

СТРУКТУРА И МАГНИТОТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОСТРУКТУР $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ И $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}$ С ЭФФЕКТОМ ГИГАНТСКОГО МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ

© 2024 г. И. А. Найданов^{а, *}, М. А. Миляев^а, В. В. Проглядо^а, В. В. Устинов^а

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

*e-mail: naydenus@mail.ru

Поступила в редакцию 18.04.2024 г.

После доработки 09.05.2024 г.

Принята к публикации 15.05.2024 г.

Исследованы структурные и магниторезистивные свойства многослойных наноструктур $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}$ и $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ с количеством магнитных слоев и немагнитных прослоек от 1 до 11. Показано, что в наноструктурах с прослойками $\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ формируются острая аксиальная текстура $\langle 111 \rangle$, более совершенные интерфейсы и наблюдается относительно малый гистерезис магнитосопротивления. Методом атомно-силовой микроскопии оценены шероховатость поверхности и размер кристаллитов в исследуемых образцах. Обнаружено, что с увеличением числа слоев в образцах на основе сплава $\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ размер кристаллитов от слоя к слою изменяется слабо в интервале 18–22 нм, в то время как в образцах на основе меди наблюдается значительное увеличение размеров кристаллитов. В сверхрешетках с прослойками Cu обнаружен эффект десятикратного уменьшения магнитосопротивления при малом увеличении толщины слоев $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6$ от 1.5 до 2 нм.

Ключевые слова: сверхрешетки, гигантский магниторезистивный эффект, $\text{Cu}_{1-x}\text{In}_x$, малый гистерезис, шероховатость интерфейсов

DOI: 10.31857/S0015323024080038 EDN: JWQSSA

ВВЕДЕНИЕ

Исследование сверхрешеток, в которых наблюдается эффект гигантского магнитосопротивления (ГМС), представляет интерес с практической точки зрения. Такие наноструктуры находят свое применение в различных приложениях, например, в датчиках магнитных полей. Для этого сверхрешетки помимо большого магнитосопротивления (МС) и высокой чувствительности к магнитному полю также должны обладать минимальным гистерезисом, что позволяет установить однозначное соответствие между величиной сопротивления и напряженностью магнитного поля.

Использование в качестве магнитного материала для сверхрешеток тройных ГЦК-сплавов Co-Fe-Ni позволяет получить малый гистерезис и малые поля насыщения при толщинах медных прослоек, соответствующих второму максимуму межслойного антиферромагнитного взаимодействия [1, 2]. В работах [3, 4] показано, что в сверхрешетках CoFeNi/Cu при оптимально подобранном числе магнитных слоев и их толщин можно получить МС около 30% в магнит-

ных полях 200–300 Э. Наибольшее МС 33% при комнатной температуре получено на сверхрешетках на основе сплава $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6$ [3]. По этой причине данный сплав был выбран для проведения текущих исследований. Ранее также было показано, что использование двойного буферного слоя состава $\text{Ta}/(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$ позволяет получить сверхрешетки с высокой степенью совершенства аксиальной текстуры $\langle 111 \rangle$, что способствует существенному уменьшению гистерезиса магнитосопротивления [5, 6].

Выбор материала немагнитных прослоек оказывает значительное влияние на функциональные характеристики сверхрешеток. В ГМС-сверхрешетках в качестве немагнитных разделительных слоев наиболее часто используют Cu и сплавы CuAgAu [7, 8]. В работе [9] предложено использовать немагнитные прослойки на основе сплава $\text{Cu}_{1-x}\text{In}_x$ вместо медных слоев. Было показано, что при увеличении содержания индия до 5 ат.% в сверхрешетках $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}_{1-x}\text{In}_x$ наблюдается многократное снижение гистерезиса на магниторезистивной кривой. Данный эффект связан с уменьшением размеров кристалли-

тов в сравнении с прослойками Cu. В работе [9] также было показано, что при оптимизации композиции сверхрешеток $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ можно получить величину ГМС-эффекта более 25% в сочетании со слабым гистерезисом магнитосопротивления в несколько эрстед.

