

УДК 539.216.2:543.429.3  
PACS 68.35.Ct: 68.65.Cd

## Изменение состояния межслойных границ сверхрешеток [Co/Cu]<sub>10</sub> в процессе термообработки

С. А. Чупраков, И. В. Блинов, М. А. Миляев, В. В. Попов

Институт физики металлов УрО РАН  
620108, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18  
e-mail: chuprakov@imp.uran.ru

Цель работы состоит в исследовании структурных особенностей сверхрешеток [Co/Cu]<sub>10</sub> и определении влияния состояния межслойных границ Co/Cu на их магнитные и магниторезистивные характеристики. Сверхрешетки стекло//Fe(5нм)/[Co(1.5нм)/Cu(0.9нм)]<sub>10</sub>/Cr(2нм) были приготовлены магнетронным напылением на высоковакуумной напылительной системе Ulvac MPS-4000-C6. Структурные свойства образцов исследовались при помощи электронной микроскопии и рентгенографических исследований. Магнитосопротивление было измерено при комнатной температуре по стандартной методике четырёхконтактным методом на постоянном токе при протекании тока в плоскости слоёв. Состояние межслойных границ изменялось путем отжига при температурах 150, 200, 300 °С в течение 1 ч. Методом ядерного магнитного резонанса на ядрах <sup>59</sup>Co были получены спектры исследуемых образцов в диапазоне частот 80–240 МГц. Съёмки спектров были выполнены на импульсном спектрометре ЯМР при температуре жидкого гелия в локальном поле. Поправки Δ*Q*, Δ*η* и *T*<sub>2</sub> были использованы при расчёте интенсивности линий спектра. Проведенные исследования показали, что в исследуемых сверхрешетках после напыления максимальная величина магнитосопротивления составляет 34%. При увеличении температуры отжига до 300 °С магнитосопротивление уменьшается до 15 %. Показано, что уменьшение магнитосопротивления с увеличением температуры отжига обусловлено изменением состояния интерфейсов, а именно, уменьшением доли высокосовершенных интерфейсов и возрастанием числа атомов кобальта, участвующих в формировании межслойных границ.

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

*Поступила в редакцию 03.04.2018; принята к опубликованию 18.04.2018*

## Modification of the state of interlayer interfaces in [Co/Cu]<sub>10</sub> superlattices under heat treatment

S. A. Chuprakov, I. V. Blinov, M. A. Milyaev, V. V. Popov

Institute of Metal Physics, UB RAS, 620108, Ekaterinburg, S. Kovalevskaya str., 18  
e-mail: chuprakov@imp.uran.ru

The goal of the study is the investigation of specific features of the structure of [Co/Cu]<sub>10</sub> superlattices and determination of the effect of the state of Co/Cu interfaces on their magnetic and magnetoresistive characteristics. The glass//Fe(5nm)/[Co(1.5nm)/Cu(0.9nm)]<sub>10</sub>/Cr(2nm) superlattices

were fabricated by magnetron sputtering in high-vacuum sputtering system Ulvac MPS-4000-C6. The structural features of specimens were studied by electron microscopy and X-ray analysis. The magnetoresistance was studied at room temperature by a standard four-contact method at constant current flowing in layer planes. The state of interlayer interfaces was changed by annealing at 150, 200, 300 °C for 1 h. The spectra of the specimens under study were obtained by nuclear magnetic resonance on  $^{59}\text{Co}$  nuclei in the frequency range of 80-240 MHz. The spectra were taken on an impulse NMR spectrometer at the liquid helium temperature in a local field. The  $\Delta Q$ ,  $\Delta\eta$  and T2 corrections were used to calculate the spectra lines intensities. These studies have shown that in the sputtered superlattices under investigation the maximal magnetoresistance is 34 %. When the annealing temperature is increased up to 300 °C, the magnetoresistance decreases to 15 %. It is demonstrated that the magnetoresistance decrease with the increasing annealing temperature is caused by changes in the interfaces state, namely, the decrease of the fraction of high-perfect interfaces and the increase of the number of Co atoms participating in the formation of interlayer interfaces

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

Received 03.04.2018; accepted 18.04.2018

doi: 10.17072/1994-3598-2018-2-45-51

## 1. Введение

Магнитные металлические сверхрешетки с гигантским магниторезистивным (ГМР) эффектом являются одним из видов металлических многослойных наноструктур, которые используются в современных магниточувствительных устройствах радиоэлектроники и спинтроники [1,2]. Как известно, сверхрешетки Co/Cu обладают наибольшим магнитосопротивлением по сравнению с другими типами металлических наноструктур [3–5]. При этом их магнитные и магнитотранспортные свойства зависят от структурных особенностей слоев и интерфейсов, формируемых в процессе напыления.

