

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института физики им. Л.В. Киренского,  
Федеральный исследовательский научный  
центр Сибирского отделения Российской академии наук".

-мат. наук

В. Волков

\_\_\_\_\_ 2016 г.



## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Банниковой Натальи Сергеевны «**Структурные, магнитные и магнитотранспортные свойства сверхрешеток на основе меди и сплавов 3-d металлов**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений

### **Актуальность темы диссертации**

Диссертационная работа Н.С. Банниковой посвящена установлению физических закономерностей влияния различных буферных слоёв на структурные, магнитные и магнитотранспортные свойства сверхрешёток на основе меди и сплавов 3-d металлов для получения материалов с большими значениями магнитосопротивления в сочетании с высокой магниторезистивной чувствительностью и слабым гистерезисом. Магнитные металлические сверхрешётки, являются искусственными многослойными наноматериалами и относятся к объектам металлической спинтроники.

Интерес к исследованию магнитных металлических сверхрешёток сохраняется благодаря сочетанию свойств, требуемых для практического использования таких наноматериалов в сенсорах магнитного поля. По сравнению с другими активно исследуемыми магниточувствительными наноматериалами (спиновыми клапанами и спинтуннельными наноструктурами) магнитные металлические сверхрешётки отличаются простой технологией изготовления и не содержат слоёв антиферромагнитных материалов, используемых для создания наведённой анизотропии в соседнем ферромагнитном слое. При этом сверхрешётки могут обладать высокой температурной стабильностью в сочетании с величиной магнитосопротивления в десятки процентов при комнатной температуре.

Для создания многослойных сверхрешёток – системы чередующихся магнитных и немагнитных слоёв, напылённых на аморфную подложку, используют такие металлы как медь и некоторые 3-d металлы и их сплавы. Путем изменения толщин слоёв и выбором эффективного материала буферного слоя можно сформировать в сверхрешётках различные типы кристаллической структуры слоёв и интерфейсов, разнообразные типы магнитного упорядочения как внутри магнитных слоёв, так и между соседними магнитными слоями. Это создает основу для поиска новых физических эффектов и подходов для оптимизации практически значимых свойств сверхрешеток. В связи с этим исследование различных типов сверхрешёток с гигантским магниторезистивным эффектом является актуальной задачей.

## **Структура и основное содержание работы**

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены новизна и показана практическая значимость работы. Описаны основные защищаемые положения и структура диссертации.

В первой главе освещено современное состояние дел в исследуемой области. Описаны основные виды магниторезистивных эффектов, определяющие магнитотранспортные свойства ультратонких плёнок с чередующимися ферромагнитными и немагнитными слоями, подробно рассмотрены различные виды взаимодействий между ферромагнитными слоями в многослойных пленках. Кратко описываются физические причины, объясняющие феномен гигантского магнитосопротивления. Приводится краткое изложение основных экспериментальных и обзорных книг и статей, посвященных физическим принципам, объясняющим магнитные и транспортные свойства сверхрешёток, а так же способам получения наноструктур, обладающих практически значимыми функциональными характеристиками. Проанализирована корреляция между микроструктурой слоев и магниторезистивными свойствами сверхрешёток.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных методик и методам приготовления образцов. Описывается лабораторная технология синтеза многослойных магнитных наноструктур на высоковакуумной магнетронной установке, включающая в себя подготовку поверхности подложек, калибровку скоростей напыления материалов и определение шероховатости поверхности подложек и полученных плёнок. Дается обзор основных методов измерений элементного состава образцов и мишеней, структуры, магнитных и транспортных свойств сверхрешеток.

В третьей главе излагается процесс обработки лабораторного магнетронного напыления многослойных наногетероструктур, на примере изготовления сверхрешёток Co/Cu. Проводится поиск оптимальных параметров роста сверхрешёток, оптимизация толщин слоёв и количества пар Co/Cu для достижения наибольшего магнитосопротивления. Обсуждаются основные структурные и магниторезистивные свойства полученных сверхрешёток и проводится сравнение полученных результатов с известными из литературы данными. Показано, что для данной серии образцов с толщиной меди, соответствующей первому антиферромагнитному максимуму косвенного обменного взаимодействия, при отсутствии магнитного поля магнитные моменты ферромагнитных слоёв могут выравниваться по отношению друг к другу под углом, отличным от  $180^\circ$ .

