

УДК 538.91; 537.621.2
PACS 73.43.Qt

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

Влияние состояния интерфейсов на магниторезистивные свойства сверхрешеток $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}]_{12}$

С. А. Чупраков, И. В. Блинов

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН
620108, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18
email: chuprakov@imp.uran.ru

Методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР) исследовано влияние структуры интерфейсов на магниторезистивные свойства сверхрешеток $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}$. Установлено, что при увеличении температуры отжига уменьшается доля высокосовершенных интерфейсов, вызывая уменьшение магнитосопротивления.

Ключевые слова: гигантское магнитосопротивление; сверхрешётки; интерфейсы; ядерный магнитный резонанс

Поступила в редакцию 24.07.2019; принята к опубликованию 06.11.2019

The influence of the state of interfaces on the magnetoresistive properties of $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}]_{12}$ superlattices

S. A. Chuprakov, I. V. Blinov

M.N. Miheev Institute of Metal Physics UB RAS
620108, Ekaterinburg, S. Kovalevskaya str., 18
email: chuprakov@imp.uran.ru

The effect of the structure of interfaces on the magnetoresistance properties of $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}$ superlattices has been studied by the method of nuclear magnetic resonance (NMR). It was found that, with increasing annealing temperature, the fraction of highly perfect interfaces decreases. It is demonstrated that the deteriorated state of interlayer boundaries results in a decrease in GMR.

Keywords: giant magnetoresistance; superlattices; interfaces; nuclear magnetic resonance

Received 24.07.2019; accepted 06.11.2019

doi: 10.17072/1994-3598-2019-4-11-16

1. Введение

Многослойные обменно-связанные металлические магнитные сверхрешетки, обладающие эффектом гигантского магнитосопротивления (ГМС), находят широкое применение в устройствах спин-

троники и радиоэлектроники [1, 2]. Одними из часто используемых магнитных материалов, слои которого входят в состав магнитных сверхрешеток, являются сплавы $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$, используемые совместно, например, со слоями Cu. Ранее было установлено, что замена в сверхрешетках Co/Cu кобальта

на сплав $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ приводит к увеличению эффективного магнитного момента на атом [3], повышению магнитосопротивления и уменьшению магнитного гистерезиса [3, 4], а также к улучшению термической стабильности [5].

При изменении толщины слоев меди в сверхрешетках $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x/\text{Cu}$ наблюдается осциллирующий характер изменения межслойного обменного взаимодействия с периодом осцилляций около 12 Å, сопровождающийся периодическим изменением величины ГМС [4].

Ранее наибольшие для системы CoFe/Cu значения магнитосопротивления 63 и 55% были получены, соответственно, в работах [6] и [7] при толщинах слоев меди $t_{\text{Cu}} = 9$ Å и $t_{\text{Cu}} = 10$ Å, что соответствует первому максимуму антиферромагнитного межслойного обменного взаимодействия. При этом поле магнитного насыщения составляло $H_s = 3-5$ кЭ. Недавно авторами работы [8] были получены рекордные значения магнитосопротивления 81% при комнатной температуре в сверхрешетках $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}(1.5\text{нм})/\text{Cu}0.95\text{нм}]_{24}$.

Известно, что магнитные и магнитотранспортные свойства зависят от структурных особенностей слоёв и межслойных границ, формируемых в процессе приготовления [9, 10]. Для исследования состояния межслойных границ и структурных особенностей слоёв успешно применяется метод ядерного магнитного резонанса [11–14]. Ранее авторами работы [15] было проведено исследование состояния межслойных границ в сверхрешетках $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}(1.5\text{нм})/\text{Cu}0.95\text{нм}]_{12}$ при температурах отжига 400 и 450 °С.

