

На правах рукописи

Чупраков Станислав Александрович

СТРУКТУРА И ИНТЕРФЕЙСЫ КОБАЛЬТСОДЕРЖАЩИХ
СВЕРХРЕШЁТОК И НАНОПРОВОЛОК ПО ДАННЫМ ЯДЕРНОГО
МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

1.3.12. Физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2023

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН)

Научный руководитель: **Оглобличев Василий Владимирович**, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией диффузии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (г. Екатеринбург).

Официальные оппоненты: **Еремина Рушана Михайловна**, доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории радиоспектроскопии диэлектриков Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук» (г. Казань);

Свистов Леонид Евгеньевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физических проблем им. П.Л. Капицы Российской академии наук (г. Москва).

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург).

Защита состоится «2» февраля 2024 года в 11:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.133.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского Отделения Российской Академии наук (ИФМ УрО РАН) по адресу: 620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФМ УрО РАН и на сайте Института www.imp.uran.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 года

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Чарикова Татьяна Борисовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Работа направлена на решение фундаментальной проблемы физики магнитных явлений - природа спинового транспорта в многослойных наноструктурах, сформированных из магнитных и немагнитных слоёв. Магнитные слои представляют собой $3d$ -ферромагнитный металл или сплав (Co, Fe, CoFe), немагнитные слои - немагнитный металл или сплав (Cu, Ag, CuIn) [1, 2]. Такие слоистые наноструктуры имеют широкое применение в различных технических приложениях (магнитные сенсоры, устройства спинтроники, автомобильная промышленность [3]) в связи с обнаружением в них необычных эффектов и свойств, в частности эффекта гигантского магнитосопротивления (ГМС) [4].

Согласно существующим сегодня представлениям, природа необычных эффектов и свойств в наноструктурах Co/Cu связана с особенностями межслойного обменного взаимодействия и со специфической спиновой зависимостью рассеяния электронов проводимости от типа магнитного упорядочения как внутри слоев, так и на межслойных границах [5]. Особое значение имеет состояние и структура межслойных границ, которые оказывают влияние на магниторезистивные свойства многослойных структур [6, 7]. Исследование интерфейсов и границ требует привлечения локальных методов исследования: мессбауэровской спектроскопии, просвечивающей электронной микроскопии, рентгеновской дифракции, рентгеновской рефлектометрии, EXAFS [8, 9]. Все методы являются взаимодополняющими, но при этом они не дают полной информации о структуре нанобъектов. Например, рентгеновская дифракция позволяет хорошо исследовать правильные упаковки объемного кобальта, в то время как при исследовании наноразмерных систем рефлексы в рентгенограмме сильно уширяются, и она становится малоинформативной. Состояние интерфейсов можно изучать и с помощью рентгеновской рефлектометрии, но данные, полученные этим методом, обрабатываются с помощью программного обеспечения с большим количеством параметров, что значительно увеличивает погрешность их определения. Модель, используемая в программном пакете для обработки рефлектограмм, имеет ограничения, связанные с толщинами слоёв и среднеквадратичной шероховатостью интерфейсов. Сложность применения рефлектометрии для исследования сверхрешёток Co/Cu обусловлена также низкой контрастностью рентгеновских свойств кобальта и меди. Мессбауэровская спектроскопия дает детальную информацию о состоянии интерфейсов только для многослойных систем, содержащих изотоп ионов железа ^{57}Fe [8].

Среди локальных методов исследования важное место занимает метод ядерного магнитного резонанса, возможности которого были ранее многократно и успешно продемонстрированы при исследовании состава и структуры магнитоупорядоченных веществ как в объеме, так и на интерфейсах пленочных материалов [14-16]. В настоящее время опубликован ряд работ, посвящённых изучению интерфейсов в многослойных системах Co/Cu с использованием ядерного магнитного резонанса [10, 11]. Однако результаты этих исследований, в большинстве своем, не системны относительно влияния различных параметров (материал подложки и буферного слоя, число пар слоёв [12], толщина магнитных и немагнитных слоёв, режим термообработки, методика и режим приготовления) на строение интерфейсов и роли этих особенностей в эффекте ГМС. Перечисленные работы выполнены разными научными группами с использованием разного оборудования и методологическими особенностями, так что последовательное и систематическое исследование кобальтсодержащих сверхрешёток, при варьировании минимального числа параметров и сохранении постоянства условий эксперимента, является актуальным. Необходимо отметить, что в сверхрешётках Co/Cu, приготовленных в Институте физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН (ИФМ УрО РАН), к началу работы над диссертацией, значение магнитосопротивления достигало 40 %. Исследования, изложенные в диссертации, шли параллельно с развитием технологии магнетронного распыления в ИФМ УрО РАН, которая позволила получить сверхрешётки Co/Cu с магнитосопротивлением свыше 60 %. Другим важным классом низкоразмерных систем являются нанопроволоки, где длина объекта значительно превосходит его диаметр. Нанопроволоки бывают следующих типов: гомогенные – состоящие из одного или нескольких металлов, гетерогенные – слоистые нанопроволоки, где чередуются слои различных металлов. Формирование и строение кобальтсодержащих нанопроволок до настоящего времени изучено мало, особенно методом ЯМР.

Значительный интерес представляет моделирование исследуемых наноструктур и межслойных границ в целях объяснения спектров ЯМР. В работах [13, 14] были предложены двумерные модели межслойных границ в сверхрешётках Co/Cu. Принимая во внимание, что интерфейсы являются важным источником рассеяния электронов проводимости [6, 7, 15], а их структура зависит от наличия и типа текстуры в сверхрешётке, задача трёхмерного моделирования интерфейсов и сопоставление результирующих модельных спектров ЯМР с экспериментальными является актуальной и важной.

Таким образом, применение метода ЯМР, в этой диссертационной работе, является основой для построения трёхмерных моделей наноструктур типа сверхрешётки и нанопроволоки, позволяющих подробно описать системы пониженной размерности.

Цель работы

Выявление особенностей структуры и интерфейсов кобальтсодержащих сверхрешёток и нанопроволок в зависимости от числа бислоёв, режима термообработки, типа буферного слоя и толщины немагнитного слоя методом ядерного магнитного резонанса. Для достижения поставленной цели решались **следующие задачи:**

1. Создать датчик и поставить методику исследования кобальтсодержащих сверхрешёток и нанопроволок методом ядерного магнитного резонанса;
2. Установить характер влияния состояния интерфейсов, по данным метода ядерного магнитного резонанса на ядре кобальта (^{59}Co), на величину эффекта гигантского магнитосопротивления посредством варьирования параметров сверхрешёток Co/Cu: число бислоёв, тип буферного слоя, температура отжига, толщина немагнитного слоя.
3. Выявить структурные особенности нанопроволок из чистого кобальта, гомогенных нанопроволок $\text{Co}_{80}\text{Cu}_{20}$, гетерогенных нанопроволок Co/Cu методом ядерного магнитного резонанса на ядре кобальта (^{59}Co);
4. Построить трёхмерные модели интерфейсов в кобальтсодержащих сверхрешётках и гетерогенных нанопроволоках, модель структуры гомогенных нанопроволок CoCu для интерпретации экспериментальных данных ядерного магнитного резонанса.

Научная новизна диссертации

В работе методом ЯМР впервые системно исследованы структурные особенности межслойных границ в сверхрешётках Co/Cu в зависимости от числа бислоёв, типа буферного слоя, температуры отжига, толщины немагнитного слоя при неизменных параметрах эксперимента, влияние состояния межслойных границ на величину ГМС, выявлены структурные особенности кобальтсодержащих нанопроволок. Впервые построены трёхмерные модели, которые позволили интерпретировать экспериментальные спектры ЯМР кобальтсодержащих сверхрешёток и нанопроволок. Научная новизна диссертационной работы отражена в следующих **положениях, выносимых на защиту:**

1. При использовании в сверхрешётке Co/Cu буферного слоя Fe, увеличение числа пар слоёв более десяти, приводит к увеличению шероховатости межслойных границ, уменьшению доли высокосовершенных границ;
2. При использовании в сверхрешётке Co/Cu буферного слоя NiFeCr, увеличение числа бислоёв не приводит к уменьшению доли высокосовершенных границ, что позволяет получить сверхрешётки Co/Cu с высокими значениями магнитосопротивления;
3. Увеличение толщины медного слоя и повышение температуры термообработки приводит к увеличению шероховатости интерфейсов и уменьшению доли высокосовершенных границ;
4. В нанопроволоках из чистого Co формируется два типа кристаллической структуры: ГЦК и ГПУ, с преобладанием ГЦК фазы; в нанопроволоках $\text{Co}_{80}\text{Cu}_{20}$ доминирует ГЦК фаза кобальта, в которой формируются кластеры меди; в гетерогенных нанопроволоках Co/Cu шероховатость интерфейсов превосходит шероховатость интерфейсов в сверхрешётках Co/Cu.

Научная и практическая значимость работы

1. Полученные в настоящей работе результаты дополняют и развивают современные представления об особенностях формирования и строения межслойных границ и влияния их на величину магнитосопротивления в магнитных сверхрешётках;
2. Продемонстрирована эффективность использования метода ЯМР для изучения особенностей строения межслойных границ в магнитных сверхрешётках, а также структурных особенностей кобальтсодержащих нанопроволок;
3. Построены трёхмерные модели интерфейсов сверхрешёток Co/Cu и кобальтсодержащих нанопроволок, позволяющие интерпретировать экспериментальные спектры ЯМР.

Методология и методы исследования

Сверхрешётки Co/Cu были приготовлены в лаборатории квантовой наноспинтроники ИФМ УрО РАН на напылительной системе магнетронного распыления MPS-4000-C6 (Ulvac). Нанопроволоки приготовлены однованновым методом гальванического осаждения в Федеральном научно-исследовательском центре «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук (г. Москва).

Измерение магниторезистивных характеристик выполнено на вибрационном магнитометре АВМ-1 в лаборатории квантовой наноспинтроники ИФМ УрО РАН. Основным методом исследования является метод ЯМР. Сигналы ЯМР детектировали методом спинового эха на модернизированном импульсном фазокогерентном спектрометре ЯМР SXP 4100 фирма “Bruker”. Электронно-микроскопические исследования выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования отдела электронной микроскопии ИФМ УрО РАН на электронных просвечивающих микроскопах Philips «CM-30 SuperTwin» и Tecnai Tecnai «G2 30 Twin». Рентгеноструктурные исследования (дифракция, рефлектометрия) выполнены на рентгеновском дифрактометре PANalytical Empyrean Series 2 в центре коллективного пользования ИФМ УрО РАН и на рентгеновском дифрактометре ДРОНЗ-М в лаборатории квантовой наноспинтроники ИФМ УрО РАН. Моделирование рефлектограмм выполнено в программном комплексе PANalytical X'Pert Reflectivity. Термообработка сверхрешёток Co/Cu выполнено в вакуумной установке, построенной на основе откачного поста VOC Edwards, в лаборатории квантовой наноспинтроники ИФМ УрО РАН.

Степень достоверности полученных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением широко апробированных методов приготовления и аттестации образцов, записи спектров ядерного магнитного резонанса и рентгеновских рефлектограмм, надёжной воспроизводимостью результатов, корректностью обработки экспериментальных данных. Результаты исследований, приведенные в диссертации, согласуются между собой и не противоречат известным научным представлениям и результатам.