Подбор буферного слоя и толщин слоёв позволили получить значения магнитосопротивления на уровне зарубежных аналогов до 50 % при комнатной температуре при небольшом количестве пар слоёв. Следовательно, разработанная лабораторная технология магнетронного напыления может быть применена для изготовления магнитных металлических сверхрешёток другого типа.

В четвертой главе исследуются зависимости структурных, магнитных и магниторезистивных свойств сверхрешёток  $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}]_n$  от типа подложки, материала и толщины буферного слоя (Cr, Fe,  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ ,  $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$ ). Определяются оптимальные значения толщин слоев для получения наибольшего значения магнитосопротивления при слабом гистерезисе.

В сверхрешётках  $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}]_n$  при использовании хрома в качестве буферного слоя обнаружено резкое, более чем на порядок величины, увеличение гистерезиса при изменении номинальной толщины слоя хрома в интервале от 15 до 20 Å, что сопровождается изменением кристаллической структуры в слоях сверхрешётки.

Подбором толщин слоёв, входящих в сверхрешётку  $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}/[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}]_8$  получено значение магнитосопротивления 54 %, близкое к наибольшим опубликованным значениям магнитосопротивления для сверхрешёток данного типа при комнатной температуре. При понижении температуры до 83 К эта величина возрастает до 95 %.

В пятой главе исследуется влияние отжига на структуру, магнитный гистерезис и магнитосопротивление сверхрешёток  $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}(15 \text{ Å})/\text{Cu}(23 \text{ Å})]_n$  с буферными слоями Cr и CoFe различной толщины. При отжиге исследуемых сверхрешёток определен интервал температурной стабильности таких характеристик как магнитосопротивление и ширина петли гистерезиса. Установлено, что оптимальные параметры отжига (температура и длительность), которые позволяют увеличить магнитосопротивление сверхрешётки, зависят не только от использованного материала буферного слоя, но также и от его толщины.

На основе полученных данных по рентгеновской рефлектометрии для отожженных сверхрешёток получены численные значения эффективных коэффициентов межслойной диффузии, обусловленной термическим отжигом.

В шестой главе исследуются закономерности влияния буферного слоя  $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$  на микроструктуру и магниторезистивные характеристики обладающих гигантским магниторезистивным эффектом двух типов сверхрешёток  $[\text{Ni}_{65}\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}/\text{Cu}]_8$  и  $[\text{Ni}_{76}\text{Fe}_{10}\text{Co}_{14}/\text{Cu}]_8$ , напыленных в магнитном поле, приложенном в плоскости слоёв 80 Э. Обсуждаются причины возникновения сильного или слабого гистерезиса в таких наноструктурах. Предлагается метод уменьшения гистерезиса магнитосопротивления для сверхрешёток путем использования составного буферного слоя  $\text{Ta}/(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$ .

В заключении диссертации приводятся выводы по всем результатам работы.