Исследования методом ЯМР способны дать информацию о кристаллической структуре Co (ГЦК, ГПУ, наличие дефектов упаковки), обнаружить напряженное состояние в слоях и получить данные о структуре интерфейсов. Основная идея использования метода ЯМР при исследовании многослойных структур Co/Cu и CoFe/Cu заключается в следующем. В результате сверхтонкого взаимодействия, магнитные моменты атомов кобальта создают в месте расположения ядер ^{59}Co локальные магнитные поля, величина и направление которых существенно зависят от магнитных и структурных особенностей ближайшего окружения ядра-зонда. Метод ЯМР позволяет исследовать распределение этих локальных полей в образце, а потому является мощным методом изучения структурных характеристик многослойных наноструктур.

Цель работы заключается в исследовании структуры межслойных границ в сверхрешетках $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}$ и определении влияния состояния границ на магниторезистивные свойства сверхрешеток. Состояние интерфейсов изменялось путем термообработки образцов в интервале температур 300–450 °С.

2. Образцы и методика эксперимента

Образцы были приготовлены в напылительной системе Ulvac MPS-4000-C6 методом магнетронного напыления при постоянном токе на стеклянные подложки (Corning). Поверхность подложки перед напылением очищали ионным травлением в атмосфере аргона в напылительной системе. Материал защитного слоя – Ta толщиной 5 нм. В качестве буферного слоя использовался композит $\text{Ta}(5\text{нм})/\text{PyCr}(5\text{нм})$, содержащий парамагнитный сплав пермаллой-хром (PyCr) состава $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$.

Напыление сверхрешеток выполнялось при комнатной температуре подложки, фиксированном давлении аргона 0.1 Па и мощности магнетронов 100 Вт. Структурная формула образцов имеет следующий вид: $\text{Стекло}/\text{Ta}(5\text{нм})/\text{PyCr}(5\text{нм})/[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}(1.6\text{нм})/\text{Cu}(0.95\text{нм})]_{12}/\text{Ta}(5\text{нм})$. В дальнейшем приготовленные образцы были отожжены при температурах $T_{\text{отж}} = 300, 350, 400, 450$ °С при давлении $P = 10^{-5}$ Па в течение 1 ч.

Рентгенографические исследования выполнены при использовании программно-аппаратного комплекса Philips Empyrean в излучении $\text{CuK}\alpha$.

Методом ядерного магнитного резонанса на ядрах ^{59}Co были получены спектры исследуемых образцов в диапазоне частот 130–260 МГц. Съёмки спектров были выполнены на импульсном спектрометре ЯМР при температуре жидкого гелия (4.2 К) в локальном магнитном поле – внешнее магнитное поле отсутствовало. Сигнал спинового эха формируется последовательностью двух когерентных радиочастотных импульсов $(\tau_p)_x - t_{\text{del}} - (\tau_p)_y - t_{\text{del}} - \text{echo}$, создающих в резонансной катушке с образцом переменное магнитное поле с амплитудой круговой компоненты $H_1 \approx 10$ Э. Длительность импульсов τ_p составляла 0.5 мкс; временной промежуток между импульсами $t_{\text{del}} - 11$ мкс; шаг изменения частоты – 1 МГц.

Сигнал ЯМР в магнитных материалах обусловлен ядерным откликом на РЧ-поле возбуждения и коэффициентом усиления ЯМР.

Интенсивности скорректированы на $t_{\text{del}} \approx 0$ путём определения скорости затухания сигнала спинового эха при различных частотах спектра. Добротность катушки ЯМР, импеданс резонансного контура и насыщение усилителя мощности контролировались посредством постоянства переднего фронта волны и амплитуды радиочастотного импульса в каждой точке всего спектра.

Коэффициент усиления ЯМР, η , был определён для каждой линии спектра. Было обнаружено, что величина η остаётся практически неизменной: $\Delta\eta / \eta \leq 0.15$. Соответствующие поправки ΔQ , $\Delta\eta$ и T_2 были использованы при расчёте интенсивности линий спектра.

Таким образом, напрямую определена доля кобальта, участвующего в формировании сигнала при заданной частоте.

