

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 539.216.2:537.624

### МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ СВЕРХРЕШЕТОК CoFeNi/Cu С РАЗЛИЧНЫМ СОСТАВОМ ФЕРРОМАГНИТНОГО СПЛАВА

© 2019 г. М. А. Миляев<sup>b, \*</sup>, Н. С. Банникова<sup>a</sup>, Л. И. Наумова<sup>a, b</sup>, В. В. Проглядо<sup>a</sup>,  
Е. И. Патраков<sup>a</sup>, И. Ю. Каменский<sup>a</sup>, В. В. Устинов<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup>Институт физики металлов УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620990 Россия

<sup>b</sup>Уральский федеральный университет, ИЕНУМ, ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002 Россия

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

Поступила в редакцию 25.02.2019 г.

После доработки 02.04.2019 г.

Принята к публикации 09.04.2019 г.

Проведены исследования структуры и магниторезистивных свойств сверхрешеток Ta(5 нм)/NiFeCr(5 нм)/[FM( $t_{\text{FM}}$ )/Cu(2.2 нм)]<sub>n</sub>/Ta(5 нм), полученных методом магнетронного напыления. Толщину ферромагнитного слоя  $t_{\text{FM}}$  изменяли в интервале 1.1–1.5 нм. В качестве ферромагнитных материалов (FM) использованы сплавы Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>, Co<sub>85</sub>Fe<sub>12</sub>Ni<sub>3</sub>, Co<sub>77</sub>Fe<sub>17</sub>Ni<sub>6</sub>, Co<sub>70</sub>Fe<sub>20</sub>Ni<sub>10</sub>, обладающие ГЦК-структурой и близкими значениями намагниченности насыщения. Показано, что при увеличении содержания Ni и Fe в сплаве CoFeNi магнитосопротивление сверхрешеток, содержащих 8 бислоев, сохраняет высокие значения 24–28%, при этом гистерезис уменьшается в 2 раза. При увеличении числа бислоев до 12 в сверхрешетках, содержащих сплавы CoFeNi различного состава, получены близкие величины магнитосопротивления 30–31%. Обсуждается корреляция между намагниченностью насыщения ферромагнитного материала слоев сверхрешетки и максимальной величиной магнитосопротивления.

**Ключевые слова:** магнетронное напыление, магнитные металлические сверхрешетки, гигантское магнитосопротивление, сплавы CoFeNi, намагниченность насыщения, гистерезис

DOI: 10.1134/S0015323019090080

#### ВВЕДЕНИЕ

Магнитные металлические сверхрешетки с эффектом гигантского магнитосопротивления (ГМС) являются одним из современных типов магниточувствительных наноматериалов, используемых в различных изделиях магнитоэлектроники. Функциональные характеристики таких искусственных наноматериалов могут быть изменены в широких пределах путем выбора композиции многослойной структуры и типов входящих в них магнитных и немагнитных материалов. Использование тройных ферромагнитных сплавов Co–Fe–Ni в сверхрешетках нацелено на получение ГМС материалов с малыми полями магнитного насыщения, слабым гистерезисом и высокой чувствительностью к магнитному полю, которая может достигать значений (0.3–0.5)%/Э. Повышение чувствительности у таких сверхрешеток связано, главным образом, со снижением поля магнитного насыщения, что обусловлено, в частности, свойствами используемых магнитомягких сплавов CoFeNi.

Отличительной особенностью сверхрешеток CoFeNi/Cu, обладающих малыми полями магнитного насыщения 50–100 Э, является небольшая величина относительного магнитосопротивления (МС) в сравнении, например, со сверхрешетками Co/Cu и Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>/Cu. Для толщины слоев меди  $t_{\text{Cu}} = 2–2.3$  нм, соответствующей второму антиферромагнитному максимуму осциллирующего межслойного обменного взаимодействия РККИ типа, в большинстве опубликованных работ МС сверхрешеток CoFeNi/Cu при комнатной температуре составляет лишь 10–15% [1–6]. В то время как в сверхрешетках Co/Cu и Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>/Cu с полями магнитного насыщения 200–400 Э магнитосопротивление достигает значений 25–35% [7–10]. Только в одной работе [3] для сверхрешеток CoFeNi/Cu приведены данные о величинах МС 20–25%, наблюдаемых при использовании сплавов с концентрацией Fe менее 15 атомных процентов.

В работе [3] приведена тройная диаграмма для сплавов CoFeNi с указанием линии, соответствующей

ющей композициям с нулевой константой магнитострикции ( $\lambda$ ). Положение данной линии на диаграмме соответствует сплавам с содержанием Ni 5–20% и содержанием Fe 5–40%. Аналогичное расположение линии для сплавов с  $\lambda = 0$  отмечено также в работе [11], в которой исследованы спиновые клапаны, содержащие тонкий (2 нм) свободный слой из сплавов CoFeNi различного состава. Следует отметить, что в ряде работ на тройной диаграмме для сплавов с нулевой магнитострикцией указано другое положение линии [1, 12].