В настоящей работе представлены результаты исследования морфологии поверхности многослойных наноструктур серий $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}$ и $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}_{96}\text{In}_4$, полученных при последовательном увеличении числа ферромагнитных слоев и немагнитных прослоек, а также результаты исследования их магнитотранспортных и структурных свойств.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследуемые образцы получены методом магнетронного напыления на установке ULVAC MPS-4000-C6. Напыление выполняли при комнатной температуре на стеклянные подложки с двойным буферным слоем $\text{BL} = \text{Ta}(5 \text{ нм})/(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}(5 \text{ нм})$. Мощность магнетронного испарителя и давление аргона составляло 100 Вт и 0.1 Па соответственно. Число чередующихся ферромагнитных (FM) и немагнитных (NM) слоев в композиции многослойных наноструктур изменяли от 1 до 11, начиная с первого ферромагнитного слоя. В результате наноструктура из 11 слоев представляла собой сверхрешетку $[\text{FM}/\text{NM}]_5/\text{FM}$, где $\text{FM} = \text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6$ и $\text{NM} = \text{Cu}$ или $\text{Cu}_{96}\text{In}_4$. В качестве защитного слоя использован слой Ta(5 нм). Толщину ферромагнитных слоев и немагнитных прослоек, приведенную далее в скобках в нанометрах, подбирали таким образом, чтобы получить наибольшую величину МС в наноструктурах с максимальным количеством слоев $N = 11$. Для серии образцов с прослойками Cu были подобраны толщины слоев $t_{\text{FM}} = 1.5 \text{ нм}$ и $t_{\text{NM}} = 2.2 \text{ нм}$ (серия I), а для серии с прослойками $\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ (серия II) $t_{\text{FM}} = 2 \text{ нм}$ и $t_{\text{NM}} = 2 \text{ нм}$. Также были подготовлены дополнительные образцы с $\text{NM} = \text{Cu}$ и $N = 11$ с толщиной ферромагнитных слоев 1.5 и 1.8 нм.

Исследование структуры пленок проведено методом рентгеновской дифракции на дифрактометре ДРОН-3М в излучении $\text{CoK}\alpha$. Степень совершенства текстуры $\langle 111 \rangle$ в образцах определена методом кривых качания. Также из анализа данных рентгеновской рефлектометрии произведена качественная оценка совершенства интерфейсов многослойных наноструктур.

Исследование морфологии поверхности образцов проведено на атомно-силовом микроскопе (АСМ) SOLVER-NEXT. По изображениям рельефа поверхности образцов была выполнена оценка среднего размера кристаллитов и шероховатости при усреднении данных по 3–6 сканам на участках размером $1 \times 1 \text{ мкм}^2$. Съемка выполнена в полуконтактном режиме с использованием зонда серии HA_NC. Цифровая обработка АСМ-изображений и оценка физических параметров поверхности выполнена при помощи программного обеспечения Image Analysis (NT-MDT). Измерение электросопротивления образцов размерами $2 \times 8 \text{ мм}^2$ выполнено четырехконтактным методом при протекании тока в плоскости слоев. Магнитосопротивление образцов рассчитывали как $\Delta R/R(H) = [(R(H) - R_s)/R_s] \times 100\%$, где R_s – сопротивление образца в поле насыщения. Значение гистерезиса магнитосопротивления ΔH определяли на полувысоте магниторезистивной кривой, измеренной при прямом и обратном направлении магнитного поля.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В работе [9] было показано, что увеличение концентрации индия до 5 ат.% в сверхрешетках $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}_{1-x}\text{In}_x$ приводит к уменьшению гистерезиса магнитосопротивления ΔH в несколько раз по сравнению со сверхрешетками $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}$. Подобное изменение гистерезиса было обнаружено в текущих исследованиях наноструктур с тройным ферромагнитным сплавом $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6$. На рис. 1 для образцов

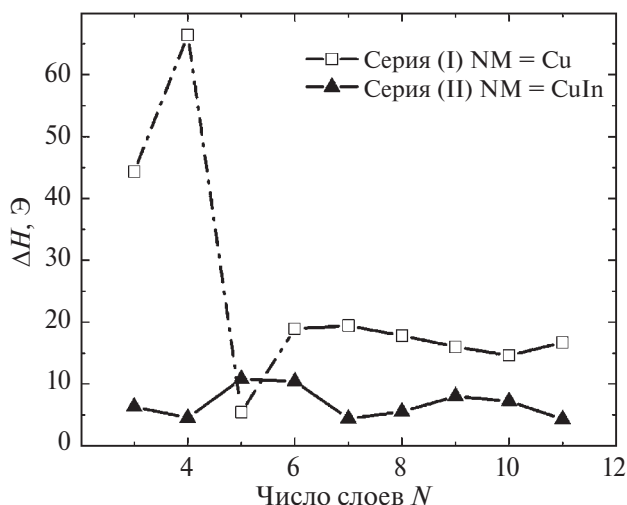


Рис. 1. Зависимость гистерезиса ΔH от числа магнитных и немагнитных слоев для сверхрешеток $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}$ (серия I) и $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ (серия II).