Апробация работы

Результаты работы были доложены на следующих международных и всероссийских конференциях: XIII Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-13) (Екатеринбург, 7-14 ноября 2012); 8-th International Symposium on Metallic Multilayers (MML 2013) (Japan, Kyoto, 19-24 May 2013); V Euro-Asian Symposium «Trends in MAGnetism:Nanomagnetism» (EASTMAG-2013) (Владивосток, 15-21 сентября, 2013); International Conference «Nanotech.Advanced Materials & Application» (Nanotech-2014) (USA, Washington, DC, 15-18 июня, 2014); XV Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-15) (Екатеринбург, 13-20 ноября, 2014); 2-International Conference on Nanomagnetism and Spintronics (RTNSA-2015) (Spain, Ordizia, 30 июня - 3 июля, 2015); XVII Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-17) (Екатеринбург, 15-22 ноября, 2016); International Conference on Magnetism and Spintronics (Sol-SkyMag 2017) (Spain, San Sebastian, 19-23 июня, 2017); Moscow International

Symposium on Magnetism (MISM-2017) (Москва, 1-5 июля, 2017); Научная сессия ИФМ УрО РАН по итогам 2017 г. (Екатеринбург 2018 г.); VII Euro-Asian Symp. «Trends in MAGnetism» (EASTMAG-2019) (Екатеринбург, 8-13 сентября, 2019); XXVI Международный симпозиум «Нанозлектроника» (Нижний Новгород, 14-17 марта, 2022).

Личный вклад автора

Постановка цели и задач исследования проведена диссертантом Чупраковым С.А. совместно с научным руководителем Оглобличевым В.В. Автор лично проводил регистрацию спектров ЯМР, моделирование спектров ЯМР, моделирование рефлектограмм, разработку трёхмерных моделей. Автор принимал непосредственное участие в обсуждении результатов, изложенных в диссертации, в формулировке ее основных положений и выводов, в обобщении и опубликовании полученных результатов. Датчик ЯМР разработан и изготовлен автором совместно с Верховским С.В. и Матвеевым С.А. Магнитометрические измерения были выполнены Банниковой Н.С. на оборудовании лаборатории квантовой наноспинтроники ИФМ УрО РАН. Электронно-микроскопические измерения проведены Кринициной Т.П. Запись рентгеновских дифрактограмм и рефлектограмм проведена Макаровой М.В. Все электронно-микроскопические и рентгеноструктурные измерения выполнены в Центре коллективного пользования ИФМ УрО РАН. Нанопроволоки предоставлены Загорским Д.Л. (ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН). Обсуждение всех результатов исследований были выполнены автором совместно с научным руководителем Оглобличевым В.В., Поповым В.В., а также Миляевым М.А. и Устиновым В.В. Материал диссертации неоднократно докладывался автором лично на международных и российских конференциях.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Содержание диссертации соответствует пункту 3 «Экспериментальные исследования магнитных свойств и состояний веществ различными методами, установление взаимосвязи этих свойств и состояний с химическим составом и структурным состоянием, выявление закономерностей их изменения под влиянием различных внешних воздействий», пункту 4 «Исследование изменений различных физических свойств вещества, связанных с изменением их магнитных состояний и магнитных свойств», пункту 5 «Исследование явлений, связанных с взаимодействием различного рода электромагнитных излучений и потоков элементарных частиц с магнитными моментами вещества или его структурных составляющих: атомов, атомных ядер, электронов (парамагнитный, ферромагнитный, ядерный магнитный, ядерный гамма резонансы и др.)», пункту 6 «Моделирование свойств и физических явлений в материалах с различными видами магнитного упорядочения, а также в композитных структурах на их основе» Паспорта специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Публикации

Результаты, представленные в диссертации, изложены в 8 статьях в рецензируемых журналах, включённых в Перечень ВАК и индексируемых в базах Web of Science. Результаты работы были представлены на 11 российских и международных конференциях.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 111 наименований. Общий объем диссертации составляет 137 страниц, включая 10 таблиц, 98 рисунков.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, аргументирована научная новизна и показана практическая значимость полученных результатов, изложены выносимые на защиту положения и кратко описана структура диссертации.

В первой главе дано описание эффекта гигантского магнитосопротивления, приведен краткий обзор систем, где наблюдается этот эффект. Рассмотрено формирование сверхтонкого поля

на ядрах кобальта, позволяющее выполнять эксперименты методом ЯМР в отсутствие внешнего магнитного поля. Представлен обзор современных представлений о применении метода ЯМР для определения структурных особенностей сверхрешёток Co/Cu. Дано описание нанопроволок.

Во второй главе приведено описание условий приготовления сверхрешёток: подготовка подложки, режим напыления методом магнетронного распыления. Описан метод приготовления кобальтсодержащих нанопроволок. Сделан обзор применяемых экспериментальных методов: измерение магниторезистивных характеристик, рентгеноструктурные методы (дифракция, рефлектометрия), метод просвечивающей электронной микроскопии, метод регистрации спектров ЯМР. Также в этой главе описывается используемое в работе оборудование.

В третьей главе представлены результаты исследования влияния числа бислоёв и типа буферного слоя в сверхрешётках Co/Cu на структурные особенности межслойных границ, а также влияние состояния границ на величину эффекта гигантского магнитосопротивления.

На рисунке 1 показано, что величина магнитосопротивления уменьшается при увеличении числа бислоёв n :

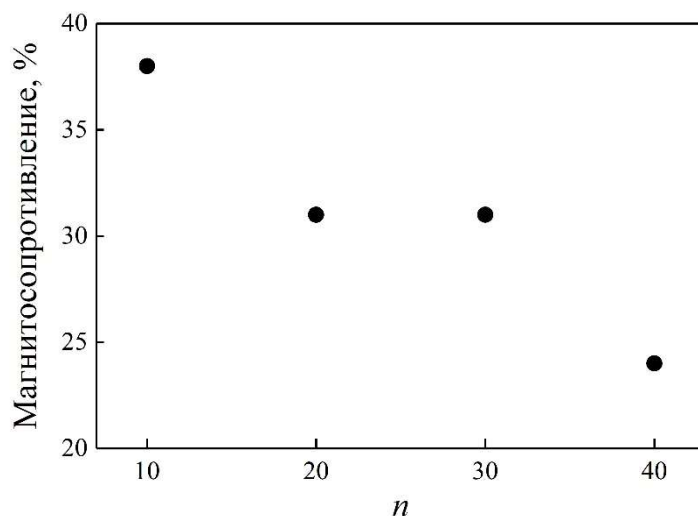


Рисунок 1 – Зависимость магнитосопротивления сверхрешёток стекло//Fe(5нм))/[Co(1,5нм)/Cu(0,9нм)] $_n$ /Cr(3нм) от числа бислоёв n

Рефлектограммы (излучение $\text{CoK}\alpha$, $\lambda = 1,7889 \text{ \AA}$) серии сверхрешёток стекло//Fe(5нм))/[Co(1,5нм)/Cu(0,9нм)] $_n$ /Cr(3нм), при $n = 10, 20, 30, 40$ приведены на рисунке 2. Можно видеть, что первый брегговский пик не меняет свое положение и находится вблизи угла $2\Theta = 4,6^\circ$, что означает равенство периодов для всех сверхрешёток.

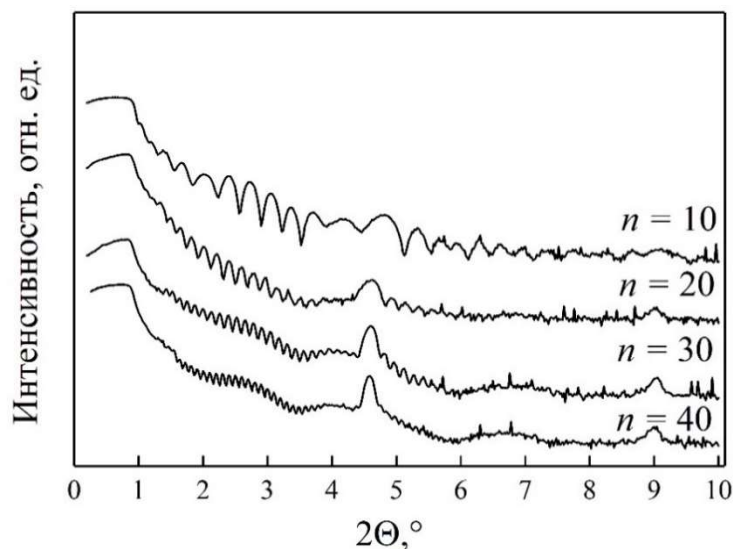


Рисунок 2 – Рефлектограммы серии сверхрешёток стекло//Fe(5нм))/[Co(1,5нм)/Cu(0,9нм)] $_n$ /Cr(3нм), $n = 10, 20, 30, 40$. Излучение $\text{CoK}\alpha$, $\lambda = 1,7889 \text{ \AA}$

Для получения численных значений шероховатости интерфейсов было выполнено моделирование экспериментальных рефлектограмм. При моделировании варьировались плотность и толщина слоёв кобальта и меди, толщина и плотность защитного слоя Cr (и возникающего под воздействием атмосферы оксида хрома Cr_2O_3), толщина буферного слоя, а также шероховатость интерфейсов Co/Cu, буфер/Co, сверхрешётка/Cr, Cr/ Cr_2O_3 . Для проверки параметров, полученных в ходе моделирования рефлектограмм, были использованы различные начальные условия. В результате моделирования установлено, что шероховатость межслойных границ возрастает от 0,39 нм ($n = 10$) до 0,61 нм ($n = 40$). Рентгеновская дифракция в больших углах (излучение $\text{CoK}\alpha$, $\lambda = 1,7889 \text{ \AA}$) показала, что в сверхрешётках стекло//Fe(5нм)/[Co(1,5нм)/Cu(0,9нм)]₃₀/Cr(3нм) отсутствует преобладающая текстура, но имеют место два направления роста текстуры: $\langle 100 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$, что является важным моментом при обсуждении результатов, полученных методом ядерного магнитного резонанса.

Методом ядерного магнитного резонанса на ядрах ^{59}Co были записаны спектры ЯМР сверхрешёток стекло//Fe(5нм)/[Co(1,5нм)/Cu(0,9нм)]_n/Cr(3нм), при $n = 10, 20, 30, 40$, в отсутствие внешнего магнитного при температуре 4.2 К (образец находился в прямом контакте с жидким гелием), в диапазоне 150-235 МГц. На рисунке 3 приведены спектры ЯМР для сверхрешёток с различным числом бислоёв n : (а) – 10 и (б) – 40 пар слоёв:

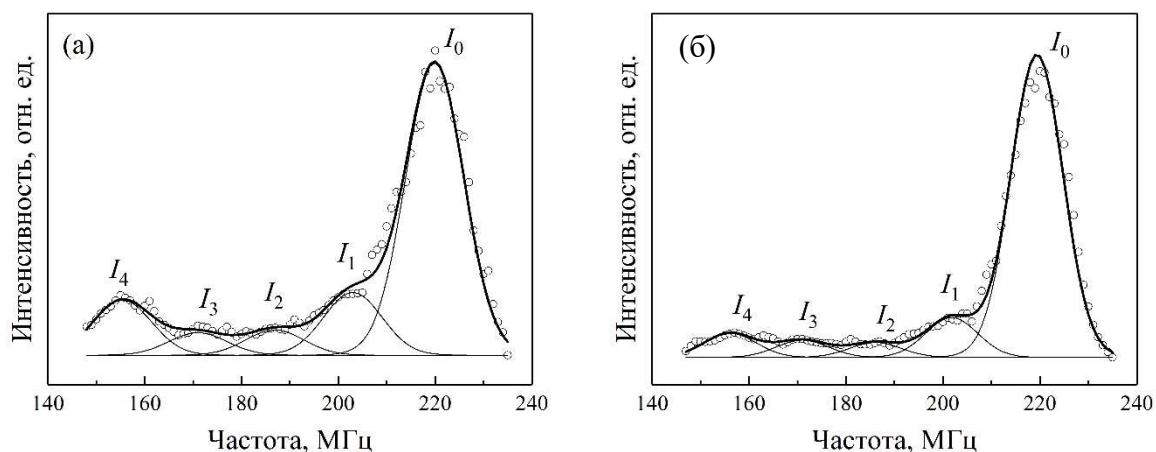


Рисунок 3 – Спектры ЯМР сверхрешёток стекло//Fe(5нм)/[Co(1,5нм)/Cu(0,9нм)]_n/Cr(3нм), $n = 10$ (а), 40 (б)