Использование тройных сплавов с нулевой магнитострикцией в ГМС сверхрешетках может приводить к уменьшению поля магнитного насыщения и ослаблению гистерезиса. Ряд сверхрешеток с такими сплавами исследован, например, в [3]. Было обнаружено, в частности, что увеличение содержания Fe в сплаве при малом содержании Ni приводит к значительному уменьшению МС сверхрешеток с 25 до 5%. Данный результат не является ожидаемым, так как магнитные характеристики использованных в [3] сплавов CoFeNi кардинально не изменяются в зависимости от состава. Значительное уменьшение МС в данном случае, по-видимому, обусловлено выбором неоптимальной композиции сверхрешеток, содержащих 20 бислоев. В частности, для сверхрешеток  $[\text{Ni}_{76}\text{Fe}_{10}\text{Co}_{14}/\text{Cu}]_n$  и  $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}]_n$  с толщиной слоев меди  $t_{\text{Cu}} = 2\text{--}2.3$  нм ранее было показано, что при возрастании числа бислоев ( $n > 10$ ) наблюдается уменьшение МС относительно максимального значения [1, 13]. Другая причина уменьшения МС в [3] может быть связана с изменением кристаллической структуры в слоях CoFeNi с ГЦК на ОЦК при увеличении концентрации Fe в сплаве [11, 12].

Целью настоящей работы было показать возможность получения в сверхрешетках на основе тройных сплавов CoFeNi/Cu(2.2 нм) больших, как и в сверхрешетках Co/Cu и CoFe/Cu, значений магнитосопротивления (~30%), а также исследовать изменение величины магнитосопротивления и гистерезиса магнитосопротивления в зависимости от состава и толщины слоев CoFeNi.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Образцы сверхрешеток получены методом магнетронного напыления на постоянном токе с использованием установки MPS-4000-C6 (Ulvac) при комнатной температуре подложки, давлении аргона 0.1 Па и мощности магнетронного испарителя 100 Вт. В качестве подложек использованы стекла (Corning). Описание методики получения наноструктур можно найти в работах [6, 10]. Исследованные сверхрешетки имеют состав:

стекло//Ta(5)/NiFeCr(5)/[FM( $t_{\text{FM}}$ )/Cu(2.2)] $_n$ /Ta(5). Здесь и далее толщина слоев в скобках указана в нанометрах. Парамагнитный сплав, входящий в составной буферный слой, имеет следующий состав: NiFeCr =  $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$ . Эффективность использования данного материала в составе буферного слоя ГМС сверхрешеток нами была показана в работах [6, 10, 14, 15]. Исследование гистерезиса в зависимости от состава ферромагнитных слоев проведено на сверхрешетках с числом бислоев  $n = 8$ . Для получения максимальных значений МС также были исследованы сверхрешетки с  $n = 12$ .

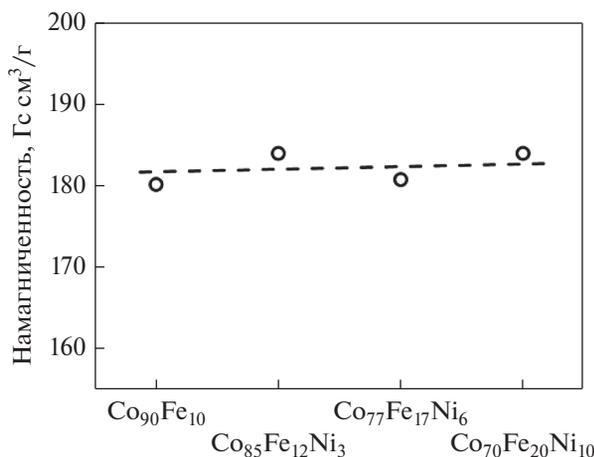
В исследованных сверхрешетках использованы четыре типа ферромагнитных (FM) сплавов:  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ ,  $\text{Co}_{85}\text{Fe}_{12}\text{Ni}_3$ ,  $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6$ ,  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}$ . Напыление металлических слоев происходило из мишеней соответствующего сплава. Тройные сплавы выбраны таким образом, чтобы на тройной диаграмме они находились вблизи линии, соответствующей сплавам с нулевой магнитострикцией [3]. При этом максимальное содержание Fe ограничено 20%, чтобы обеспечить сохранение в сплаве ГЦК-структуры. Толщину слоев в сверхрешетках для сплава каждого состава варьировали в пределах 1.1–1.5 нм.

Исследования структуры исходных мишеней и приготовленных сверхрешеток проводили методом рентгеновской дифракции на модернизированном дифрактометре ДРОН-3М с использованием  $\text{CoK}\alpha$ -излучения и Si монохроматора на первичном пучке.

