

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке ФГАОУ ВО



«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

— А.В. Германенко

«25» декабря 2023 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации - Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» на диссертационную работу Чупракова Станислава Александровича **«Структура и интерфейсы кобальтсодержащих сверхрешёток и нанопроволок по данным ядерного магнитного резонанса»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений

Диссертационная работа С.А. Чупракова является экспериментальной и посвящена исследованию структурно-композиционного состояния поверхностей межфазного сопряжения (интерфейсов) гетерогенных магнитных сред методом ядерного магнитного резонанса, а также установлению влияния структуры интерфейсов на транспортные свойства сверхрешёток и слоистых нанопроволок типа Co/Cu. Её актуальность обусловлена повышенным интересом исследователей и практиков к указанным объектам как носителям уникальных макроскопических свойств, к которым например, относится эффект гигантского магнитосопротивления. Этот эффект состоит в изменении проводимости магнитной наносистемы при вариации взаимной ориентации магнитных моментов элементов такой системы и в обязательном порядке предполагает электронный транспорт между этими элементами с сохранением спинов электронов. Если, как в рассматриваемом случае, магнитная система имеет слоистый характер, то именно межслойные интерфейсы могут быть главными источниками рассеяния электронов, определяя тем самым величину магнитосопротивления. Следует подчеркнуть, что речь идёт о структурных образованиях с поперечным размером в несколько межатомных расстояний, для исследования которых требуются локальные методы, к числу немногих из которых относится ядерный магнитный резонанс (ЯМР). Таким образом, выбор объектов исследования, формулировка поставленных научных задач и методология их решения

отвечают современным тенденциям развития физики функциональных магнитных материалов.

Диссертация Чупракова С.А. имеет типичную структуру и включает введение, семь глав, общие выводы, список цитируемой литературы из 111 наименований. Работа изложена на 137 страницах, содержит 98 рисунков и 10 таблиц. Информация, приведенная в автореферате, соответствует основному содержанию диссертации и дает полное представление об ее научных положениях, результатах и основных выводах.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы его цель и конкретные исследовательские задачи, указана научная и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, и данные о личном вкладе автора.

Первая глава диссертации содержит краткое описание эффекта гигантского магнитосопротивления и структурных факторов, определяющих условия его реализации и величину, а также общие сведения о природе и методиках количественного описания сверхтонкого поля на ядрах ^{59}Co . Выполнен достаточно подробный анализ научной литературы, посвящённой ЯМР-исследованиям сверхрешёток типа Co/Cu, который позволил определить спектр нерешённых задач в данной области и корректно обосновать тему диссертационной работы.

Вторая глава посвящена методическим вопросам. В ней дана характеристика объектов исследования, к которым отнесены, в первую очередь, плёночные структуры типа Co/Cu, полученные методом магнетронного распыления, а также нанопроволоки, изготовленные с помощью электролитического осаждения разных металлов в поры трековых мембран. Приведено описание технологического, аналитического и измерительного оборудования, использованного при получении и аттестации образцов по структуре, магнитным и магнитоэлектрическим свойствам. Особое внимание уделено методике ядерного магнитного резонанса. В том числе достаточно подробно описано соответствующее оборудование и оснастка, использованная для возбуждения и регистрации сигнала спинового эха на образцах плёнок и нанопроволок. Важно, что для этого применялся ЯМР-датчик оригинальной конструкции, позволивший обеспечить высокую чувствительность и помехозащищенность измерительного комплекса.

Третья глава содержит основные результаты исследования сверхрешёток Co/Cu с изменяющимся числом периодов (бислоёв) в плёнках, осаждённых на различные буферные покрытия: Fe и $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$. Показано что применение буферного слоя железа приводит к двухфазному состоянию плёнок. В рамках ГЦК кристаллической структуры эти фазы отличаются по типу кристаллической текстуры – (100) и (110). Кроме того, установлено,

что при увеличении числа бислоёв, происходит рост шероховатости межслойных интерфейсов и уменьшение доли так называемых высокосовершенных границ, модель которых характеризуется отсутствием межслойной диффузии. Напротив, при использовании многокомпонентного буферного слоя формируется однофазное состояние с текстурой типа (111), а количество высокосовершенных межслойных границ не зависит от числа бислоёв. Полученные данные позволили дать обоснованную интерпретацию основным закономерностям в изменении гигантского магнитосопротивления, наблюдающимся при указанных вариациях в структуре сверхрешёток.