$\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}$ (серия I) и $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ (серия II) показаны экспериментальные зависимости гистерезиса МС от числа слоев N . Видно, что в образцах с прослойками $\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ величина ΔH в 2–4 раза меньше, чем в образцах с прослойками меди. Наибольшее отличие на наблюдается в образцах с малым числом слоев $N = 3, 4$.

При анализе магниторезистивных кривых с $N = 3, 4$ серии (I) обнаружено, что величина МС составляет менее 2%, в то время как для аналогичных образцов серии (II) МС достигает 14%. На рис. 2 в качестве примера представлены магниторезистивные кривые для $N = 3$. В образцах с медными слоями, по всей видимости, в нулевом магнитном поле не формируется антиферромагнитное упорядочение магнитных моментов соседних ферромагнитных слоев, что приводит к уменьшению МС и увеличению ΔH . Для выяснения причин появления обнаруженных особенностей МС указанных образцов необходимо провести дополнительные исследования.

На рис. 3 представлен график изменения среднего размера кристаллитов от числа слоев N . Оценка размера выполнена с помощью АСМ. Отметим, что в структурах с прослойками меди получен более значительный разброс экспериментальных точек. Монотонные кривые на рис. 3 отражают лишь тенденцию изменения среднего размера кристаллитов для двух серий образцов. Видно, что в наноструктурах с прослойками $\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ наблюдается меньший размер кристаллитов, чем в образцах с прослойками

Cu. Следует также отметить, что у двух серий образцов набор слоев при $N = 1$ является одним и тем же — $\text{Ta}/\text{NiFeCr}/\text{CoFeNi}/\text{Ta}$. Отличие имеется лишь в толщине слоев $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6$ на 0.5 нм. Средние размеры кристаллитов в двух наноструктурах, соответствующих случаю $N = 1$, близки друг к другу, как можно было ожидать. Данные, соответствующие случаю $N = 2$, указывают на то, что добавление слоя Cu привело к заметному росту размера кристаллитов, в то время как в структуре с дополнительным слоем $\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ размер кристаллитов почти не изменился. Таким образом, увеличение размера кристаллитов в исследованных наноструктурах с прослойками меди начинается уже на первом слое Cu.

Известно, что коэрцитивная сила H_c в поликристаллических ферромагнитных материалах зависит от размеров кристаллитов D как $H_c \sim D^n$, где показатель n зависит от размерности объекта [10, 11]. Для пленочных образцов $n = 2$. Из данных моделей следует, что чем меньше размер кристаллитов в ферромагнетике, тем меньше может быть коэрцитивная сила. Такая корреляция между средними размерами кристаллитов и гистерезисом МС и была обнаружена в исследованных наноструктурах (рис. 1 и рис. 3).

Рентгенографические исследования структуры проведены на наноструктурах с прослойками Cu и $\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ и наибольшим числом слоев: BL/ $[\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6(1.5)/\text{Cu}(2.2)]_3/\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6(1.5)/\text{Ta}(5)$ (образец 1) и BL/ $[\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6(2)/\text{Cu}_{96}\text{In}_4(2)]_3/\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6(2)/\text{Ta}(5)$ (образец 2). К периодиче-