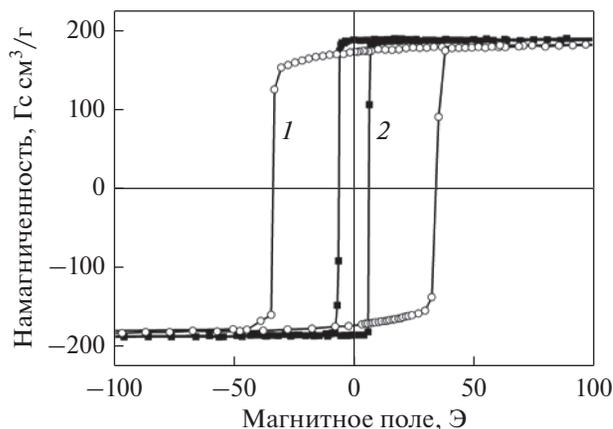
Сопротивление образцов измеряли на постоянном токе 4-х контактным методом с использованием держателя с прижимными контактами. Векторы напряженности магнитного поля и тока были направлены в плоскости слоев взаимно перпендикулярно. Изменение МС от напряженности магнитного поля определяли как  $\Delta R(H)/R_s = [(R(H) - R_s)/R_s] \times 100\%$ , где  $R_s$  – сопротивление образца в поле магнитного насыщения. Исследования полевых зависимостей намагниченности и МС проведены при комнатной температуре в магнитных полях до  $\pm 500$  Э. Для характеристики гистерезиса на полевой зависимости МС использована величина  $\Delta H$ , определяемая по разности значений магнитного поля, соответствующих полувисоте кривой  $\Delta R(H)/R_s$ , для восходящей и нисходящей ветвей.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования магнитных характеристик исходных FM-сплавов показали, что они обладают близкими значениями намагниченности насыщения (рис. 1). Из мишеней были приготовлены пленки толщиной 80–110 нм и на них проведены



**Рис. 1.** Значения намагниченности насыщения ( $M_s$ ) для объемной мишени тройного сплава Co–Fe–Ni соответствующего состава.



**Рис. 2.** Петли магнитного гистерезиса для пленок сплавов: 1 –  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ , 2 –  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}$ . Толщина пленок составляет 110 нм.

измерения петель магнитного гистерезиса. Было обнаружено, в частности, что при увеличении в сплаве CoFeNi концентрации Ni и Fe происходит существенное уменьшение коэрцитивной силы ( $H_c$ ): 34; 27; 17 и 6 Э, соответственно для сплавов  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ ,  $\text{Co}_{85}\text{Fe}_{12}\text{Ni}_3$ ,  $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6$  и  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}$ . На рис. 2 для наглядности приведены петли магнитного гистерезиса только для двух составов. Видно, что для пленок сплавов  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$  и  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}$  коэрцитивная сила отличается более, чем в 5 раз.

Для магниторезистивных измерений были приготовлены серии образцов сверхрешеток, содержащих 8 бислоев. Толщина ферромагнитных слоев каждого состава в серии принимала пять значений: 1.1; 1.2; 1.3; 1.4; 1.5 нм. Результаты измерений приведены в таблице 1. Отметим, что максимальные значения MC для всех исследованных образцов находятся в диапазоне 23.8–28.2%. При этом для исследованного диапазона толщин ферромагнитных слоев не прослеживается какой-либо зависимости величины MC ни от толщины слоев, ни от состава используемых сплавов. Небольшим отличием в величине MC обладают сверхрешетки с  $t_{\text{FM}} = 1.3$  нм, поэтому далее в работе им уделено основное внимание.

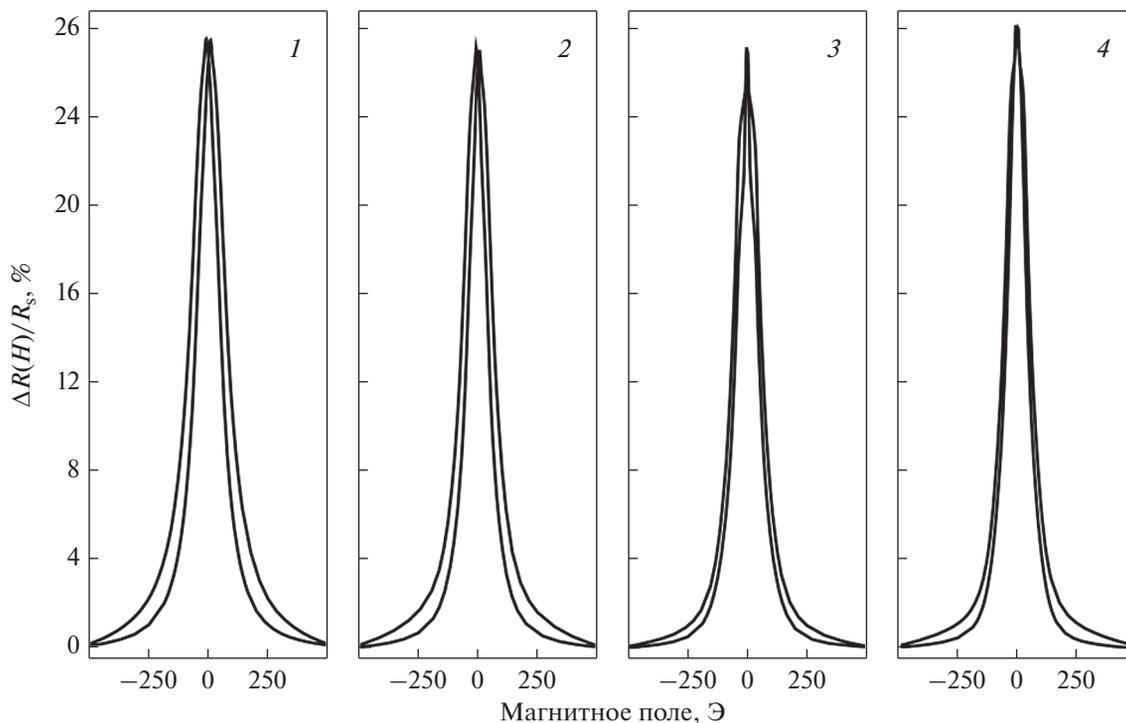
Для сравнения на рис. 3 приведены зависимости  $\Delta R(H)/R_s$  для сверхрешеток с  $t_{\text{FM}} = 1.3$  нм. Сверхрешетки имеют близкие значения максимального MC, однако изменение состава ферромагнитного сплава от 1 к 4 образцу оказывает влияние на форму полевых зависимостей MC.

