

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Свистова Леонида Евгеньевича на диссертационную работу Чупракова Станислава Александровича **«Структура и интерфейсы кобальтсодержащих сверхрешёток и нанопроволок по данным ядерного магнитного резонанса»**, представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Актуальность темы диссертации

Магнитные сверхрешётки являются актуальным классом наноматериалов и имеют практическое применение. Они используются в качестве датчиков магнитного поля и в устройствах спинтроники. Используя различные технологические приемы можно добиться разнообразных сочетаний характеристик изготовленных магнитных слоистых структур. Так можно варьировать магниторезистивные свойства, управлять магнитным полем насыщения, управлять магнитной и температурной жесткостью магнитной структуры. Работа С.А. Чупракова посвящена исследованиям планарных Co/Cu структур (сверхрешеток) приготовленных методом магнетронного распыления в ИФМ УрО РАН. В исследованных сверхрешётках толщины магнитных и немагнитных слоёв не превышают одного-двух десятков ангстрем. Важным фактором, влияющим на особенности магнитных и транспортных свойств таких объектов, является структура границ раздела магнитных и немагнитных слоёв (интерфейсов). Ожидается, что интерфейсы составляют несколько атомных слоёв. Для исследования структуры интерфейсов необходимо задействовать локальные методы обладающие высокой чувствительностью. В работе С.А. Чупракова использован метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР), который оказался весьма информативным для исследования интерфейсов. Проведённое системное исследование методом ЯМР влияния различных параметров на структуру интерфейсов, дополненное результатами рентгеноструктурного анализа, проведенного на тех же образцах, позволило получить данные о структуре интерфейсов в атомном масштабе. Во второй части работы С.А. Чупракова обсуждаются результаты ЯМР исследований кобальтсодержащих нанопроволок, в результате которых была построена модель кристаллической структуры внутри кобальтовых дисков и в интерфейсах.

Структура и основное содержание работы

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка публикация автора по теме диссертации и списка используемой литературы

Во введении обоснована актуальность темы исследования, перечислены ее цели и задачи, приведены основные положения, выносимые на защиту, описана научная и практическая значимость полученных результатов. Материал диссертации изложен на 137 страницах и включает 98 рисунков, 10 таблиц и 111 наименований литературных источников.

В первой главе диссертации приведено описание эффекта гигантского магнитосопротивления, особенности формирования сверхтонкого поля на ядрах ^{59}Co , литературный обзор по применению метода ядерного магнитного резонанса для исследования структуры и интерфейсов сверхрешёток Co/Cu с различными структурными формулами и методами приготовления, представлены данные о моделях двумерных интерфейсов. В конце главы приведены краткие выводы по изложенному материалу.

Во второй главе описаны исследуемые материалы, конструкция ЯМР вставки для измерений в транспортном гелиевом сосуде Дьюара, используемое оборудование и методики исследования: просвечивающая электронная микроскопия, магнитометрия, рентгеновская рефлектометрия и рентгеновская дифракция, ядерный магнитный резонанс.

В третьей главе обсуждаются результаты исследования сверхрешёток Co/Cu при толщине медного слоя соответствующего антиферромагнитному обменному взаимодействию между слоями кобальта с изменяющимся числом бислоёв от 10 до 40, в качестве материала буферного слоя было выбрано железо. С помощью рентгеновской дифракции установлено наличие двухкомпонентной текстуры, рентгеновская рефлектометрия показала, что при увеличении числа бислоёв происходит увеличение шероховатости интерфейсов. Методом ядерного магнитного резонанса установлено, что доля высокосовершенных интерфейсов уменьшается при увеличении числа бислоёв. Далее в этой главе приведены данные по сверхрешётке Co/Co с числом бислоёв от 10 до 20 с применением в качестве буферного слоя материала с составом $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{40}\text{Cr}_{60}$. В этих сверхрешётках формируется текстура (111), шероховатость интерфейсов, при увеличении числа бислоёв, изменяется незначительно. Обработка экспериментальных спектров ЯМР показала, что доля высокосовершенных интерфейсов изменяется в пределах 38 – 46 %.

