

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.8>

УДК: 537.635

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПА ТЕКСТУРЫ В СВЕРХРЕШЕТКАХ СО/СИ

С.А. Чупраков

Институт физики металлов УрО РАН,  
620990 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

Статья поступила в редакцию 7 ноября 2024 г.

**Аннотация.** Исследование состояния межслойных границ (интерфейсах) в различных многослойных системах является актуальной и сложной задачей, для решения которой задействуются локальные методы. Эффективность применения метода ядерного магнитного резонанса (ЯМР) при исследовании сверхрешеток Со/Си была неоднократно продемонстрирована, однако, в опубликованных работах ядерный магнитный резонанс использовался для определения типа кристаллической решетки в слоях кобальта и особенностей строения интерфейсов Со/Си. В настоящей работе предложен способ определения типа текстуры, сформированной в сверхрешетках Со/Си. Способ базируется на интерпретации данных ЯМР и рентгеновской дифракции с помощью трехмерного моделирования структуры межслойных границ.

**Ключевые слова:** сверхрешетки Со/Си, текстура, буферный слой, магнитосопротивление.

**Автор для переписки:** Чупраков Станислав Александрович, [chuprakov@imp.uran.ru](mailto:chuprakov@imp.uran.ru)

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания по теме “Функция” № 122021000035-6.

## Введение

Магнитные металлические обменно-связанные сверхрешетки, в которых проявляется эффект гигантского магнитосопротивления (ГМС), являются одним из типов двумерных многослойных наноструктур, находящие применение в области приборов спинтроники и радиоэлектроники [1-3]. Подобные материалы используются для разработки перспективных типов носителей информации типа структурированный носитель данных (bit-patterned media) [4], накопители с термомагнитной технологией записи (heat-assisted magnetic recording) [5]. Применяются в области биотехнологий, например в интегрированных системах распознавания, использующих целевые биомолекулы, помеченные магнитными частицами [6,7]. Известно [3,8-10], что сверхрешетки Co/Cu обладают значительной величиной эффекта гигантского магнитосопротивления, которую определяет целый ряд параметров. Тип текстуры, сформированной в сверхрешетках [11], поскольку морфология поверхности Ферми зависит от кристаллографического направления [12]. Тип текстуры, в случае идеальной плоской границы Co/Cu, определяет состав первой координационной сферы атомов кобальта, формирующих интерфейсы (межслойные границы). Интерфейсы являются источником спин-зависящего рассеяния электронов проводимости, а структурное состояние интерфейсов определяет особенности спинового транспорта в сверхрешетках [13-17].

Эффективным методом определения типа текстуры, сформированной в сверхрешетках, является метод рентгеновской дифракции в больших углах [11,18-20]. Однако, из-за ультрамалых толщин слоев в многослойных структурах – несколько атомных слоев – не всегда возможно исследовать их с помощью рентгеновской дифракции, либо эксперимент будет занимать очень длительное время. Поскольку структурные особенности исследуемых систем имеют атомные масштабы, то целесообразно использовать локальные методы исследования – Мессбауэровская спектроскопия, ядерный магнитный резонанс. Применение Мессбауэровской спектроскопии, в случае решеток Co/Cu представляет собой крайне сложную задачу, поскольку в сверхрешетках Co/Cu

отсутствуют радиоактивные изотопы типа  $^{57}\text{Fe}$  или  $^{57}\text{Co}$ , а добавление зондирующего слоя, например из  $^{119}\text{Sn}$ , приведет к изменению электронной структуры меди. Метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР) успешно применялся для исследования состояния межслойных границ (интерфейсов) и структуры слоев Co [21-24]. Основная идея для исследования структурного состояния многослойных структур заключается в следующем. 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. Метод ЯМР позволяет исследовать распределение этих локальных полей, а потому является эффективным методом изучения структурных характеристик многослойных наноструктур. В настоящей работе предложен способ применения метода ЯМР для определения типа текстуры в сверхрешетках Co/Cu, который является обобщением накопленного опыта при исследовании многослойных структур Co/Cu.