### **Научная новизна результатов диссертационной работы**

1. Проведены систематические исследования влияния различных типов материалов, используемых в качестве буферного слоя, на структурные и магниторезистивные свойства четырех типов магнитных металлических сверхрешёток:  $\text{Co}/\text{Cu}$ ,  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}$ ,  $\text{Ni}_{65}\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}/\text{Cu}$  и  $\text{Ni}_{76}\text{Fe}_{10}\text{Co}_{14}/\text{Cu}$ . Впервые показано, что изменения толщины буферного слоя в несколько атомных монослоёв, могут приводить к смене типа кристаллической структуры в слоях сверхрешётки и к кардинальному изменению магнитных и магниторезистивных свойств.
2. Показана эффективность использования немагнитного сплава  $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$  в качестве материала буферного слоя, позволяющего получать высокие значения магнитосопротивления, в сверхрешётках  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}$ ,  $\text{Ni}_{65}\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}/\text{Cu}$  и  $\text{Ni}_{76}\text{Fe}_{10}\text{Co}_{14}/\text{Cu}$  при малом числе пар ферромагнитных слоёв и меди ( $n = 8-10$ ).
3. Предложен способ уменьшения гистерезиса магнитосопротивления и повышения магниторезистивной чувствительности сверхрешёток  $\text{Ni}_{65}\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}/\text{Cu}$  и  $\text{Ni}_{76}\text{Fe}_{10}\text{Co}_{14}/\text{Cu}$ , основанный на использовании составного буферного слоя  $\text{Ta}/(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$ . Показано, что добавление подслоя Ta приводит к формированию в последующих слоях сверхрешётки острой аксиальной текстуры  $\langle 111 \rangle$ .

### **Достоверность результатов и обоснованность выводов**

Степень достоверности результатов исследований и обоснованность выводов подтверждается сертифицированными методиками изготовления образцов и измерения их

свойств. В работе используется сертифицированное фирмой-производителем оборудование и измерительные установки, прошедшие метрологический контроль в ИФМ УрО РАН (г. Екатеринбург, Россия).

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 13 всероссийских и международных конференциях и симпозиумах. Материалы диссертации опубликованы в 5 печатных статьях, входящих в перечень ВАК и опубликованных в рецензируемых журналах, и индексируемых системой цитирования Web of Science.

### **Практическая значимость полученных результатов**

Разработанная технология изготовления и оптимизации магниторезистивных свойств магнитных металлических сверхрешёток может быть использована для создания сверхрешёток  $[\text{Co}/\text{Cu}]_n$  и  $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}]_n$  с высокими значениями магнитосопротивления до 54 % при комнатной температуре. Такие материалы являются перспективными для практических приложений.

В сверхрешётках  $[\text{Ni}_{65}\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}/\text{Cu}]_n$  и  $[\text{Ni}_{76}\text{Fe}_{10}\text{Co}_{14}/\text{Cu}]_n$  при использовании составного буферного слоя  $\text{Ta}/(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$  получено сочетание высокой магниторезистивной чувствительности (0.1-0.3) %/Э, больших значений магнитосопротивления (12-16) % и относительно малого гистерезиса ( $\leq 10$  Э) при комнатной температуре. Разработанные магниточувствительные материалы, приготовленные на кремниевых пластинах диаметром 100 мм, используются как для создания новых высокочувствительных сенсоров, так и могут быть применены в уже работающих магнито-измерительных устройствах.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Термин «сверхрешетки» не очень соответствует реальной структуре исследованных материалов, которые более правильно назвать многослойными наноструктурами.
2. Название диссертации представляется неудачным. Более правильное название могло бы быть таким: «Структура, магнитные и магнитотранспортные свойства многослойных наноструктур на основе меди и сплавов 3-d металлов»
3. Основная часть исследований, кроме п. 4.3.2, приведена при комнатной температуре, температурная стабильность сверхрешеток обсуждается в зависимости только от температуры и длительности отжига, однако анализ температурных зависимостей транспортных, магнитотранспортных и

магнитных свойств может дать дополнительную информацию об основных механизмах наблюдаемых явлений.