В четвертой главе описано исследование влияния толщины медного слоя на структуру интерфейсов сверхрешёток Co/Cu. Толщины медного слоя выбраны таким образом, чтобы эффект гигантского магнитосопротивления

наблюдался на первом и вторых антиферромагнитных максимумах. Показано, что шероховатость интерфейсов возрастает от 0.37 до 0.56 нм, доля высокосовершенных границ уменьшается с 25 до 20 %, при увеличении толщины медного слоя.

В пятой главе обсуждается влияние температуры термообработки: 150, 200, 300 °С, и при неизменной длительности термообработки на структуру сверхрешетки с текстурой (111). Увеличение температуры отжига приводит к уменьшению доли высокосовершенных границ, увеличению доли атомов Со участвующих в формировании межслойных границ, шероховатость интерфейсов увеличивается.

В шестой главе приводятся спектры ЯМР гомогенных нанопроволок из чистого кобальта и с составом $\text{Co}_{80}\text{Cu}_{20}$, слоевых нанопроволок из чередующихся слоёв Со и Си. По данным ЯМР, в нанопроволоках из чистого Со формируются два типа кристаллические структуры: ГЦК и ГПУ. В нанопроволоках $\text{Co}_{80}\text{Cu}_{20}$ преобладает фаза ГЦК, фаза ГПУ практически отсутствует, формируется низкочастотное крыло спектра ЯМР. Из анализа интенсивности резонансных линий в диссертации приводится вывод, что в этих нанопроволоках формируются кластеры меди, состоящие из примерно 30 атомов. В гетерогенных нанопроволоках отсутствует фаза ГПУ.

В седьмой главе представлена трёхмерные модели интерфейсов в сверхрешётках Со/Си и в гетерогенных нанопроволоках Со/Си, структуры кластеров меди в гомогенных нанопроволоках $\text{Co}_{80}\text{Cu}_{20}$. В результате моделирования получены модельные спектры ЯМР, которые в будущем могут быть использованы для моделирования состояния неоднородных СоСи систем. Приведены примеры использования модельных ЯМР спектров для интерпретации экспериментально полученных на двумерных объектах и нанопроволоках.

В заключении диссертационной работы сформулированы основные выводы, из которых показано, что в сверхрешётках Со/Си структура интерфейсов оказывает влияние на величину магнитосопротивления, описана зависимость структуры интерфейсов от различных параметров сверхрешеток Со/Си. Приведены зависимости структуры и возникновения особенностей структуры нанопроволок от их состава, выполнено сравнение интерфейсов Со/Си в нанопроволоках и сверхрешетках.

Научная новизна результатов диссертационной работы

В работе методом ЯМР впервые системно исследованы структурные особенности межслойных границ в сверхрешётках Со/Си 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.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием метрологически аттестованного оборудования и апробированных методик, применением разнообразных современных взаимодополняющих методов исследования.

Публикации и апробация диссертационной работы. Результаты диссертации апробированы и опубликованы. По теме диссертации автор опубликовал в 8 статьях в рецензируемых научных журналах из Перечня ВАК, а также в 11 тезисах докладов на международных и российских научных конференциях. Полученные в диссертации результаты полностью соответствуют поставленной цели и задачам исследования. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. Автор измеряет ЯМР в нулевом магнитном поле. Были ли эксперименты методом ЯМР на сверхрешётках в магнитном поле? Какую эволюцию спектра ЯМР автор ожидает при введении поля?
2. В работе сравниваются интенсивности резонансных линий, однако в работе не приведены данные о величинах спин-спиновой релаксации. Время спин-спиновой релаксации каким-либо образом учитывались в расчётах?
3. Есть несколько замечаний касающихся изложения материала.
 - А. В тексте приводится процентное изменение сопротивления при приложении внешнего магнитного поля большего, чем поле насыщения. Вместе с тем, мне, как читателю интересно само значение сопротивления и описание полевой зависимости $R(H)$ при намагничивании и размагничивании.
 - Б. Есть ряд рисунков со спектрами, приведенными в относительных единицах. На них необходимо указывать положение нуля, чтобы была видна величина эффекта.
 - В. Рисунок 1.2 неудачный, поскольку не соответствует геометрии эксперимента автора.
 - Г. Автор несколько раз пишет, что магнитосопротивление измерялось с помощью вибрационного магнитометра. Это стилистически не верно.

Автор использовал магнит магнитометра для измерения магнитосопротивления.