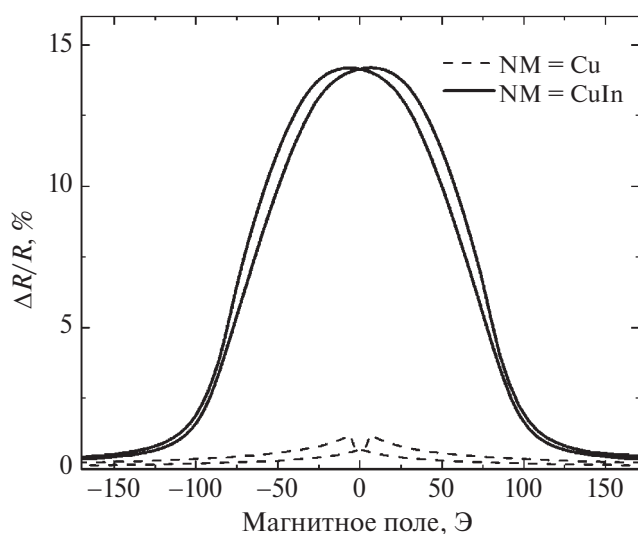


Рис. 2. Кривые магнитосопротивления образцов BL/ $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6(1.5)/\text{Cu}(2.2)/\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6(1.5)/\text{Ta}(5)$ (серия I, NM — Cu) и BL/ $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6(2)/\text{Cu}_{96}\text{In}_4(2)/\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6(2)/\text{Ta}(5)$ (серия II, NM — $\text{Cu}_{96}\text{In}_4$).

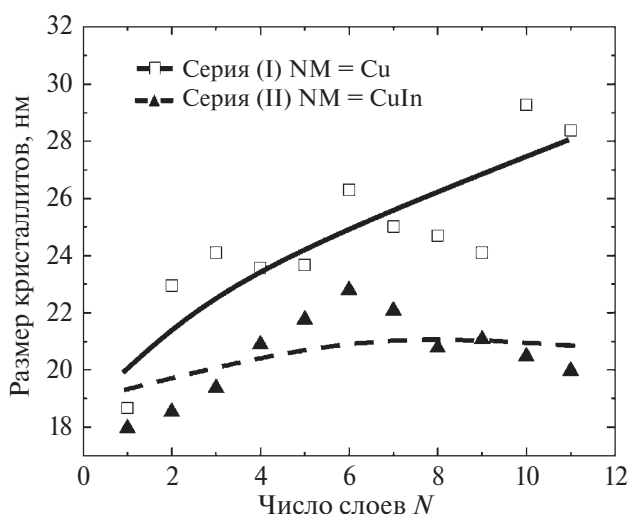


Рис. 3. Зависимость среднего размера кристаллитов от числа слоев для многослойных наноструктур $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}$ (серия I) и $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ (серия II).

ским наноструктурам с большим числом пар слоев может быть применимым термин «сверхрешетка». На рис. 4 показаны дифрактограммы для сверхрешеток с числом слоев $N = 11$. Для обоих образцов наблюдаются рефлексы (111) и (222), что указывает на формирование в сверхрешетках ГЦК-структуры. Присутствие только двух брегговских рефлексов свидетельствует о наличии в образцах текстуры $\langle 111 \rangle$, ось которой направлена перпендикулярно плоскости пленок. Для оценки степени совершенства текстуры были измерены кривые качания вокруг рефлекса (111) (на вставке рис. 4). Видно, что кривая качания сверхрешетки с прослойками $\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ обладает большей интенсивностью, а также меньшей шириной на полувысоте. Таким образом, сверхрешетка $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ обладает более совершенной текстурой $\langle 111 \rangle$, чем сверхрешетка $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}$. Отметим, что формирование совершенной текстуры и малых размеров кристаллитов способствует уменьшению гистерезиса, что находится в соответствии с данными, приведенными на рис. 1.

Качественная информация о шероховатости межслойных границ (интерфейсов) в исследуемых наноструктурах получена методом малоугловой рентгеновской дифракции. На рис. 5 приведены рефлектограммы, полученные на образцах серий (I) и (II) с числом слоев: $N = 3$ и $N = 11$. На рефлектограммах сверхрешеток с $N = 11$ наблюдаются осцилляции с большим периодом. Данные осцилляции обусловлены

дифракцией рентгеновского излучения на слоях тантала, и они не связаны с межслойными границами. Информация о шероховатости межслойных границ может быть получена из анализа кессиговских осцилляций с малым периодом. Выводы на качественном уровне можно сделать из сравнения формы рефлектограмм — чем более выражены такие осцилляции проявляются, тем более совершенными являются интерфейсы в наноструктурах. Видно, что для малого числа слоев ($N = 3$) амплитуды кессиговских осцилляций для образцов с прослойками Cu и $\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ отличаются незначительно. При большом числе слоев ($N = 11$) в образце с прослойками $\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ осцилляции с малым периодом остаются хорошо выраженными. В то же время для образца с прослойками Cu наблюдается существенное уменьшение амплитуды осцилляций. Из указанных результатов следует вывод о том, что для малого числа слоев шероховатости интерфейсов в наноструктурах с различными прослойками являются близкими, а увеличение числа слоев приводит к повышению шероховатости интерфейсов в образцах с прослойками меди. Указанный качественный вывод также подтверждается количественными данными о шероховатости поверхности образцов, полученными при анализе АСМ данных. На рис. 6 показано, что при увеличении числа слоев в наноструктурах с прослойками $\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ амплитуда шероховатости слабо возрастает, в то время как в наноструктурах с прослойками Cu наблюдается значительное

