

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Чупракова Станислава Александровича

«Структура и интерфейсы кобальтосодержащих сверхрешеток и нанопроволок по данным ядерного магнитного резонанса»,

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальности

1.3.12 – Физика магнитных явлений.

Диссертация Чупракова Станислава Александровича посвящена исследованию магнитных свойств сверхрешеток Co/Cu в зависимости от числа бислоев, типа буферного слоя (Fe, NiFeCr), температуры отжига, толщины слоя меди и нанопроволок из чистого кобальта, гомогенных нанопроволок $\text{Co}_{80}\text{Cu}_{20}$, гетерогенных нанопроволок Co/Cu методами ядерного магнитного резонанса. Различные виды сверхрешеток активно получают и исследуют благодаря наблюдению в них явления гигантского магнитосопротивления при высоких температурах, которое сразу стали применять при записи и считывании информации в жестких дисках и оперативной памяти, а также магнитных сенсорах. Поиски новых материалов, а также их стабильности от внешних факторов стимулируются потребностями нанoeлектроники и спинтроники. Физические свойства полученных гетероструктур зависят от геометрических особенностей интерфейса, обменных взаимодействий между слоями, особенности которых активно теоретически и экспериментально изучаются в настоящее время. Получение новых сверхрешеток с разной толщиной слоев 3d – элементов и химического состава, их характеристика являются актуальной задачей как с фундаментальной точки зрения, так и возможного практического применения. Метод ядерного магнитного резонанса является важным и наиболее полезным инструментом изучения ближайшего окружения иона – локального зонда, так как резонансное значение линии ядерного резонанса необычайно чувствительно к симметрии кристаллического поля, созданного окружением. В связи с этим проведенные Чупраковым Станиславом Александровичем экспериментальные и теоретические исследования сверхрешеток составов стекло/(Fe или $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$)/[Co/Cu(t_{Cu})]_n/Cr n = 10,20,30,40 при различных температурах отжига, толщины буферного слоя, и нанопроволок из чистого кобальта, гомогенных $\text{Co}_{80}\text{Cu}_{20}$, гетерогенных Co/Cu методами ядерного магнитного резонанса являются актуальными как в теоретическом, так и прикладном аспектах.

Структура диссертации

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

Во введении обоснована актуальность темы исследования, перечислены ее цели и задачи, приведены основные положения, выносимые на защиту, описана научная и практическая значимость полученных результатов.

В **первой** главе приведен обзор литературных данных по получению и характеристике сверхрешеток Co/Cu и нанопроволок, содержащих ионы Co. Рассмотрены особенности ядерного магнитного резонанса на ядрах кобальта в гетероструктурах и нанопроволоках, влияние беспорядка ближайшего окружения на резонансное значение магнитного поля, обозначены задачи и цели диссертационной работы.

Во **второй** описаны исследуемые объекты (кобальтсодержащие сверхрешетки и нанопроволоки) и методики исследования, к которым относятся магнитометрия, просвечивающая электронная микроскопия, рентгеновские дифракция и рефлектометрия, ядерный магнитный резонанс. Также в этой главе описаны особенности методики регистрации сигнала ядерного магнитного резонанса на ядрах ^{59}Co . Автор разработал и сделал датчик ядерного магнитного резонанса, работающий в диапазоне частот от 7 - 260 МГц из тонкостенных немагнитных сталей при максимально возможном отношении объема образца к объему высокочастотного поля. Чупраковым С.А. были изготовлены измерительные катушки типа плоский соленоид, представляющую собой плоскую спираль с напаянным контактом центрального отвода для изучения пленочных материалов, в том числе гетероструктур и нанопроволок.