Одним из методов исследования состояния интерфейсов является хорошо зарекомендовавший себя метод рентгеновской рефлектометрии [6,7]. Однако при обработке рефлектограмм варьируется значительное число параметров, что делает правильную интерпретацию экспериментальных данных довольно затруднительной. Вследствие этого при оценке состояния межслойных границ желательно задействовать альтернативный метод. Ранее метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР) уже успешно применялся для исследования магнитных свойств и структурных особенностей сверхрешеток на основе Co/Cu [8–13].

Основная идея использования метода ЯМР при исследовании многослойных структур Co/Cu заключается в том, что в результате сверхтонкого взаимодействия магнитные моменты атомов кобальта создают в месте расположения ядер  $^{59}\text{Co}$  локальные магнитные поля, величина и направление которых существенно зависят от магнитных и структурных особенностей ближайшего окружения ядра-зонда. ЯМР позволяет исследовать распределение этих локальных полей в образце, а потому

является мощным методом изучения структурных характеристик многослойных наноструктур.

В настоящей работе ставилась задача исследовать структурные особенности сверхрешеток и влияние состояния интерфейсов Co/Cu на их магнитные и магниторезистивные характеристики. Состояние межслойных границ изменялось при помощи отжига образцов при различных температурах в течение 1 ч.

## 2. Образцы и методика эксперимента

Образцы были приготовлены на напылительной системе Ulvac MPS-4000-C6 методом магнетронного напыления при постоянном токе на стеклянные подложки (Corning). Поверхность подложки, перед напылением, очищалась ионным травлением в атмосфере аргона в напылительной системе. Для защиты образцов от окисления был напылен слой Cr толщиной 2 нм. В качестве буферного слоя использовано Fe – 5 нм.

Напыление сверхрешеток выполнялось при комнатной температуре подложки, при фиксированном давлении аргона 0.1 Па и мощности магнетронов 100 Вт. Указанные условия позволили распылять материалы мишеней Fe, Co, Cu и Cr со скоростями 2.7, 3, 6.9 и 3 нм/мин, соответственно. Структурная формула образцов имела следующий вид: Стекло // Fe(5нм) / [Co(1.5нм) / Cu(0.9нм)]<sub>10</sub> / Cr(2нм). В дальнейшем приготовленные образцы были отожжены при температурах  $T_{\text{отж}} = 150, 200, 300$  °C при давлении  $P = 10^{-5}$  Па в течение 1 ч. Исследование структуры образцов проводилось на электронном микроскопе Tecnaï G-30. Для изготовления образцов для электронной микроскопии поверхности пленки использовалась специальная методика, заключающаяся в скалывании подложки под определенным углом с целью получения кусочка пленки, выступающего за край подложки.

Рентгеновские исследования образцов выполнялись при использовании программно-аппаратного комплекса Philips Empyrean. Съёмка проводилась в излучении  $\text{CoK}_\alpha$  [14].

Методом ядерного магнитного резонанса на ядрах  $^{59}\text{Co}$  были получены спектры исследуемых образцов в диапазоне частот 80–240 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  $n_1 \approx 10$  Э. Длительность импульсов  $\tau_p$  составляла 0.5 мкс, временной промежуток между импульсами  $t_{\text{del}} - 20$  мкс. Шаг изменения частоты составлял 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,  $\eta$  был определён для каждой линии спектра. Было обнаружено, что величина  $\eta$  остаётся практически неизменной:  $\Delta\eta/\eta \leq 0.15$ . Соответствующие поправки  $\Delta Q$ ,  $\Delta\eta$  и  $T_2$  были использованы при расчёте интенсивности линий спектра.