### **Методы исследования**

Сверхрешетки были приготовлены в напылительной системе Ulvac MPS-4000-C6 методом магнетронного распыления при постоянном токе на стеклянные подложки (аморфный  $\text{SiO}_2$  толщиной 0.46 мм). Поверхность подложки перед напылением очищали ионным травлением в атмосфере аргона в напылительной системе. Материал защитного слоя – хром. Материалы буферного слоя: Fe и  $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{40}\text{Cr}_{60}$ . Давление остаточных газов в камере напыления металлов перед запуском аргона составляло  $3 \times 10^{-7}$  Па. Напыление производилось в атмосфере особо чистого аргона (99.9998 %) при давлении 0.1 Па. Мощность магнетронов составляла 100 Вт. Для обеспечения одинаковой толщины на всей площади пленки подложка вращалась со скоростью 7-10 об./мин. Во время напыления температура подложки составляла  $3 \pm 2$  °C. Контроль скорости напыления выполнялся

с помощью оптического профилометра Zygo NewView 7300 по ранее определенному времени напыления и высоте перепада материал/подложка. Для получения сверхрешеток необходимой толщины время напыления рассчитывалось согласно таблице 1:

Таблица 1. Скорости напыления материалов при мощности магнетронов 100 Вт и давлении аргона 0,1 Па.

Напыляемый материал	Скорость напыления, нм/мин
Fe	2,7
Co	3,0
Cu	6,9
Cr	3,0
$(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{40}\text{Cr}_{60}$	3,21

Рентгеновские исследования образцов выполнены при использовании программно-аппаратного комплекса PANalytical Empyrean Series 2. Запись дифрактограмм выполнена в излучении  $\text{CoK}\alpha$ .

Регистрация спектров ЯМР на ядрах  $^{59}\text{Co}$  была выполнена на модернизированном импульсном фазокогерентном спектрометре ЯМР SXP 4100 производства компании «Bruker». Спектры ЯМР были записаны методом развертки по частоте в диапазоне частот 130-260 МГц с шагом в 1 МГц. Запись спектров осуществлялась при температуре 4.2 К в локальном магнитном поле – внешнее магнитное поле отсутствовало. Сигнал спинового эха формировался последовательностью двух когерентных радиочастотных импульсов – импульсная последовательность солид-эхо. Длительность импульсов  $\tau_{\text{pulse}}$  составляла 0.5 мкс, временной промежуток  $\tau_{\text{delay}}$  между импульсами составлял 11 мкс. Для устранения искажения спектров за счет интерференционных эффектов и переходных процессов в резонансном контуре применялась последовательность с альтернированием фазы РЧ-импульсов. Для увеличения соотношения сигнал/шум осуществлялось многократное накопление сигнала. Контролировалось постоянство мощности усилителя во всем рабочем диапазоне частот.

## Результаты и обсуждение

Определим, какую информацию, в рамках поставленной задачи, можно получить из спектров ядерного магнитного резонанса. На ядрах кобальта, из-за существования сверхтонкого взаимодействия, наводится локальное магнитное поле, направление и величина которого определяются типом и магнитными особенностями атомов первой координационной сферы ядра-зонда. Метод ЯМР позволяет получить информацию о распределении этих локальных полей в исследуемых кобальтсодержащих сверхрешетках. Если ядро-зонд размещено внутри слоя кобальта со структурой ГЦК, то расчетное значение этого поля составит  $-22.8$  Тл, а его экспериментально определенная величина составит  $-21.6$  Тл [25]. Учитывая гиромантическое отношение  $\gamma(^{59}\text{Co})/2\pi = 10.1$  МГц/Тл получим резонансную частоту ядра-зонда примерно  $218$  МГц. Замещение одного атома кобальта на один атом меди приводит к уменьшению резонансной частоты на  $16-18$  МГц, а в целом связь между величиной сверхтонкого поля и набором атомов первой координационной сферы описывается следующим выражением [25]:

$$H_{hf} \approx H_{hf}^b - \Delta H_{hf}^1 (n^b - n^1), \quad (1)$$

где  $H_{hf}^b$  – сверхтонкое поле в объемном материале,  $n^b$  – координационное число в объемном материале, величина сдвига  $\Delta H_{hf}^1$  (от  $-1.8$  до  $-1.6$  Тл [26]),  $n^1$  – число атомов кобальта в ближайшем окружении ядра-зонда. Подробное описание расчета компонент сверхтонкого поля (контактное Ферми-взаимодействие, магнитный и дипольный члены, связанные с  $p$ - $s$  электронами) и результирующего сверхтонкого поля в объемных и тонкопленочных системах приведено в [25].

Необходимо отметить, что приведенные ниже рассуждения справедливы в случае сврхрешеток Co/Cu с толщинами кобальтовых слоев до  $4-5$  нм. Это связано с тем, что при толщинах слоя Co менее  $4-5$  нм, за счет кристаллической структуры буферного слоя и ГЦК-решетке Cu, кобальтовые

слои имеют кристаллическую структуру типа ГЦК. В случае, если толщина кобальтовых слоев превышает 4-5 нм, то в кобальтовых слоях начинает формироваться и преобладать, с ростом толщины слоя Co, кристаллическая решетка типа ГПУ [19,22]. Рассмотрим возможные типы текстуры: (111), (110), (100), которые реализуются в сверхрешетках Co/Cu: для этого построим трехмерные модели высокосовершенных (идеально гладкий, т.е. в случае отсутствия шероховатости) межслойных границ в атомном масштабе, Рис.1:

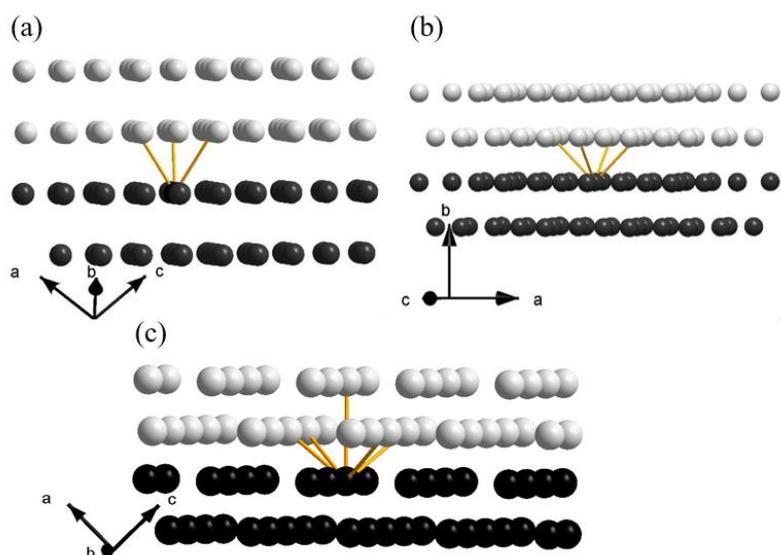


Рис. 1. Структура высокосовершенного интерфейса для (а) текстуры (111), (б) текстуры (100), (с) текстуры (110). Светло-серые шары обозначают атомы меди, черные – атомы кобальта. Линии соединяют атом кобальта формирующий высокосовершенный интерфейс и атомы меди из его первой координационной сферы

Как можно видеть на Рис. 1а, выбранный атом (ядро-зонд), участвующий в формировании идеальной межслойной границы имеет три атома меди в ближайшем окружении. Согласно выражению (1), частота резонансной линии атомов, формирующих высокосовершенные границы составляет примерно 168 МГц. В случае текстуры (100), Рис. 1б, частота резонансной линии атомов, формирующих высокосовершенные границы составит примерно 152 МГц, а в случае текстуры (100), Рис.1с – 136 МГц.