Третья глава включает результаты по экспериментальному изучению структур стекло/ $\text{Fe}/[\text{Co}/\text{Cu}(\text{t}_{\text{Cu}})]_n/\text{Cr}$ $n = 10, 20, 30, 40$ и зависимости магнитосопротивления от особенностей интерфейса. В спектре ядерного магнитного резонанса наблюдалось пять линий, которые были названы I_0, I_1, I_2, I_3, I_4 . Автор пишет на странице 67, что в случае высокосовершенной границы атом кобальта имеет 5 атомов меди в ближайшем окружении, ниже на этой же странице 67 резонансная линия I_4 (высокосовершенная) имеет 4 атома меди в ближайшем окружении. Возникает вопрос: изменяется ли интенсивность линии I_4 в зависимости от текстуры? Проведена оценка относительной интенсивности линии I_4 в зависимости от количества слоев. В главе также обсуждаются особенности спектров магнитного резонанса при 4.2К для структуры стекло/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ $_{60}\text{Cr}_{40}\text{Cr}/[\text{Co}/\text{Cu}(\text{t}_{\text{Cu}})]_n/\text{Cr}$ $n=10, 12, 14, 16, 20$, в которой магнитосопротивление

растет с числом слоев n и высокосовершенной межслойной границе соответствует линия I_3 . Проведено сравнение спектров ЯМР для двух серий образцов.

В **четвертой** главе рассмотрено влияние толщины слоя меди на особенности интерфейса стекло/Fe/[Co/Cu(t_{Cu})]₁₀/Сг в зависимости от толщины слоев меди. Проведено моделирование дифрактограммы. Проведена аппроксимация спектров ЯМР в диапазоне от 100 до 240 МГц суммой из семи линий. *Впервые* показано, что доля ионов кобальта, вблизи интерфейса в пределах ошибки не зависит от толщины медного слоя, установлено, что интенсивность сигнала I_3 уменьшается при повышении толщины медного слоя.

В **пятой** главе рассмотрены особенности интерфейса в сверхрешетках [Co\Cu] после термообработки. Показано, что при повышении температуры отжига до 573К увеличивается шероховатость межслойных границ практически в два раза: увеличивается перемешивание атомы кобальта и меди на границе. Анализ спектров ЯМР до и после отжига показал, что интенсивность линий I_1 и I_5 резко увеличилась после отжига, а интенсивность линии I_3 уменьшается, а доля ионов кобальта в интерфейсах увеличивается.

В **шестой** главе рассмотрены особенности ядерного магнитного резонанса нанопроволок, в состав которых входят как чистый кобальт, так и кобальт/медь. Показано, что в нанопроволоках из чистого кобальта спектр ЯМР состоит из трех линии, одна из которых связана с ионами кобальта в области с гексагональной структурой (ГПУ), вторая обусловлена ионами кобальта с кристаллической решеткой ГЦК. Автором *впервые* обнаружено, что спектр ЯМР нано проволоки $Co_{80}Cu_{20}$ состоит из пяти линий, а вклад от ГПУ составляющей уменьшается до 4%. Анализ интенсивности линий и расчет возможных состояний позволил оценить размер кластера, который формируется ионами меди.

Седьмая глава посвящена рассмотрению различных типов межслойных конфигураций. Выполнено трёхмерное моделирование интерфейсов в кобальтсодержащих сверхрешётках и нанопроволоках, структуры нанопроволок. С помощью моделирования автор интерпретирует экспериментальные спектры ЯМР и делает следующие выводы: в исследуемых сверхрешётках в интерфейсной области происходит внедрение меди в кобальт с характерной формой «остров», глубина проникновения составляет один атомный слой. Для нанопроволок $Co_{80}Cu_{20}$ построена модель кластера меди в объёме кобальта. Построена модель интерфейса в слоевых нанопроволоках Co/Cu, согласно которой шероховатость интерфейсов в слоевых нанопроволоках больше, чем шероховатость интерфейсов в сверхрешётках Co/Cu.

В заключении представлены основные результаты настоящей диссертационной работы.

На защиту вынесено четыре научных положения. Все выводы диссертации хорошо обоснованы и не вызывают возражений.

