

СТРУКТУРА,
ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ДИФФУЗИЯ

УДК 539.143.43

ИССЛЕДОВАНИЕ КОБАЛЬТСОДЕРЖАЩИХ НАНОПРОВОЛОК
РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ МЕТОДОМ ЯМР

© 2021 г. С. А. Чупраков^{а, *}, И. В. Блинов^а, Д. Л. Загорский^б, Д. А. Черкасов^{б, с}

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

^бФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, Ленинский просп., 59, Москва, 119333 Россия

^сМФТИ, Институтский переулок, 9, Долгопрудный, Московская область, 141701 Россия

*e-mail: chuprakov@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 05.02.2021 г.

После доработки 21.04.2021 г.

Принята к публикации 27.04.2021 г.

Методом матричного синтеза получены нанопроволоки (НП) различных типов: из чистого кобальта, из сплава кобальта с медью и слоевые структуры, состоящие из чередующихся слоев кобальта различной толщины и медных прослоек. Методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР) на ядрах ⁵⁹Со исследованы структурные особенности массивов. Установлено, что в однокомпонентных НП присутствуют фазы ГЦК и ГПУ Со, при добавлении ионов меди в электролит происходит практически полное исчезновение ГПУ-фазы Со в НП. Определены параметры, характеризующие структуру межслойных границ слоевых НП при различных толщинах слоев.

Ключевые слова: нанопроволоки, межслойные границы, ядерный магнитный резонанс

DOI: 10.31857/S0015323021090035

ВВЕДЕНИЕ

Одномерные наноматериалы – металлические нанопроволоки (НП) различных типов привлекают большое внимание исследователей. Одним из способов получения таких структур является т.н. матричный (темплатный) синтез [1]. Используют два типа матриц – пористый оксид алюминия и трековые мембраны. Заполнение пор в таких матрицах металлом проводится гальваническим методом – производится электроосаждение металла из раствора соответствующих солей. Преимуществом метода является возможность получение структур с чередующимися слоями различных составов, например, НП из различных металлов или сплавов разного состава [2].

Известно, что последовательное гальваническое осаждение различных металлов может быть получено разными способами – существуют т.н. “двухванновый” и “однованновый” методы (названия соответствуют терминам “double-bath” и “single-bath” в англоязычной литературе). В первом случае чередование составов достигается сменой электролита, во втором – рост проводится в двухкомпонентном электролите, а изменение состава осадка достигается за счет изменения потенциала. Отметим, что существуют различные типы слоевых НП: с чередованием составов двух или нескольких магнитных металлов и с чередо-

ванием магнитного и немагнитного металлов. В последнем случае часто в качестве немагнитной прослойки используется медь.

Получаемые структуры (массивы слоевых НП) интересны для магнитной записи, для генерации электромагнитного излучения, как элементы спинтроники, различного рода сенсоры и т.п. [3]. Ряд работ был посвящен исследованию эффекта гигантского магнитосопротивления (ГМС) в слоевых НП, который проявляется в наноструктурах с чередованием магнитных и немагнитных слоев. Первоначально эффект ГМС был обнаружен в двумерных структурах – многослойных пленках, а затем и в НП. Чаще всего используется чередование слоев кобальта, железа, никеля (или их сплавов) со слоями меди [4–10]. В большинстве случаев наибольшие значения ГМС были достигнуты при чередовании слоев меди и кобальта. Также показано, что значительный эффект возможен только в НП с тонкими слоями, а величина эффекта зависит также от качества интерфейсов [11].

Другим интереснейшим направлением использования слоевых НП является их применение для магнитной записи. Современная идея состоит в использовании единичной НП для записи нескольких бит информации. Для этого доменные стенки в НП должны не только перемещаться за счет импульсов спин-поляризованного тока,

но сами домены должны менять свою ориентацию. Подход может быть успешно реализован в проволоках с фиксированными местами для пиннинга доменной стенки – таковыми могут являться искусственные границы – интерфейсы между магнитными и немагнитными слоями [12].

Еще одним потенциальным направлением применения слоевых НП является их использование в качестве сенсоров – в большинстве работ рассматривают НП из оксидов металлов [13, 14]. Отмечено, что слоевые НП наиболее перспективны для такой цели ввиду наличия “дополнительных” поверхностей раздела – межслоевых границ. Значительную роль границы играют и в НП со структурой “стержень–оболочка” [15].