На рисунке 2а показана экспериментальная дифрактограмма сверхрешетки стекло/ $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{40}\text{Cr}_{60}(5\text{нм})/[\text{Co}(1.5\text{нм})/\text{Cu}(1\text{нм})]_{20}/\text{Cr}(5\text{нм})$  (буферный слой  $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{40}\text{Cr}_{60}$ ),

на Рис. 2b сверхрешетки стекло//Fe(5нм)/[Co(1.5нм)/Cu(0.9нм)]<sub>20</sub>/Cr(3нм) (буферный слой Fe):

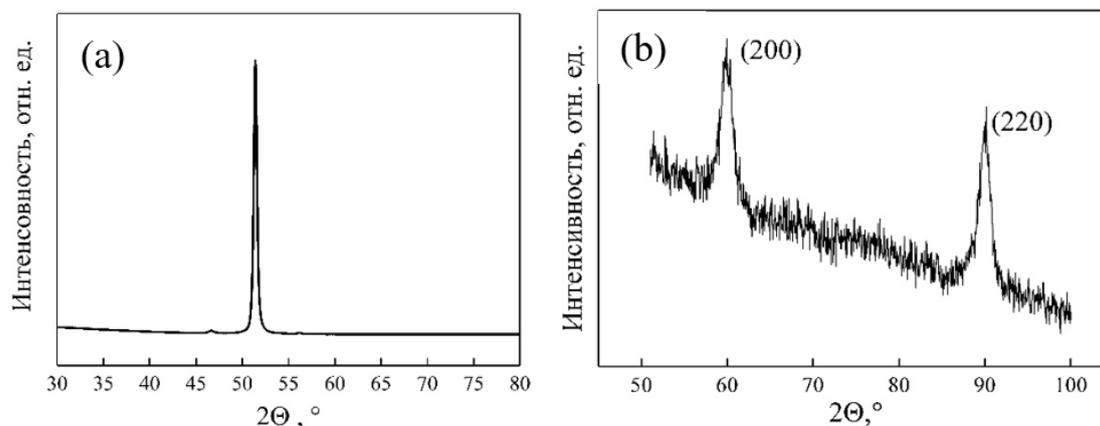


Рис. 2. Дифрактограмма сверхрешетки (a) с буферным слоем  $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{40}\text{Cr}_{60}$  и (b) с буферным слоем Fe. Излучение  $\text{CoK}\alpha$ .

На Рис. 2a можно видеть, что в сверхрешетках с буферным слоем  $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{40}\text{Cr}_{60}$  формируется текстура (111), а в случае использования буферного слоя Fe в сверхрешетке Co/Cu сформирована двухкомпонентная текстура (100) и (110). В [10] были исследованы сверхрешетки  $[\text{Co}1\text{nm}/\text{Cu}0.9\text{nm}]_{16}$  приготовленных методом магнетронного распыления с использованием различных материалов буферного слоя (Fe, Cu) на подготовленной подложке Si(100). Методом рентгеновской дифракции в больших углах показано, что слои кобальта и меди имеют ГЦК структуру и текстуру (111). В этой работе показано, что сверхрешетки Co/Cu с буферным слоем Fe имеют большее значение магнитосопротивления, чем сверхрешетки с буферным слоем Cu. Методом электронной микроскопии исследовано поперечное сечение сверхрешеток и показано, что структурная морфология этих пленок значительно отличается: в случае буферного слоя Fe, магнитные и немагнитные слои сверхрешетки имеют более плоскую поверхность в сравнении со сверхрешетками с буферным слоем Cu. В [27] сверхрешетки  $[\text{Co}1\text{nm}/\text{Cu}1\text{nm}]_{30}$  приготовлены методом магнетронного распыления на стеклянной подложке. Была установлена оптимальная, для получения максимального значения магнитосопротивления, толщина буферного слоя из Fe – 5 нм. По данным рентгеновской дифракции