Магнитосопротивление было измерено по стандартной методике четырёхконтактным методом на постоянном токе при протекании тока в плоскости слоёв. Все измерения выполнены при комнатной температуре. Магнитосопротивление определяли по формуле: $MR = (R(H) - R_s) / R_s$, где R_s – сопротивление в поле магнитного насыщения.

3. Результаты и обсуждение

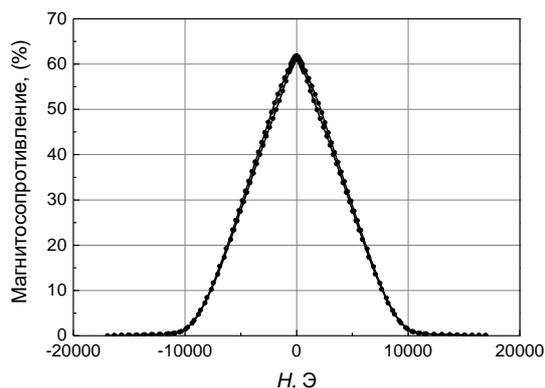


Рис. 1. Полевая зависимость магнитосопротивления сверхрешетки *Стекло//Ta(5нм)/PyCr(5нм)/[Co₉₀Fe₁₀(1.6нм)/Cu(0.95нм)]₁₂/Ta(5нм)* после напыления

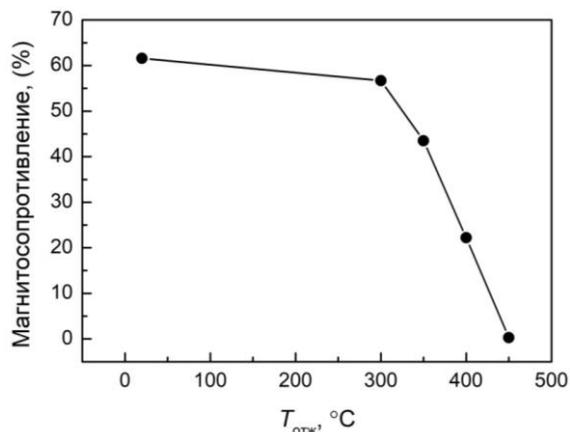


Рис. 2. Зависимость магнитосопротивления образцов *Стекло//Ta(5нм)/PyCr(5нм)/[Co₉₀Fe₁₀(1.6нм)/Cu(0.95нм)]₁₂/Ta(5нм)* от температуры отжига

После напыления максимальная величина магнитосопротивления составляет $\Delta R/R_s = 61.6\%$, поле магнитного насыщения $H_s = 10$ кЭ (рис. 1). При увеличении температуры отжига ($T_{отж}$) до 300 °C магнитосопротивление незначительно уменьшается до 56.7% . При дальнейшем повышении $T_{отж}$ до 450 °C происходит падение магнеторезистивного эффекта до 0.3% (рис. 2).

Видно, что приготовленные сверхрешетки $[Co_{90}Fe_{10}(1.6нм)/Cu(0.95нм)]_{12}$ на первом максимуму

ме антиферромагнитного обменного взаимодействия обладают высокой термостабильностью магнеторезистивных свойств по сравнению со сверхрешетками Co/Cu, близкими по толщине к исследованным [14, 16]. В образцах $[Co(1.5нм)/Cu(0.9нм)]_{10}$ значительное уменьшение магнитосопротивления наблюдалось в более низком интервале температур ($T_{отж} = 150\text{--}300$ °C) [16].