Общие графики, отражающие изменение гистерезиса  $\Delta H$  и поля магнитного насыщения  $H_s$  в зависимости от состава ферромагнитного сплава и толщины слоев, приведены, соответственно, на

рис. 4 и 5. Видно, что в пределах исследованного интервала толщин величина  $\Delta H$  почти не изменяется при увеличении толщины ферромагнитных слоев в сверхрешетке. При этом значение  $H_s$  уменьшается при увеличении  $t_{\text{FM}}$ . Из рис. 4 и 5 также видно, что изменение состава ферромагнитного сплава приводит к существенному снижению как гистерезиса, так и поля насыщения. Для сверхрешеток на основе сплава  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}$  величины  $\Delta H$  и  $H_s$  оказались приблизительно в 2 и в 1.5 раза меньше соответствующих значений, наблюдаемых у сверхрешеток на основе сплава  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ . Следует отметить, что число бислоев  $n = 8$  выбрано с той целью, чтобы получить сочетание большой величины MC и слабого гистерезиса. Однако данное число бислоев не является оптимальным, если задачей является достижение максимальных значений MC. Дополнительное повышение MC может быть получено при увеличении числа бислоев, например, до  $n = 12$ . Заметим, что при увеличении числа бислоев возрастает также и гистерезис.

**Таблица 1.** Максимальные значения магнитосопротивления сверхрешеток, содержащих слои ферромагнитных сплавов различного состава и различной толщины ( $t_{\text{FM}}$ )

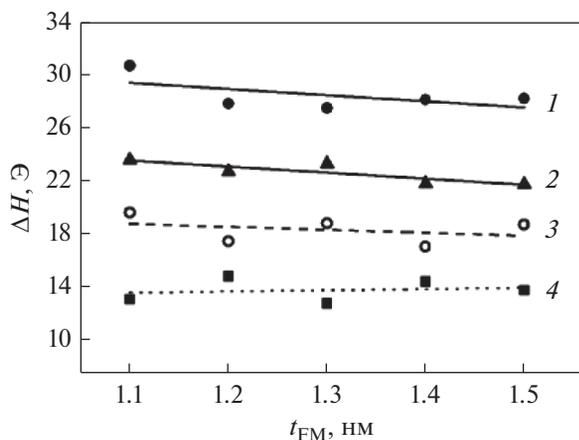
$[FM(t_{\text{FM}})/Cu(2.2)]_8$	$(\Delta R/R_s)_{\text{max}}, \%$				
	$t_{\text{FM}}, \text{нм}$	1.1	1.2	1.3	1.4
$\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$	26.5	27.0	27.4	26.5	26.1
$\text{Co}_{85}\text{Fe}_{12}\text{Ni}_3$	26.7	27.0	27.1	27.2	26.2
$\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6$	26.6	26.3	27.0	25.5	23.8
$\text{Co}_{70}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}$	26.5	27.2	28.1	26.0	28.2



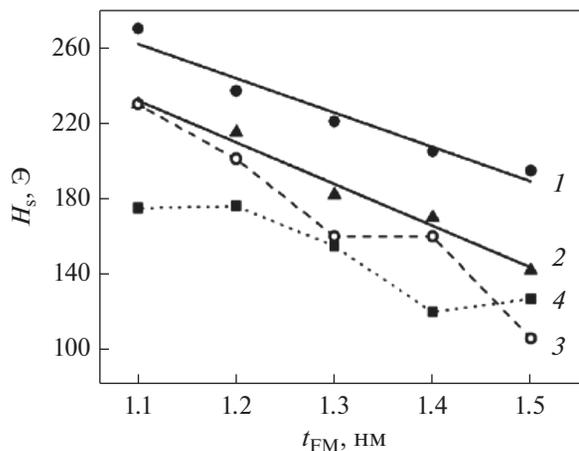
**Рис. 3.** Полевые зависимости магнитосопротивления сверхрешеток Ta(5)/NiFeCr(5)/[FM(1.3)/Cu(2.2)]<sub>8</sub>/Ta(5) с ферромагнитными сплавами различного состава: 1 – Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>/Cu; 2 – Co<sub>85</sub>Fe<sub>12</sub>Ni<sub>3</sub>/Cu; 3 – Co<sub>77</sub>Fe<sub>17</sub>Ni<sub>6</sub>/Cu; 4 – Co<sub>70</sub>Fe<sub>20</sub>Ni<sub>10</sub>/Cu.

