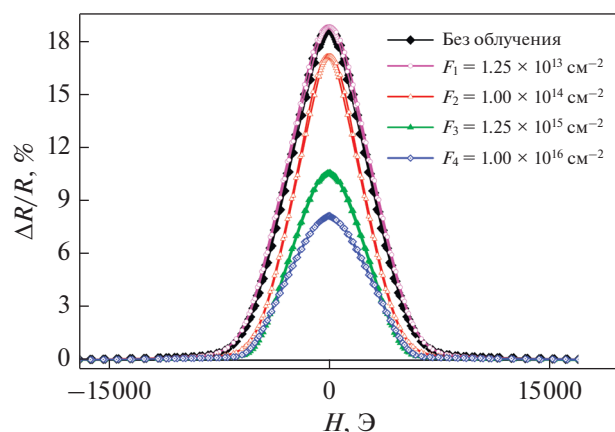


Рис. 1. Полевые зависимости магнитосопротивления сверхрешеток Fe/Cr, полученные до и после облучения ионами Ag^+ .

стоянии и после облучения в различных режимах приведены на рис. 1 и 2.

Исследования показали, что **модельные сверхрешетки Fe/Cr**: Ситалл/Cr(18 Å)/Cr_{0.4}Fe_{0.6}(23 Å)/[Fe(17 Å)/Cr(13 Å)/Fe(17 Å)/Cr(16 Å)]₈ непосредственно после их изготовления имеют максимальную величину магнитосопротивления ($r = 18\%$); поле магнитного насыщения $H_s = 7$ кЭ. После облучения флюенсом $F = 1.25 \times 10^{13}$ см⁻² значение r не изменяется, при $F = 1 \times 10^{14}$ см⁻² магнитосопротивление также практически не снижается ($r = 17\%$). Дальнейшее увеличение флюенса ионов до $F = 1.25 \times 10^{15}$ см⁻² приводит к уменьшению магнитосопротивления в 1.6 раз до $r = 10.5\%$. При более высоком флюенсе $F = 1 \times 10^{16}$ см⁻² магнитосопротивление снижается уже не так значительно – до 8%. Изменение профиля полевой зависимости электросопротивления с увеличением флюенса ионов Ag^+ определяется не только уменьшением магнитосопротивления, но и понижением поля магнитного насыщения H_s , начиная с флюенса $F = 1.0 \times 10^{14}$ см⁻² (до 5 кЭ при самом высоком использованном флюенсе).

В сверхрешетках Co₉₀Fe₁₀/Cu композиции: Подложка//Ta(100 Å)/(Ni₈₀Fe₂₀)₆₀Cr₄₀ (50 Å)/[Co₉₀Fe₁₀(14 Å)/Cu(23 Å)]₁₂/Ta(30 Å) исходная (до облучения) максимальная величина магнитосопротивления зависит от вида подложки (рис. 2) и составляет: $r = 28.6\%$ – для стекла; $r = 22.8\%$ – для Al₂O₃; $r = 22.7\%$ – для монокристаллического кремния, что может быть связано с небольшими различиями в величине шероховатости подложек. Полученные значения согласуются с данными работ [8–10, 13, 14].

Ионное облучение сверхрешеток Co₉₀Fe₁₀/Cu, как и в случае мультислоев Fe/Cr, приводит к уменьшению их магнитосопротивления для всех