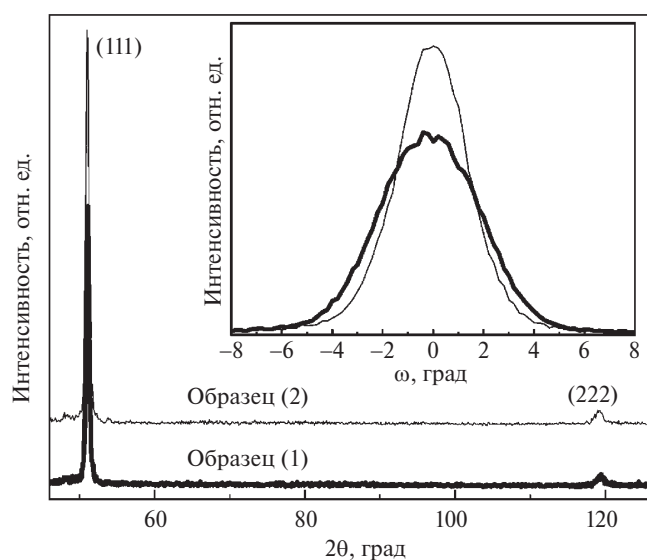


Рис. 4. Дифрактограммы сверхрешеток $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}$ (1) и $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ (2). На вставке приведены кривые качания вокруг пиков (111).

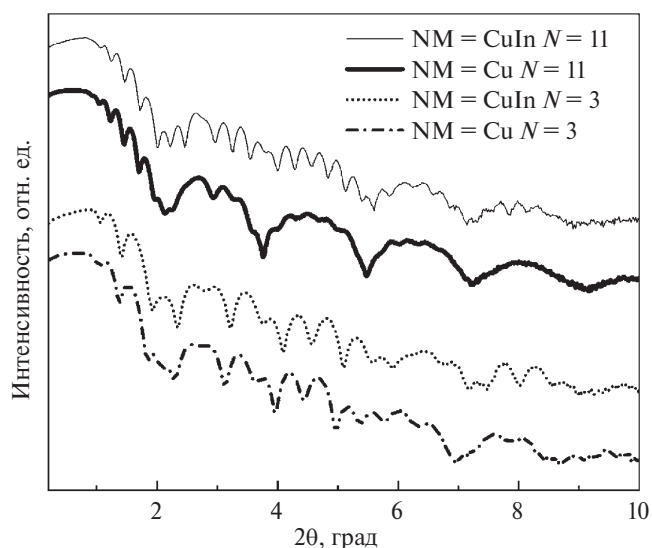


Рис. 5. Рефлектограммы образцов с прослойками Cu и $\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ для числа слоев $N = 3, 11$.

повышение шероховатости. Отметим, что наличие шероховатости в магнитных пленках может приводить к возрастанию магнитного гистерезиса, что было показано теоретически [12] и экспериментально, например, для многослойных наноструктур Co/Pt, Co/Pd [13, 14].

Необычным результатом является обнаруженная большая разница в величине МС у наноструктур с прослойками Cu и $\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ с $N = 11$. На рис. 7 представлены магниторезистивные кривые сверхрешеток $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ и $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}$ с одинаковым числом слоев $N = 11$ и одинаковой толщиной ферромагнитных слоев $t_{\text{FM}} = 2$ нм. ГМС-эффект в образце с прослойками меди составляет всего $\sim 2\%$, в то время как в образце с прослойками $\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ данная величина достигает 27%.