Таким образом, прямо получена 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 выполнялись при комнатной температуре. Магнитосопротивление определялось по формуле:  $MR = (R(H) - R_s)/R_s$ , где  $R_s$  – сопротивление в поле магнитного насыщения,  $R(H)$  – сопротивление при определенном поле.

### 3. Результаты и обсуждение

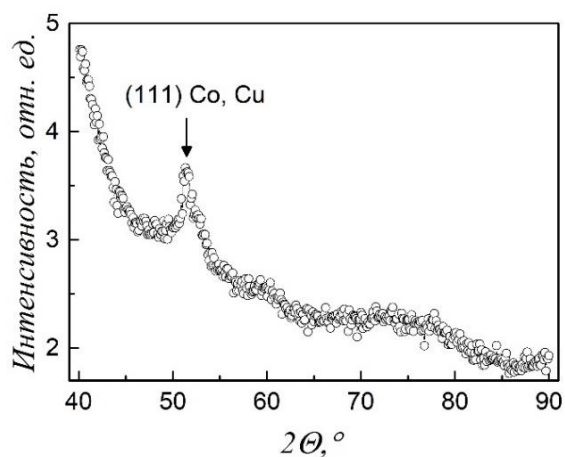
Проведенные исследования показали, что в сверхрешётках Co/Cu после напыления максимальная величина магнитосопротивления составляет  $\Delta R/R_s = 34\%$ , поле магнитного насыщения  $H_s = 8$  кЭ. При увеличении температуры отжига от 150 °С до 300 °С магнитосопротивление уменьшается от 29 до 15 %, соответствующие данные представлены в таблице.

Электронно-микроскопическое исследование показало, что образцы характеризуются нанокристаллической структурой, средний размер кристаллитов составляет около 20 нм.

*Зависимость магнитосопротивления от температуры отжига образца Стекло // Fe(5нм)/[Co(1.5нм)/Cu(0.9нм)]<sub>10</sub>/Cr(2нм)*

T (°C)	MR (%)
После напыления	34
150	29
200	26
300	15

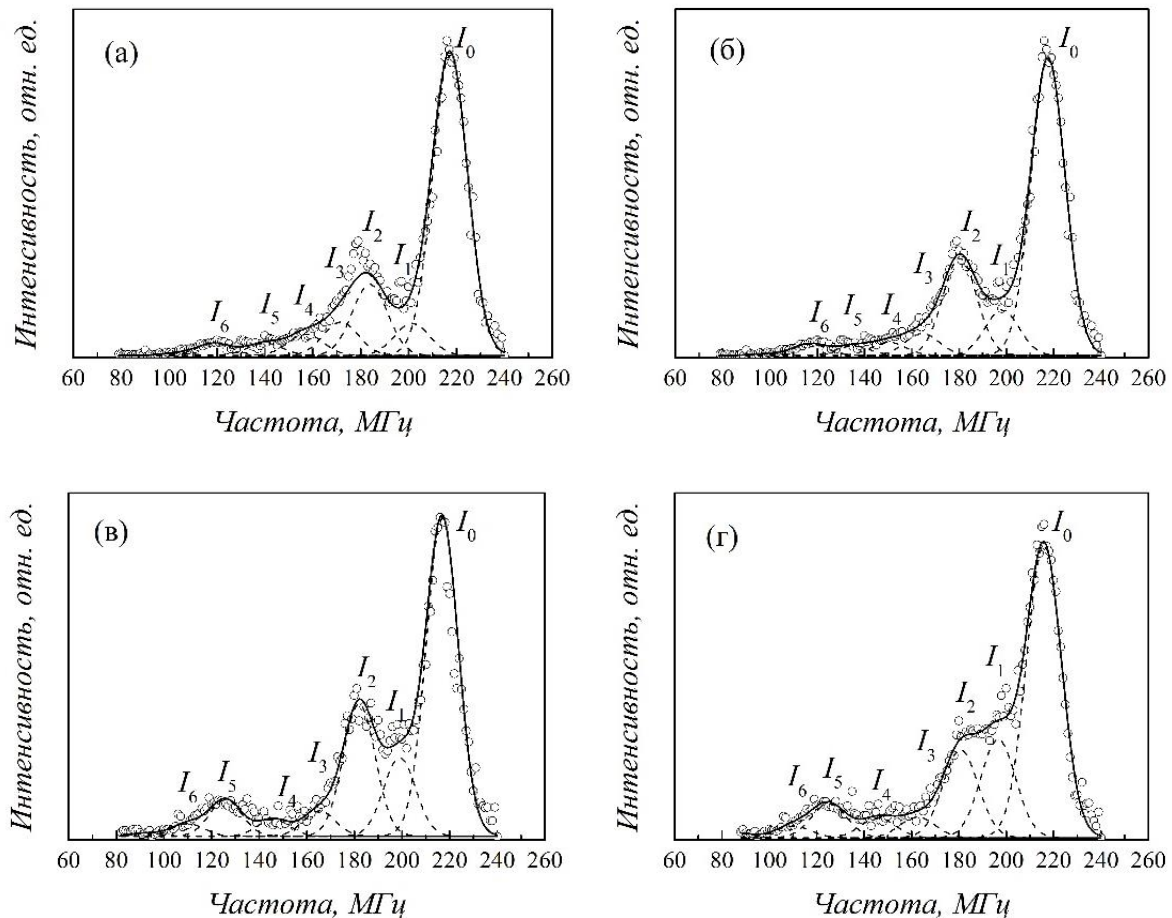
На рис. 1 показана рентгеновская дифрактограмма образца после напыления. На дифрактограмме присутствуют только одна линия, отвечающая за отражение от плоскостей {111}. Таким образом, в исследуемом образце формируется аксиальная текстура с осью <111>, перпендикулярной плоскости подложки.