в больших углах, в этих сверхрешетках сформирована текстура (100), что отлично от результатов полученных в [10]. Различные научные группы связывали высокие значения магнитосопротивления в сверхрешетках Co/Cu с формированием в них текстуры (100) [28, 29], или с текстурой (111) и (100) [30], или (100) и (100) [13, 14]. В значительно более поздней работе [11] авторы исследуют сверхрешетки  $[\text{Co}1.1\text{nm}/\text{Cu}0.9\text{nm}]_{25}$  приготовленные методом радиочастотного распыления на подложках их стекла с различными типами буферного слоя: Fe, Cr, Al, Ta, Co, Cu. Авторы делают вывод, что тип текстуры не оказывает влияния на величину магнитосопротивления и установили строгую корреляцию между величиной магнитосопротивления и структурным состоянием интерфейсов, а тип буферного слоя является наиболее значительным параметром для получения наибольшего значения магнитосопротивления.

Теперь рассмотрим экспериментальные спектры ядерного магнитного резонанса и результат их обработки для сверхрешеток обоих типов, Рис. 3:

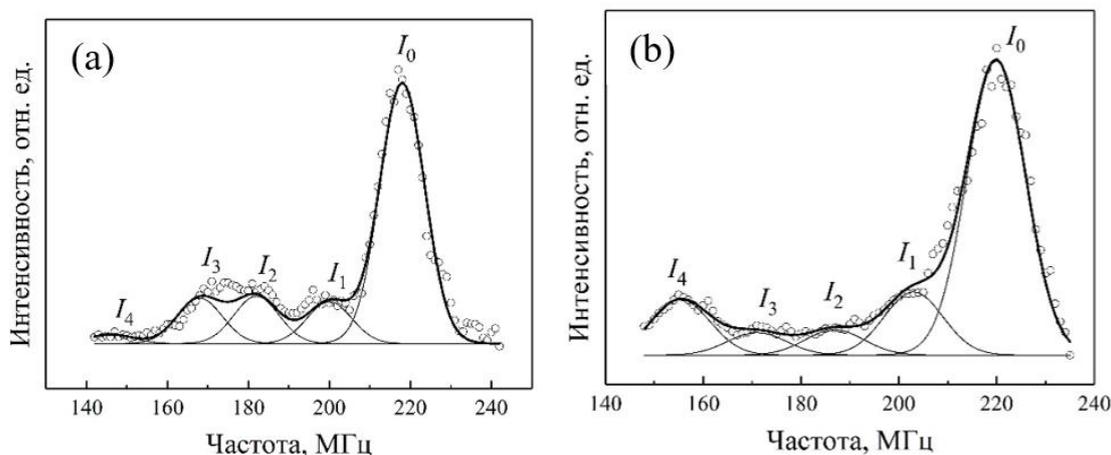


Рис. 3. Экспериментальные спектры ЯМР и результаты их обработки сверхрешеток (a) с буферным слоем  $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{40}\text{Cr}_{60}$  и (b) буферным слоем Fe.

На Рис.3 показано положение линий  $I_j$ , где  $j$  – количество атомов кобальта, замещенных атомами меди в первой координационной сфере ядра-зонда. Положение резонансных линий определялось с помощью выражения (1). При обработке спектров ядерного магнитного резонанса форма резонансной