Отметим, что оба образца относятся к сверхрешеткам с эффектом ГМС. В каждом из этих типов сверхрешеток путем оптимизации композиции многослойной структуры может быть получено МС на уровне 20–30%. Малая величина МС, обнаруженная в сверхрешетке с прослойками меди (рис. 7), указывает на реализацию в нулевом магнитном поле магнитного порядка, близкого к ферромагнитному, когда магнитные моменты соседних ферромагнитных слоев ориентированы под малыми углами друг к другу. В этом случае магнитосопротивление может изменяться на небольшую величину в единицы процентов. Отметим, что во всех исследованных наноструктурах толщина немагнитных прослоек соответствует второму максимуму межслойно-

го обменного взаимодействия. Следовательно, формирование магнитного упорядочения, близкого к ферромагнитному, связано с диполь-дипольным взаимодействием между магнитными моментами слоев CoFeNi и взаимодействием ферромагнитного типа, обусловленным шероховатостью межслойных границ [15, 16]. Оба типа взаимодействия в исследуемых сверхрешетках $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}$ являются в сумме более сильными в сравнении с антиферромагнитным межслойным обменным взаимодействием РККИ-типа. Можно предположить, что ослабление взаимодействия ферромагнитного типа в системе за счет, например, уменьшения толщины ферромагнитных слоев приведет к формированию антиферромагнитного порядка и увеличению МС.

Для выяснения степени влияния толщины ферромагнитных слоев на величину МС были приготовлены дополнительные сверхрешетки $[\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6(t)/\text{Cu}(2.2)]_5/\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6(t)$ с более тонкими ферромагнитными слоями $t_{\text{CoFeNi}} = 1.5, 1.8$ нм и на них проведены измерения магнитосопротивления. Из рис. 8 видно, что уменьшение толщины ферромагнитных слоев на 0.5 нм приводит к увеличению МС в 10 раз – с 2 до 20%. Данный результат указывает на возможность кардинального изменения исходного магнитного упорядочения и величины МС в ГМС сверхрешетках за счет малого изменения толщины ферромагнитных слоев. Наиболее резко такое изменение будет происходить в сверхрешетках с большой шероховатостью межслойных границ. Отметим, что показанные на рис. 8 различные

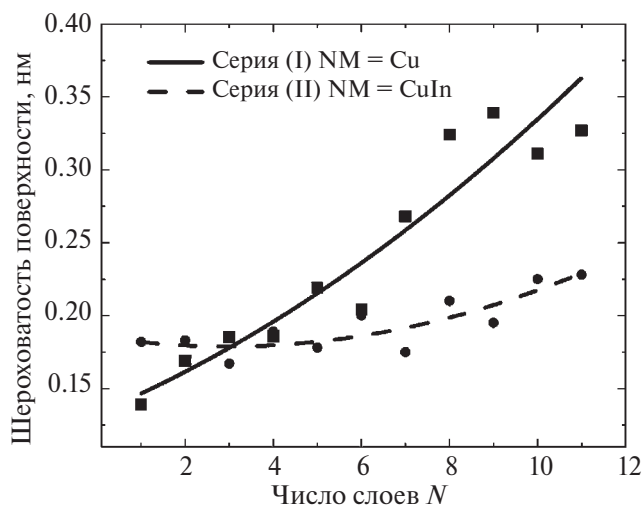


Рис. 6. Зависимость шероховатости поверхности серий образцов (I) и (II) с прослойками Cu и $\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ от числа слоев N .

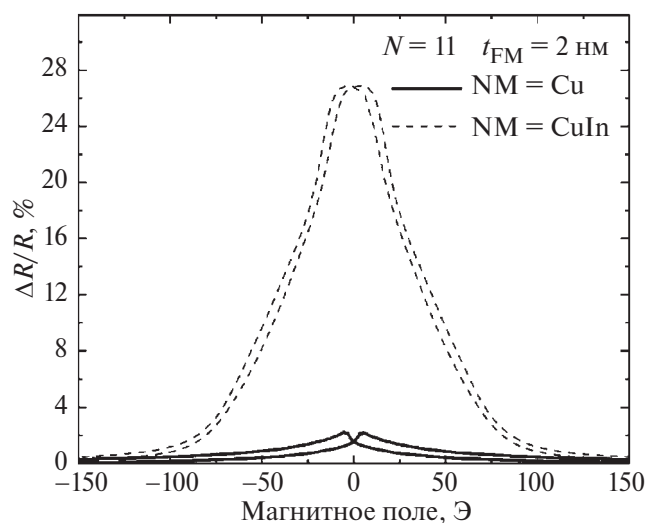


Рис. 7. Кривые магнитосопротивления сверхрешеток $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ и $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}$ с числом слоев $N = 11$ и $t_{\text{FM}} = 2$ нм.