Очевидно, что во всех вышеперечисленных случаях характер слоев и границ между слоями, (между наностержнями и матрицей, между стержнем и оболочкой) и толщина этих границ играют важную (или даже определяющую) роль в формировании свойств таких структур. В ряде работ структурные особенности отдельных слоев исследовали методом ПЭМ. Так, авторы первых работ утверждали, что получили регулярные чередующиеся слои с толщиной 5–10 нм и даже менее. Однако эти значения обосновываются лишь расчетами времени и/или протекшего заряда. Реально слои удалось увидеть уже в более поздних работах – используя метод ПЭМ [16]. НП с чередованием слоев Co/Cu были изучены комплексом методов в работе [17]. При этом декларировали получение слоев уже заметно большей толщины. Отметим, что во многих работах говорилось о важности исследования не только слоев, но и интерфейсов, однако реально межслоевые границы (их характер и толщина) практически нигде детально не исследовали. Отсутствие таких данных может быть связано с отсутствием инструментария для изучения интерфейсов. И здесь, на наш взгляд, огромные возможности для изучения межслоевых границ может дать метод ЯМР.

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 структур на основе Co заключается в том, что в результате сверхтонкого взаимодействия, в месте расположения ядер ^{59}Co магнитные моменты соседних атомов кобальта создают локальные магнитные поля. Величина и направление последних существенно зависят от магнитных и структурных особенностей всего ближайшего окружения ядра-зонда. ЯМР позволяет исследовать распределение этих локальных полей в образце, а потому является мощным методом изучения структурных характеристик наноструктур. Так, например, метод ЯМР

ранее был успешно применен для исследования структурных особенностей сверхрешеток Co/Cu, приготовленных методом магнетронного распыления, было исследовано влияние состояния интерфейсов Co/Cu на их магниторезистивные характеристики [18–23].

Известно, что слоевые НП Co/Cu обладают наибольшим эффектом ГМС [3, 24] и перспективны для магнитной записи (кобальт – один из наиболее магнито жестких металлов). Отметим также, что кобальт может иметь две кристаллические структуры – гексагональную и кубическую.

В настоящей работе поставлена задача методом ЯМР исследовать структурные особенности массивов гомогенных и гетерогенных НП. К гомогенным (однородным) наноструктурам относятся однокомпонентные НП из Co и НП из сплава Co–Cu. К гетерогенным (слоевым) относятся НП Co/Cu, состоящие из чередующихся слоев кобальта и меди.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Получение нанопроволок различных типов. В качестве темплатных матриц (ТМ) использовали полимерные ТМ из полиэтилентерефталатной пленки, полученные в ОИЯИ, г. Дубна. Толщина пленки составляла 10 мкм, диаметр пор 100 нм и поверхностная плотность пор – 1.2×10^9 пор/см². Роль как токоподвода, так и подложки-основы для формирования НП выполнял слой меди, нанесенный на поверхность мембраны. Нанесение проводили в две стадии: термическое распыление тонкого слоя меди в вакууме с последующим осаждением толстого слоя меди гальваническим методом. Полученные матрицы с контактными слоями помещали в гальваническую ячейку, в которой по двух-электродной схеме проводили осаждение НП.

Для получения НП из чистого кобальта применяли электролит следующего состава: $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 1.25 моль/л, H_3BO_3 – 0.5 моль/л, напряжение осаждения составляло 0.8 В.

Для осаждения сплава Co–Cu рост проводили в электролите, содержащем ионы обоих металлов – состав: $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0.7 моль/л, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – 0.03 моль/л, H_3BO_3 – 0.5 моль/л. Напряжение на протяжении всего времени осаждения составляло 1.5 В. (концентрация меди в приготовленном сплаве составляла около 20% по данным последующего элементного анализа).

Для осаждения гетероструктурных НП (слоевых) Co/Cu использовали тот же электролит, однако напряжение осаждения периодически изменяли. Известно, что медь и кобальт имеют разные равновесные потенциалы осаждения, поэтому периодическое изменение потенциала позволяет получать соответственно слои разного состава. Потенциалы для слоев кобальта и меди задавали

1.5 и 0.5 В соответственно. Отметим, что концентрация меди в растворе была значительно меньше концентрации кобальта — это обусловлено особенностями использования бинарного электролита. Переключение напряжения задавали по достижении заранее заданного заряда. Отметим, что в силу особенностей осаждения в однованновом режиме (когда электролит содержит ионы нескольких металлов), слой кобальта получается не “чистым”, а содержащим какое-то количество меди. Были приготовлены образцы с толщиной слоев кобальта 5, 10, 20, 30 и 50 нм. Толщину медных слоев специально не контролировали, в различных образцах она составляла от 70 до 130 нм.