Согласно данным рентгеновской дифракции, в сверхрешётках сформировалась двухкомпонентная текстура – (100) и (110). На рисунке 4 показаны оба типа текстуры при направлении роста $\langle 100 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$:

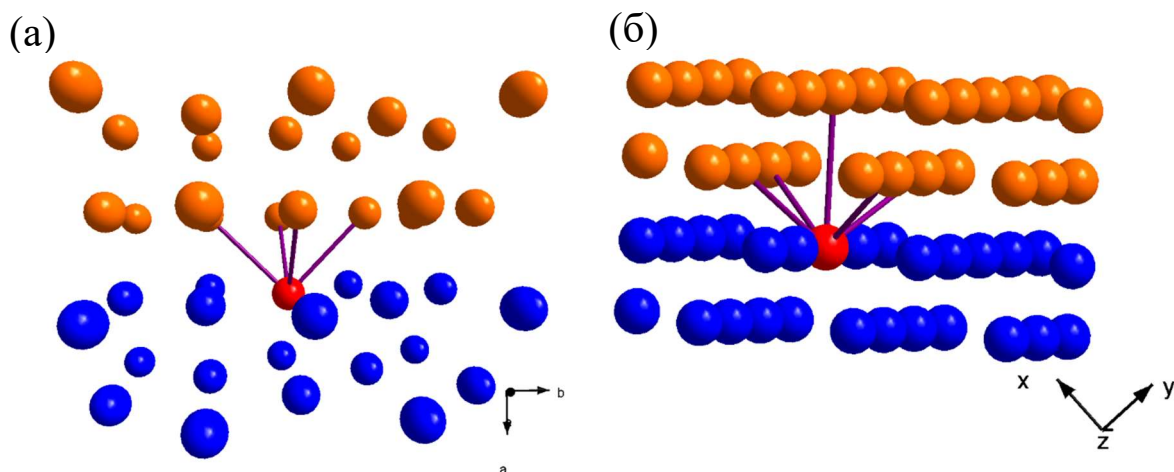


Рисунок 4 – Структура высококачественного интерфейса при (а) аксиальной текстуре (100), (б) текстуре (110)

Обработка спектров осуществлялась с помощью набора гауссовых функций: толстая линия – результат обработки экспериментальных данных. При моделировании спектра ЯМР варьировали следующие параметры: ширина резонансных линий (одинаковая для всех линий), резонансная частота, а также интенсивности. Линия I_0 на 218 МГц свидетельствует, что кобальт находится в фазе ГЦК. Отсутствие резонансных линий в диапазоне 223-228 МГц означает, что в исследуемых сверхрешётках отсутствует гексагональная плотноупакованная решётка кобальта. Высокосовершенной межслойной границе соответствует резонансная линия I_4 (4 атома меди в ближайшем окружении ядра-зонда – рисунок 4 (а)). Обработка спектров ЯМР показала, что доля высокосоввершенных границ $I_4/\sum_{i=1}^{i=4} I_i$ уменьшается от 33 % при $n = 10$ до 25 % при $n = 40$ (рисунок 5):

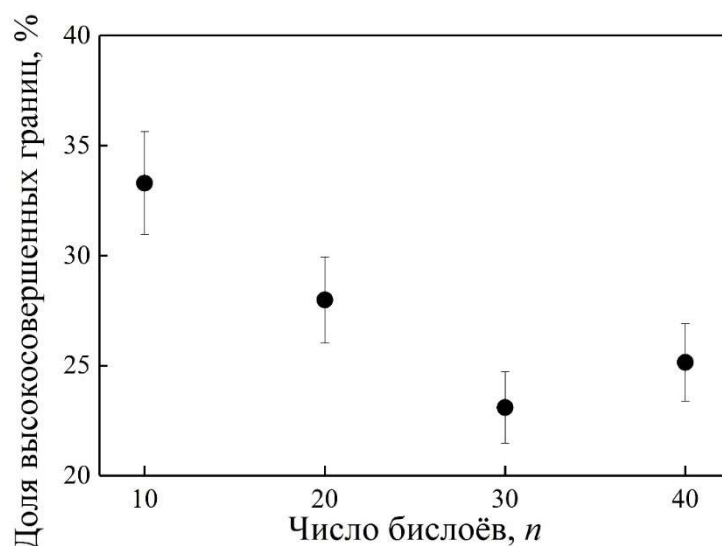


Рисунок 5 – Доля высокосоввершенных границ $I_4/\sum_{i=1}^{i=4} I_i$ в зависимости от числа пар слоёв n для сверхрешёток стекло//Fe(5нм)/[Co(1,5нм)/Cu(0,9нм)] $_n$ /Cr(3нм), при $n = 10, 20, 30, 40$

Поскольку эффект ГМС зависит от состояния границ, то уменьшение эффекта ГМС с ростом числа n , по-видимому, можно связать с ухудшением состояния межслойных границ.

В отличие от сверхрешёток описанных выше, в этих сверхрешётках использован композитный буферный слой $\text{PyCr} = (\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})\text{Cr}_{60}$, что позволило сформировать более совершенную кристаллическую структуру слоёв [16]. Зависимость магнитосопротивления от числа бислоёв n показана на рисунке 6:

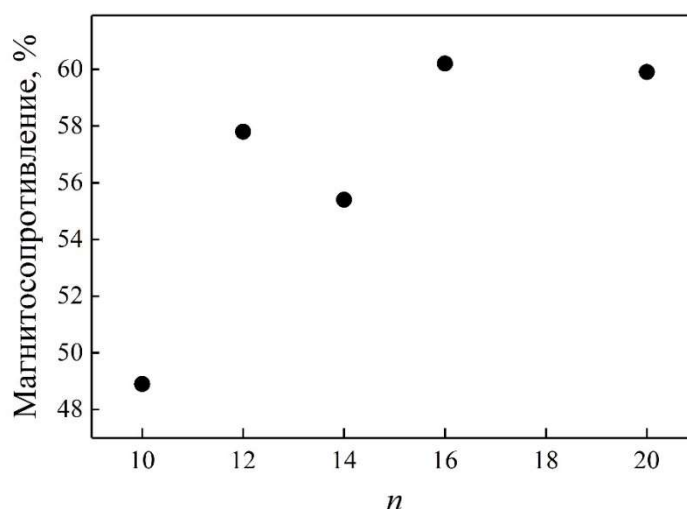


Рисунок 6 – Зависимость магнитосопротивления от числа бислоёв сверхрешёток стекло//PyCr(5нм)/[Co(1,5нм)/Cu(1нм)] $_n$ /Cr(5нм), $n = 10, 12, 14, 16, 20$

Метод рентгеновской дифракции показал, что в исследуемых сверхрешётках сформирована текстура (111), что соответствует направлению роста аксиальной текстуры $\langle 111 \rangle$. В то же время тип сформированной текстуры влияет не только на структуру интерфейсов, но и непосредственно на величину магнитосопротивления. На рисунке 7 приведены рентгеновские рефлектограммы, записанные в излучении $\text{CoK}\alpha$:

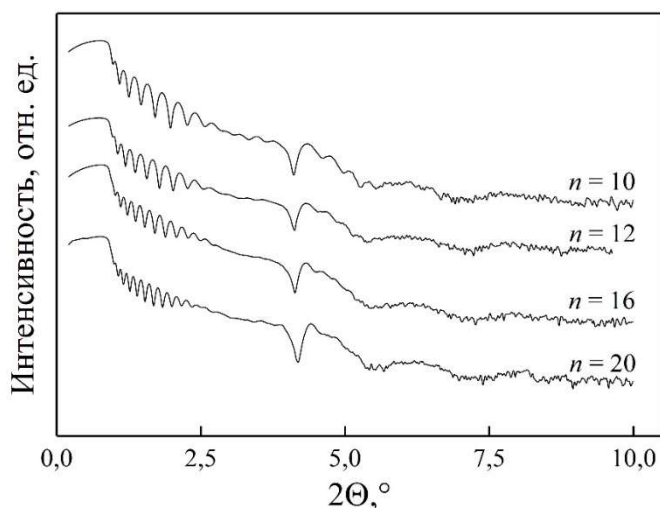


Рисунок 7 – Рефлектограммы сверхрешёток стекло// $\text{PyCr}(5\text{нм})/[\text{Co}(1,5\text{нм})/\text{Cu}(1\text{нм})]_n/\text{Cr}(5\text{нм})$, $n = 10, 12, 16, 20$. Излучение $\text{CoK}\alpha$

На этих рефлектограммах первый брэгговский пик находится вблизи угла $2\theta = 4,35^\circ$, что означает равенство периодов сверхструктур. Хорошо прорисованные осцилляции Киссига свидетельствуют о малой шероховатости интерфейсов сверхрешёток. Моделирование рефлектограмм показало, что нет прямой связи между шероховатостью интерфейсов и числом бислоёв, шероховатость изменяется от 0,17 нм до 0,42 нм при увеличении n от 10 до 20.

Согласно данным рентгеновской дифракции, в сверхрешётках сформирована текстура (111). В этом случае высокосовершенная граница формируется атомами кобальта, в координации которых три атома меди. Эта конфигурация проиллюстрирована на рисунке 8:

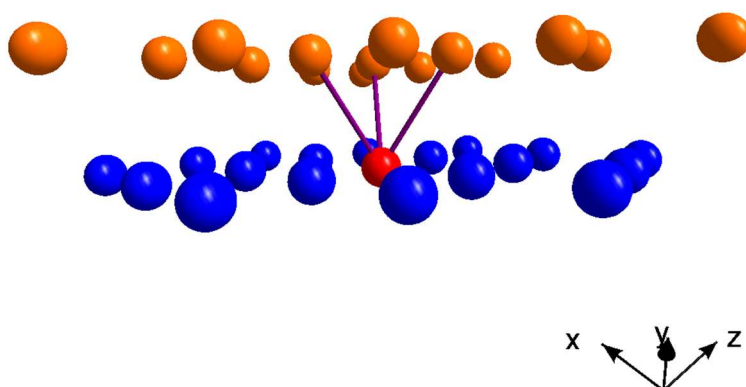


Рисунок 8 – Структура интерфейса при направлении роста аксиальной текстуры $\langle 111 \rangle$

Для качественного сравнения состояния межслойных границ из работы [17] был взят спектр ЯМР сверхрешётки Co/Cu со структурной формулой $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Nb}(3\text{нм})\text{Cu}(2\text{нм})/[\text{Co}(1,5\text{нм})/\text{Cr}(0,9\text{нм})]_{20}$, приготовленной методом молекулярно-лучевой эпитаксии. На рисунке 9 приведены спектры сверхрешёток $\text{стекло//PyCr}(5\text{нм})/[\text{Co}(1,5\text{нм})/\text{Cu}(1\text{нм})]_n/\text{Cr}(5\text{нм})$ при $n = 10, 12, 14, 16, 20$ и сверхрешётки $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Nb}(3\text{нм})\text{Cu}(2\text{нм})/[\text{Co}(1,5\text{нм})/\text{Cr}(0,9\text{нм})]_{20}$ [17], нормированные на единицу:

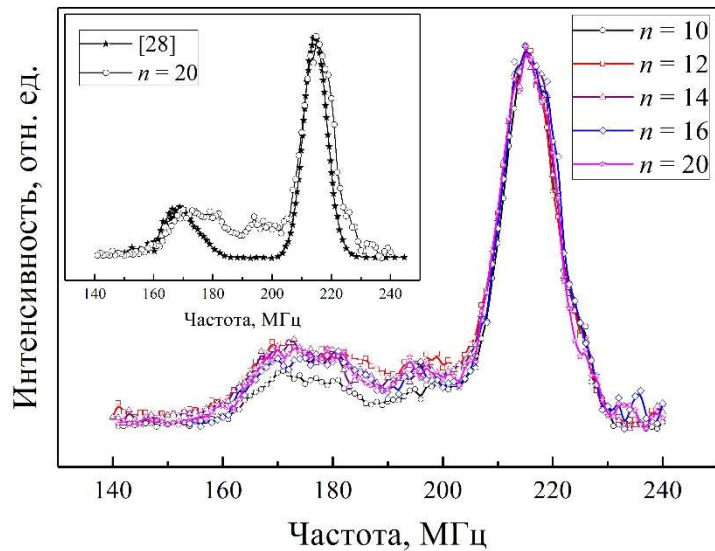


Рисунок 9 – Спектры сверхрешёток стекло// $\text{PuCr}(5\text{нм})/[\text{Co}(1,5\text{нм})/\text{Cu}(1\text{нм})]_n/\text{Cr}(5\text{нм})$, при $n = 10, 12, 14, 16, 20$ и сверхрешётки $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Nb}(3\text{нм})\text{Cu}(2\text{нм})/[\text{Co}(1,5\text{нм})/\text{Cr}(0,9\text{нм})]_{20}$ [17], нормированные на единицу

На рисунке 10 показана доля высокосовершенных границ в зависимости от числа пар слоёв n для стекло// $\text{PuCr}(5\text{нм})/[\text{Co}(1,5\text{нм})/\text{Cu}(1\text{нм})]_n/\text{Cr}(5\text{нм})$, $n = 10, 12, 14, 16, 20$ (●) и $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Nb}(3\text{нм})\text{Cu}(2\text{нм})/[\text{Co}(1,5\text{нм})/\text{Cr}(0,9\text{нм})]_{20}$ (★) [17]:

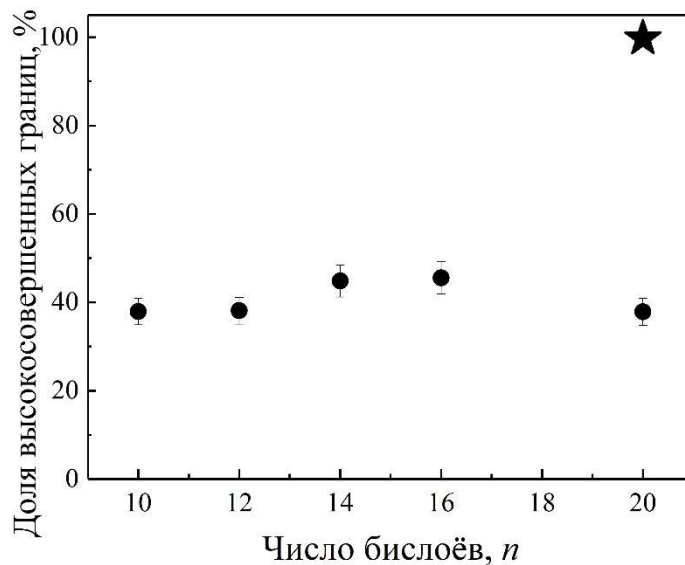


Рисунок 10 – Доля высокосовершенных межслойных границ в зависимости от числа бислоёв n . Стекло// $\text{PuCr}(5\text{нм})/[\text{Co}(1,5\text{нм})/\text{Cu}(1\text{нм})]_n/\text{Cr}(5\text{нм})$, при $n = 10, 12, 14, 16, 20$ (●) и $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Nb}(3\text{нм})\text{Cu}(2\text{нм})/[\text{Co}(1,5\text{нм})/\text{Cr}(0,9\text{нм})]_{20}$ (★) [17]

В соответствии с рисунком 10, доля высокосовершенных интерфейсов изменяется в диапазоне от 38 до 46 %.

Рассмотренные серии образцов имеют одинаковую структурную формулу, отличаясь материалом буферного слоя. На рисунке 11 показаны спектры ЯМР сверхрешёток стекло// $\text{PuCr}(5\text{нм})/[\text{Co}(1,5\text{нм})/\text{Cu}(1\text{нм})]_{20}/\text{Cr}(5\text{нм})$, стекло// $\text{Fe}(5\text{нм})/[\text{Co}(1,5\text{нм})/\text{Cu}(0,9\text{нм})]_{20}/\text{Cr}(3\text{нм})$:

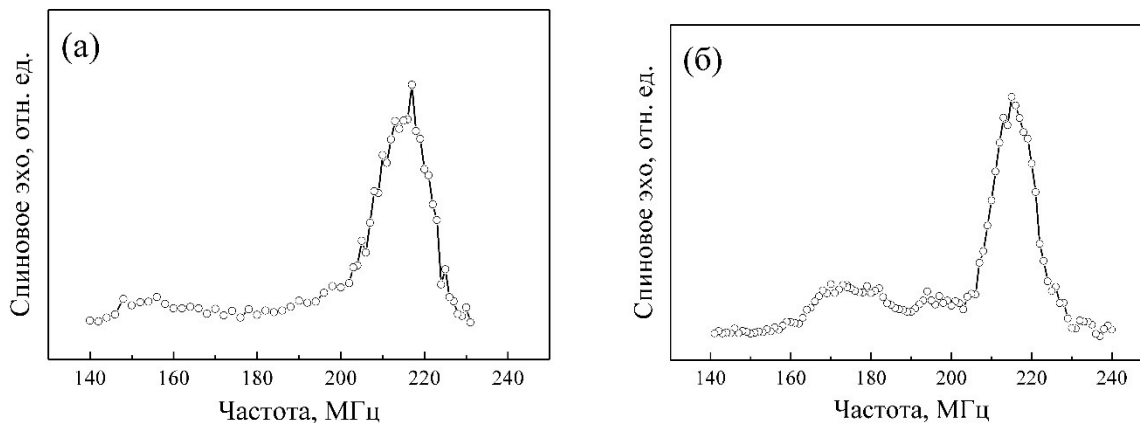


Рисунок 11 – Спектры ЯМР для сверхрешёток стекло//Fe(5нм)/[Co(1,5нм)/Cu(0,9нм)]₂₀/Cr(3нм) (а) и стекло//PuCr(5нм)/[Co(1,5нм)/Cu(1нм)]₂₀/Cr(5нм) (б)

Наибольший интерес представляет низкочастотная часть спектров: в случае буфера Fe в образцах реализуется два типа текстуры – (200) и (220), в случае буфера PuCr сформирована качественная аксиальная текстура типа (111). Как показано на рисунках 4 и 8, различные типы текстуры приводят к различному количеству атомов меди в координации атомов кобальта, формирующих высокосовершенные интерфейсы. Это проявляется в низкочастотной области спектров ЯМР, что позволяет сделать вывод о том, методом ядерного магнитного резонанса, в некоторых случаях, чувствителен к текстуре сверхрешёток Co/Cu и является пригодным для определения текстуры, сформированной в них.

В четвертой главе представлены результаты исследований структурного состояния межслойных границ Co/Cu в зависимости от толщины медного слоя в сверхрешётках стекло//Fe(5нм)/[Co(1,5нм)/Cu(t_{Cu})]₁₀/Cr(2нм), при $t_{Cu} = 0,85, 0,93, 2,28, 2,7$ нм.

Методом рентгеновской дифракции установлено, что в этих сверхрешётках формируется аксиальная текстура (111). Моделирование рентгеновских рефлектограмм позволило установить, что увеличение толщины медного слоя t_{Cu} от 0,85 до 2,7 нм приводит к увеличению шероховатости межслойных границ Co/Cu от 0,37 до 0,56 нм соответственно, рисунок 12:

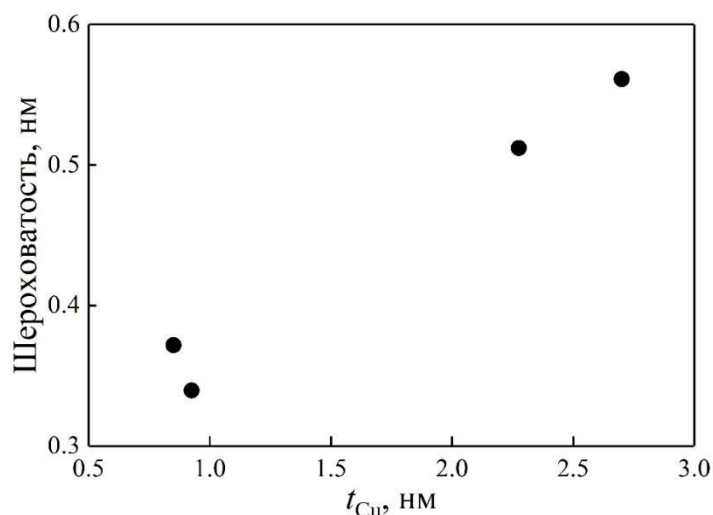


Рисунок 12 – Зависимость шероховатости интерфейсов Co/Cu от толщины медного слоя t_{Cu} для сверхрешёток стекло//Fe(5нм)/[Co(1,5нм)/Cu(t_{Cu})]₁₀/Cr(2нм), при $t_{Cu} = 0,85, 0,93, 2,28, 2,7$ нм

На рисунке 13 приведены спектры ЯМР сверхрешёток стекло//Fe(5нм)/[Co(1,5нм)/Cu(t_{Cu})]₁₀/Cr(2нм), при $t_{Cu} = 0,85$ (а), 2,28 (б) нм:

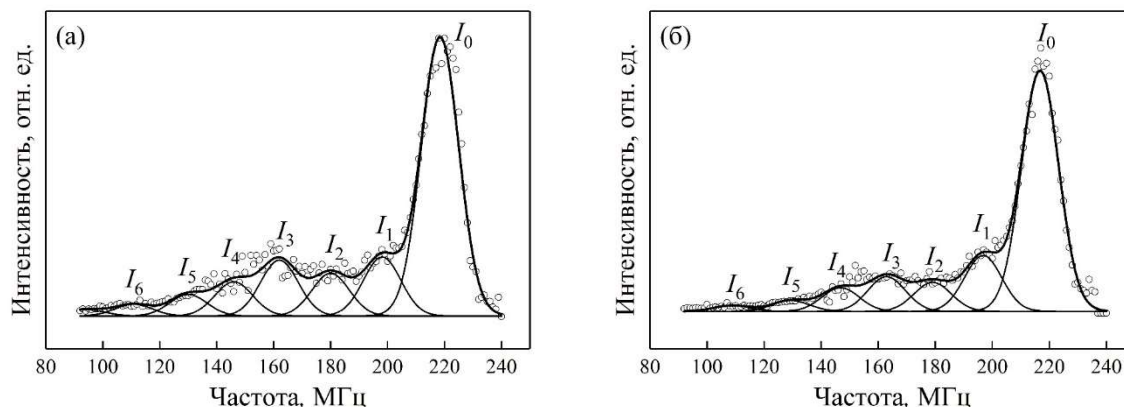


Рисунок 13 – Зависимость интенсивности сигнала спинового эха от частоты для сверхрешёток стекло//Fe(5нм)/[Co(1,5нм)/Cu(t_{Cu})]₁₀/Cr(2нм), при t_{Cu} = 0,85 (а), 2,28 (б) нм. Толстая чёрная линия – результат моделирования экспериментальных данных