**Рис. 1.** Рентгеновская дифрактограмма образца Стекло // Fe(5нм) / [Co(1.5нм) / Cu(0.9нм)]<sub>10</sub> / Cr(2нм)

Съёмка спектров ЯМР была произведена в диапазоне частот 80–240 МГц. Спектры моделируются набором гауссиан, каждая из которых соответствует ядру-зонду  $^{59}\text{Co}$  с определённым типом ближайшего окружения [12].

На рис. 2 приведены обработанные спектры ЯМР для образца после напыления (рис. 2, а), после отжига при 150 °С (рис. 2, б), после отжига при 200 °С (рис. 2, в) и после отжига при 300 °С – 1 ч. (рис. 2, г). Сплошная линия на рис. 2 показывает, что экспериментальный ЯМР-спектр хорошо аппроксимируется семью Гауссианами, расположенными на одинаковом расстоянии (они изображены штриховыми линиями). При обработке спектра варьировались следующие параметры: ширина линий (одинаковая для всех линий), положение пиков, а также их интенсивности.



**Рис.2.** Спектры ЯМР для образца *Стекло/Fe(5нм)/[Co(1.5нм)/Cu(0.9нм)]<sub>10</sub>/Cr(2нм)*: а – после напыления, б – после отжига при 150 °С, в – после отжига при 200 °С, г – и после отжига при 300 °С, длительность отжига 1 ч

Самые интенсивные пики ( $I_0$ ) на рис. 2 имеют центр при 218 МГц, что близко к значению, полученному для объемного Co (217 МГц [13]). Следовательно, эта линия формируется атомами Co, расположенными в объеме слоев, которые имеют ГЦК структуру. Пик на 228 МГц, который возникает при наличии ГПУ-модификации Co, отсутствует, показывая, что в исследуемых образцах отсутствуют ГПУ-модификация Co и дефекты упаковки, что согласуется с данными электронно-микроскопического исследования.

Компоненты с более низкими резонансными частотами, чем у объемной линии, связаны с атомами Co, расположенными в интерфейсах, где один или более ближайших соседей атомов Co замещены атомами Cu. Положение пиков не изменяется в зависимости от температуры отжига. Среднее расстояние между пиками составляет 17.5 МГц, что соответствует литературным данным [13,15]. Таким образом, линии  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_4$ ,  $I_5$  и  $I_6$  соответствуют атомам Co, имеющим 1, 2, 3, 4, 5 и 6 атомов Cu в ближайшем окружении, соответственно.