Микроскопия. Для проведения микроскопических исследований полимерную ростовую матрицу удаляли, для чего образцы помещали в раствор гидроксида натрия (6 моль/л) при температуре 60°C на 4 ч. Электронно-микроскопические исследования проводили на СЭМ Jeol JSM 6000+ при ускоряющем напряжении 15 кВ, во вторичных электронах, при увеличениях 300–4000.

Методом ядерного магнитного резонанса на ядрах ^{59}Co были получены спектры исследуемых образцов в диапазоне частот 140–250 МГц. Съемки 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 составлял 1 МГц. Сигнал ЯМР в магнитных материалах обусловлен ядерным откликом на радиочастотное поле возбуждения и коэффициентом усиления. Интенсивности скорректированы на $t_{\text{del}} \approx 0$ путем определения скорости затухания сигнала спинового эха при различных частотах спектра. Добротность катушки ЯМР, импеданс резонансного контура и насыщение усилителя мощности контролировали посредством постоянства переднего фронта волны и амплитуды радиочастотного импульса в каждой точке всего спектра. Коэффициент усиления ЯМР η был определен для каждой линии спектра. Установлено, что коэффициент усиления η изменяется не более чем на 15% во всем рабочем диапазоне частот. Соответствующие поправки ΔQ (добротность резонансного контура), T_2 (время спин-решеточной релаксации) были использованы при расчете интенсивности линий спектра. Таким образом, прямо получена доля кобальта, участвующего в формировании сигнала при заданной частоте. По описанной ранее мето-

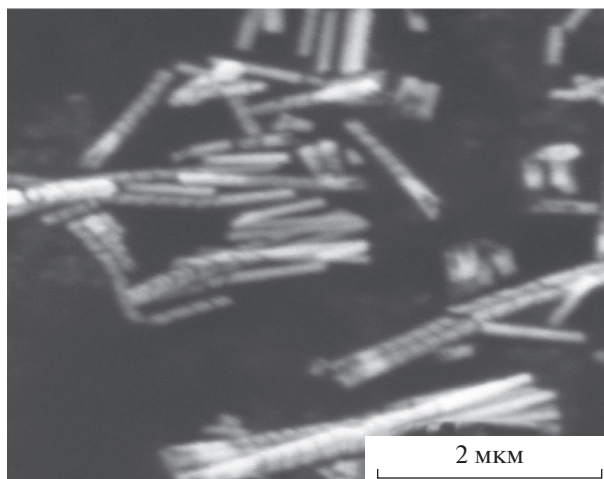


Рис. 1. Микрофотография слоевых НП Co/Cu (толщины слоев кобальта (темные перемычки) — 30 нм, слой меди (светлые прослойки) — около 100 нм).

дике и использованной модели ЯМР спектр раскладывали на несколько гауссианов, каждый из которых соответствует ядру-зонду ^{59}Co с определенным типом ближайшего окружения [19].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Микроскопия. Пример СЭМ-изображения полученных массивов НП приведен на рис. 1.

На приведенном СЭМ-изображении отчетливо видна слоевая структура НП. Отметим, что наблюдаемый при этом контраст возникает из-за различной эмиссионной способности слоев, связанной с различием атомных номеров. Видно, что все структурные единицы имеют сходные геометрические размеры — диаметр НП (100 нм) и толщины слоев (около 30 нм), что соответствует заявленным параметрам роста.

ЯМР-спектроскопия — гомогенные НП. На рис. 2 показаны ЯМР-спектры массивов нанопроволок из чистого Co (а) и массивов НП из сплава Co—Cu (б).

НП из чистого кобальта. Сплошной линией (рис. 2а) показан результат моделирования экспериментальных данных ЯМР (символ “окружность” на графике). Моделирование выполнено разложением на три Гауссиана, (пунктирные линии). При поиске аппроксимации варьировали ширину линий (одинаковая для всех линий), положение пиков, а также их интенсивности. Резонансная линия I_{fcc} на рис. 2а имеет центр при 218 МГц, что совпадает со значением, полученным для объемного Co (218 МГц [25]). Следовательно, эта линия формируется атомами Co, расположенными в объеме НП, которые находятся в ГЦК-решетке. Резонансная линия I_{hcp} на частоте 226 МГц также соответствует кобальту, располо-