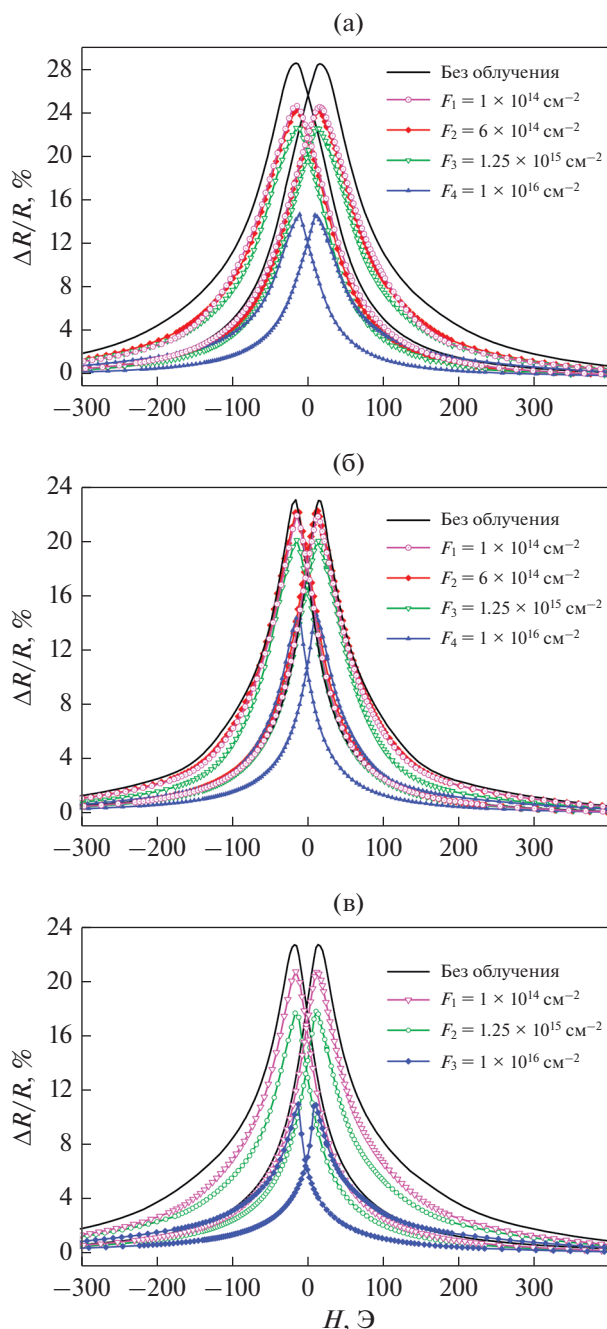


Рис. 2. Полевые зависимости магнитосопротивления, полученные до и после облучения ионами Ag^+ сверхрешеток Co₉₀Fe₁₀/Cu на подложках: а – стекло; б – Al₂O₃; в – Si.

трех типов независимо от материала подложки (рис. 2). При флюенсах ионов 1.0×10^{14} и 6.25×10^{14} см⁻² магнитосопротивление образца на подложке из стекла уменьшается с 28.6 до 24.7 и 24.3%, для образца на подложке из Al₂O₃ с 22.9 до 21.7 и 22%. Результаты исследования сверхрешеток на подложке из Si аналогичны: при $F = 1.0 \times 10^{14}$ см⁻² происходит уменьшение магни-

тосопротивления с 22.7 до 20.7%. При увеличении флюенса до $1.25 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ оно продолжает уменьшаться, и при $F = 10^{16} \text{ см}^{-2}$ достигает минимального значения для каждого типа образцов. Самое низкое магнитосопротивление, 10.9%, после облучения флюенсом $F = 10^{16} \text{ см}^{-2}$ имеет сверхрешетка на подложке из кремния: в 2.1 раза меньше по сравнению с исходным значением (рис. 2). В двух других случаях значения магнитосопротивления близки и составляют 14.4 и 14.7%, соответственно, для образцов на Al_2O_3 и стекле. Поле магнитного насыщения по мере увеличения флюенса также уменьшается, а переход к магнитному насыщению становится более резким.

Для понимания основных причин уменьшения магнитосопротивления в исследуемых сверхрешетках обратимся к известным литературным данным. Уменьшение магнитосопротивления в результате облучения газовыми ионами средних энергий наблюдали ранее в работах [1–3] на сверхрешетках Fe/Cr. Показано, что в случае облучения образцов $[\text{Fe}(30 \text{ \AA})/\text{Cr}(11 \text{ \AA})]_n$ ионами Ag^+ с энергией 200 кэВ флюенсами от $5 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ до 10^{14} см^{-2} магнитосопротивление монотонно уменьшается, а при флюенсах, превышающих 10^{14} см^{-2} , ГМР-эффект исчезает полностью [1]. Проективные пробеги ионов Ag^+ с такой энергией соответствуют толщине исследуемой многослойной пленки $\sim 100 \text{ нм}$.