Внутреннюю структуру границ можно характеризовать долей участков «совершенного» сопряжения в общей поверхности интерфейсов. Наличие текстуры  $\langle 111 \rangle$  означает, что «совершенному» сопряжению соответствует ситуация, когда граница совпадает с кристаллографической плоскостью  $\{111\}$ . В этом случае каждому атому Co, расположенному на границе, соответствуют три атома Cu в ближайшем окружении.

Пик  $I_3$  сформирован ядрами атомов Co высокосовершенного интерфейса Co/Cu, совпадающего с плотноупакованной плоскостью  $\langle 111 \rangle$  ГЦК решетки, когда каждый атом Co имеет в ближайшем окружении три атома Cu. Следовательно, долю интерфейсных атомов, имеющих в окружении три атома меди, а значит, и долю высокосовершенных межслойных границ, можно определить как  $I_3 / \sum_{i=1}^6 I_i$ . В результате обработки спектров ЯМР было выявлено уменьшение участков доли высокосовершенных границ. Это иллюстрирует рис. 3, на котором показана зависимость, характеризующая интенсивностью пика на частоте  $\sim 164$  МГц от температуры отжига.

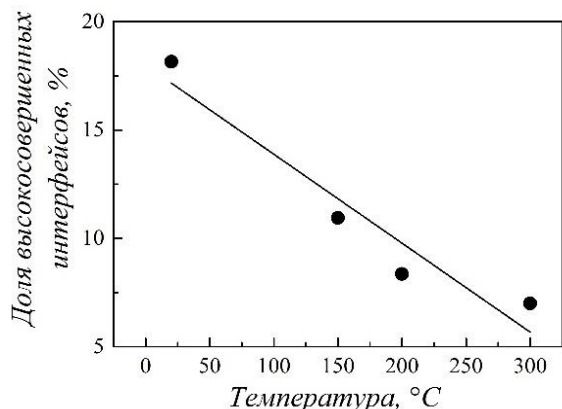


Рис. 3. Влияние отжига на долю высокосовершенных интерфейсов

Состояние межслойных границ можно также характеризовать долей атомов Co, локализованных в интерфейсах. Её можно определить как отношение суммарной интенсивности пиков, сформированных атомами, находящимися в интерфейсах, к суммарной интенсивности всех пиков, т.е.  $\sum_{i=1}^6 I_i / \sum_{i=0}^6 I_i$ . Влияние отжига на долю атомов Co, находящихся в межслойных границах, иллюстрирует рис. 4. В результате отжига доля атомов, участвующих в формировании интерфейсов, возрастает от 38 % для образца после напыления до 49% для образца после отжига при 300°C, 1 ч. Это свидетельствует о том, что при отжиге происходит размытие межслойных границ.

Таким образом, результаты исследований показывают, что при повышении температуры отжига происходит уменьшение доли участков высокосовершенного сопряжения межслойных границ, увеличивается доля атомов Co, участвующих в образовании интерфейсов, т.е. увеличивается ширина межслойных границ. По-видимому, именно влиянием этих факторов можно объяснить уменьшение магнитосопротивления при повышении температуры термообработки.

#### 4. Заключение

Методами электронной микроскопии, ядерного магнитного резонанса, рентгеновской дифракции исследованы структурные особенности сверхрешёток Стекло // Fe(5нм) / [Co(1.5нм) / Cu(0.9нм)]<sub>10</sub> / Cr(2нм) и влияние состояния интерфейсов Co/Cu на их магниторезистивные характеристики.

Показано, что с увеличением температуры отжига происходит уменьшение магнитосопротивления, что обусловлено изменением состояния интерфейсов: уменьшается доля высокосовершенных интерфейсов, возрастает число атомов кобальта, участвующих в формировании межслойных границ.