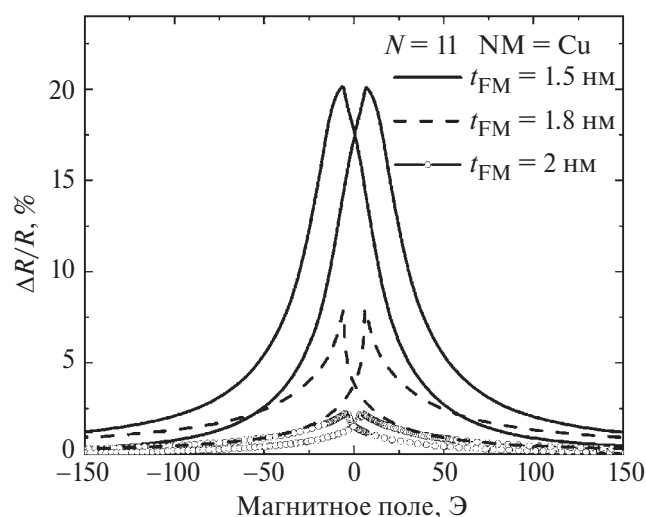


Рис. 8. Кривые магнитосопротивления сверхрешеток с медными прослойками и толщиной магнитных слоев $t_{\text{FM}} = 1.5, 1.8, 2$ нм при $N = 11$.

магниторезистивные кривые соответствуют различным исходным неколлинеарным магнитным состояниям. Для определения степени влияния различных параметров на магнитное состояние, реализуемое в обменно связанных многослойных структурах, необходимо провести численное моделирование процессов намагничивания с учетом диполь-дипольного взаимодействия между всеми ферромагнитными слоями. Решение данной задачи выходит за рамки настоящей работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование магнитотранспортных и структурных свойств многослойных наноструктур $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}$ и $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}_{96}\text{In}_4$. В наноструктурах с медными прослойками обнаружена тенденция послойного увеличения размеров кристаллитов при возрастании числа слоев. В то же время в наноструктурах с прослойками $\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ размер кристаллитов изменяется незначительно, оставаясь в интервале значений 18–22 нм. Установлено, что использование сплава $\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ в качестве прослоек способствует формированию в наноструктурах острой текстуры $\langle 111 \rangle$ и более гладких интерфейсов, что приводит к уменьшению гистерезиса МС.

Сверхрешетка с прослойками $\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ и наибольшим числом слоев $N = 11$ обладает величиной МС 27%. В аналогичной обменно-связанной сверхрешетке с прослойками меди обнаружена малая величина МС 2%. Это может указывать на формирование в сверхрешетке $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}$ упорядочения, близкого к ферромагнитному.

Обнаружено, что уменьшение толщины ферромагнитных слоев в такой сверхрешетке на 0.5 нм с 2 до 1.5 нм приводит к десятикратному возрастанию величины МС, что может быть связано с кардинальным изменением магнитного порядка в системе. В наноструктурах с прослойками $\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ наблюдается большая величина МС как в трехслойной системе, так и в сверхрешетке с толщиной ферромагнитных слоев 2 нм. Это указывает на наличие в них антиферромагнитного порядка в нулевом магнитном поле.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-12-20022 <https://rscf.ru/project/24-12-20022/>, ФГБУН Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Свердловская обл.).

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Parker M.R., Hossain S., Seale D., Barnard J.A., Tan M., Fujiwara H. Low-field giant magnetoresistance in Co/Cu, CoFe/Cu and CoNiFe/Cu multilayer systems // IEEE Trans. on Magn. 1994. V. 30. № 2. P. 358–363.
2. Hossain S., Seale D., Qiu G., Jarratt J., Barnard J.A., Fujiwara H., Parker M.R. Hysteresis reduction in NiFeCo/Cu multilayers exhibiting large low-field giant magnetoresistance // J. Appl. Phys. 1994. V. 75. № 10. P. 7067–7069.
3. Milyaev M.A., Bannikova N.S., Naumova L.I., Proglyado V.V., Patraikov N.P., Glazunov N.P., Ustinov V.V. Effective Co-rich ternary CoFeNi alloys for spintronics application // J. Alloys Compounds 2021. V. 854. № 157171.
4. Милыев М.А., Банникова Н.С., Наумова Л.И., Проглядо В.В., Патраков Е.И., Каменский И.Ю., Устинов В.В. Магнитосопротивление сверхрешеток CoFeNi/Cu с различным составом ферромагнитного сплава // ФММ. 2019. Т. 120. № 9. С. 905–912.
5. Банникова Н.С., Милыев М.А., Наумова Л.И., Криницина Т.П., Патраков Е.И., Проглядо В.В., Чернышова Т.А., Устинов В.В. Сверхрешетки NiFeCo/Cu с высокой магниторезистивной чувствительностью и слабым гистерезисом // ФТТ. 2016. Т. 58. № 10. С. 1940–1946.
6. Банникова Н.С., Милыев 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. Т. 119. № 11. С. 1132–1137.