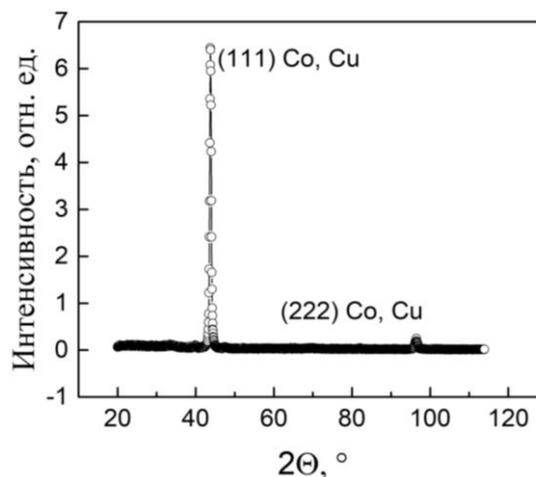


Рис. 3. Рентгеновская дифрактограмма образца *Стекло//Ta(5нм)/PyCr(5нм)/[Co₉₀Fe₁₀(1.6нм)/Cu(0.95нм)]₁₂/Ta(5нм)* после напыления

На рис. 3 показана рентгеновская дифрактограмма образца после напыления. На дифрактограмме присутствует только набор линий, отвечающих за отражение от плоскостей {111}. Таким образом, в исследуемом образце формируется аксиальная текстура с осью $\langle 111 \rangle$, перпендикулярной плоскости подложки, что также подтверждается данными электронно-микроскопического исследования. По данным электронной микроскопии образцы характеризуются нанокристаллической структурой со средним размером кристаллитов $20\text{--}40$ нм. Запись спектров ЯМР была произведена в соответствии с использованной методикой. На рис. 4. представлены примеры моделирования спектров, где маркерами в виде окружности приведены экспериментальные данные, штриховой линией показаны Гауссовы пики, каждый из которых соответствует определённому типу ближайшего окружения ядра-зонда, сплошной линией – итоговый смоделированный спектр.

В ходе обработки экспериментальных данных выполнялась нормализация интенсивности спинового эха на единицу. Если ядро-зонд находится в объёме слоя Co, то в ближайшем окружении все возможные 12 позиций будут заняты атомами Co, в результате чего сверхтонкое поле на ядре-зонде составит примерно $B = 21.8$ Т, резонансная частота – 217.4 МГц [9]. Согласно ранее разработанной модели [11–16], замещение одного атома кобальта одним атомом меди в ближайшем окружении ядра-

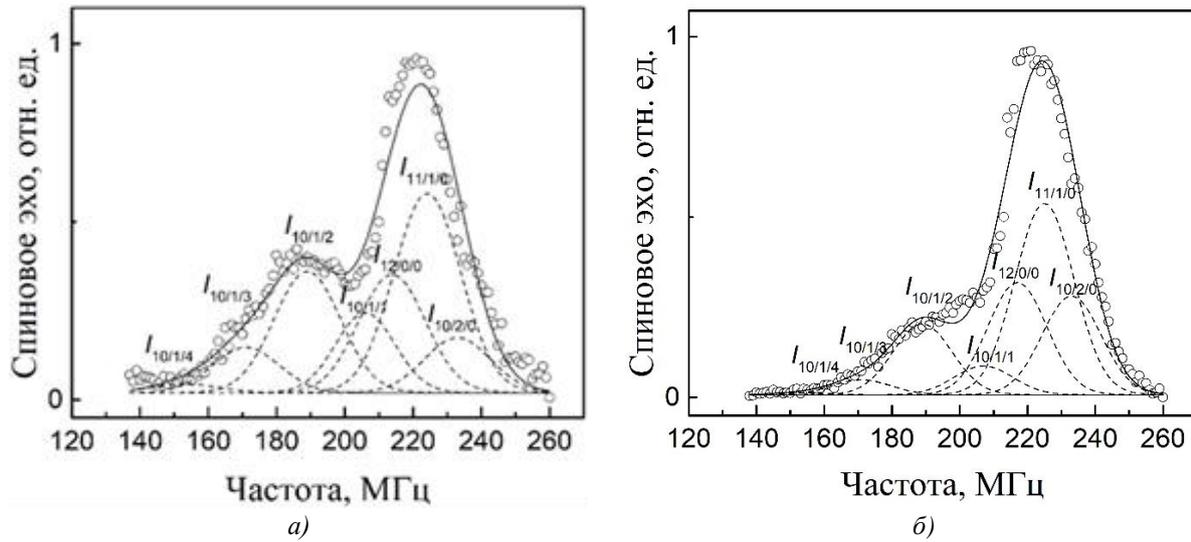


Рис. 4. Спектры ЯМР для образца Стекло//Ta(5нм)/PyCr(5нм)/[CoFe(1.6нм)/Cu(0.95нм)]₁₂Ta(5нм): а – после напыления; б – после отжига при 450 °С в течение 1 ч