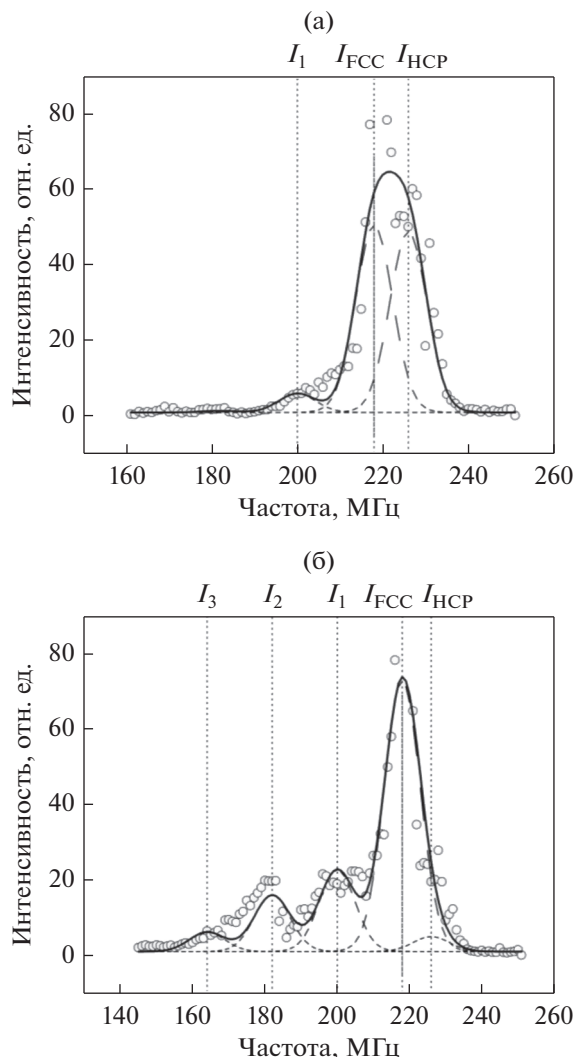


Рис. 2. Спектры ЯМР нанопроволок из чистого Со (а) и сплава Со–Cu (б).

женному в объеме НП – фазе с гексагональной структурой (ГПУ) и с намагниченностью, направленной перпендикулярно оси c [26]. Ось c может быть направлена как параллельно, так и перпендикулярно длинной оси нанопроволоки в зависимости, например, от условий приготовления и диаметра НП [27, 28]. Интенсивность резонансных линий I_{fcc} составляет 48%, I_{hcp} – 47%. Наличие фазы ГЦК–Со вероятно связано с тем, что при быстром росте НП возникают значительные растягивающие напряжения [29]. Другой причиной может быть изменение кислотности раствора, которая также может влиять на формирование определенного типа решетки (ГЦК или ГПУ) [30]. Наименее интенсивный пик на частоте 200 МГц соответствует ГЦК фазе Со с одним немагнитным атомом меди в ближайшем окружении ядра-зонда ^{59}Co [31]. По-видимому, возник-

новение этого пика обусловлено вкладом от атомов Со, находящихся на границе НП со слоем меди, который был нанесен на поверхность для создания электрического контакта.

НП из сплава Со–Cu. На рис. 26 показан ЯМР-спектр НП из сплава с концентрацией меди 20%. Вид спектра значительно отличается от вида спектра НП из чистого кобальта. Так, характер пика I_{hcp} на частоте 226 МГц свидетельствует о значительном уменьшении доли фазы ГПУ – до 4%. Помимо резонансных линий на частотах $I_{fcc} = 218$ МГц и $I_{hcp} = 226$ МГц возникают резонансные линии I_1, I_2, I_3 на частотах 200, 182 и 164 МГц соответственно. Две первых относятся к атомам Со, расположенным в ГЦК- или ГПУ-решетках и не имеющих атомов меди в окружении (находятся “в объеме”). Последние три определяются атомами Со в ГЦК-решетке, в которых соответственно один, два или три ближайших атома замещены атомами Cu. Отметим, что количество атомов в гексагональной фазе при переходе к сплаву значительно сокращается. Можно предположить, что при совместном осаждении кобальта с медью последняя (имеющая структуру ГЦК) будет способствовать осаждению кобальта с преимущественно кубической структурой, что согласуется с данными работы [32].

Интенсивность пиков I_{fcc}, I_1, I_2 и I_3 пропорциональна количеству атомов кобальта с различной координацией – без атомов меди в окружении, с одним или более атомами меди в окружении, соответственно. Тогда отношение $I_{fcc}/(I_1 + I_2 + I_3) \approx 1.84$ характеризует фактическую долю атомов кобальта без атомов меди в ближайшем окружении.