Четвёртая глава посвящена исследованию влияния толщины слоя меди в диапазоне 1-2,3 нм на структуру межслойных границ Co/Cu. В частности, показано, что в рамках кристаллической текстуры типа (111) увеличение толщины немагнитного слоя ведёт к росту шероховатости и уменьшению относительного числа высокосовершенных межслойных границ. Это, как и случае, описанном в предыдущей главе, хорошо коррелирует с изменением магниторезистивных свойств исследованных объектов.

В пятой главе представлены результаты исследования влияния термообработки на макроскопические свойства и структуру межслойных границ в сверхрешётках Co/Cu. Совокупный анализ данных рентгеновской дифрактометрии и рефлектометрии, результатов измерений магниторезистивных свойств и ЯМР-спектров позволил составить целостную картину структурных изменений, происходящих при термообработке, и их связи со свойствами плёнок. В частности, показано, что термообработка даже при относительно небольших температурах (до 200°C) ведёт к росту числа атомов кобальта, формирующих интерфейс, и соответственно к уменьшению доли высокосовершенных межслойных границ.

В шестой главе диссертации изложены результаты исследования нанопроволок, приготовленных методом электролитического осаждения чистого кобальта, сплава Co₈₀Cu₂₀, а также имеющих модулированный по длине состав (Co/Cu). Установлено, что эти объекты характеризуются различной кристаллической структурой. В Co-нанопроволоках паритетно представлены фазы с ГПУ и ГЦК кристаллическими решётками, в Co₈₀Cu₂₀-нанопроволоках преобладает ГЦК-фаза кобальта, а в Co/Cu-нанопроволоках ГПУ-кобальт практически отсутствует. Анализ спектров ЯМР позволил детализировать микроструктуру исследуемых объектов. В частности, показано, что нанопроволоки Co₈₀Cu₂₀ гетерогенны и включают нанокластеры меди, содержащие до 30 атомов.

В седьмой главе представлены трёхмерные модели атомной структуры интерфейсов, используемые для интерпретации экспериментальных спектров ЯМР. С их помощью, для сверхрешёток Co/Cu, выделено несколько особенностей строения межслойных границ. В

том числе показано, что глубина проникновения меди в кобальт составляет один атомный слой, и граница этого внедрения неоднородна. Кроме того, не наблюдается проникновения кобальта в медь или проникновение меди в кобальт в виде полос,

В заключении перечислены основные выводы по диссертационной работе.

В целом, диссертация имеет выраженную концептуальность и методическую выверенность, которая основана на тщательной подготовке экспериментов как в части выбора объектов исследования, так и в части их аппаратного обеспечения. Это, а также внутренняя непротиворечивость и согласованность полученных результатов с литературными данными позволяет считать материалы, представленные в диссертации **достоверными**, а к числу наиболее интересных и **новых** из них отнести следующие.

1. Разработан ЯМР-датчик, позволивший обеспечить прецизионное измерение резонансных спектров на ультратонких объектах и создать методику изучения межфазных границ в композитах типа Co/Cu.

2. Дано количественное описание изменений в структуре межслойных интерфейсов, происходящих в сверхрешётках типа Co/Cu при варьировании состава буферного покрытия, количества бислоёв в плёночной структуре, толщины слоя меди и температуры отжига. Показано, что на основе этих данных можно удовлетворительно интерпретировать закономерности формирования эффекта гигантского магнитосопротивления в такого рода средах.