зонда обуславливает уменьшение сверхтонкого поля на ядре-зонде и, соответственно, уменьшение резонансной частоты примерно на 18 МГц. При наличии текстуры <111> ядро-зонд в совершенной межслойной границе Co/Cu имеет в ближайшем окружении 9 атомов Co и 3 атома Cu и резонансную частоту примерно на 168 МГц. Поскольку в настоящей работе ферромагнитный слой – сплав Co₉₀Fe₁₀, то необходимо учесть конфигурации ближайшего окружения с учётом атомов железа. В случае ГЦК решётки, при замещении одного атома кобальта одним атомом железа в ближайшем окружении ядра-зонда, происходит увеличение резонансной частоты на 8 МГц [17].

Для удобства описания спектра выбраны следующие обозначения: $I_{12/0/0}$ (ближайшее окружения ядра зонда: 12 атомов Co, 0 – Fe, 0 – Cu), $I_{10/1/1}$ (ближайшее окружение ядра-зонда: 10 атомов Co, 1 – Fe, 1 – Cu). При моделировании варьировались следующие параметры Гауссовых пиков: положение (частота), интенсивность, ширина линии. Для проверки полученных результатов моделирование проводилось с различными наборами начальных условий. Компьютерная обработка экспериментальных спектров ЯМР осуществлялась в программе UnivemMS.

Гауссов пик $I_{12/0/0}$ на частоте 217 МГц соответствует ядру-зонду, находящемуся в объёме слоя CoFe, и, соответственно, имеет в ближайшем окружении 12 атомов Co. Также к объемному слою мы относим Гауссовы пики $I_{10/1/0}$ и $I_{10/2/0}$, принадлежащие объемному слою CoFe с одним и двумя соседями Fe на частотах 225 и 233 МГц, соответственно. Соотношение интенсивности пиков $I_{12/0/0}$, $I_{10/1/0}$ и $I_{10/2/0}$ приблизительно соответствуют вероятным конфигурациям с 0; 1 и 2 атомами Fe в слое CoFe, рассчитанных при помощи биномиального распределения.

Высокосовершенной границей мы считаем пик $I_{8/1/3}$ на частоте ~176 МГц (ближайшее окружение ядра-зонда: 8 атомов Co, 1 – Fe, 3 – Cu). Долю высокосовершенных границ можно определить через отношение суммы $I_{8/1/3}$ к сумме интенсивностей остальных спектральных линий, кроме характеризующих ядро-зонд внутри слоя CoFe как $I_{8/1/3} / \sum_{interfaces}$. Полученная зависимость доли высокосовершенных границ от температуры отжига приведена на рис. 5.

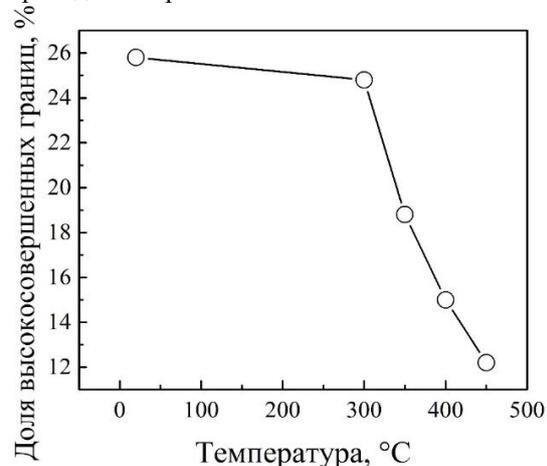


Рис. 5. Доля высокосовершенных границ в зависимости от температуры отжига

Видно, что полученная зависимость доли высокосовершенных интерфейсов коррелирует с величиной магнитосопротивления. Доля высокосовершенных интерфейсов образца после напыления составляет ~26%. При повышении $T_{отж}$ до 300 °С доля границ практически не изменяется, уменьшаясь далее до 18% ($T_{отж} = 350$ °С). И, наконец, падает до 12% ($T_{отж} = 450$ °С), что соответствует практически полному исчезновению эффекта ГМС в образце.