Как было показано в третьей главе, направление роста текстуры <111> в сверхрешётках означает, что в ближайшем окружении атомов кобальта, формирующих высокосовершенные межслойные границы, присутствуют три атома меди. На рисунке 14 показана доля высокосовершенных границ в зависимости от толщины немагнитного слоя t_{Cu} для сверхрешёток стекло//Fe(5нм)/[Co(1,5нм)/Cu(t_{Cu})]₁₀/Cr(2нм):

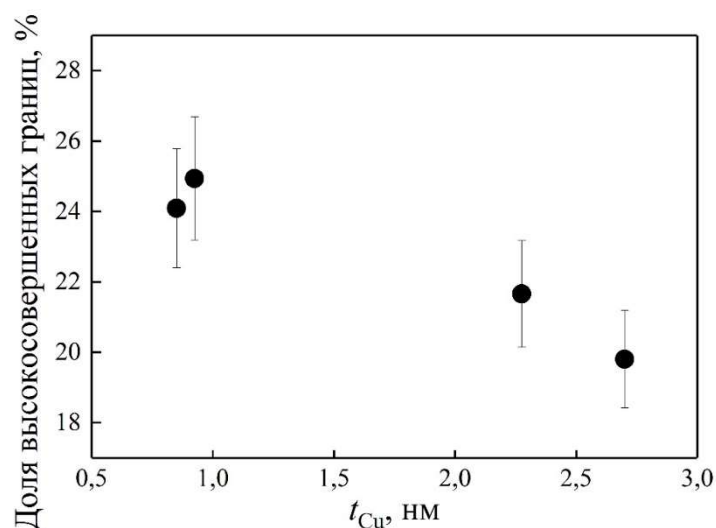


Рисунок 14 – Доля высокосовершенных границ $I_3 / \sum_{i=1}^{i=6} I_i$ в зависимости от толщины немагнитного слоя t_{Cu}

Из этого рисунка видно, что доля высокосовершенных интерфейсов уменьшается при увеличении толщины медного слоя t_{Cu} : от 25 % при t_{Cu} = 0,925 нм до 20 % при t_{Cu} = 2,7 нм.

В пятой главе представлены результаты исследования структурного состояния интерфейсов сверхрешёток стекло//Fe(5нм)/[Co(1,5нм)/Cu(0,9нм)]₁₀/Cr(2нм) в зависимости от режима термообработки. Состояние интерфейсов модифицируется путём отжига образцов при температурах $T_{отж}$ = 150, 200, 300 °С, длительность отжига – 1 час. На рисунке 15 приведена зависимость магнитосопротивления от температуры термообработки:

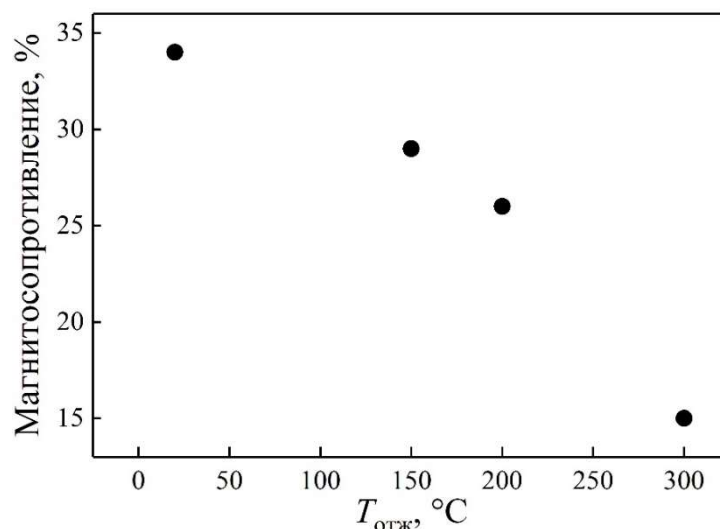


Рисунок 15 – Зависимость магнитосопротивления сверхрешеток Стекло//Fe(5нм)/[Co(1,5нм)/Cu(0,9нм)]₁₀/Cr(2нм) от температуры отжига: после напыления (а), термообработка при 150 °С (б), 200 °С (в), 300 °С (г) – 1 ч

Из этого рисунка видно, что исследуемые наноструктуры демонстрируют достаточно высокий уровень термостабильности. Численные значения магнитосопротивления для различных температур отжига приведены в таблице 1:

Таблица 1 - Зависимость магнитосопротивления от температуры отжига сверхрешёток стекло//Fe(5нм)/[Co(1,5нм)/Cu(0,9нм)]₁₀/Cr(2нм)

$T_{отж}, ^\circ\text{C}$	Магнитосопротивление, %
После напыления	34
150	29
200	26
300	15

Методом рентгеновской дифракции установлено, что в исследуемых плёночных системах формируется аксиальная текстура (111) с осью, нормальной к плоскости подложки. Моделирование рентгеновских рефлектограмм позволяет сделать следующий вывод: при увеличении $T_{отж}$ происходит увеличение шероховатости межслойных границ от 0,42 нм для образца в исходном состоянии до 0,75 нм для образца после термообработки при температуре 300 °С длительностью 1 час.

На рисунке 16 приведены спектры ЯМР для образцов стекло//Fe(5нм)/[Co(1,5нм)/Cu(0,9нм)]₁₀/Cr(2нм) после напыления (а) и после отжига $T_{отж} = 300$ °С длительностью 1 час (б):

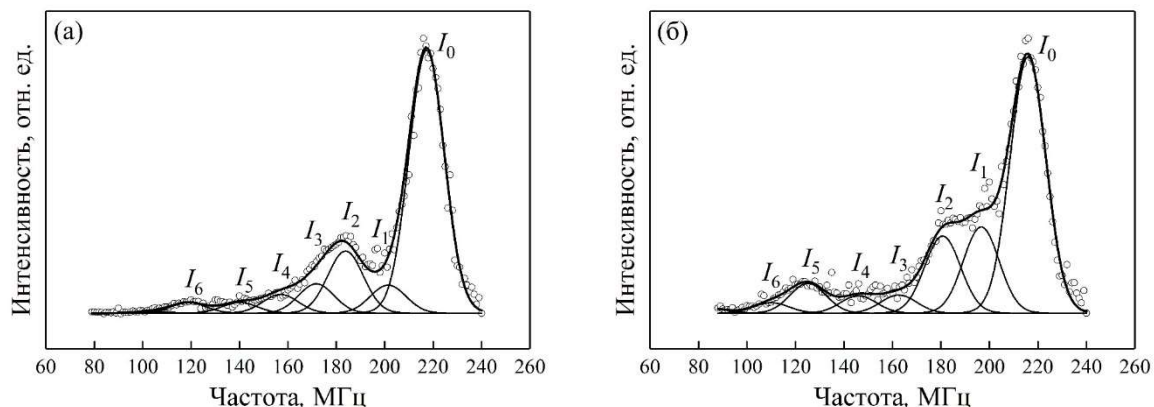


Рисунок 16 – Спектры ЯМР сверхрешёток стекло//Fe(5нм)/[Co(1,5нм)/Cu(0,9нм)]₁₀/Cr(2нм) после напыления (а) и после отжига $T_{отж} = 300\text{ °C}$ длительностью 1 час (б)

На рисунке 17 приведена зависимость доли высокосовершенных интерфейсов от температуры отжига:

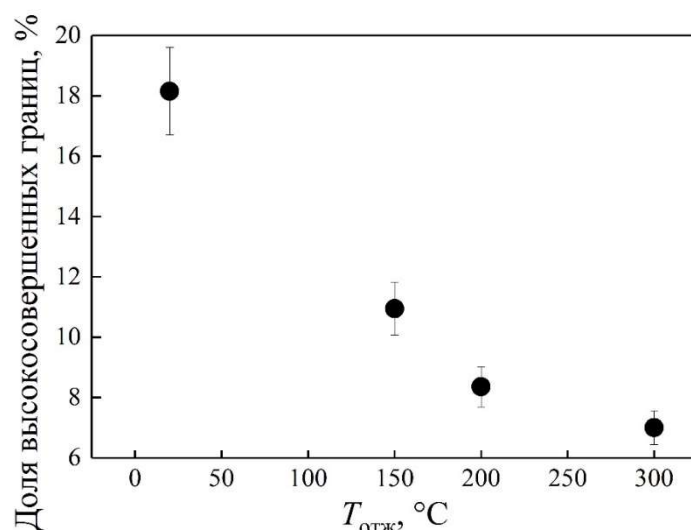


Рисунок 17 – Доля высокосовершенных интерфейсов в сверхрешётках стекло//Fe(5нм)/[Co(1,5нм)/Cu(0,9нм)]₁₀/Cr(2нм) при различных температурах отжига

Согласно рисунку 17, при увеличении температуры отжига происходит уменьшение доли высокосовершенных интерфейсов: от 18 % при комнатной температуре, до 7 % после отжига при 300 °C длительностью 1 час.

Полученные данные могут быть использованы для оценки вероятности единичного акта рассеяния электрона на интерфейсе. Используя формулу Друде-Лоренца, связывающую удельное электросопротивление материала ρ и τ , можно оценить время релаксации электронов τ . Сделав некоторые допущения, получим выражение, связывающее магнитосопротивление сверхрешётки MR и вероятность рассеяния на интерфейсе P :

$$MR = MR_0 \frac{1}{1 + \frac{2mV_F P}{\rho L N e^2 \tau}} \quad (1)$$

где MR_0 – магнитосопротивление образца, в котором интерфейсное рассеяние пренебрежимо мало, m , e , N – масса, заряд и концентрация электронов проводимости, соответственно, ρ – удельное электросопротивление кобальта. Значения вероятности единичного акта рассеяния электронов рассчитанные с помощью выражения (1) приведены в таблице 2:

Таблица 2 – Зависимость вероятности рассеяния электронов P на интерфейсах для сверхрешёток стекло//Fe(5нм)/[Co(1,5нм)/Cu(0,9нм)]₁₀/Cr(2нм)

$T_{отж}, ^\circ\text{C}$	$MR, \%$	P
После напыления	34	0,14
150	29	0,21
200	26	0,27
300	15	0,69

Анализ полученных результатов показывает, что наблюдается определённая корреляция между долей атомов кобальта, локализованных в интерфейсах (аналогично шероховатости межслойных границ), и вероятностью рассеяния электронов на интерфейсах Co/Cu. Связь между долей атомов кобальта, локализованных в интерфейсах, и вероятностью рассеяния электронов на границах иллюстрирует рисунок 18:

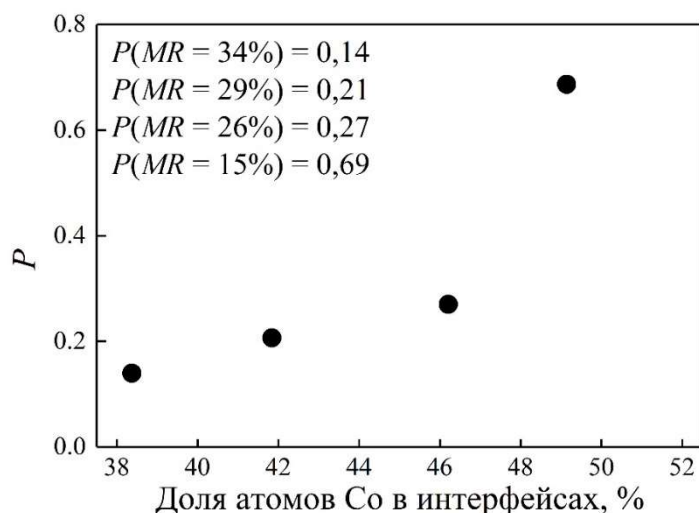


Рисунок 18 – Вероятность единичного акта рассеяния электрона на межслойной границе Co/Cu в зависимости от доли атомов Co, локализованных в интерфейсах

Увеличение доли атомов, формирующих интерфейсы, и шероховатости границ Co/Cu, при повышении температуры отжига, приводит к увеличению вероятности единичного акта рассеяния электрона на интерфейсе и, по-видимому, это является причиной уменьшения величины магнитосопротивления.