Для теоретической оценки характера взаимного расположения атомов предположим, что в объеме матрицы (нанопроволоки) атомы меди распределены равномерно среди атомов кобальта. Исходя из этого будем считать, что число $N(k)$ атомов Со, имеющих соседями k атомов Cu, можно оценить из закона биномиального распределения [33]. Так как число ближайших соседей в первой координационной сфере ГЦК-структуры равно 12, то

$$N(k) = \left(\frac{12!}{(12-k)!k!} \right) x^k (1-x)^{12-k}, \quad (1)$$

где x – объемная концентрация меди в НП.

Учитывая, что в исследованных НП $x = 0.20$, получим отношение $N(0)/(N(1) + N(2)) \approx 0.14$. Это значительно меньше полученного из эксперимента отношения $I_{fcc}/(I_1 + I_2)$, равного 1.84. Такое различие может свидетельствовать об ином распределении атомов меди – неравномерном: по-видимому, в исследованных НП медь осаждается преимущественно в виде кластеров. Для оценки среднего размера такого кластера (со стороны L

и объемом L^3) была использована модель, предложенная авторами работы [32]. Предполагается, что медные кластеры являются кубическими и состоят из L^3 -атомов, и для каждого кластера существуют $n(k)$ атомов кобальта, имеющих k -соседей -атомов меди, тогда:

$$N(k) = \frac{x}{1-x} \frac{n(k)}{L^3}, \quad k = 1, 2, 4, \quad (2)$$

$$N(0) = 1 - [N(1) + N(2) + N(4)], \quad (3)$$

где x – концентрация меди в НП. Используя $x = 20\%$ и соотношение $I_{fcc}/(I_1 + I_2) \approx 1.84$, получим, что средний кластера меди объемом L^3 включает приблизительно 30 атомов.

Отметим, что образование кластеров меди в двухкомпонентных НП отмечали и ранее. Так, в работе [16] при изучении НП медь–никель и методом ПЭМ было обнаружено образование отдельных фаз (кластеров) меди или оксида меди размером 5–20 нм.

ЯМР-спектроскопия – гетерогенные НП. На рис. 3 показаны спектры ЯМР двух типов слоевых НП Co/Cu с толщиной слоев кобальта $d = 5$ (а) и $d = 30$ нм (б).

Здесь также проведено разложение ЯМР-спектра на несколько Гауссианов, результаты которого представлены на графиках пунктирными линиями.

Пик на частоте 226 МГц, который соответствует гексагональному кобальту, отсутствует, показывая, что в исследуемых слоевых НП ГПУ-модификации Co нет. В многослойных нанопроволоках переход Co из ГПУ в ГЦК может определяться следующими факторами. Во-первых, это присутствие медных примесей, влияние которых наблюдали и в НП из сплава Co–Cu. Во-вторых, это наличие множества интерфейсов Co/Cu, в которых несоответствие параметров кристаллической решетки меди и гексагонального кобальта приводит к преимущественному образованию кобальта со структурой ГЦК. Подобный эффект наблюдается в многослойных обменно-связанных сверхрешетках Co/Cu, приготовленных магнетронным напылением [21].

В слоевых НП Co/Cu самый интенсивный пик на частоте 218 МГц формируется атомами Co, расположенными в объеме слоев, которые имеют ГЦК-структуру. В исследуемых многослойных НП положение пиков не изменяется в зависимости от толщины слоя НП, среднее расстояние между пиками составляет 18 МГц, что соответствует литературным данным [25]. Таким образом, пунктирные линии I_1, I_2, I_3 на рис. 3 соответствуют атомам Co, имеющим 1, 2, 3, атомов Cu в ближайшем окружении соответственно.

Интенсивность низкочастотной части ЯМР спектра (пики на частотах 164, 182 и 200 МГц) по