Научная новизна и достоверность защищаемых положений

Достоверность полученных данных подтверждается тщательной подготовкой и характеристикой образцов, выполнением калибровочных экспериментов, использованием современного оборудования, согласием с экспериментальными результатами других авторов и непротиворечивостью известным физическим моделям.

Впервые рассмотрено влияние буферного слоя железа и количества бислоев на проявление шероховатости интерфейса в спектрах ЯМР сверхрешетки спектров стекло/Fe/[Co/Cu(t_{Cu})]_n/Cr.

Впервые проведены исследования ядерного магнитного резонанса в структуре стекло/ Ni₈₀Fe₂₀)₆₀Cr₄₀Cr/[Co/Cu(t_{Cu})]_n/Cr $n=10, 12, 14, 16, 20$. Доказано, что количество бислоев не уменьшает долю высокосовершенных границ.

Впервые показано, что в спектрах ЯМР нанопроволоки кобальта наблюдаются линии атомов, находящихся как в гексагональной плотноупакованной ячейке, так и гранецентрированная кубическая ячейке.

Практическая значимость работы

Автором была разработана и введен в эксплуатацию датчик ЯМР для регистрации сигналов ЯМР сверхрешеток Co/Cu, изготовлена измерительная плоская спиральная катушка, которая может быть использована для аналогичных соединений. Показано влияние температуры отжига на качество интерфейса сверхрешеток Co/Cu, что связано с величиной гигантского магнитосопротивления в них.

К важнейшим результатам диссертационной работы можно отнести:

- Определение размеров кластеров меди, включающих около 30 атомов, формирующихся в нанопроволке Co₈₀Cu₂₀.
- Проведено теоретическое описание экспериментальных спектров ЯМР нанопроволок и сверхрешеток как сумма нескольких сигналов от атомов кобальта с различной упаковкой и в зависимости от числа атомов меди, находящихся в ближайшем окружении.
- Построение моделей межслойных границ сверхрешеток Co/Cu и анализ экспериментальных спектров ЯМР на их основе.

Каждый из этих результатов обладает несомненной **научной новизной и является практически значимым.**

Вопросы и замечания:

- 1. В главе 7 рассмотрены возможные варианты расположения ионов меди, которые показаны на рисунках красным цветом. Осталось непонятно, какие ионы обозначены синим и оранжевым цветом.*
- 2. Автор пишет о высокой степени совершенства сверхрешетки. Однако критерии и оценки степени высоты данного совершенства не представлены.*
- 3. Высокоугловые границы (стр.78) и высокосовершенные границы - это одно и то же физическое понятие?*
- 4. Автор подробно рассматривает особенности ЯМР на ионах кобальта для всех представленных соединений. При этом не обсуждаются особенности спектров ионов меди, которые могут представить дополнительную информацию об особенностях интерфейсов.*
- 5. В выводах по главе 6 нет упоминания об исследованных слоевых нанопроволках Co/Si.*

Сделанные выше замечания никак не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Результаты проведенных исследований опубликованы в восьми статьях из перечня ВАК и доложены на 11 международных и российских конференциях, что подтверждает высокий уровень проделанной работы. Публикации в научной печати полностью отражают основные результаты работы. В автореферате с достаточной полнотой изложено основное содержание диссертационной работы.

Заключение (выводы о работе)

Совокупность результатов, представленных в диссертации Чупракова Станислава Александровича, представляет собой достижение в физике магнитных явлений. Считаю, что представленная диссертационная работа С.А. Чупракова «Структура и интерфейсы кобальтосодержащих сверхрешеток и нанопроволок по данным ядерного магнитного резонанса» по актуальности решаемых задач, степени достоверности, научной новизне и практической значимости результатов, полностью отвечает требованиям ВАК к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук (п.9 Положения о присуждении учёной степени, утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013, ред. от 30.07.2014), а её автор – Чупраков Станислав

Александрович заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 – «Физика магнитных явлений».

Официальный оппонент:

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 исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук».