В шестой главе успешно применён метод ЯМР для исследования структурных особенностей кобальтсодержащих нанопроволок. На рисунке 19 показан спектр ЯМР для массива однородных НП из чистого кобальта:

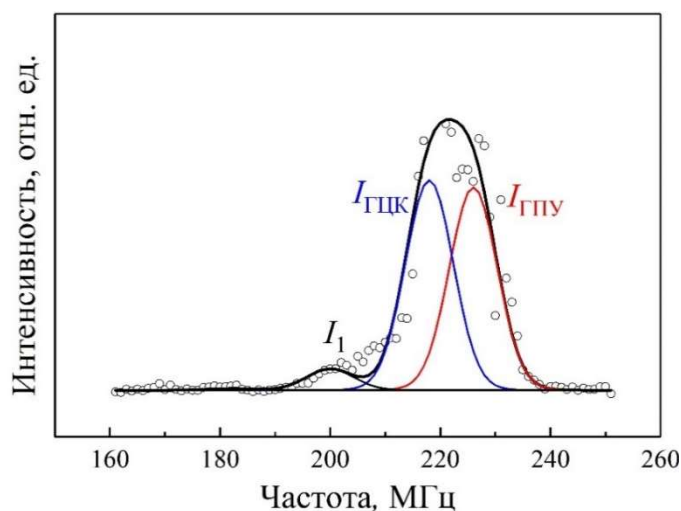


Рисунок 19 – Спектр ЯМР массивов нанопроволок из чистого Co

Сплошная линия является результатом обработки, состоит из трёх гауссовых функций. Наиболее интенсивная линия $I_{ГЦК}$ имеет центр на частоте 218 МГц, что соответствует ГЦК фазе кобальта. Менее интенсивная линия $I_{ГПУ}$ на частоте 226 МГц соответствует кобальту в фазе с гексагональной структурой (ГПУ). На рисунке 20 приведён спектр ЯМР на ядрах ^{59}Co нанопроволок $\text{Co}_{80}\text{Cu}_{20}$:

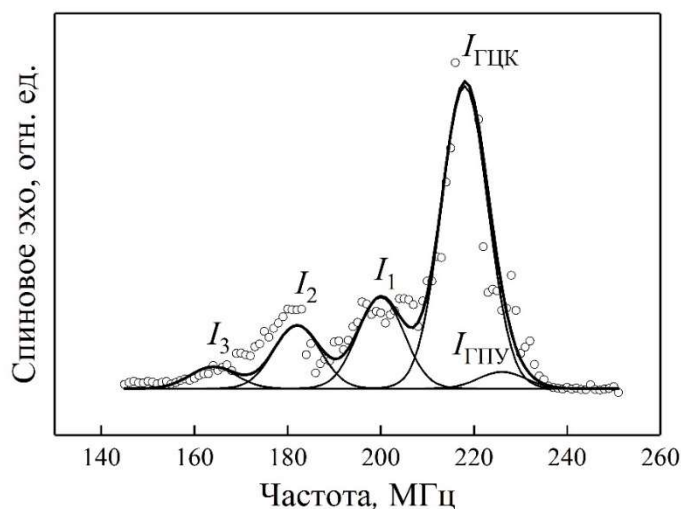


Рисунок 20 – Спектр ЯМР массивов нанопроволок $\text{Co}_{80}\text{Cu}_{20}$

Переход к нанопроволокам состава $\text{Co}_{80}\text{Cu}_{20}$ приводит к значительному уменьшению интенсивности линии $I_{ГПУ}$ на частоте примерно 226 МГц до 4 %. Вероятно, это можно связать с тем, что совместное осаждение кобальта с медью, имеющей структуру ГЦК, способствует осаждению кобальта с преимущественно кубической структурой, что наблюдали в сверхрешётках Co/Cu и согласуется с данными работы [18]. Кроме этого формируется низкочастотная область спектра: резонансные линии I_1 , I_2 , I_3 на частотах 200, 182, 164 МГц, соответственно. Линии $I_{ГЦК}$ и $I_{ГПУ}$ возникают от атомов, расположенных в объёме кобальта с различной кристаллической структурой. Линии, формирующие низкочастотную область спектра, соответствуют атомам кобальта в ГЦК решётке, имеющим от одного до трёх атомов меди в первой координационной сфере. По модели, предложенной авторами [18], рассчитано, что в исследуемых нанопроволоках $\text{Co}_{80}\text{Cu}_{20}$ формируются кластеры меди, средний размер кластера составляет 30 атомов.

На рисунке 21 приведены спектры ЯМР на ядрах ^{59}Co гетерогенных нанопроволок Co/Cu с толщинами кобальтовых слоёв 5 и 30 нм, обработанные по аналогии со спектрами ЯМР в сверхрешётках:

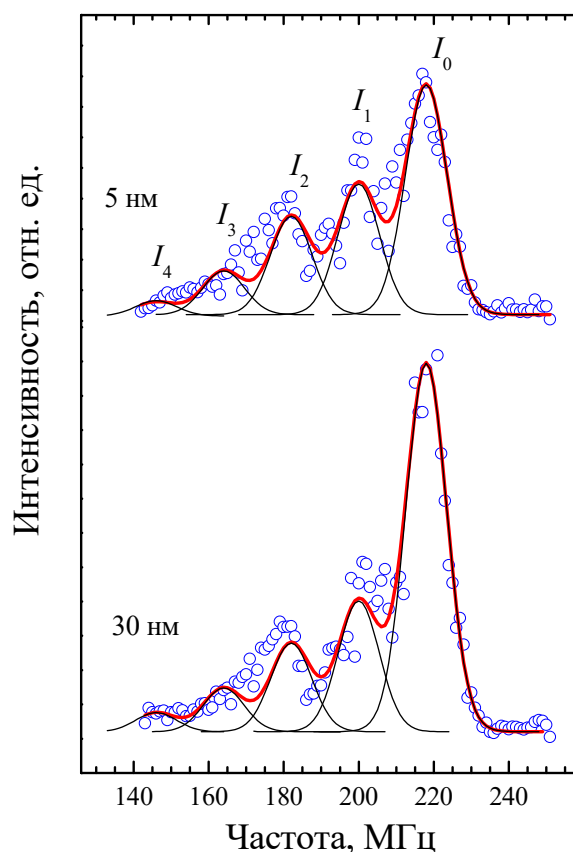


Рисунок 21 – Спектры ЯМР на ядрах ^{59}Co гетерогенных нанопроволок Co/Cu с толщинами кобальтовых слоёв 5 и 30 нм

Линия на частоте 218 МГц соответствует атомам кобальта, локализованным внутри кобальтового слоя с кристаллической структурой ГЦК. Отсутствие линии кобальта на частоте 226 МГц показывает, что в данных слоистых нанопроволоках ГПУ фаза не формируется. Сравнивая спектры ЯМР на ядрах ^{59}Co слоевых НП Co/Cu со спектром ЯМР гомогенных НП CoCu (рисунок 20), можно сказать, что резонансные линии с частотой меньшей, чем 218 МГц, соответствуют атомам кобальта, формирующим межслойные границы. Из рисунка 21 также видно, что при увеличении толщины слоёв кобальта происходит увеличение интенсивности резонансной линии на частоте 218 МГц относительно резонансных линий меньшей частоты. Это объясняется тем, что увеличение толщины кобальтового слоя приводит к изменению соотношения числа атомов в объёме кобальтового слоя и атомов кобальта, локализованных в интерфейсах.

В седьмой главе выполнено трехмерное моделирование структуры интерфейсов сверхрешёток Co/Cu и нанопроволок Co/Cu, структуры гомогенных НП $\text{Co}_{80}\text{Cu}_{20}$. Для моделирования спектров ЯМР сверхрешёток Co/Cu было предложено несколько моделей: внедрение меди в кобальт, модель «остров» с однородной границей; внедрение меди в кобальт, модель «остров» с неоднородной границей, внедрение меди в кобальт, модель «стена». Показано, что введение неоднородной границы внедрения меди в кобальт, модель «остров» (рисунок 22 (а)), является необходимым для описания структуры интерфейсов исследуемых сверхрешёток (рисунок 22 (б)):

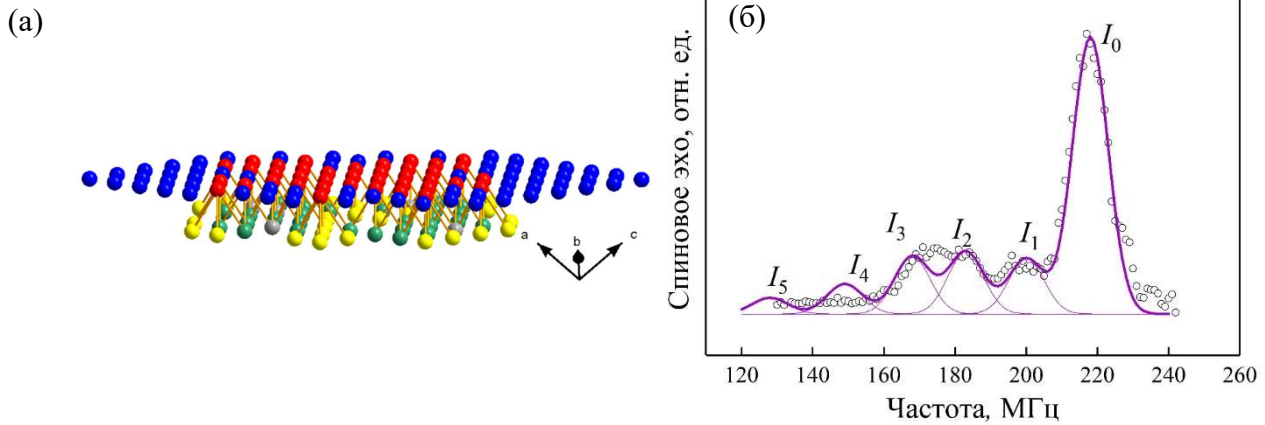


Рисунок 22 - Внедрение меди в кобальт, модель «остров» с неоднородной границей (а) и смоделированный спектр ЯМР с экспериментальными данными ЯМР (о) (б)

На рисунке 22 (а) показано внедрение меди «островного» типа в слой кобальта, агломерация внедрения составляет 39 атомов. На рисунке 22 (б) представлены: экспериментальный спектр ЯМР (о) сверхрешётки стекло//RuCr(5нм)/[Co(1.5нм)/Cu(1нм)]₂₀/Cr(5нм)₂, толстая линия – модельный спектр ЯМР.