Данные мессбауэровской спектроскопии на конверсионных электронах и малоугловой дифракции рентгеновских лучей позволили авторам работы [1] связать наблюдаемое уменьшение магнитосопротивления с эффективным перемешиванием атомов Fe и Cr под воздействием ионного пучка на межслойных границах в сверхрешетке и увеличением шероховатости этих границ. Установлено, что при максимальном флюенсе $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ происходит перемешивание, приводящее к тому, что почти все слои Fe расходуется на образование сплава FeCr.

Аналогичные результаты монотонного уменьшения ГМР-эффекта при увеличении флюенса ионного облучения, связанные с увеличением шероховатости межслойных границ, вызванной ионным облучением, были продемонстрированы в работе [2] при облучении ионами Ag^+ с энергией 200 кэВ структур с различной толщиной слоев: $\text{Fe}(30 \text{ \AA})/\text{Cr}(11 \text{ \AA})$, $\text{Fe}(14 \text{ \AA})/\text{Cr}(10.3 \text{ \AA})$ и $\text{Fe}(14 \text{ \AA})/\text{Cr}(15 \text{ \AA})$. При этом установлено, что деградация ГМР-эффекта намного сильнее проявляется в сверхрешетках с тонкими слоями хрома при $t_{\text{Cr}} = 10.3 \text{ \AA}$ и $t_{\text{Cr}} = 11 \text{ \AA}$, а с увеличением толщины слоев деградация становится слабее. Наблюдаемую корреляцию между толщиной слоя хрома и изменением ГМР-эффекта авторы объясняют тем, что по мере увеличения флюенса уменьшается количество антиферромагнитно-связанных

областей, происходит формирование и увеличение объемной доли микроотверстий в слоях хрома, что приводит к ферромагнитной связи между соседними слоями железа.

В случае облучения ионами Xe^+ с энергией 500 кэВ сверхрешеток $[\text{Fe}(30 \text{ \AA})/\text{Cr}(12 \text{ \AA})]_{10}$ при флюенсах 3×10^{13} и $3 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ также наблюдали уменьшение магнитосопротивления [3]. В этой работе при указанной толщине пленки ионы Xe^+ полностью проходят через нее. При этом было установлено, что при более низких флюенсах 3×10^{11} и $3 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ величина магнитосопротивления была не чувствительна к облучению, а затем, при достижении флюенса до $1 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$, даже незначительно увеличилась. При этом показано [3], что при такой величине флюенса ионов наблюдается максимальная шероховатость межслойных границ, которая ведет, как показано в работах [1, 2], к увеличению электрического сопротивления структуры и уменьшению магнитосопротивления. При более высоких флюенсах, согласно данным рентгеноструктурного анализа, на границах слоев происходит увеличение взаимной диффузии атомов соседних слоев. В работе [3] показано также, что облучение ионами Xe^+ приводит не только к изменению состояния межслойных границ, но и к морфологическим изменениям, в частности, к увеличению структурной когерентности, что также может влиять на магнитосопротивление.

В ряде работ [4, 5, 15] авторы исследовали влияние высокоэнергетического ионного облучения на свойства магнитных сверхрешеток. Так, в работе [4] показано, что под воздействием ионов Ag с энергией 200 МэВ гигантское магнитосопротивление сверхрешеток $[\text{Fe}(30 \text{ \AA})/\text{Cr}(120 \text{ \AA})]_{20}/\text{Fe}(50 \text{ \AA})$ монотонно уменьшается с увеличением флюенса, начиная с $5 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$, причем максимальное снижение, на 70% от исходного, достигается при флюенсе 10^{13} см^{-2} . В работе установлено, что при облучении не происходит изменений размера зерна и исходной текстуры. Наблюдаемый эффект снижения магнитосопротивления объясняется изменением состояния интерфейсов.