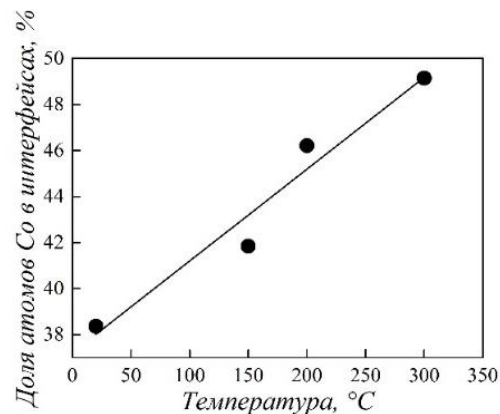


Рис. 4. Зависимость доли атомов кобальта, участвующих в формировании межслойных границ, от температуры отжига

Рентгеновские измерения проведены на дифрактометре Empyrean PANalytical Series 2 ЦКП ИФМ УрО РАН. Электронно-микроскопические исследования выполнены в ОЭМ ЦКП ИЦ НПМ.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Спин» №АААА-А18-118020290104-2 и проекту №18-10-2-37 Программы УрО РАН.

#### Список литературы

1. *Wetzig K., Schneider C. M.* Metal based thin films for electronics. New-York: Wiley 2003. 388 p.
2. *Mallinson J. C.* Magnetoresistive and spin valve heads. Fundamentals and applications. San Diego: Academic Press, 2002. 184 p.
3. *Goto A., Yasuoka H., Takanashi K., Saito K., Fujimori H.* NMR study of copper in [Ni/Cu], [Co/Cu] magnetic superlattices synthesized by the ion beam sputtering method // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1993. Vol. 126. P. 358–360. DOI: 10.1016/0304-8853(93)90626-D
4. *Parkin S. S. P., Li Z. G., Smith D. J.* Giant magnetoresistance in antiferromagnetic Co/Cu multilayers // Applied Physics Letters. 1991. Vol. 58. N. 23. P. 2710–2712. DOI: 10.1063/1.104765
5. *Mosca D. H., Petroff F., Fert A., Schroeder P., Pratt W. P., Loloee R.* Oscillatory interlayer coupling and giant magnetoresistance in Co/Cu multilayers // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1991. Vol. 94. N. 1–2. P. L1–L5. DOI: 10.1016/0304-8853(91)90102-G
6. *Fullerton E. E., Schuller I. K., Vanderstraeten H., Bruynseraede Y.* Structural refinement of superlattices from x-ray diffraction // Physical Review B. 1992. Vol. 45. N. 16. P. 9292–9309. DOI: 10.1103/PhysRevB.45.9292
7. *Kourtina N. V., Kravtsov E. A., Ustinov V. V.* Method of the reflections function in the X-ray re-