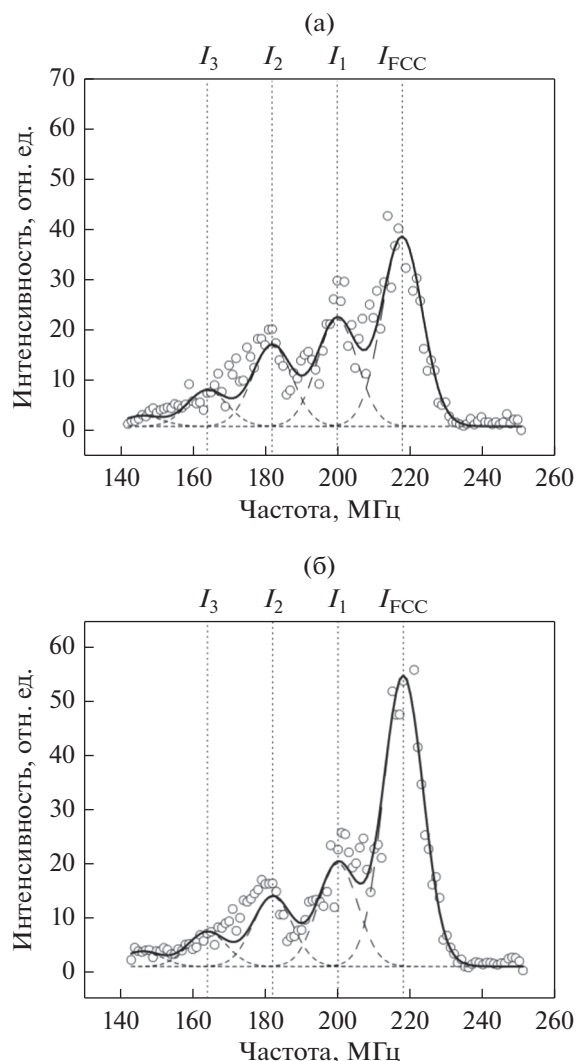


Рис. 3. Спектры ЯМР слоевых нанопроволок Co/Cu с толщиной слоя Co (а) 5 нм (б) 30 нм.

отношению к ГЦК пику (I_{fcc}) на частоте 218 МГц в многослойных нанопроволоках выше по сравнению с гомогенными НП (рис. 2). Очевидно, что такое изменение обусловлено вкладом от атомов Co, находящихся в межслойных границах.

Состояние межслойных границ слоевых НП можно характеризовать долей атомов Co, локализованных в интерфейсах. Ее можно определить как отношение суммарной интенсивности пиков, сформированных атомами в интерфейсах, к суммарной интенсивности всех пиков, т.е. $\sum_{i=1}^4 I_i / \sum_{i=0}^4 I_i$. Этот параметр характеризует относительную ширину межслойных границ.

Доля атомов Co, локализованных в межслойных границах, при различных толщинах слоев Co показана на рис. 4. Из графика видно, что при увеличении толщины слоя НП доля атомов ко-

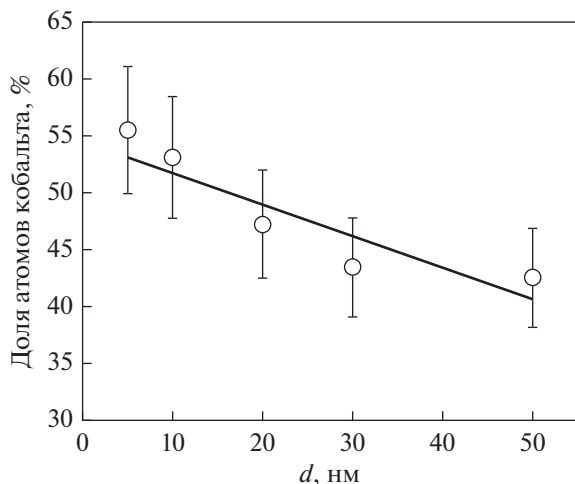


Рис. 4. Зависимость доли атомов Co, находящихся в межслойных границах при изменении толщины слоя Co слоевых НП Co/Cu.

бальта, находящихся в интерфейсной области, уменьшается от 56% при толщине слоя 5 нм, до 46% при толщине 50 нм. Т.е. при увеличении толщины слоя d происходит увеличение абсолютного значения толщины межслойных границ. Согласно соотношению $\sum_{i=1}^4 I_i / \sum_{i=0}^4 I_i$, доля атомов кобальта, локализованных в интерфейсах, относительно толщины слоя d , уменьшается. Такое распределение атомов кобальта свидетельствует о наличии в образцах интерфейсов диффузного типа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методами электронной микроскопии, ядерного магнитного резонанса исследованы структурные особенности нанопроволок на основе Co, приготовленных методом матричного синтеза на основе трековых мембран. Показано, что Co в однокомпонентных НП (чистый кобальт) образует ГЦК- и ГПУ-решетки. Наличие и преобладание ГЦК-фазы Co может быть обусловлено как соответствующим рН раствора, так и тем, что при быстром росте нанопроволок возникают значительные растягивающие напряжения. При добавлении ионов меди в электролит в синтезированных “гомогенных” НП происходит практически полное исчезновение ГПУ-фазы Co. При этом медь осаждается (по крайней мере частично) в виде наноразмерных кластеров со средним размером 30 атомов. В слоевых НП наблюдается значительная доля ядер кобальта с одним, двумя или более атомами меди в ближайшем окружении по сравнению с гомогенными НП. При увеличении толщины слоя кобальта в НП относительная ширина межслойных границ уменьшается.