При моделировании гомогенных НП $Co_{80}Cu_{20}$ построена модель кластера меди в кобальте (рисунок 23), поскольку размещение атомов меди в объёме кобальта, в случае нанопроволок CoCu, не описывается статистическим распределением [19]. Оценка агломерации кластера меди приведена в главе 6 диссертационной работы.

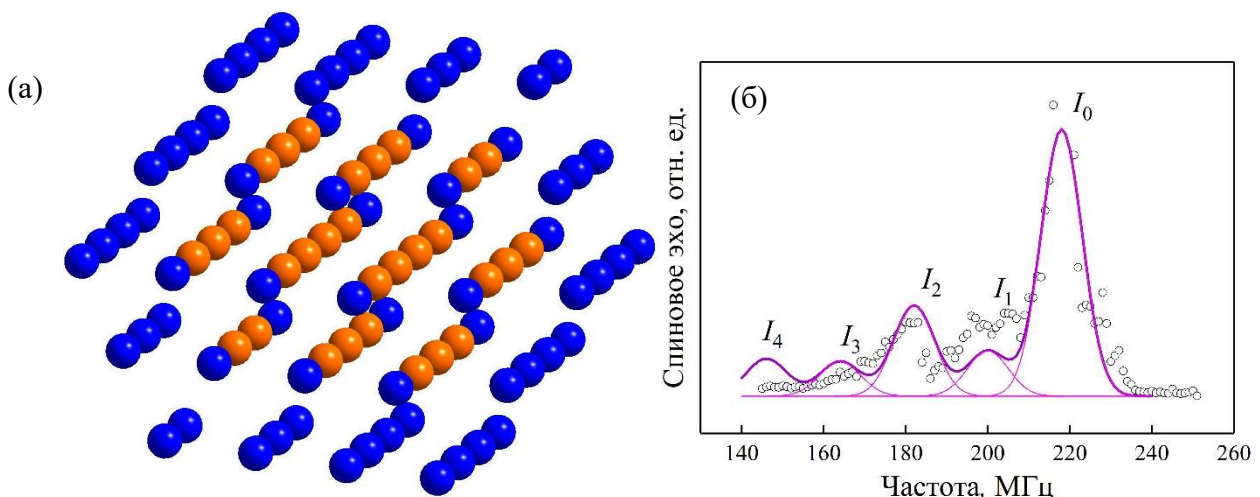


Рисунок 23 – Кластер меди в объёме кобальта, 30 атомов (а). Результат моделирования спектра ЯМР кластера меди в объёме кобальта (б)

Для более высокой степени совпадения экспериментального и теоретического спектров ЯМР уменьшили толщину кластера – рисунок 24:

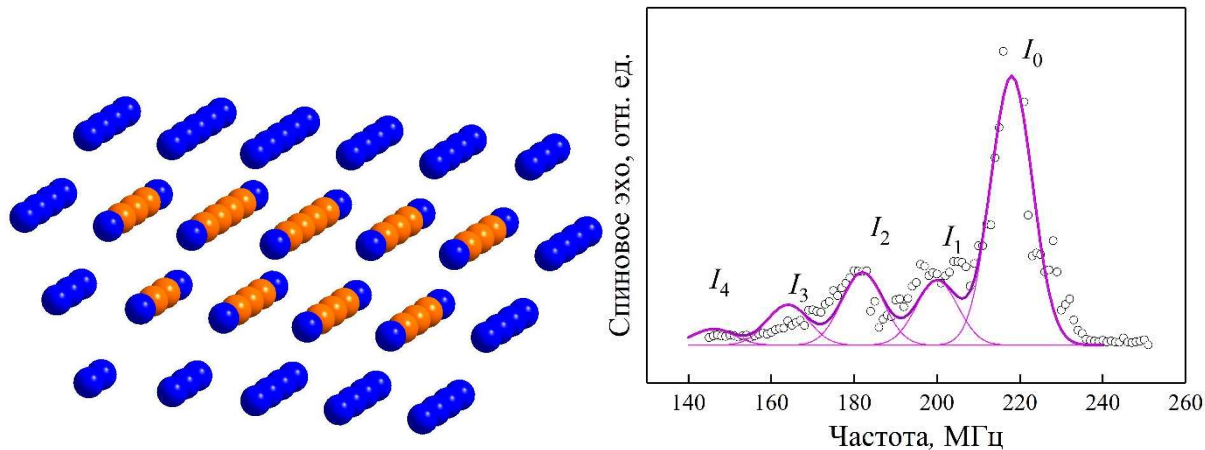


Рисунок 24 – Кластер меди, с уменьшенной толщиной, в объеме кобальта, 28 атомов (а).
Результат моделирования спектра ЯМР кластера меди в объеме кобальта (б)

Модели для описания интерфейсов в сверхрешетках CoCu не описывают полученные спектры ЯМР на ядрах ^{59}Co в слоевых нанопроволоках Co/Cu. Поэтому в моделировании необходимо рассматривать более глубокое проникновение меди: проникновение меди в два и более слоев кобальта. Для моделирования интерфейсов слоевых НП Co/Cu (рисунок 25 (а)) также выполнена последовательная модификация структуры интерфейса и сопоставление результирующего модельного спектра ЯМР с экспериментальными данными (рисунок 25 (б)):

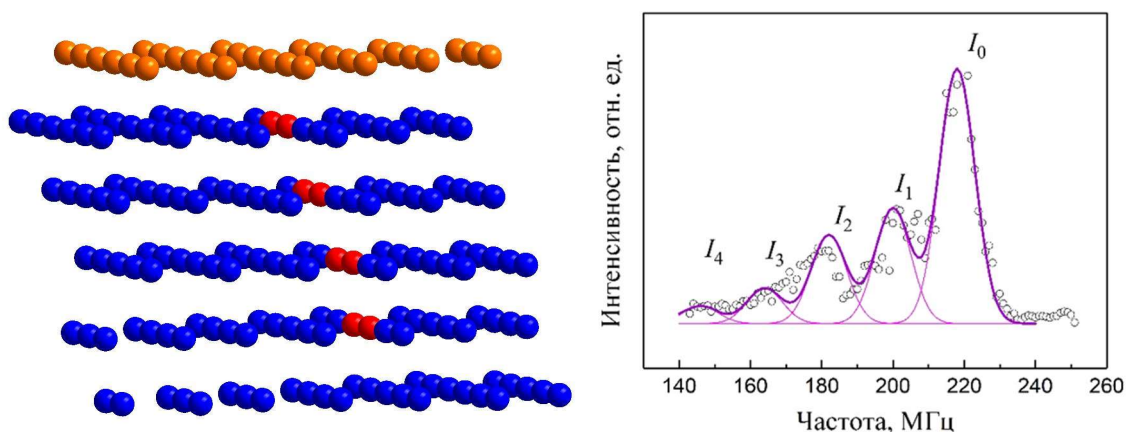


Рисунок 25 – Интерфейс нанопроволок Co/Cu, внедрение глубиной в четыре атомных слоя и шириной в два атома (а). Результат моделирования спектра ЯМР на ядре ^{59}Co (б)

В результате трёхмерного моделирования структуры интерфейсов и сопоставление его со спектрами ЯМР на ядрах ^{59}Co в слоевых нанопроволоках Co/Cu показано, что происходит проникновение меди в два и более слоев кобальта. Следовательно, шероховатость интерфейсов в НП Co/Cu превосходит шероховатость интерфейсов в сверхрешётках Co/Cu.

Основные результаты работы

1. В сверхрешётках Co/Cu, при использовании буферного слоя Fe, увеличение числа пар слоёв выше десяти приводит к увеличению шероховатости межслойных границ, а также к увеличению числа атомов кобальта, локализованных в области межслойных границ, что коррелирует с величиной эффекта ГМС. Установлено, что при использовании буферного слоя $(\text{Ni}_{180}\text{Fe}_{20})_{40}\text{Cr}_{60}$, увеличение числа бислоёв, до двадцати, не приводит к уменьшению доли высокосовершенных границ, что позволяет получить сверхрешётки Co/Cu с высокими значениями эффекта ГМС.

2. Увеличение толщины медного слоя приводит к увеличению шероховатости и уменьшению доли высокосовершенных границ; Показано, что при увеличении температуры отжига происходит увеличение шероховатости интерфейсов, доля высокосовершенных интерфейсов уменьшается.

3. В нанопроволоках из чистого кобальта формируются две фазы кобальта: ГЦК и ГПУ. В нанопроволоках $\text{Co}_{80}\text{Cu}_{20}$ доминирует фаза ГЦК. Рассчитано, что в нанопроволоках $\text{Co}_{80}\text{Cu}_{20}$, в объёме кобальта, формируются кластеры меди агломерацией около 30 атомов.

4. Для описания экспериментальных спектров ЯМР построена трёхмерная модель межслойных границ сверхрешёток Co/Cu. В рамках данной модели показано, что введение неоднородной границы внедрения островного типа глубиной в один атомный слой является необходимым для описания исследуемых сверхрешёток. Построена трёхмерная модель кластера меди в нанопроволоках CoCu, которая позволила интерпретировать экспериментальные спектры ЯМР. Построена трёхмерная модель интерфейсов в гетерогенных нанопроволоках Co/Cu. Показано, что шероховатость интерфейсов нанопроволок Co/Cu превосходит шероховатость интерфейсов в сверхрешётках Co/Cu.

Список публикаций автора

- A1** Interface structure and magnetoresistance studies of $[\text{Co}/\text{C}]_n$ superlattices by means of NMR and TEM / S. A. Chuprakov, T. P. Krinitsina, N. S. Bannikova, I. V. Blinov, S. V. Verkhovskii, M. A. Milyaev, V. V. Popov, V. V. Ustinov. – Текст : непосредственный // Solid State Phenomena. 2014. – Т. 215.– С. 358–363.
- A2** Исследование интерфейсов многослойных структур Co/Cu методом ядерного магнитного резонанса / С. А. Чупраков, Н. С. Банникова, И. В. Блинов, Т. П. Криницина, М. А. Миляев, В. В. Попов, В. В. Устинов. – Текст: непосредственный // ФММ. – 2015. – Т. 116, № 2. – С. 145-149.
- A3** Исследование структуры межслойных границ в сверхрешётках $[\text{Co}/\text{Cu}]_{10}$ методами ЯМР и рентгеновской рефлектометрии / С. А. Чупраков, Н. С. Банникова, И. В. Блинов, Т. П. Криницина, М. А. Миляев, В. В. Попов, В. В. Устинов. – Текст: непосредственный // ФММ. – 2016. – Т. 117, № 12. – С. 1241–1246.
- A4** Nuclear magnetic resonance and X-ray reflectometry of Co/Cu superlattices / S. Chuprakov, N. Bannikova, I. Blinov, T. Krinitsina, M. Milyaev, V. Popov, V. Ustinov. – Текст: непосредственный // Applied Magnetic Resonance. – 2019. – Т. 50, № 1. – С. 415-423.
- A5** Влияние состояния интерфейсов на магниторезистивные свойства сверхрешёток Co/Cu / С. А. Чупраков, Н. С. Банникова, И. В. Блинов, Т. П. Криницина, М. А. Миляев, В. В. Попов, М. В. Рябухина, В. В. Устинов. – Текст: непосредственный // ФММ. – 2018. – Т. 119, № 4. – С. 327-333.
- A6** Исследование кобальтсодержащих нанопроволок различных типов методом ЯМР / С. А. Чупраков, И. В. Блинов, Д.Л. Загорский, Д.А. Черкасов. – Текст: непосредственный // ФММ. – 2021. – Т. 122, № 9. – С. 933–939.
- A7** Особенности синтеза, структура, магнитометрия и ЯМР-спектроскопия нанопроволок различных типов / Д. Л. Загорский, И. М. Долуденко, Р. И. Хайбуллин, С. А. Чупраков, А. А. Гиппиус, С. В. Журенко, А. В. Ткачев, Д. А. Черкасов, О. М. Жигалина, Д. Н. Хмеленин, В. М. Каневский, А. Э. Муслимов, Д. В. Панов, И. В. Блинов. – Текст: непосредственный // Физика твёрдого тела. – 2022. – Т. 64. – С. 1153–1161.
- A8** Effect of State of Interface Boundaries on the Magnetoresistive Properties of Layered Co/Cu Nanostructures / S. A. Chuprakov, N. S. Bannikova, I. V. Blinov, M. A. Milyaev, V. V. Ogolichev, V. V. Popov, V. V. Ustinov. – Текст: непосредственный // Applied Magnetic Resonance. – 2022. – V. 53. –P. 1621–1632.
- A9** Исследование сверхрешёток $[\text{Co}/\text{Cu}]_n$ методом ЯМР / С.А. Чупраков, И.В. Блинов, В.В. Оглобличев // XIII Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-13), Екатеринбург, 7-14 ноября, 2012: тезисы докладов. – Екатеринбург : ИФМ УрО РАН.- 74 с.
- A10** Interface structure and magnetoresistance studies of $[\text{Co}/\text{Cu}]_n$ superlattices by means of NMR and TEM / S.A. Chuprakov, T.P. Krinitsina, N.S. Bannikova, I.V. Blinov, N.A. Milyaev, V.V. Popov, V.V. Ustinov // V Euro-Asian Symposium «Trends in MAGnetism:Nanomagnetism»(EASTMAG-2013). – Vladivostok, 15-21 сентября, 2013: тезисы докладов. – Владивосток: ДВФУ. – 280 с.