3. Убедительно продемонстрировано, что метод ЯМР достаточно эффективен при изучении кристаллической структуры и микроструктуры нанопроволок на основе Co. В том числе на примере нанопроволок сплава $Co_{80}Cu_{20}$ дано количественное описание гранулированной структуры, свойственной данной системе.

В то же время работа имеет и ряд недостатков, состоящих в следующем.

1. Во введении отмечено, что в плёнках Co/Cu постоянная ГЦК-решётки кобальта может быть больше её равновесного значения. Между тем при моделировании спектров ЯМР это отличие никак не обсуждается.

2. При моделировании спектров ЯМР не анализируется их возможная модификация из-за наличия межкристаллитных границ в исследуемых поликристаллических объектах.

3. На рисунке 3.10 представлены рентгеновские дифрактограммы сверхрешёток $PuCr(5\text{нм})/[Co(1,5\text{нм})/Cu(1\text{нм})]_n/Cr(5\text{нм})$, призванные продемонстрировать формирование в образцах текстуры (111). При этом диапазон показанных углов 2θ чуть превышает 70° , хотя хорошо известно, что для данных систем линия (220) находится вблизи угла $2\theta = 90^\circ$ (см., например, рисунок 3.5).

4. Отсутствует сопоставление результатов тонкого структурного анализа нанопроволок с их макроскопическими свойствами.

Несмотря на отмеченные недостатки содержательного характера, в целом диссертационная работа может быть расценена как исследование, выполненное на хорошем методическом уровне, позволившем получить интересные и достоверные научные результаты по магнитным сверхрешёткам и нанопроводам, а также показать уникальные возможности ЯМР-спектроскопии в изучении наноструктурированных сред. По результатам, представленным в диссертационной работе, опубликовано 8 статей из списка ВАК, они неоднократно докладывались на международных и российских научных конференциях. Диссертационная работа Чупракова С.А. соответствует Паспорту специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Заключение. Диссертация Чупракова С.А. «Структура и интерфейсы кобальтсодержащих сверхрешёток и нанопроволок по данным ядерного магнитного резонанса» является научно-квалификационной работой и соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертационным работам в соответствии с пунктами 9-14 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 № 842 (с последующими изменениями). Автор представленной работы, Чупраков Станислав Александрович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Отзыв ведущей организации обсуждён и утверждён на заседании объединённого научного семинара кафедры магнетизма и магнитных наноматериалов и отдела магнетизма твёрдых тел НИИ ФПМ Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» 15 декабря 2023 г., протокол №.56.

Доктор физико-математических наук,
заведующий отделом магнетизма
твёрдых тел НИИ ФПМ
Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Н.В. Кудреватых

Подпись Кудреватых Н.В. заверяю,

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
УРФУ
МОРОЗОВА В.А.



С отзывом ознакомлен
26.12.2023

Чупраков С.А.

Сведения о ведущей организации

Полное наименование: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Краткое наименование: ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Почтовый адрес: 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19

Тел.: (343) 375-44-44

E-mail: contact@urfu.ru

Адрес официального сайта организации в сети интернет: <https://urfu.ru/>

Основные научные направления:

1. Нелинейная динамика магнетиков;
2. Магнитная сенсорика и хиральная спинтроника;
3. Физика и технологии 3D-печати постоянных магнитов и магнитных систем;
4. Компьютерный дизайн магнитных материалов;
5. Магнитные материалы для силовой энергетики;
6. Мягкие магнитные материалы для биомедицинских приложений;
7. Ван-дер-ваальсовы двумерные магнетики для спинтронных устройств;
8. Уникальные магнитные системы.

Публикации в сфере исследований, которым посвящена диссертация

1. Spin Reorientation Transition and Exchange Bias in Hard/Soft Tb–Co/FeNi Films / A. V. Svalov, V. N. Lepalovskij, A. N. Gorkovenko, I. A. Makarochkin, E. A. Stepanova, A. Larrañaga, G. V. Kurlyandskaya, V. O. Vas'kovskiy. – Текст: непосредственный // IEEE Transactions on Magnetics. – 2022. – Т. 58, № 2. – С. 1-5.