Авторы благодарят П.Ю. Апеля (ОИЯИ, г. Дубна) за предоставление образцов трековых мембран и И.М. Долуденко (ИК РАН, г. Москва) за получение СЭМ-изображения.

Результаты ЯМР-исследований получены в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема “Функция”, № АААА-А19-119012990095-0). Синтез и микроскопия НП проведены в рамках Госзадания ФНИЦ “Кристаллография и фотоника”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Martin C.R. Nanomaterials: A Membrane-Based Synthetic Approach // Science. 1994. V. 266. P. 1961–1966.
2. Prida V.M., Garcí'a J., Hernando B., Bran C., Vivas L.G., Va'zquez M. Electrochemical synthesis of magnetic nanowires with controlled geometry and magnetic anisotropy / In Magnetic Nano- and Microwires. 1st Edition. Design, Synthesis and Applications. Ed. by M. Vazquez. Elsevier. 2015. 847 p.
3. Борисенко В.Е., Данилюк А.Л., Мугас Д.Б. Спинтроника. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2017. 229 с.
4. Piroux L., George J.M., Despres J.F., Leroy C., Ferain E., Legras R., Ounadjela K., Fert A. Giant magnetoresistance in magnetic multilayered nanowires // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 65. P. 2484.
5. Blondel A., Meier J., Doudin B., Ansermet J. Giant magnetoresistance of nanowires of multilayers. // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 65. P. 3019.
6. Liu K., Nagodawithana K., Searson P., Chien C. Perpendicular giant magnetoresistance of multilayered Co/Cu nanowires // Phys. Rev. B. 1995. V. 51. P. 7381–7385.
7. Blondel A., Doudin B., Ansermet J.Ph. Comparative study of the magnetoresistance of electrodeposited Co/Cu multilayered nanowires made by single and dual bath techniques // J. Magn. Magn. Mater. 1997. V. 165. P. 34–37.
8. Blondel A., Meier J., Doudin B., Ansermet J.Ph., Attenborough K., Evans P., Hart R., Nabiyouni G., Schwarzscher W. Wires shaped magnetic multilayers for 'current perpendicular to plane' magnetoresistance measurements // J. Magn. Magn. Mater. 1995. V. 148. P. 317–318.
9. Dubois S., Chassaing E., Duvail J.L., Piroux L., Waals M.G. Preparation and characterization of electrodeposited Fe and Fe/Cu nanowires // J. Chimie Physique. 1999. V. 96. P. 1316–1331.
10. Evans P.R., Yi G., Schwarzscher W. Current perpendicular to plane giant magnetoresistance of multilayered nanowires electrodeposited in anodic aluminum oxide membranes // Appl. Phys. Letters. 2000. V. 76. № 4. P. 481–483.
11. Diez Herrera L., Ravelosona D. Controlling magnetism by interface engineering. / In Magnetic Nano- and Microwires. 2nd Edition. Design, Synthesis and Applications. Ed. by M. Vazquez. Elsevier. 2020. 997 p.
12. Ivanov Yu.P., Chuvilin A., Lopatin S., Kosel J. Modulated Magnetic Nanowires for Controlling Domain Wall