На рис. 6 приведены магниторезистивные кривые для оптимизированных сверхрешеток на основе сплавов Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub> и Co<sub>70</sub>Fe<sub>20</sub>Ni<sub>10</sub>, содержащих 12 бислоев. Величина МС в данных образцах достигает ~31% при гистерезисе 34 и 18 Э, соответственно. Магниторезистивная чувствительность на начальном участке указанных кривых в

интервале полей (20–50 Э) составляет 0.35%/Э, что является довольно большой величиной для ГМС-сверхрешеток. Для оптимизированных сверхрешеток на основе сплавов Co<sub>85</sub>Fe<sub>12</sub>Ni<sub>3</sub> и Co<sub>77</sub>Fe<sub>17</sub>Ni<sub>6</sub> также получены значения МС около 30%. Для наглядности на рис. 6 приведены кривые только для двух образцов.



**Рис. 4.** Изменение величины  $\Delta H$  в зависимости от толщины ( $t_{FM}$ ) и состава ферромагнитных слоев в сверхрешетках [FM( $t_{FM}$ )/Cu(2.2)]<sub>8</sub>: 1 – Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>; 2 – Co<sub>85</sub>Fe<sub>12</sub>Ni<sub>3</sub>; 3 – Co<sub>77</sub>Fe<sub>17</sub>Ni<sub>6</sub>; 4 – Co<sub>70</sub>Fe<sub>20</sub>Ni<sub>10</sub>.



**Рис. 5.** Значения полей магнитного насыщения в зависимости от толщины и состава ферромагнитных слоев в сверхрешетках [FM( $t_{FM}$ )/Cu(2.2)]<sub>8</sub>. Нумерация кривых соответствует рис. 4.

На данном этапе исследований целью оптимизации композиции сверхрешеток было получить максимально возможные значения МС. Проведенные исследования показали, что в случае использования сплавов  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ ,  $\text{Co}_{85}\text{Fe}_{12}\text{Ni}_3$  и  $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6$  максимальное МС наблюдается при  $n = 12$  и  $t_{\text{FM}} = 12 \text{ \AA}$ , в то время как в сверхрешетках на основе сплава  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}$  – при  $n = 12$  и  $t_{\text{FM}} = 13 \text{ \AA}$ .

Важно отметить, что сверхрешетки с  $n = 8$  и различным материалом ферромагнитных слоев обладают близкими величинами МС (табл. 1). В оптимизированных сверхрешетках с числом бислоев  $n = 12$  также наблюдаются близкие значения МС  $(\Delta R/R_s)_{\text{max}} = 30\text{--}31\%$  вне зависимости от состава ферромагнитного сплава.

Указанные максимальные значения МС превосходят соответствующие значения, приведенные в опубликованных ранее работах для различных ГМС сверхрешеток на основе меди и тройных сплавов CoFeNi. Полученные результаты отличаются также от данных работы [3], в которой исследованы сверхрешетки, близкие по составу к изученным в настоящей работе. В частности, для сверхрешеток  $\text{CoFeNi}(1.5)/[\text{CoFeNi}(1.5)/\text{Cu}(2)]_{20}$  в [3] было показано, что величина МС убывает от 25 до 5% при увеличении в сплаве CoFeNi концентрации Fe от 10 до 40% и вариации концентрации Ni в пределах 3.5–30%. В качестве вывода в [3] указано, что ГМС выше 20% наблюдается при концентрации Fe менее 15%, а при концентрациях Fe 20 и 30% МС составляет лишь 5–10%. В нашем случае МС больше 30% получено для сверхрешетки на основе сплава  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}$ , содержащего 20% Fe. Данное несоответствие результатов может быть обусловлено двумя причинами: 1 – выбором в [3] ферромагнитного буферного слоя CoFeNi, влияющего на процессы перемагничивания, а также на структуру слоев и интерфейсов в сверхрешетке, и 2 – использованием в сверхрешетке большого числа бислоев ( $n = 20$ ). Уменьшение величины МС при  $n > 10$ , ранее наблюдали, например, в [1, 13].

Заметим, что при значительном различии состава ферромагнитного сплава величины МС оптимизированных сверхрешеток на основе сплавов  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}$  и  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$  совпадают и равны 31%. Максимальные известные значения МС для сверхрешеток Co/Cu (~2 нм) составляют 33–35% [7], что лишь на несколько процентов превышает значения МС, приведенные в настоящей работе для сверхрешеток CoFe/Cu и CoFeNi/Cu. Данное сравнение результатов показывает, что элементный состав используемого ферромагнитного материала на основе *3d*-металлов (Co, CoFe, CoFeNi) не оказывает значительного влияния на величину МС оптимизированных сверхрешеток.

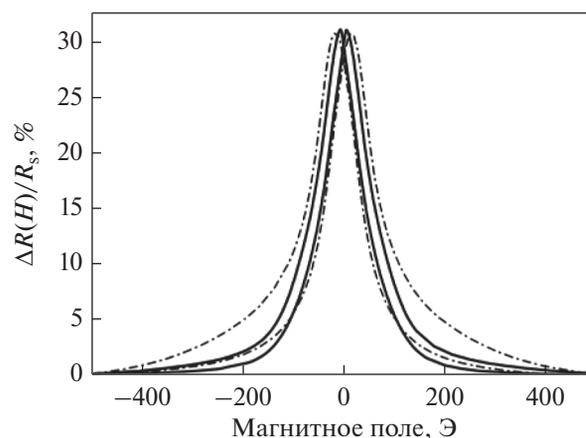


Рис. 6. Полевые зависимости магнитосопротивления для  $\text{Ta}(5)/\text{NiFeCr}(5)/[\text{Co}_{70}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}(1.3)/\text{Cu}(2.2)]_{12}/\text{Ta}(5)$  – сплошная линия и  $\text{Ta}(5)/\text{NiFeCr}(5)/[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}(1.2)/\text{Cu}(2.2)]_{12}/\text{Ta}(5)$  – штрихпунктирная линия.