Представленная диссертационная работа Чупракова Станислава Александровича является законченной научно-квалификационной работой обладающей внутренней целостностью, демонстрирующей актуальность и научную новизну. Содержание диссертационной работы соответствует поставленным задачам и приводит логичное и последовательное их решение. Автореферат полностью соответствует диссертационной работе: цель, задачи исследования, положения, выносимые на защиту, актуальность, научная новизна. Работа соответствует пунктам 3-6 Паспорта специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений. Диссертационная работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук – критериям 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (с последующими изменениями), а её автор Чупраков Станислав Александрович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Автор отзыва согласен на обработку персональных данных

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Институт физических проблем
им. П.Л. Капицы
Российской академии наук



Свистов Леонид Евгеньевич

119334, г. Москва,
ул. Косыгина, д. 2
e-mail: svistov@kapitza.ras.ru
тел.: +7(499)1370998

Дата составления отзыва «_28_» декабря 2023 года

Ученый секретарь



Андреева Ольга Александровна

Подпись Л.Е. Свистова заверяю:
Начальник отдела кадров
ИФП РАН



Макарова
Макарова Наталия Юрьевна

С отзывом знакомых
09.01.2024

Уураков С.А. 1

Сведения об официальном оппоненте

по диссертации **Чупракова Станислав Александровича** на тему «**Структура и интерфейсы кобальтсодержащих сверхрешёток и нанопроволок по данным ядерного магнитного резонанса**» по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Фамилия, имя, отчество	Свистов Евгений Леонидович
Гражданство	РФ
Ученая степень	доктор физико-математических наук
Ученое звание	-
Наименование отрасли науки и специальности, по которой защищена диссертация	01.04.09 – Физика низких температур
Место работы:	
Полное наименование организации в соответствии с уставом	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физических проблем им. П.Л. Капицы Российской академии наук
Сокращенное наименование организации в соответствии с уставом	ИФП РАН
Почтовый адрес, индекс организации	119334, г. Москва, ул. Косыгина, д. 2
Адрес официального сайта в сети «Интернет»	https://www.kapitza.ras.ru/
Должность	Ведущий научный сотрудник
Структурное подразделение	-
Телефон	+7(499)1370998
Адрес электронной почты	svistov@kapitza.ras.ru
Список основных публикаций за последние пять лет по теме диссертации (не более 15 публикаций)	

Список основных публикаций за последние пять лет по теме диссертации
(не более 15 публикаций)

1. Multiferroicity of CuCrO_2 tested by electron spin resonance / S. K. Gotovko, T. A. Soldatov, L. E. Svistov, H. D. Zhou. – Текст: непосредственный // Physical Review B. – 2018. – Т. 97, № 9. – С. 094425.
2. Search for a nematic phase in the quasi-two-dimensional antiferromagnet CuCrO_2 by NMR in an electric field / Y. A. Sakhratov, J. J. Kweon, E. S. Choi, H. D. Zhou, L. E. Svistov, A. P. Reyes. – Текст: непосредственный // Physical Review B. – 2018. – Т. 97, № 9. – С. 094409.
3. Electron spin resonance in spiral antiferromagnet linarite: Theory and experiment / S. K. Gotovko, L. E. Svistov, A. M. Kuzmenko, A. Pimenov, M. E. Zhitomirsky. – Текст: непосредственный // Physical Review B. – 2019. – Т. 100, № 17. – С. 174412.
4. Magnetic structure of the triangular antiferromagnet $\text{RbFe}(\text{MoO}_4)_2$ weakly doped with nonmagnetic K^+ ions studied by NMR / Y. A. Sakhratov, M. Prinz-Zwick, D. Wilson, N. Büttgen, A. Y. Shapiro, L. E. Svistov, A. P. Reyes. – Текст: непосредственный // Physical Review B. – 2019. – Т. 99, № 2. – С. 024419.
5. High-field magnetic structure of the triangular antiferromagnet $\text{RbFe}(\text{MoO}_4)_2$ / Y. A. Sakhratov, O. Prokhnenko, A. Y. Shapiro, H. D. Zhou, L. E. Svistov, A. P. Reyes, O. A. Petrenko. – Текст: непосредственный // Physical Review B. – 2022. – Т. 105, № 1. – С. 014431.

Начальник отдела кадров
ИФП РАН

Макарова Наталия Юрьевна

Ученый секретарь ИФП РАН

/ Андреева Ольга Александровна