4. Заключение

Методами ядерного магнитного резонанса, электронной микроскопии и рентгеновской дифракции исследованы структурные особенности сверхрешеток Стекло// Ta(5нм) / PyCr(5нм) / [Co₉₀Fe₁₀(1.6нм)/ Cu(0.95нм)]₁₂/Ta(5нм), определено влияние состояния интерфейсов CoFe/Cu на их магнеторезистивные свойства.

Показано, что при увеличении температуры отжига происходит уменьшение магнитосопротивления, что, вероятно, обусловлено уменьшением доли высокосовершенных интерфейсов.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Функция» № АААА-А19-119012990095-0 и проекту № 18-10-2-37 Программы УрО РАН.

Список литературы

1. *Wetzig K., Schneider C. M.* Metal Based Thin Films for Electronics. Wiley, Weinheim, 2003.
2. *Mallinson J. C.* Magnetoresistive and spin valve heads. Fundamentals and applications. Academic Press, San Diego, 2002. 184 p.
3. *Kataoka N., Saito K., Fujimori H.* Magnetoresistance of Co-X/Cu multilayers // *Journal of Magnetism and Magnetic Material*. 1993. Vol. 121. P. 383–385. DOI: 10.1016/0304-8853(93)91226-W
4. *Saito Y., Inomata K., Yusu K., Goto A., Yasuoka H.* Correlation between the interface structure and magnetic and transport properties for Co/Cu(110) and Ni₈Fe₂/Cu/Co/Cu(110) superlattices // *Physical Review B*. 1995. Vol. 52, N. 9, P. 6500–6512. DOI: 10.1103/PhysRevB.52.6500
5. *Wang D., Anderson J., Daughton J. M.* Thermally stable, low saturation field, low hysteresis, high GMR CoFe/Cu multilayers // *IEEE Transactions on Magnetism*. 1997. Vol. 33, № 5. P. 3520–3522. DOI: 10.1109/20.619484
6. *Kuch W., Marley A. C., Parkin S. S. P.* Seeded epitaxy of Co₉₀Fe₁₀/Cu multilayers on MgO(001): Influence of Fe seed layer thickness // *Journal of Applied Physics*. 1998. Vol. 83. № 9. P. 4709–4713. DOI:10.1063/1.367259
7. *Kano H., Iwasaki Y., Hayashi K., Aso K.* Magnetoresistance of Co-X/Cu (X = Fe, Ni) multi-layers // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1993. Vol. 126. P. 445–447. DOI: 10.1016/0304-8853(93)90651-H
8. *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. Vol. 118. P. 1300–1359. DOI:10.1134/S0031918X17130038
9. *Thomson T., Riedi P. C., Greig D.* Interfacial quality and giant magnetoresistance in MBE-grown