Однако следует отметить, что сплавы CoFe и CoFeNi в зависимости от состава могут обладать как ГЦК, так и ОЦК-кристаллической структурой. Использование в сверхрешетках сплавов с ОЦК-структурой приводит к уменьшению МС и увеличению гистерезиса. Результаты исследований сверхрешеток с ОЦК-структурой не включены в данную статью. Сплавы CoFeNi с ГЦК-структурой в зависимости от состава значительно, в 2.5 раза, отличаются по намагниченности насыщения [12]. В ряде опубликованных ранее и цитированных в настоящей статье работ аргументы при целенаправленном выборе состава тройных сплавов, как правило, сводятся к учету и минимизации внутренних упругих напряжений и константы анизотропии ( $K_1$ ), что может привести к уменьшению поля магнитного насыщения ГМС сверхрешеток. Влияние же намагниченности насыщения сплавов на величину МС сверхрешеток не обсуждается. В различных микроскопических теоретических моделях также не анализируются физические механизмы, связывающие величину намагниченности насыщения и степень спин-зависимого рассеяния электронов проводимости [16]. Однако проведенные нами исследования показывают, что некоторая корреляция между величиной намагниченности насыщения сплавов CoFeNi и максимальным МС сверхрешеток CoFeNi/Cu (~2 нм) имеется. Такой вывод основан на том, что при использовании в сверхрешетках сплавов с относительно небольшой намагниченностью насыщения и оптимизации варьируемых параметров многослойной структуры не удается получить МС свыше 20% при комнатной температуре. Такие исследования были нами проведены на ряде тройных сплавов с высоким содержанием никеля, напри-

**Таблица 2.** Значения удельного сопротивления и ширина на полувысоте кривых качания ( $\gamma$ ), характеризующая угол рассеяния текстуры  $\langle 111 \rangle$ , для образцов с  $t_{\text{FM}} = 1.3$  нм

[FM(1.3)/Cu(2.2)] <sub>8</sub>	$\rho$ , $\mu\text{Ом см}$	$\gamma$ , град
[Co <sub>90</sub> Fe <sub>10</sub> /Cu] <sub>8</sub>	20.1	2.63
[Co <sub>85</sub> Fe <sub>12</sub> Ni <sub>3</sub> /Cu] <sub>8</sub>	21.1	2.69
[Co <sub>77</sub> Fe <sub>17</sub> Ni <sub>6</sub> /Cu] <sub>8</sub>	20.9	2.51
[Co <sub>70</sub> Fe <sub>20</sub> Ni <sub>10</sub> /Cu] <sub>8</sub>	23.9	2.60

мер, Ni<sub>65</sub>Fe<sub>15</sub>Co<sub>20</sub>, Ni<sub>76</sub>Fe<sub>10</sub>Co<sub>14</sub> [6], Ni<sub>46</sub>Fe<sub>31</sub>Co<sub>23</sub>. Согласно литературным данным [1–6, 17], в сверхрешетках CoFeNi/Cu на основе сплавов с малой намагниченностью насыщения  $M_s = (110–150)$  Гс см<sup>3</sup>/г ранее также не наблюдали MC свыше 20%. Более высокие значения MC получены только в сверхрешетках на основе Co и сплавов CoFe и CoFeNi с высоким содержанием Co и  $M_s > 160$  Гс см<sup>3</sup>/г [3].

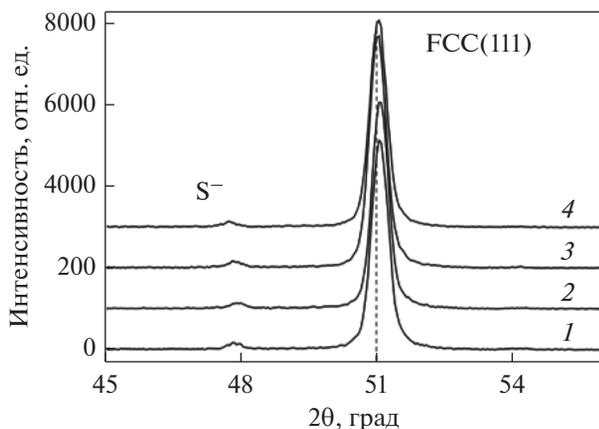
Данный вывод касается также тройных сплавов, использованных в настоящей работе. Повышение содержания Ni в них приводит к снижению коэрцитивной силы и уменьшению намагниченности насыщения. Для компенсации уменьшения  $M_s$  в них повышена концентрация Fe. В результате намагниченность насыщения сплавов Co<sub>85</sub>Fe<sub>12</sub>Ni<sub>3</sub>, Co<sub>77</sub>Fe<sub>17</sub>Ni<sub>6</sub>, Co<sub>70</sub>Fe<sub>20</sub>Ni<sub>10</sub> остается высокой ( $M_s > 180$  Гс см<sup>3</sup>/г) и примерно равной  $M_s$  для Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub> (рис. 1). В исследованных сверхрешетках

на основе сплавов с близкими значениями  $M_s$  наблюдаются также и близкие значения максимального магнитосопротивления.