Кроме сведений о многослойных структурах Fe/Cr, в литературе имеются данные об изучении трехслойных структур Fe/Cr/Fe. Магнитные и структурные исследования [5] показали различное влияние ионов Au с энергией 163 МэВ на трехслойные Fe/Cr/Fe и многослойные $(\text{Fe}/\text{Cr})_{20}$ наноструктуры. В сверхрешетках $(\text{Fe}/\text{Cr})_{20}$ увеличение шероховатости интерфейсов приводит к разрушению антиферромагнитной связи соседних ферромагнитных слоев, и в результате к уменьшению магнитосопротивления даже при низких флюенсах ионов. В трехслойных образцах Fe/Cr/Fe при малых флюенсах (1×10^{11} – $4 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$), напротив, наблюдается сглаживание границ раздела, и трех-

слойные сверхструктуры остаются полностью антиферромагнитными. Это приводит к небольшому увеличению магнитосопротивления. При дальнейшем увеличении флюенса (до $1.5 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$) происходит увеличение шероховатости интерфейсов, что приводит к уменьшению ГМР-эффекта.

Облучение многослойной структуры Co/NiFe/Co/Cu [15] ионным пучком Au с энергией 593 МэВ также приводит к деградации величины магнитосопротивления с увеличением флюенса: его уменьшению в 1.5 раза при $F = 3 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и в 2.3 раза при $F = 6 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Авторы работы связывают снижение магнитосопротивления с образованием и увеличением объемной доли ферромагнитно-связанных областей.

Согласно приведенным литературным и полученным нами данным, уменьшение магнитосопротивления сверхрешеток Fe/Cr и Co₉₀Fe₁₀/Cu обусловлено в основном процессами перемешивания атомов слоев разного сорта, изменением состояния интерфейсов и возникновением в исследуемых сверхрешетках областей с ферромагнитной обменной связью между соседними ферромагнитными слоями. Уменьшение полей магнитного насыщения изученных сверхрешеток (см. рис. 1, 2) при облучении ионами Ag⁺ ($E = 10 \text{ кэВ}$) полностью согласуется с изложенными выше представлениями и экспериментальными данными.

Важно отметить, что зона интенсивного перемешивания при ионном облучении составляет $\sim(2-3) \times R_p$, где R_p – средний проективный пробег иона (при гауссовском распределении пробегов). Средний проективный пробег ионов Ag⁺ с энергией 10 кэВ, согласно результатам расчета с помощью программы SRIM, в этих сверхрешетках составляет $\sim 5-7 \text{ нм}$: в железе 6.0 нм, в хrome – 6.5 нм, в меди – 5.8 нм, в кобальте – 5.6 нм, в тантале – 5.2 нм. Оценка глубины зоны перемешивания атомов по направлению от поверхности пленки к подложке при этом составляет $\sim 12.0-20.0 \text{ нм}$. Толщина исследуемых пленок равна 50.4 нм для Fe/Cr и 47.4 нм для Co₉₀Fe₁₀/Cu (при этом на поверхность последней сверхрешетки нанесен защитный слой из тантала, толщина которого составляет 3.0 нм). Наблюдаемые нами закономерности снижения магнитосопротивления, по всей вероятности, связаны с частичным по глубине этих пленок перемешиванием атомов на межслойных границах. В пользу этого могут свидетельствовать и совокупные данные об относительном к исходному значению изменении магнитосопротивления в сверхрешетках в зависимости от флюенса ионов Ag⁺ (рис. 3). Из графика видно, что ход зависимостей для образцов Co₉₀Fe₁₀/Cu на подложках из стекла и кремния является одинаковым, в то время как исходное магнитосопротивление образца на стекле заметно выше (см. рис. 2).