- A11** TEM and NMR studies of layer and interface structure of $[\text{Co}/\text{Cu}]_n$ superlattices / N.S. Bannikova, S.A. Chuprakov, T.P. Krinitsina, I.V. Blinov, V.V. Popov, V.V. Ustinov // 8-th International Symposium on Metallic Multilayers (MML 2013). – Kyoto, 19-24 мая, 2013: программа и сборник тезисов. – Kyoto, Japan: – 310 с.
- A12** Nanostructure of Interfaces and Giant Magnetoresistance of Co/Cu Superlattices / S.A. Chuprakov, T.P. Krinitsina, N.S. Bannikova, I.V. Blinov, M.A. Milyaev, V.V. Popov, V.V. Ustinov // International Conference «Nanotech.Advanced Materials & Application» (Nanotech-2014) – Washington, DC, USA, 15-19 июня, 2014: материалы конференции. – Washington: TechConnect. – стр. 466-469.
- A13** Исследование интерфейсов многослойных структур Co/Cu методом ядерного магнитного резонанса / С.А. Чупраков, Н.С. Банникова, И.В. Блинов // XV Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-15), Екатеринбург, 13-20 ноября, 2014: тезисы докладов. – Екатеринбург: ИФМ УрО РАН. – 245 с.
- A14** NMR Investigation of Interfaces in $[\text{Co}/\text{Cu}]_{10}$ Superlattices with Varying Cu Thickness / S.A. Chuprakov, T.P. Krinitsina, N.S. Bannikova, I.V. Blinov, M.A. Milyaev, V.V. Popov, V.V. Ustinov // 2-International Conference on Nanomagnetism and Spintronics (RTNSA-2015), Ordizia, 30 июня-3 июля, 2015. На съёмном носителе.- 0 с.
- A15** Изучение состояния интерфейсов в сверхрешетках $[\text{Co}/\text{Cu}]_{10}$ методами ЯМР и рентгеновской рефлектометрии / С.А. Чупраков, Н.С. Банникова, И.В. Блинов, М.В. Рябухина // XVII Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-17), Екатеринбург, 15-22 ноября, 2016: тезисы докладов. – Екатеринбург: ИФМ УрО РАН. – 80 с.
- A16** Spin-dependent interface scattering contribution to the GMR of Co/Cu superlattices with varying interlayer structure / S.Chuprakov, T.Krinitsina, N.Bannikova, I.Blinov, M.Milyaev, V.Popov, V.Ustinov // International Conference on Magnetism and Spintronics (Sol-SkyMag 2017), San Sebastian, 19-23 июня, 2017: тезисы докладов. – На съёмном носителе. – 70 с.
- A17** Effect of interface state on magnetoresistive properties of Co/Cu-based superlattices / S.A.Chuprakov, I.V.Blinov, T.P.Krinitsina, M.A.Milyaev, V.V.Popov // Moscow International Symposium on Magnetism (MISM-2017), Moscow, 1-5 июля, 2017: тезисы докладов. –Moscow: Lomonosov Moscow State Univ. – 153 с.
- A18** NMR studies of interlayer boundaries in Co/Cu superlattices / V.V.Popov, N.S.Bannikova, I.V.Blinov, S.A.Chuprakov, T.P.Krinitsina, M.A.Milyaev, V.V.Ustinov // VII Euro-Asian Symp. «Trends in MAGnetism» (EASTMAG-2019), Ekaterinburg, 8-13 сентября, 2019: M.N. Miheev Institute of Metal Physics UB RAS. – 63 с.
- A19** Особенности синтеза, структура, магнитометрия и ЯМР-спектроскопия нанопроволок различных типов / Д.Загорский, И.Долуденко, Р.Хайбуллин, С.Чупраков, С.Чигарев, Е.Вилков, А.Гиппиус, С.Журенко, О.Жигалина, Д.Черкасов, В.Каневский, И.Блинов // XXVI Международный симпозиум «Нанозелетроника», Нижний Новгород, 14-17 марта, 2022. – 246 с.

Список литературы

- Ферт, А.** Происхождение, развитие и перспективы спинтроники / А. Ферт. – Текст: непосредственный // Успехи физических наук. – 2008. – Т. 178, № 12. – С. 1336-1348.
- Advantages of using $\text{Cu}_{1-x}\text{In}_x$ alloys as spacers in GMR multilayers / М. А. Milyaev, L. I. Naumova, V. V. Proglyado, А. Y. Pavlova, М. V. Makarova, E. I. Patrakov, N. P. Glazunov, V. V. Ustinov. – Текст: непосредственный // Journal of Alloys and Compounds. – 2022. – Т. 917. – С. 165512.
- Reig, C.** Giant Magnetoresistance (GMR) Sensors From Basis to State-of-the-Art Applications. Smart Sensors, Measurement and Instrumentation. Volume 6. / C. Reig, Cardoso S., Mukhopadhyay S. C. – Berlin : Springer-Verlag, 2013. – 301 с. ISBN 978-3-642-37171-4. – Текст: непосредственный.
- Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange / G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach, W. Zinn. – Текст: непосредственный // Physical Review B. – 1989. – Т. 39, № 7. – С. 4828-4830.
- Grünberg, P.** Layered magnetic structures in research and application / P. Grünberg. – Текст: непосредственный // Acta Materialia. – 2000. – Т. 48, № 1. – С. 239-251.

6. Effect of interface structure correlation on magnetoresistance of Fe/Cr multilayers / A. Paul, A. Gupta, S. M. Chaudhari, D. M. Phase. – Текст: непосредственный // *Vacuum*. – 2001. – Т. 60, № 4. – С. 401-405.
7. Effect of interface structure on magnetic and magnetoresistive properties of Fe/Cr multilayers / V. V. Ustinov, L. N. Romashev, T. P. Krinitsina, E. A. Kravtsov, M. A. Milyaev, A. V. Semerikov, V. A. Tsurin, N. V. Kourtina. – Текст: непосредственный // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2002. – Т. 240, № 1. – С. 511-513.
8. Мессбауэровское исследование процесса формирования слоев Fe в сверхрешетках Fe/Cr / В. А. Цурин, Л. Н. Ромашев, В. В. Устинов, А. П. Танкеев, В. В. Овчинников. – Текст: непосредственный // *Письма в ЖТФ*. – 2009. – Т. 35, № 3. – С. 74-81.
9. XAFS studies of the behaviour of Bi in Co/Cu multilayers / M. Krupiński, M. Kas, A. Polit, Y. Zabala, D. Zajac, M. Marszalek, C. Kapusta, A. Dobrowolska. – Текст: непосредственный // *Acta Physica Polonica Series a*. – 2009. – Т. 115. – С. 565.
10. Investigation of ion beam deposited spin valve interface structure by ^{59}Co nuclear magnetic resonance / E. Jędryka, W. E. Bailey, M. Wójcik, S. Nadolski, S. X. Wang. – Текст: непосредственный // *Journal of Applied Physics*. – 1999. – Т. 85, № 8. – С. 4439-4441.
11. Исследование тонких пленок неоднородных сплавов Co-Cu методами ЯМР / Д. Халяпин, Мальцев, В., Ким П., Турпанов И., Бетенькова А. – Текст: непосредственный // *Журнал СФУ. Математика и физика*. – 2010. – Т. 3, № 1. – С. 70-77.
12. Correlation of magnetotransport and structure in sputtered Co/Cu multilayers / A. Paul, T. Damm, D. E. Bergler, S. Stein, H. Kohlstedt, P. Grunberg. – Текст: непосредственный // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2003. – Т. 15, № 17. – С. 2471-2491.
13. The critical thickness of Fe buffer layer in giant magnetoresistance of Co/Cu superlattices / M. Suzuki, Y. Taga, A. Goto, H. Yasuoka. – Текст: непосредственный // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 1993. – Т. 126, № 1. – С. 495-497.
14. Nanostructure of Co/Cu multilayers / H. A. M. de Gronckel, K. Kopinga, W. J. M. de Jonge, P. Panissod, J. P. Schillé, F. J. A. den Broeder. – Текст: непосредственный // *Physical Review B*. – 1991. – Т. 44, № 16. – С. 9100-9103.
15. Effect of Interface Roughness on GMR in Fe/Cr Multilayers / A. Gupta, A. Paul, S. M. Chaudhari, D. M. Phase. – Текст: непосредственный // *Journal of the Physical Society of Japan*. – 2000. – Т. 69, № 7. – С. 2182-2187.
16. High magnetoresistance permalloy films deposited on a thin NiFeCr or NiCr underlayer / W.-Y. Lee, M. F. Toney, P. Tameerug, E. Allen, D. Mauri. – Текст: непосредственный // *J. Appl. Phys.* – 2000. – Т. 87, № 9. – С. 6992-6994.
17. **Thomson, T.** Interfacial quality and giant magnetoresistance in MBE-grown Co/Cu(111) superlattices / T. Thomson, P. C. Riedi, D. Greig. – Текст: непосредственный // *Physical Review B*. – 1994. – Т. 50, № 14. – С. 10319-10322.
18. **Scarani, V.** The microstructure of electrodeposited cobalt-based nanowires and its effect on their magnetic and transport properties / V. Scarani, B. Doudin, J.-P. Ansermet. – Текст: непосредственный // *Journal of magnetism and magnetic materials*. – 1999. – Т. 205, № 2-3. – С. 241-248.
19. **Chojcan, A.** Interactions between impurity atoms of 3d transition metals dissolved in iron / A. Chojcan – Текст: непосредственный // *Journal of alloys compounds*. – 1998. – Т. 264, № 1-2. – С. 50-53.

Отпечатано на Ризографе ИФМ УрО РАН тир. 100 зак. № 69
Объем 1 печ. л. Формат 60x84 1/16
620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18