линии описывалась Гауссовой функцией, ширина всех резонансных линий была положена одинаковой. При варьировании учитывались только интенсивность и частота резонансных линий. Можно видеть (Рис. 3а), что интенсивность низкочастотной области спектра (ниже 168 МГц) в случае использования буферного слоя  $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{40}\text{Cr}_{60}$  близка к нулю, в то время как при использовании буферного слоя Fe низкочастотная область спектра имеет значительную интенсивность. Ненулевая интенсивность резонансных линий  $I_1$ ,  $I_2$ , в случае сверхрешеток с буферным слоем  $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{40}\text{Cr}_{60}$  и резонансных линий  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ , в случае применения материала буферного слоя Fe говорит о наличии шероховатости межслойных границ. Проведенные исследования, например [31], показали, что на тип текстуры, сформированной в сверхрешетках Co/Cu, влияет толщина буферного слоя Fe. Показано, что при толщине буферного слоя Fe до 2.4 нм в сверхрешетке формируется текстура (111), а при толщине буферного свыше 2.4 нм происходит формирование двухкомпонентной текстуры (100)/(110). В случае сверхрешеток с буферным слоем  $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{40}\text{Cr}_{60}$ , введение шероховатостей в трехмерную модель межслойной границы не приводит к формированию линии  $I_4$ . Как было показано в [32], изменение содержания хрома в буферном слое  $(\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19})_{100-x}\text{Cr}_x$  оказывает значительное влияние на размер зерен. При содержании хрома 34 и 50 % сверхрешетки имеют слабовыраженную текстуру (111) и малый размер зерен, а при содержании хрома 40 % в сверхрешетках наблюдается выраженная текстура (111) и большой размер зерен. Буфер из Ta, как из Cr ведет к формированию текстуры (111) [11]. В работе [33] было показано, что применение композитного буферного слоя Ta/ $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$  приводит к формированию областей когерентного рассеяния большего размера в сравнение с буферным слоем  $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$ , что согласуется с выводами из [11]. Влияние типа текстуры на магниторезистивные свойства сверхрешеток обусловлено различной морфологией поверхности Ферми вдоль различных кристаллографических направлений [12, 34], а структура интерфейсов влияет на спин-зависящее рассеяние электронов проводимости. И, наконец, необходимо

отметить, что режим и конкретная реализованная методика приготовления оказывают влияние на все структурные параметры сверхрешеток. Резюмируя, можно сделать вывод, что метод ядерного магнитного резонанса позволяет не только определить структуру слоев кобальта в сверхрешетках Co/Cu, структурные особенности межслойных границ, но и является чувствительным к текстуре, сформированной в таких сверхрешетках.

## Заключение

С помощью методов трехмерного моделирования в атомном масштабе, ядерного магнитного резонанса и рентгеновской дифракции в больших углах показано, что в сверхрешетках Co/Cu в зависимости от типа буферного слоя формируются различные типы текстуры: в случае буферного слоя Fe формируется двухкомпонентная текстура (110)/(100), в случае буферного слоя (Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>)<sub>40</sub>Cr<sub>60</sub> формируется текстура (111). Формирование различных типов текстуры в зависимости от толщины железного буферного слоя обусловлено, по-видимому, кристаллической решеткой Fe – ОЦК. В случае композитного буферного слоя с присутствием хрома в составе, ожидается выраженная текстура (111). Показано, что близкая к нулю интенсивность резонансной линии  $I_4$  на спектрах ЯМР, позволяет сделать о формировании текстуры (111) в сверхрешетках Co/Cu. В заключение можно сказать, что метод ядерного магнитного резонанса мощным комплексным методом исследования сверхрешеток Co/Cu, поскольку позволяет определить тип кристаллической структуры в слоях кобальта, позволяет получить информацию о структурном состоянии межслойных границ Co/Cu, но и является чувствительным к типу текстуры, сформированной в сверхрешетках Co/Cu.

Автор выражает благодарность Миляеву М.А. за предоставленные сверхрешетки.

Рентгенографические исследования выполнены на оборудовании центра коллективного пользования отдела наноспинтроники ИФМ УрО РАН.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания по теме “Функция” № 122021000035-6.