- Co/Cu(111) superlattices // *Physical Review B*. 1994. Vol. 50. № 14. P.10319–10322. DOI: 10.1103/PhysRevB.50.10319
10. *Thomson T., Riedi P. C., Wellock K. P., Hickley B. J.* ⁵⁹Co nuclear magnetic resonance studies of interfacial defects in molecular beam epitaxy grown Co/Cu(111) multilayer // *Journal of Applied Physics*. 1995. Vol. 81. №. 8. P. 4469–4471. DOI: 10.1063/1.364980
11. *Chuprakov S. A., Krinitsina T.P., Bannikova N.S., Blinov I. V., Verkhovskii S. V., Milyaev M. A., Popov V. V., Ustinov V. V.* Interface structure and magnetoresistance studies of [Co/C]_n superlattices by means of NMR and TEM // *Solid State Phenomena*. 2014. Vol. 215. P. 358–364. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.215.358
12. *Chuprakov S. A., Bannikova N. S., Blinov I. V., Krinitsina T. P., Milyaev M. A., Popov V. V., Ustinov V. V.* Investigation of interfaces of multilayer Co/Cu structures using the method of nuclear magnetic resonance // *Physics of Metals and Metallography*. 2015. Vol. 116. P. 136–140. DOI: 10.1134/S0031918X15020040
13. *Chuprakov S. A., Bannikova N. S., Blinov I. V., Krinitsina T. P., Milyaev M. A., Popov V. V., Ustinov V. V.* Study of the structure of interlayer boundaries in [Co/Cu]₁₀ superlattices by methods of NMR and X-ray reflectometry // *Physics of Metals and Metallography*. 2016. Vol. 117. P.1192–1197. DOI: 10.1134/s0031918x16120048
14. *Chuprakov S. A., Bannikova N. S., Blinov I. V., Krinitsina T. P., Milyaev M. A., Popov V. V., Ryabukhina M. V., Ustinov V. V.* Influence of the interface state on the magnetoresistive properties of Co/Cu superlattices // *Physics of Metals and Metallography*. 2018. Vol. 119. P. 309–315.
15. *Chuprakov S. A., Blinov I. V., Milyaev M. A., Popov V. V.* Effect of heat treatment on the state of interlayer interfaces and magnetoresistive properties of Co₉₀Fe₁₀/Cu superlattices // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2018. Vol. 4. P. 34–41. DOI: 10.17804/2410-9908.2018.4.034-041
16. *Чупраков С. А., Блинов И. В., Милыев М. А., Попов В. В.* Изменение состояния межслойных границ сверхрешеток [Co/Cu]₁₀ в процессе термообработки // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2018. № 2 (40). С. 45–51. DOI: 10.17072/1994-3598-2018-2-45-51
17. *Thomson T., Riedi P. C.* NMR studies of sputtered CoFe alloy thin films // *IEEE Transactions on Magnetism*. 1998. Vol. 34. № 4. P. 1045–1047. DOI: 10.1109/20.706352

References

1. *Wetzig K., Schneider C. M.* Metal based thin films for electronics. Wiley, Weinheim, 2003.