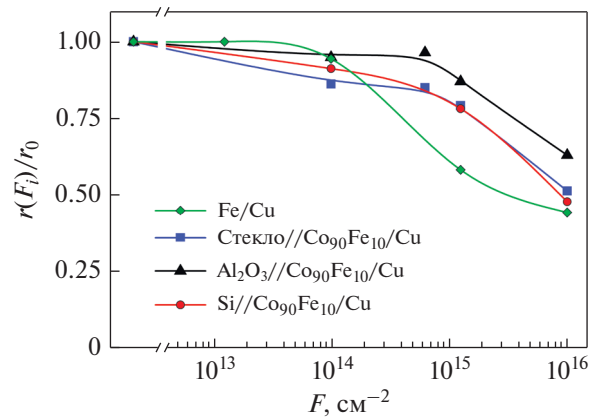


Рис. 3. Относительное к исходному значению изменение магнитосопротивления в сверхрешетках Fe/Cr и Co₉₀Fe₁₀/Cu в зависимости от флюенса ионов Ag⁺.

В нашем эксперименте при облучении сверхрешеток Fe/Cr ионами Ag⁺ с относительно низкой энергией 10 кэВ, уменьшение магнитосопротивления, в отличие от рассмотренных выше примеров, наблюдается при более высоких значениях флюенса, начиная с $1.25 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$. При более низких флюенсах 1.25×10^{13} и $1.0 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ магнитосопротивление остается неизменным. В то же время в рассмотренных выше работах [1–5, 15], где были использованы различные ионы с более высокими энергиями (200, 500 кэВ для ионов Ag⁺ и Xe⁺, а также 200 МэВ для Ag⁺, 163 и 593 МэВ для Au⁺), магнитосопротивление уменьшается при более низких значениях флюенса. Наблюдаемое отличие можно связать с тем, что при высоких энергиях средний проективный пробег ионов сопоставим или превышает толщину исследуемых сверхрешеток, следовательно процессы перемешивания атомов и изменение состояния интерфейсов происходят по всей толщине пленок, а не частично, как при использовании ионов с энергией 10 кэВ.

Менее интенсивное падение магнитосопротивления (обусловленное в конечном счете процессами изменения состояния интерфейсов в сверхрешетках) при облучении ионами аргона с энергией 10 кэВ может быть также связано с более низкими значениями ядерных и электронных потерь по сравнению с рассмотренными выше случаями. Так, например, согласно расчетам SRIM, при облучении Fe ионами Ag⁺ с $E = 10 \text{ кэВ}$ ядерные потери $(dE/dx)_n$ составляют 1.096 кэВ/нм, электронные потери $(dE/dx)_e = 0.1788 \text{ кэВ/нм}$. В то же время при облучении ионами Ag⁺ с $E = 200 \text{ кэВ}$ $(dE/dx)_n = 8.957 \text{ кэВ/нм}$, $(dE/dx)_e = 0.8143 \text{ кэВ/нм}$; для ионов Ag с $E = 200 \text{ МэВ}$ $(dE/dx)_n = 0.09587 \text{ кэВ/нм}$, $(dE/dx)_e = 33.5 \text{ кэВ/нм}$ (значения ядерных и электронных потерь в Cr, Co и Cu близки к значениям

для Fe). В работе [4] отмечается, что пороговое значение $(dE/dx)_e$ для создания радиационных повреждений в объемном Fe составляет ~ 50 кэВ/нм. В тонких пленках этот порог может быть несколько снижен из-за уменьшенной подвижности электронов проводимости. В работе [5] авторы пришли к выводу, что при облучении высокоэнергетическими ионами Au с энергией 593 МэВ, когда электронные потери даже превышают пороговые значения $(dE/dx)_e = 54.95$ кэВ/нм, большой вклад вносят ядерные потери, несмотря на то, что они в 300 раз меньше энергии, отдаваемой электронным возбуждением. Авторы [5] показывают, что именно ядерные потери ответственны за образование в сверхрешетках Fe/Cr ферромагнитных микрорегионов при облучении ионами Au с энергией 593 МэВ. Именно образование каскадов атомных смещений приводит к уменьшению совершенства кристаллической структуры слоев и интерфейсов.