### Литература

1. Xing F., Ji G., Li Z., Zhong W., Wang F., Liu Z., Xin W., Tian J. Preparation, properties and applications of two-dimensional superlattices // *Materials Horizons*. – 2023. – Т. 10. № 3. – С. 722-744.
2. Mallinson J. C. Preface to Second Edition // *Magneto-Resistive and Spin Valve Heads (Second Edition)* / Mallinson J. C. – San Diego: Academic Press, 2002. – С. xvii-xx.
3. *Metal Based Thin Films for Electronics*. WILEY-VCH GmbH & Co. / Wetzig K., Schneider C., 2003.
4. Shiroishi Y., Fukuda K., Tagawa I., Iwasaki H., Takenoiri S., Tanaka H., Mutoh H., Yoshikawa N. Future Options for HDD Storage // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2009. – Т. 45. № 10. – С. 3816-3822.
5. Kryder M. H., Gage E. C., McDaniel T. W., Challener W. A., Rottmayer R. E., Ju G., Hsia Y. T., Erden M. F. Heat Assisted Magnetic Recording // *Proceedings of the IEEE*. – 2008. – Т. 96. № 11. – С. 1810-1835.
6. Piedade M., Sousa L. A., de Almeida T. M., Germano J., da Costa B. d. A., Lemos J. M., Freitas P. P., Ferreira H. A., Cardoso F. A. J. I. T. o. C., Papers S. I. R. A new hand-held microsystem architecture for biological analysis //. – 2006. – Т. 53. № 11. – С. 2384-2395.
7. Brückl H., Panhorst M., Schotter J., Kamp P.-B., Becker A. Magnetic particles as markers and carriers of biomolecules // *IEE Proceedings-Nanobiotechnology*. – Т. 152 –IET, 2005. – С. 41-46.
8. 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. – Т. 126. № 1. – С. 358-360.

9. Mosca D. H., Petroff F., Fert A., Schroeder P. A., Pratt W. P., Laloe R. Oscillatory interlayer coupling and giant magnetoresistance in Co/Cu multilayers // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 1991. – Т. 94. № 1. – С. L1-L5.
10. Parkin S. S. P., Li Z. G., Smith D. J. Giant magnetoresistance in antiferromagnetic Co/Cu multilayers // *Applied Physics Letters*. – 1991. – Т. 58. № 23. – С. 2710-2712.
11. Bouziane K., Rawas A. D. A., Maaza M., Mamor M. Buffer effect on GMR in thin Co/Cu multilayers // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2006. – Т. 414. № 1. – С. 42-47.
12. Bruno P., Chappert C. Oscillatory coupling between ferromagnetic layers separated by a nonmagnetic metal spacer // *Physical Review Letters*. – 1991. – Т. 67. № 12. – С. 1602-1605.
13. Shukh A. M., Shin D. H., Hoffmann H. Dependence of giant magnetoresistance in Co/Cu multilayers on the thickness of the Co layers // *Journal of Applied Physics*. – 1994. – Т. 76. № 10. – С. 6507-6509.
14. El Harfaoui M., Le Gall H., Ben Youssef J., Pogossian S., Thiaville A., Gogol P., Qachaou A., Desvignes J. M. GMR versus interfacial roughness induced from different buffers in (Co/Cu) ML // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 1999. – Т. 198-199. – С. 107-109.
15. Gupta A., Paul A., Chaudhari S. M., Phase D. M. Effect of Interface Roughness on GMR in Fe/Cr Multilayers // *Journal of the Physical Society of Japan*. – 2000. – Т. 69. № 7. – С. 2182-2187.
16. Paul A., Gupta A., Chaudhari S. M., Phase D. M. Effect of interface structure correlation on magnetoresistance of Fe/Cr multilayers // *Vacuum*. – 2001. – Т. 60. № 4. – С. 401-405.
17. Ustinov V. V., Romashev L. N., Krinitsina T. P., Kravtsov E. A., Milyaev M. A., Semerikov A. V., Tsurin V. A., Kourtina N. V. Effect of interface structure on magnetic and magnetoresistive properties of Fe/Cr multilayers // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2002. – Т. 240. № 1. – С. 511-513.