2. Magnetic structure and macroscopic magnetic properties of Gd_{100-x}Co_x films: Changing x from 0 to 100 / V. O. Vas'kovskiy, E. Kudyukov, A. V. Svalov, K. Balymov, V. E. Maltseva. – Текст: непосредственный // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2022. – Т. 565. – С. 170254.

3. Magneto-Impedance Tomography of Composite CuBe/FeCoNi Wires / D. Bukreev, M. Derevyanko, A. Moiseev, I. M. Matsyuk, A. Ballesteros, A. V. Svalov, A. V. Semirov. – Текст: непосредственный // SPIN. – 2023. – Т. 13.
4. Magnetic Properties of FeNi/Cu-Based Lithographic Rectangular Multilayered Elements for Magnetoimpedance Applications / G. Melnikov, I. Vazhenina, R. Iskhakov, N. Boev, S. Komogortsev, A. Svalov, G. Kurlyandskaya. – Текст: непосредственный // Sensors (Basel, Switzerland). – 2023. – Т. 23.
5. In-plane magnetic anisotropy and domain structure of FeNi films deposited in the presence of a magnetic field of various configurations / A. V. Svalov, V. E. Ivanov, S. V. Andreev, V. N. Lepalovskij, A. A. Feshchenko, E. V. Kudyukov, I. A. Makarochkin, G. V. Kurlyandskaya. – Текст: непосредственный // Physics of the Solid State. – 2023. – Т. 65. – С. 856.
6. Demagnetization Processes in Multilayered Permalloy-Based Film Structures / A. Chlenova, D. Neznakhin, G. Melnikov, V. Lepalovskij, V. Vas'kovskiy, G. V. Kurlyandskaya. – Текст: непосредственный // Inorganic Materials: Applied Research. – 2020. – Т. 11. – С. 838-843.
7. Ferromagnetic Resonance of FeNi/Cu/FeNi Thin Film on Coplanar Waveguide with Operating Frequency of 1 to 20 GHz / S. Shcherbinin, S. Volchkov, G. V. Kurlyandskaya, C. Swindells, B. Nicholson, D. Atkinson. – Текст: непосредственный // Russian Physics Journal. – 2020. – Т. 63. – С. 1-8.
8. Magnetic structure and macroscopic magnetic properties of Gd_{100-x}Cox films: Changing x from 0 to 100 / V. O. Vas'kovskiy, E. Kudyukov, A. V. Svalov, K. Balymov, V. E. Maltseva. – Текст: непосредственный // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2022. – Т. 565. – С. 170254.
9. Numerical Simulation of Discrete Magnetic Breathers in Heisenberg Spin Chains with Additional Interactions / I. G. Bostrem, E. G. Ekomasov, A. S. Ovchinnikov, V. E. Sinitsyn, M. I. Fakhretdinov. – Текст: непосредственный // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2023. – Т. 68, № 1. – С. 70-76.

10. Planar ensembles of multilayer film microelements based on Cu/FeNi components / G. Melnikov, V. Lepalovskij, S. V, P. Lazpita, N. Buznikov, G. V. Kurlyandskaya. – Текст: непосредственный // Physics of the Solid State. – 2022. – Т. 64. – С. 1240.

11. Temperature Dependence of Magnetic Properties and Magnetic Field Behavior of Co/Gd/Co Thin-Film Three-Layer Systems / A. Kharlamova, A. Makarov, A. Svalov, E. Shalygina. – Текст: непосредственный // Physics of the Solid State. – 2021. – Т. 63.

12. Структурные особенности и магнитные свойства пленок Co-W / В. О. Васьковский, М. Н. Волочаев, А. Н. Горьковенко, Е. А. Кравцов, В. Н. Лепаловский, А. А. Фещенко. – Текст: непосредственный // Физика твердого тела. – 2021. – Т. 63, № 7. – С. 915-922.

Проректор по науке ФГАОУ ВО

«УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Доктор физико-математических наук, профессор

А.В. Германенко