На величину MC сверхрешеток CoFeNi/Cu некоторое влияние может оказывать удельное сопротивление, зависящее от состава тройного сплава. Однако приведенные в таблице 2 данные показывают, что удельное электросопротивление указанных сверхрешеток не сильно различается и имеет значения из диапазона 20–24 мкОм см.

Более значительное влияние на форму полевой зависимости и величину MC оказывает кристаллическая структура в слоях CoFeNi, зависящая от состава тройного сплава. В ряде работ было показано, что сочетание относительно больших значений MC и слабого гистерезиса наблюдается в сверхрешетках с ГЦК-структурой, острой текстурой  $\langle 111 \rangle$  и хорошим сопряжением кристаллических решеток сплава CoFeNi и Cu [6, 18, 19]. Для сплавов с большим содержанием Co тип кристаллической структуры определяется, главным образом, концентрацией Fe. Согласно [12], переход от ГЦК-структуры к смешанному состоянию с двумя ОЦК- и ГЦК-фазами происходит при концентрации Fe около 15%. При концентрации Fe (30–35)% происходит переход в состояние с ОЦК-структурой. В случае тонких пленок ( $t_{\text{FM}} = 2$  нм) на тройной диаграмме в [11] переход между состояниями с ГЦК- и ОЦК-структурами обозначен при концентрациях Fe выше 25%.

В настоящей работе исследования структуры проведены как в исходных сплавах с концентрацией Fe до 20%, так и в приготовленных сверхрешетках. Во всех массивных и пленочных образцах обнаружена ГЦК-структура. На рис. 7 показаны результаты рентгеновской дифракции, полученные для четырех типов исследованных сверхрешеток. В диапазоне углов  $45^\circ \leq 2\theta \leq 90^\circ$  обнаружен только один брегговский пик, который относится к общему для CoFeNi и Cu рефлексу (111), что свидетельствует о наличии текстуры  $\langle 111 \rangle$ . Слева от рефлекса (111) наблюдается характерный для сверхрешеток сателлитный пик ( $S^-$ ), обусловленный периодичным расположением слоев в сверхрешетке. Отметим, что для всех сверхрешеток величина угла рассеяния текстуры ( $\gamma$ ) является малой (табл. 2), что указывает на формирование в образцах высокосовершенной аксиальной текстуры  $\langle 111 \rangle$ . Помимо состава тройного сплава важную роль в формировании совершенной ГЦК-структуры в исследованных сверхрешетках играет также составной буферный слой Ta(5)/NiFeCr(5), который был использован нами ранее в сверхрешетках CoFe/Cu для получения рекордных значений MC [14, 15].



**Рис. 7.** Результат рентгеновской дифракции для образцов Ta(5)/NiFeCr(5)/[FM(1.3)/Cu(2.2)]<sub>8</sub>/Ta(5), где FM: 1 – Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>; 2 – Co<sub>85</sub>Fe<sub>12</sub>Ni<sub>3</sub>; 3 – Co<sub>77</sub>Fe<sub>17</sub>Ni<sub>6</sub>; 4 – Co<sub>70</sub>Fe<sub>20</sub>Ni<sub>10</sub>.

Экспериментальные данные, приведенные на рис. 4, показывают, что наилучшим вариантом из использованных ферромагнитных сплавов является сплав  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}$ . В сверхрешетках на его основе наблюдается наиболее слабый гистерезис при величине МС около 30%. Следует отметить, что для спиновых клапанов со свободным слоем на основе тройных сплавов CoFeNi различного состава ранее была установлена область концентраций, в которой у сплавов наблюдается слабый гистерезис [11]. Сплав  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}$  также относится к данной области на тройной диаграмме. Коэрцитивная сила в нем более чем в 5 раз меньше, чем у сплава  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ , и в сверхрешетках на его основе наблюдается наименьший гистерезис, что согласуется с результатами работы [11].

Отметим, что относительно высокая чувствительность (0.35%/Э) для сверхрешетки  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}/\text{Cu}$  получена не за счет уменьшения поля магнитного насыщения, а, главным образом, за счет большой величины МС. Можно ожидать, что использование в аналогичных сверхрешетках сплавов CoFeNi с концентрацией Ni более 10% и применение более толстых ферромагнитных слоев позволят уменьшить поле магнитного насыщения и дополнительно повысить чувствительность.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований показано, что в сверхрешетках CoFeNi/Cu с толщиной слоев меди, соответствующей 2-му максимуму межслойного обменного взаимодействия, магнитосопротивление при комнатной температуре может превышать 30%. При использовании сплавов различного состава ( $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ ,  $\text{Co}_{85}\text{Fe}_{12}\text{Ni}_3$ ,  $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6$ ,  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}$ ), обладающих близкими значениями намагниченности насыщения, максимальные значения магнитосопротивления почти не зависят от состава ферромагнитного сплава и укладываются в диапазон  $(\Delta R/R_s)_{\max} = 30\text{--}31\%$ . В сверхрешетках с различным составом ферромагнитных слоев наблюдается систематическое уменьшение гистерезиса магнитосопротивления при увеличении в сплаве концентрации Ni от 3 до 10% и Fe от 10 до 20%. Наименьший гистерезис  $\Delta H = 14$  Э обнаружен в сверхрешетке на основе сплава  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}$ . В сравнении с  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}$  у сверхрешеток  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}/\text{Cu}$  при близкой величине максимального магнитосопротивления наблюдаются в 2 раза более слабый гистерезис и в ~1.5 раза меньшее поле магнитного насыщения.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России по теме “Спин” АААА-А18-118020290104-2, Комплексной про-