18. Giron F., Boher P., Houdy P., Beauvillain P., Le Dang K., Veillet P. Growth and structure of fcc (100) Co/Cu and Fe/Cu multilayers // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 1993. – Т. 121. № 1. – С. 24-29.
19. Me'ny C., Panissod P., Loloee R. Structural study of cobalt-copper multilayers by NMR // *Physical Review B*. – 1992. – Т. 45. № 21. – С. 12269-12277.
20. Suzuki M., Taga Y., Goto A., Yasuoka H. X-ray diffraction and NMR study on the structure of Co/Cu superlattices with artificially modified interfaces // *Physical Review B*. – 1994. – Т. 50. № 24. – С. 18580-18585.
21. Le Dang K., Veillet P., Hui H., Lamelas F. J., Lee C. H., Clarke R. NMR study of interface structure in epitaxial Co-Cu superlattices // *Physical Review B*. – 1990. – Т. 41. № 18. – С. 12902-12904.
22. Le Dang K., Veillet P., Beauvillain P., Chappert C., He H., Lamelas F. J., Lee C. H., Clarke R. NMR and magnetization studies of Co/Cu superlattices // *Physical Review B*. – 1991. – Т. 43. № 16. – С. 13228-13231.
23. Thomson T., Riedi P. C. NMR studies of interfaces, strain and anisotropy in Co/Cu multilayers // *Hyperfine Interactions*. – 1999. – Т. 120. № 1. – С. 23-30.
24. Thomson T., Riedi P. C., Bröhl K., Bödeker P. NMR studies of  $^{59}\text{Co}$  in Cu/Co/Cu(111) trilayer systems grown by MBE // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 1995. – Т. 148. № 1. – С. 34-35.
25. Guo G. Y., Ebert H. First-principles study of the magnetic hyperfine field in Fe and Co multilayers // *Physical Review B*. – 1996. – Т. 53. № 5. – С. 2492-2503.
26. de Gronckel H. A. M., Kopinga K., de Jonge W. J. M., Panissod P., Schillé J. P., den Broeder F. J. A. Nanostructure of Co/Cu multilayers // *Physical Review B*. – 1991. – Т. 44. № 16. – С. 9100-9103.
27. Tomlinson M. E., Pollard R. J., Lord D. G., Grundy P. J. Giant magnetoresistance in sputter deposited Co/Cu multilayer systems // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 1992. – Т. 111. № 1. – С. 79-82.
28. Honda S., Ohmoto S., Imada R., Nawate M. Giant magnetoresistance in Co/Cu multilayers sputter-deposited on glass substrates // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 1993. – Т. 126. № 1. – С. 419-421.

29. Nakatani R., Hoshino K., Hoshiya H., Sugita Y. Oscillation period of magnetoresistance and texture in Co/Cu-Ni and Ni-Fe/Cu-Ni multilayers // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1997. – Т. 166. № 3. – С. 261-266.
30. Youssef J. B., Bouziane K., Koshkina O., Le Gall H., El Harfaoui M., El Yamani M., Desvignes J. M., Fert A. Correlation of GMR with texture and interfacial roughness in optimized rf sputtering deposited Co/Cu multilayers // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1997. – Т. 165. № 1. – С. 288-291.
31. Suzuki M., Taga Y., Goto A., Yasuoka H. The critical thickness of Fe buffer layer in giant magnetoresistance of Co/Cu superlattices // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1993. – Т. 126. № 1. – С. 495-497.
32. An Y., Liu J., Ma Y. Influence of  $(\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19})_{100-x}\text{Cr}_x$  seed layer on structure and magnetic properties of NiFe/PtMn bilayers // Journal of Applied Physics. – 2008. – Т. 103. № 1.
33. Milyaev M. A., Naumova L., Ustinov V. Обменно-связанные сверхрешетки с рекордным магнитосопротивлением // Физика металлов и металловедение. – 2018. – Т. 119. – С. 1224-1228.
34. Herman F., Sticht J., Van Schilfgaarde M. Spin-polarized band structure of magnetically coupled multilayers // Journal of Applied Physics. – 1991. – Т. 69. № 8. – С. 4783-4785.

**Для цитирования:**

Чупраков С.А. Определение типа текстуры в сверхрешетках Co/Cu. // Журнал радиоэлектроники. 2024. - №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.8>