7. Zou W., Wadley H.N.G., Zhou X.W., Johnson R.A. Composition-morphology-property relations for giant magnetoresistance multilayers grown by RF diode sputtering // *J. Vac. Sci. Technol.* 2001. V. 674. P. 2414–2419.
8. Rafaja D., Ebert J., Miehe G., Martz G., Knapp M., Stahl B., Ghafari M., Hahn H., Fuess H., Schmollngruber P., Farber P., Siegle H. Changes in the real structure and magnetoresistance of $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}$ and $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}_{85}\text{Ag}_{10}\text{Au}_5$ multilayers after annealing // *Thin Solid Films*. 2004. V. 460. P. 256–263.
9. Milyaev M.A., Naumova L.I., Proglyado V.V., Pavlova A.Yu., Makarova M.V., Patrakov E.I., Glazunov N.P., Ustinov V.V. Advantages of using $\text{Cu}(1-x)\text{In}_x$ alloys as spacers in GMR multilayers // *J. Alloys Compound*. 2022. V. 917. № 165512.
10. Imry Y., Ma S.-K. Random-field instability of the ordered state of continuous symmetry // *Phys. Rev. Lett.* 1975. V. 32. P. 1399–1401.
11. Alben H., Becker H., Chi M.C. Random anisotropy in amorphous ferromagnets // *J. Appl. Phys.* 1978. V. 49. P. 1653–1658.
12. Zhao Y.-P., Gamache R.M., Wang G.-C., Lu T.-M., Palasantzas G., De Hosson J.T.M. Effect of surface roughness on magnetic domain wall thickness, domain size, and coercivity // *J. Appl. Phys.* 2001. V. 89. № 2. P. 1325–1330.
13. Verbeno C.H., Zazvorka J., Nowak J., Veis M. Magnetic coercivity control via buffer layer roughness in Pt/Co multilayers // *J. Magn. Magn. Mater.* 2023. V. 585. № 171124.
14. Nakagawa S., Yoshikawa H. Effect of roughness and continuity of Co layers to magnetic properties of Co/Pd multilayers // *J. Magn. Magn. Mater.* 2005. V. 287. P. 193–198.
15. Slonczewski J.C. Fluctuation Mechanism for Biquadratic Exchange Coupling in Magnetic Multilayers // *Phys. Rev. Lett.* 1991. V. 67. № 22. P. 3172–3175.
16. Demokritov S., Tsymbal E., Grünberg P., Zinn W., Schuller I.K. Magnetic-dipole mechanism for biquadratic interlayer coupling // *Phys. Rev. B*. 1994. V. 49. № 1. P. 720–723.

STRUCTURE AND MAGNETOTRANSPORT PROPERTIES OF MULTILAYER $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ AND $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}$ NANOSTRUCTURES WITH THE GIANT MAGNETORESISTANCE EFFECT

I. A. Naidanov^{1,*}, M. A. Milyaev¹, V. V. Proglyado¹, and V. V. Ustinov¹

¹Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, 620108 Russia

*e-mail: naydenus@mail.ru

Structural and magnetoresistive properties of multilayer $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}$ and $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ nanostructures with a number of magnetic layers and nonmagnetic interlayers of 1 to 11 are studied. The sharp axial $\langle 111 \rangle$ texture and more perfect interfaces are shown to form in the nanostructures with $\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ interlayers, and a relatively small magnetoresistance hysteresis is observed. Atomic force microscopy is used to estimate the surface roughness and crystallite size of the samples under study. As the number of layers in the $\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ -based samples increases, the crystallite size is found to slightly change from layer to layer in a range of 18–22 nm, whereas, for the Cu-based sample, the crystallite size substantially increases. For superlattices with Cu interlayers, the 10-fold decrease in the magnetoresistance is observed as the thickness of $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6$ layers slightly, namely, from 1.5 to 2 nm increases.

Keywords: superlattices, giant magnetoresistance effect, $\text{Cu}_{1-x}\text{In}_x$, small hysteresis, interface roughness