- Motion: Toward 3D Magnetic Memories // ACS Nano. 2016. V. 10. № 5. P. 5326–5332.
13. Zhang B., Gao P.-X. Metal Oxide Nanoarrays for Chemical Sensing: A Review of Fabrication Methods, Sensing Modes, and Their Inter-correlations // Front. Mater. 12 April 2019. <https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00055>
 14. Lupan O., Postica V., Cretu V., Wolff N., Duppe V., Kienle L., Adelung R. Single and networked CuO nanowires for highly sensitive p-type semiconductor gas sensor applications // Phys. Stat. Sol. (RRL). 2016. V. 10. № 3. P. 260–266.
 15. Zhang K., Wu F., Jiao Y., Sun M., Xia Y., Xie A. The synthesis of core-shell nanowires with intense dielectric and magnetic resonance properties at microwave frequency // J. Mater. Chem. C. 2019. V. 7. P. 3590–3597.
 16. Жигалина О.М., Долуденко И.М., Хмеленин Д.Н., Загорский Д.Л., Бедин С.А., Иванов И.М. Структура нанопроволок Cu/Ni полученных методом матричного синтеза // Кристаллография. 2018. Т. 63. № 3. С. 463–470.
 17. Загорский Д.Л., Долуденко И.М., Черкасов Д.А., Жигалина О.М., Хмеленин Д.Н., Иванов И.М., Бухарев А.А., Бизяев Д.А., Хайбуллин Р.И., Шаталов С.А. Слоевые нанопроволоки – матричный синтез, структура и магнитные свойства // ФММ. 2019. Т. 61. Вып. 9. С. 1682–1693.
 18. 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. V. 215. P. 358–364.
 19. 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 // Phys. Met. Metal. 2015. V. 116. P. 136–140.
 20. 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 // Phys. Met. Metal. 2016. V. 117. P. 1192–1197.
 21. 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 // Phys. Met. Metal. 2018. V. 119. P. 309–315.
 22. Popov V.V., Bannikova N.S., Blinov I.V., Chuprakov S.A., Krinitsina T.P., Milyaev M.A., Ustinov V.V. NMR studies of interlayer boundaries in Co/Cu superlattices // J. Phys: Conf. Ser. 2019. V. 1389. P. 12159–12165.
 23. Chuprakov S.A., Krinitsina T.P., Bannikova N.S., Blinov I.V., Milyaev M.A., Popov V.V., Ustinov V.V. Nuclear Magnetic Resonance and X-ray Reflectometry of Co/Cu Superlattices // Appl. Magn. Resonance. 2019. V. 50. P. 415–423.
 24. Ivanov Y.P., Leliaert J., Crespo A., Pancaldi M., Tollan C., Kosel J., Chuvilin A., Vavassori P. Design of intense nanoscale stray fields and gradients at magnetic nanorod interfaces // ACS Appl. Mater. & Interfaces. 2019. V. 11. № 4. P. 4678–4685.
 25. Gronckel H.A.M., Kopinga K., Jonge W.J.M., Panissod P., Schille J.P., Broeder F.J.A. Nanostructure of Co/Cu multilayers // Phys. Rev. B. 1991. V. 44. № 16. P. 9100–9103.
 26. Panissod P. Structural and Magnetic Investigations of Ferromagnets by NMR. Application to Magnetic Metallic Multilayers. / In: Bar'yakhtar V.G., Wigen P.E., Lesnik N.A. (eds) Frontiers in Magnetism of Reduced Dimension Systems. NATO ASI Series (3. High Technology), vol. 49. Springer, Dordrecht. 1998. https://doi.org/10.1007/978-94-011-5004-0_10
 27. Xianghua Han, Qingfang Liu, Jianbo Wang, Shiliang Li, Yong Ren, Ronglin Liu, Fashen Li. Influence of crystal orientation on magnetic properties of hcp Co nanowire arrays // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42. P. 095005–095010. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/9/095005>
 28. Vila L., George J.M., Faini G., Popa A., Ebels U., Ounadjela K., Piraux L. Transport and Magnetic Properties of Isolated Cobalt Nanowires // IEEE Trans. Magn. 2002. V. 38. № 16. P. 2577–2579. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2002.801957>
 29. Roos J.R., Celis J.-P., De Bonte M. Electrodeposition of Metals and Alloys / In Materials Science and Technology: A Comprehensive Treatment, R.W. Cahn, P. Haasen, E.J. Kramer, Eds., VCH, N.Y., V. 15, Processing of Metals and Alloys, R.W. Cahn, Eds. 1991. P. 481.
 30. Li F., Wang T., Ren L., Sun J. Structure and magnetic properties of Co nanowires in self-assembled arrays // J. Phys.: Cond. Mat. 2004. V. 16. P. 8053–8060.
 31. Thomson T., Riedi P.C., Morawe C., Zabel H. ⁵⁹Co NMR investigations of sputtered Co/Cu (100) and (111) multilayers // J. Magn. Magn. Mater. 1996. V. 156. № 1–3. P. 89–90.
 32. Scarani V., Doudin B., Ansermet J.-P. The microstructure of electrodeposited cobalt-based nanowires and its effect on their magnetic and transport properties // Magn. Magn. Mater. 1999. V. 205. P. 241–248.
 33. Chojcan J. Interactions between impurity atoms of 3d transition metals dissolved in iron // J. Alloys and Comp. 1998. V. 205. № 1–2. P. 50–53.