Найдено, что величина гистерезиса магнитосопротивления сверхрешеток $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}$, определенная как ширина полевой зависимости магнитосопротивления на полувысоте [9], в результате воздействия ионного облучения практически не изменяется (см. рис. 2), несмотря на сильное изменение формы кривой магнитосопротивления, и составляет примерно 38 Э. Это справедливо для всех трех типов образцов. Величина гистерезиса магнитосопротивления зависит от совершенства микроструктурной структуры слоев сверхрешетки [8–10]. Для данного типа сверхрешеток отжиг при высоких температурах приводит к увеличению гистерезиса за счет улучшения совершенства текстуры $\langle 111 \rangle$, при низких температурах отжига таких изменений не происходит [10]. Можно предположить, что степень изменения структуры мультислоев и их интерфейсов, вызываемая воздействием ионов Ar^+ с энергией 10 кэВ при использованных флюенсах, недостаточна для кардинального изменения структурного состояния исследованных сверхрешеток. Для детального объяснения поведения магниторезистивных свойств сверхрешеток при облучении необходимы дополнительные структурные исследования.

Сравнение результатов по влиянию облучения ионами Ar^+ с одинаковыми параметрами (энергией и плотностью ионного тока) на магнитосопротивление исследуемых сверхрешеток Fe/Cr и $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}$ (рис. 3) показывает, что магнитосопротивление Fe/Cr уменьшается в 1.6 раза уже при флюенсе $F = 1.25 \times 10^{15}$ см $^{-2}$ и достигает значений в 11%, в то время как сверхрешетки $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}$ такие значения магнитосопротивления имеют только при флюенсе 1×10^{16} см $^{-2}$, т.е. на порядок выше. Более высокую радиационную стойкость сверхрешеток $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}$ по сравнению с модельными Fe/Cr можно объяснить более высокой температурной стабильностью [10, 11]. Определенную роль

играет наличие у сверхрешетки $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}$ защитного слоя из тантала толщиной 3 нм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что облучение ионами Ar^+ с энергией 10 кэВ (при плотности ионного тока 100 мкА/см 2) модельных сверхрешеток Fe/Cr, начиная с флюенса ионов 1.25×10^{15} см $^{-2}$, а также сверхрешеток $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}$ – с флюенса 1×10^{16} см $^{-2}$, приводит к существенному уменьшению их магнитосопротивления. При более низких флюенсах (1.25×10^{13} – 6×10^{14} см $^{-2}$) изученные сверхрешетки сохраняют свои функциональные характеристики.

Уменьшение магнитосопротивления сверхрешеток Fe/Cr и $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}$ с ростом флюенса ионов аргона обусловлено процессами частичного по глубине сверхрешетки перемешивания атомов слоев разного состава в зоне пробега ионов, изменением состояния межслойных границ и возникновением в исследуемых сверхрешетках областей с ферромагнитной связью между близлежащими ферромагнитными слоями.

Сделан вывод о более высокой радиационной стойкости перспективных современных сверхрешеток $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}$ по сравнению с модельными сверхрешетками Fe/Cr.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-20173). Приготовление сверхрешеток $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}$ и исследование их магнитосопротивления выполнено при частичной поддержке гранта РФФИ № 20-42-660018_p-a.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kopcewicz M., Stobiecki F., Jagielski J., Szyman'ski B., Schmidt M., Kalinowska J.* Degradation of the Giant Magnetoresistance in Fe/Cr Multilayers Due to Ar Ion Beam Mixing // *Hyperfine Interactions*. 2002. V. 144/145. P. 255–259.
2. *Kopcewicz M., Stobiecki F., Jagielski J., Szymański B., Schmidt M., Dubowik J., Kalinowska J.* Influence of the Ar ion irradiation on the giant magnetoresistance in Fe/Cr multilayers // *J. Appl. Phys.* 2003. V. 93. P. 5514–5518.
3. *Kelly D.M., Schuller I.K., Korenivski V., Rao K.V., Larsen K.K., Bottiger J., Gyorgy E.M., Dover R.B.* Increases in giant magnetoresistance by ion irradiation // *Phys. Rev.* 1994. V. 50. № 5. P. 3481–3484.
4. *Paul Am, Gupta A., Chaudhari S.M., Phase D.M., Ghosh S., Avasthi D.K.* Swift heavy ion irradiation effects on magnetoresistance of Fe/Cr multilayers // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 1999. V. 156. P. 158–161.
5. *Oomi G., Yayoi T., Nakano T., Saito K., Takanashi K., Mitani S., Kohno A., Sagara K.* Effect of Pressure and