граммы УрО РАН, проект 18-10-2-37, и при частичной поддержке РФФИ, грант 19-02-00057.

### 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. *Jimbo M., Tsunashima S., Kanda T., Goto S., Uchiyama S.* Giant magnetoresistance in soft magnetic NiFeCo/Cu multilayers // J. Appl. Phys. 1993. V. 74(5). P. 3341–3344.
3. *Meguro K., Hirano S., Jimbo M., Tsunashima S., Uchiyama S.* Composition dependence magnetoresistance effect in NiFeCo/Cu multilayers // JMMM. 1995. V. 140–144. P. 601–602.
4. *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.
5. *Mtalsi D.M., Harfaoui M.E., Qachaou A., Faris M., Youssef J.B., Gall H.L.* Magnetic layer composition effect on giant magnetoresistance in (NiFeCo/Cu) multilayers // Phys. Stat. Sol. (a). 2001. V. 187. № 2. P. 633–640.
6. *Банникова Н.С., Миляев М.А., Наумова Л.И., Криницина Т.П., Патраков Е.И., Пролядо В.В., Чернышова Т.А., Устинов В.В.* Сверхрешетки NiFeCo/Cu с высокой магниторезистивной чувствительностью и слабым гистерезисом // ФТТ. 2016. Т. 58. Вып. 10. С. 1940–1946.
7. *Marrows C.H., Wiser N., Hickey B.J., Hase T.P.A., Tanner B.K.* Giant magnetoresistance and oscillatory exchange coupling in disordered Co/Cu multilayers // J. Phys.: Condens. Matter. 1999. V. 11. P. 81–88.
8. *Parkin S.S.P., Modak A., Smith D.J.* Dependence of giant magnetoresistance on Cu-layer thickness in Co/Cu multilayers: A simple dilution effect // Phys. Rev. B. 1993. V. 47(14). P. 9136–9139.
9. *Rafaja D., Ebert J., Miehe G., Martz N., 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.
10. *Банникова Н.С., Миляев М.А., Наумова Л.И., Пролядо В.В., Криницина Т.П., Каменский И.Ю., Устинов В.В.* Гигантское магнитосопротивление сверхрешеток CoFe/Cu с буферным слоем  $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$  // ФММ. 2015. Т. 116. С. 1040–1047.
11. *Fukuzawa H., Iwasaki H., Koi K., Sahashi M.* Soft magnetic characteristics of an ultrathin CoFeNi free layer in spin-valve films // JMMM. 2006. V. 298. P. 65–71.
12. *Scheunert G., Heinonen O., Hardeman R., Lapicki A., Gubbins M., Bowman R.M.* A review of high magnetic moment thin films for microscale and nanotechnology applications // Appl. Phys. Rev. 2016. V. 3. P. 011301(1–42).
13. *Миляев М.А., Наумова Л.И., Пролядо В.В., Криницина Т.П., Бурханов А.М., Банникова Н.С., Устинов В.В.* Гигантские изменения магнитных и маг-

- ниторезистивных свойств сверхрешеток CoFe/Cu при субнанометровой вариации толщины буферного слоя хрома // ФММ. 2011. Т. 112. С. 146–154.
14. *Ustinov V.V., Milyaev M.A., Naumova L.I.* Giant magnetoresistance of metallic exchange-coupled multilayers and spin valves // *Physics of Metals and Metallography*. 2017. V. 118. № 13. P. 1300–1359.
  15. *Банникова Н.С., Мильяев 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.
  16. *Handbook of Spintronics* / Ed. by Y. Xu [et al.]. New York, London: Springer Science+Business Media Dordrecht, 2016. 1609 p.
  17. *Miyazaki T., Kondo J., Kubota H., Inoue J.* Comparison between giant magnetoresistance in Fe–Co–Ni/Cu multilayers and anisotropic magnetoresistance in the ternary alloys // *J. Appl. Phys.* 1997. V. 81. P. 5187–5189.
  18. *Kanda T., Jimbo M., Tsunashima S., Goto S., Kumazawa M., Uchiyama S.* Giant magnetoresistance in NiFeCo/Cu multilayers // *IEEE Translation J. on magnetics in Japan*. 1994. V. 9(1). P. 103–109.
  19. *Diao Z.D., Goto S., Meguro K., Hirano S., Jimbo M.* Role of the buffer layers in determining the antiferromagnetic coupling and magnetoresistance of NiFeCo/Cu superlattices // *J. Appl. Phys.* 1997. V. 81. P. 2327–2335.