Еремина Рушана Михайловна

подпись

10 января 2024

Контактные данные:

тел.: 7(960)0460812, e-mail: REremina@yandex.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.04.11 – физика магнитных явлений

Адрес места работы:

420029, (Татарстан) г.Казань, ул Сибирский тракт, д.10/7,
КФТИ ОСП ФИЦ КазНЦ РАН
Тел.: +7 (843) 272 05 03; e-mail: phys-tech@kfti.knc.ru

Подпись Ереминой Р.М. заверяю

Главный ученый секретарь ФИЦ КазНЦ

к.х.н.

10 января 2024 г.

Зитаншина С.А.



Сотделом ознакомлен

024

Управов. С.А. /

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	Еремина Рушана Михайловна
Гражданство	РФ
Ученая степень	Доктор физико-математических наук
Ученое звание	Доцент
Наименование отрасли науки и специальности, по которой защищена диссертация	01.04.11 - Физика магнитных явлений
Место работы:	
Полное наименование организации в соответствии с уставом	Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»
Сокращенное наименование организации в соответствии с уставом	КФТИ – обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН
Почтовый адрес, индекс организации	420029, Казань, ул. Сибирский тракт, 10/7
Адрес официального сайта в сети «Интернет»	https://kfti.knc.ru/
Должность	Ведущий научный сотрудник
Структурное подразделение	Лаборатория радиоспектроскопии диэлектриков
Телефон	(843) 272-05-03

Адрес электронной почты

reremina@yandex.ru

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

1. Magnetic Properties of $\text{La}_{0.81}\text{Sr}_{0.19}\text{Mn}_{0.9}\text{Fe}_{0.1-x}\text{Zn}_x\text{O}_3$ ($x=0$, $x=0.05$) / R. M. Eremina, I. V. Yatsyk, Z. Y. Seidov, F. G. Vagizov, V. A. Shustov, A. G. Badelin, V. K. Karpasyuk, D. S. Abdinov, M. M. Tagiev, S. K. Estemirova, H. A. K. von Nidda. – Текст: непосредственный // Applied Magnetic Resonance. – 2023. – Т. 54, № 4. – С. 449-461.
2. Magnetic properties of ludwigite $\text{Mn}_{2.25}\text{Co}_{0.75}\text{BO}_5$ / D. V. Popov, T. P. Gavrilova, I. F. Gilmutdinov, M. A. Cherosov, V. A. Shustov, E. M. Moshkina, L. N. Bezmaternykh, R. M. Eremina. – Текст: непосредственный // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 2021. – Т. 148. – С. 109695.
3. Structure, magnetic and thermodynamic properties of heterometallic ludwigites: Cu_2GaBO_5 and Cu_2AlBO_5 / R. M. Eremina, T. P. Gavrilova, E. M. Moshkina, I. F. Gilmutdinov, R. G. Batulin, V. V. Gurzhiy, V. Grinenko, D. S. Inosov. – Текст: непосредственный // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2020. – Т. 515. – С. 167262.
4. Observation of ε - Fe_2O_3 nanoparticles precipitated in potassium aluminoborate glasses doped with 4 mol % Fe_2O_3 / R. M. Eremina, I. V. Yatsyk, A. V. Shestakov, I. I. Fazlizhanov, T. P. Gavrilova, F. O. Milovich, A. L. Zinnatullin, F. G. Vagizov, I. F. Gilmutdinov, P. S. Shirshnev, D. I. Sobolev, N. V. Nikonov. – Текст: непосредственный // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 2019. – Т. 133. – С. 7-14.
5. Magnetic properties of the warwickite MnMgBO_4 / R. M. Eremina, E. M. Moshkina, A. R. Muftakhutdinov, I. F. Gilmutdinov, N. M. Lyadov. – Текст: непосредственный // Solid State Communications. – 2019. – Т. 290. – С. 64-66.

Заверяю:

Главный ученый секретарь

к.х.н.



Зиганина Суфия Асхатовна