- flectometry study of multilayers // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2002. Vol. 240. P. 494-497.  
DOI: 10.1016/S0304-8853(01)00911-8
8. Meny C., Panissod P., Loloee R. Structural study of cobalt-copper multilayers by NMR // *Physical Review B*. 1992. Vol. 45, N. 21, P. 12269–12277.  
DOI: 10.1103/PhysRevB.45.12269
  9. Thomson T., Riedi P. C. NMR studies of interfaces, strain and anisotropy in Co/Cu multilayers // *Hyperfine interactions*. 1999. Vol. 120/121. P. 20–30. DOI: 10.1023/A:1017061509311
  10. Khalyapin D. L., Maltsev V. K., Kim P. D., Turpanov I. A., Betenkova A. Y. The study of Co-Cu heterogeneous alloy thin films by NMR method // *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*. 2010. Vol.3. N. 1. P.1057–1063.
  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]<sub>n</sub> 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. Gronckel H. A. M., Kopinga K., Jonge W. J. M., Panissod P., Schille J. P., Broeder F. J. A. Nanostructure of Co/Cu multilayers // *Physical Review B*. 1991. Vol.44. N. 16. P. 9100–9103.
  14. 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]<sub>10</sub> superlattices by methods of NMR and X-ray reflectometry // *Physics of Metals and Metallography*. 2016. Vol. 117. P. 1192–1197.  
DOI: 10.1134/s0031918x16120048
  15. Nasu T., Yasuoka H., Nakamura Y., Murakami Y. Hyperfine field distribution in Co-Cu alloy: 59Co nuclear magnetic resonance // *Acta Metallurgica*. 1974. Vol. 22. P. 1057–1063. DOI: 10.1016/0001-6160(74)90060-1
  3. Goto A., Yasuoka H., Takashi K., Saito K., Fujimori H. NMR study of copper in [Ni/Cu], [Co/Cu] magnetic superlattices synthesized by the ion beam sputtering method. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1993, vol. 126, pp. 358–360. DOI: 10.1016/0304-8853(93)90626-D
  4. Parkin S.S.P., Li Z.G., Smith D.J. Giant magnetoresistance in antiferromagnetic Co/Cu multilayers. *Applied Physics Letters*. 1991, vol. 58, no. 23, pp. 2710-2712. DOI: 10.1063/1.104765
  5. Mosca D.H., Petroff F., Fert A., Schroeder P., Pratt W.P., Loloee R. Oscillatory interlayer coupling and giant magnetoresistance in Co/Cu multilayers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1991, vol. 94, no. 1–2, pp. L1–L5.  
DOI: 10.1016/0304-8853(91)90102-G
  6. E.E. Fullerton, I.K. Schuller, H. Vanderstraeten, Y. Bruynseraede. Structural refinement of superlattices from x-ray diffraction. *Physical Review B*. 1992, vol. 45, no. 16, pp. 9292–9309.  
DOI: 10.1103/PhysRevB.45.9292
  7. Kourtina N.V., Kravtsov E.A., Ustinov V.V. Method of the reflections function in the X-ray reflectometry study of multilayers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2002, vol. 240, pp. 494–497. DOI: 10.1016/S0304-8853(01)00911-8
  8. Meny C., Panissod P., Loloee R. Structural study of cobalt-copper multilayers by NMR. *Physical Review B*, 1992, vol. 45, no. 21, pp. 12269–12277. DOI: 10.1103/PhysRevB.45.12269
  9. Thomson T., Riedi P.C. NMR studies of interfaces, strain and anisotropy in Co/Cu multilayers. *Hyperfine interactions*, 1999, vol. 120/121, pp. 20–30. DOI: 10.1023/A:1017061509311
  10. Khalyapin D. L., Maltsev V. K., Kim P. D., Turpanov I. A., Betenkova A. Y. Study of Co-Cu heterogeneous alloy thin films by NMR method. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*, 2010, vol. 3, no. 1, pp.1057–1063.  
DOI: 10.1023/A:1017061509311
  11. Chuprakov S. A., Bannikova N. S., Blinov I. V., Krinitsina T. P., Milyaev M. A., Popov V. V., Ustinov V. V. Interface structure and magnetoresistance studies of [Co/C]<sub>n</sub> 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. Gronckel H. A. M., Kopinga K., Jonge W. J. M., Panissod P., Schille J. P., Broeder F. J. A.

## References

1. Wetzig K., Schneider C.M. *Metal based thin films for electronics*. New-York: Wiley, 2003. 388 p.
2. Mallinson J.C. *Magnetoresistive and spin valve heads. Fundamentals and applications*. San-Diego: Academic Press, 2002. 184 p.

- Nanostructure of Co/Cu multilayers. *Physical Review B*, 1991, vol.44, no. 16, pp. 9100–9103.
14. 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]<sub>10</sub> superlattices by methods of NMR and X-ray reflectometry. *Physics of Metals and Metallography*, 2016, vol. 117, pp. 1192–1197. DOI: 10.1134/s0031918x16120048
15. Nasu T., Yasuoka H., Nakamura Y., Murakami Y. Hyperfine field distribution in Co-Cu alloy: <sup>59</sup>Co nuclear magnetic resonance. *Acta Metallurgica*, 1974, vol. 22, pp. 1057–1063. DOI: 10.1016/0001-6160(74)90060-1

**Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:**

Чупраков С. А., Блинов И. В., Мильяев М. А., Попов В. В. Изменение состояния межслойных границ сверхрешёток [Co/Cu]<sub>10</sub> в процессе термообработки // Вестник Пермского университета. Физика. 2018. № 2 (40). С. 45–51. doi: 10.17072/1994-3598-2018-2-45-51

**Please cite this article in English as:**

Chuprakov S. A., Blinov I. V., Milyaev M. A., Popov V. V. Modification of the state of interlayer interfaces in [Co/Cu]<sub>10</sub> 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