- Ion Beam Irradiation on the Giant Magnetoresistance of Fe/Cr Magnetic Multilayers // IEEE Trans. Magn. 2014. V. 50. № 1. P. 1500304.
6. *Parkin S.S.P., Li Z.G., Smith D.J.* Giant magnetoresistance in antiferromagnetic Co/Cu multilayers // Appl. Phys. Letters. 1991. V. 58. № 23. P. 2710–2712.
 7. *Mosca D.H., Petroff F., Fert A., Schroeder P., Pratt W.P., Loloee R.* Oscillatory interlayer coupling and giant magnetoresistance in Co/Cu multilayers // J. Magn. Magn. Mat. 1994. V. 94. Iss. 1–2. P. L1–L5.
 8. *Миляев М.А., Наумова Л.И., Проглядо В.В., Криницина Т.П., Бурханов А.М., Банникова Н.С., Устинов В.В.* Гигантские изменения магнитных и магниторезистивных свойств сверхрешеток CoFe/Cu при субнанометровой вариации толщины буферного слоя хрома // ФММ. 2011. Т. 112. № 2. С. 146–154.
 9. *Банникова Н.С., Миляев М.А., Наумова Л.И., Патраков Е.И., Проглядо В.В., Каменский И.Ю., Рябухина М.В., Устинов В.В.* Гигантское магнитосопротивление и гистерезисные явления в сверхрешетках CoFe/Cu с высокосовершенной кристаллографической текстурой // ФММ. 2018. V. 119. № 11. С. 1132–1137.
 10. *Банникова Н.С., Миляев М.А., Наумова Л.И., Проглядо В.В., Криницина Т.П., Чернышова Т.А., Устинов В.В.* Влияние отжига на магнитосопротивление и микроструктуру многослойных систем CoFe/Cu с различным буферным слоем // ФММ. 2015. Т. 116. № 2. С. 165–170.
 11. *Чупраков С.А., Блинов И.В., Миляев М.А., Попов В.В.* Влияние термообработки на состояние межслойных границ и магниторезистивные характеристики в сверхрешетках Co₉₀Fe₁₀/Cu // Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. 2018. № 4. С. 34–41.
 12. *Gavrilov N.V., Mesyats G.A., Nikulin S.P., Radkovskii G.V., Eklind A., Perry A.J., Treglio J.R.* A New Broad Beam Gas Ion Source for Industrial Applications // J. Vac. Sci. Technol. 1996. V. A14. P. 1050–1055.
 13. *Kuch W., Marley A.C., Parkin S.S.P.* Seeded epitaxy of Co₉₀Fe₁₀/Cu multilayers on MgO(001): Influence of Fe seed layer thickness // J. Appl. Phys. 1998. V. 83. № 9. P. 4709–4713.
 14. *Банникова Н.С., Миляев М.А., Наумова Л.И., Проглядо В.В., Криницина Т.П., Каменский И.Ю., Устинов В.В.* Гигантское магнитосопротивление сверхрешеток CoFe/Cu с буферным слоем (Ni₈₀Fe₂₀)₆₀Cr₄₀ // ФММ. 2015. Т. 116. № 10. P. 1040–1046.
 15. *Grande P.L., Nagamine L.C., Morais C.M.* High-energy ion beam irradiation of Co/NiFe/Co/Cu multilayers: Effects on the structural, transport and magnetic properties // Thin Solid Films. 2008. V. 516. B. 8. P. 2087–2093.
 16. *Чупраков С.А., Банникова Н.С., Блинов И.В., Криницина Т.П., Миляев М.А., Попов В.В., Устинов В.В.* Исследование структуры межслойных границ в сверхрешетках [Co/Cu]₁₀ методами ЯМР и рентгеновской рефлектометрии // ФММ. 2016. Т. 117. № 12. С. 1241–1246.