2. Mallinson J. C. *Magnetoresistive and spin valve heads. Fundamentals and applications*. Academic Press, San Diego, 2002. 184 p.
3. Kataoka N., Saito K., Fujimori H. Magnetoresistance of Co-X/Cu multilayers. *Journal of Magnetism and Magnetic Material*, 1993, vol. 121, pp. 383–385. DOI: 10.1016/0304-8853(93)91226-W
4. Saito Y., Inomata K., Yusu K., Goto A., Yasuoka H. Correlation between the interface structure and magnetic and transport properties for Co/Cu(110) and Ni₈Fe₂/Cu/Co/Cu(110) superlattices. *Physical Review B*, 1995, vol. 52, no. 9, pp. 6500–6512. DOI: 10.1103/PhysRevB.52.6500
5. Wang D., Anderson J., Daughton J. M. Thermally stable, low saturation field, low hysteresis, high GMR CoFe/Cu multilayers. *IEEE Transactions on Magnetism*, 1997, vol. 33, no. 5, pp. 3520–3522. DOI: 10.1109/20.619484
6. Kuch W., Marley A. C., Parkin S. S. P. Seeded epitaxy of Co₉₀Fe₁₀/Cu multilayers on MgO(001): Influence of Fe seed layer thickness. *Journal of Applied Physics*, 1998, vol. 83, no. 9, pp. 4709–4713. DOI: 10.1063/1.367259
7. Kano H., Iwasaki Y., Hayashi K., Aso K. Magnetoresistance of Co-X/Cu (X = Fe, Ni) multi-layers // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1993. Vol. 126. P. 445–447. DOI: 10.1016/0304-8853(93)90651-H
8. 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, vol. 118, pp. 1300–1359. DOI: 10.1134/S0031918X17130038
9. Thomson T., Riedi P. C., Greig D. Interfacial quality and giant magnetoresistance in MBE-grown Co/Cu(111) superlattices. *Physical Review B*, 1994, vol. 50, no. 14, pp. 10319–10322. DOI: 10.1103/PhysRevB.50.10319
10. Thomson T., Riedi P. C., Wellock K. P., Hickey B. J. ⁵⁹Co nuclear magnetic resonance studies of interfacial defects in molecular beam epitaxy grown Co/Cu(111) multilayer. *Journal of Applied Physics*, 1995, vol. 81, no. 8, pp. 4469–4471. DOI: 10.1063/1.364980
11. Chuprakov S. A., Krinitsina T. P., Bannikova N. S., Blinov I. V., Verkhovskii S. V., Milyaev M. A., Popov V. V., Ustinov V. V. Interface structure and magnetoresistance studies of [Co/C]_n superlattices by means of NMR and TEM. *Solid State Phenomena*, 2014, vol. 215, pp. 358–364. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.215.358
12. Chuprakov S. A., Bannikova N. S., Blinov I. V., Krinitsina T. P., Milyaev M. A., Popov V. V., Ustinov V. V. Investigation of interfaces of multilayer Co/Cu structures using the method of nuclear magnetic resonance. *Physics of Metals and Metallography*, 2015, vol. 116, pp. 136–140. DOI: 10.1134/S0031918X15020040
13. Chuprakov S. A., Bannikova N. S., Blinov I. V., Krinitsina T. P., Milyaev M. A., Popov V. V., Ustinov V. V. Study of the structure of interlayer boundaries in [Co/Cu]₁₀ superlattices by methods of NMR and X-ray reflectometry. *Physics of Metals and Metallography*, 2016, vol. 117, pp. 1192–1197. DOI: 10.1134/s0031918x16120048
14. Chuprakov S. A., Bannikova N. S., Blinov I. V., Krinitsina T. P., Milyaev M. A., Popov V. V., Ryabukhina M. V., Ustinov V. V. Influence of the interface state on the magnetoresistive properties of Co/Cu superlattices. *Physics of Metals and Metallography*, 2018, vol. 119, pp. 309–315.
15. Chuprakov S. A., Blinov I. V., Milyaev M. A., Popov V. V. Effect of heat treatment on the state of interlayer interfaces and magnetoresistive properties of Co₉₀Fe₁₀/Cu superlattices. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*, 2018, vol. 4, pp. 34–41. DOI: 10.17804/2410-9908.2018.4.034-041
16. Chuprakov S. A., Blinov I. V., Milyaev M. A., Popov V. V. Modification of the state of interlayer interfaces in [Co/Cu]₁₀ superlattices under heat treatment. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2018, no. 2 (40), pp. 45–51. DOI: 10.17072/1994-3598-2018-2-45-51
17. Thomson T., Riedi P. C. NMR studies of sputtered CoFe alloy thin films. *IEEE Transactions on Magnetism*, 1998, vol. 34, no. 4, pp. 1045–1047. DOI: 10.1109/20.706352

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Чупраков С.А., Блинов И.В. Влияние состояния интерфейсов на магниторезистивные свойства сверхрешеток [Co₉₀Fe₁₀/Cu]₁₂ // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2019. № 4. С. 11–16. doi: 10.17072/1994-3598-2019-4-11-16

Please cite this article in English as:

Chuprakov S. A., Blinov I. V. The influence of the state of interfaces on the magnetoresistive properties of [Co₉₀Fe₁₀/Cu]₁₂ superlattices. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2019, no. 4, pp. 11–16. doi: 10.17072/1994-3598-2019-4-11-16