4. В п.2.3.4 приведены результаты исследований химического состава мишеней из ферромагнитных материалов:  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ ,  $\text{Ni}_{65}\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}$ ,  $\text{Ni}_{76}\text{Fe}_{10}\text{Co}_{14}$  и напыленных из них готовых плёнок. Было бы неплохо представить в работе также сравнение их петель магнитного гистерезиса.
5. На рисунке 4.1 стр. 72 показаны малоугловые рентгеновские дифрактограммы сверхрешёток  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cr}(t_{\text{Cr}})/[\text{CoFe}(15 \text{ \AA})/\text{Cu}(23 \text{ \AA})]_8/\text{Cr}(10 \text{ \AA})$  с различной толщиной буферного слоя хрома, для сверхрешёток на других буферных слоях аналогичные данные отсутствуют без указания причин.
6. В главе 6 нет четкого объяснения, зачем и в каком направлении при магнетронном напылении сверхрешёток  $[\text{NiFeCo}/\text{Cu}]_n$  прикладывалось магнитное поле.
7. Несмотря на хороший стиль изложения в целом в тексте диссертации встречаются мелкие погрешности и опечатки, также присутствуют жаргонные выражения, например, “величинами ГМР-эффекта” на стр. 20, стр. 70; “наибольшего ГМР-эффекта” на стр. 55; “с высоким ГМР-эффектом” на стр. 111. Гигантский магниторезистивный эффект – явление, характеризуется величиной магнитосопротивления, следует избегать жаргонных выражений.

Указанные замечания не являются принципиальными ошибками и не снижают общий научный уровень диссертационной работы.

### **Заключение (выводы о работе)**

Данная диссертация производит хорошее впечатление и представляет собой завершённую работу. Содержание диссертации соответствует пункту 3 «Исследование изменений различных физических свойств вещества, связанных с изменением их магнитных состояний и магнитных свойств» и содержит исследования общезначимого характера по пункту 5 «Разработка различных магнитных материалов, технологических приёмов, направленных на улучшение их характеристик, приборов и устройств, основанных на использовании магнитных явлений и материалов» паспорта специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ФАНО и при частичной поддержке грантов и проектов (Министерства образования и науки РФ, РФФИ, УрО РАН, Программ Президиума РАН и др.). Большинство из представленных в работе результатов

являются новыми и получены автором впервые. Об этом свидетельствуют публикации автора в рецензируемых журналах и выступления с докладами на престижных российских и международных конференциях. Полученные в работе результаты исследований, выявляющие эффективные способы изменения магниторезистивных свойств сверхрешёток, могут быть использованы для получения магниторезистивных наноматериалов с высокой чувствительностью к магнитному полю и высокой температурной стабильностью. Помогают создавать научно-обоснованные подходы для оптимизации функциональных характеристик сверхрешеток. Необходимо отметить, что автореферат диссертации и публикации автора полностью отражают полученные в диссертационной работе результаты, которые полностью соответствуют поставленной в работе цели и задачам.

Представленная диссертационная работа Банниковой Н.С. удовлетворяет предъявляемым к кандидатским диссертациям, требованиям п. 9. «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842. Автор диссертационной работы Банникова Наталья Сергеевна, без сомнения, заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений.

Отзыв составлен по результатам обсуждения диссертационной работы Банниковой Натальи Сергеевны «Структурные, магнитные и магнитотранспортные свойства сверхрешеток на основе меди и сплавов 3-d металлов» на семинаре отдела физики магнитных явлений 8 ноября 2016г., протокол №10.

Отзыв утвержден на Ученом Совете ИФСОРАН 25.11.2016, протокол №7

Зав. лаборатории физики магнитных пленок

ИФ СО РАН,

доктор физ.-мат. наук, профессор

Р.С. Исхаков

Почтовый адрес: 620036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50, строение № 38

Тел.: +7(391)243-26-35

E-mail: dir@iph.krasn.ru

Ученый секретарь ИФ СО РАН,

кандидат физ.-мат. наук

С.И. Попков

*С отзывом ознакомлена*  
*29.11.2016 г. Банникова Н.С.*

## Сведения о ведущей организации

Полное наименование: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Обособленное подразделение «Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук»

Краткое наименование: ИФ СО РАН

Почтовый адрес: 620036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50, строение № 38

Тел.: +7(391)243-26-35, факс.: +7(391)243-89-23

E-mail: [dir@iph.krasn.ru](mailto:dir@iph.krasn.ru)

<http://www.kirensky.ru/>

## Основные научные направления

— *актуальные проблемы физики конденсированных сред, в том числе физика диэлектриков, магнитных материалов и наноструктур;*

— *физическое материаловедение, в том числе материалы для электронной техники и спинтроники, сверхпроводящие материалы;*

— *актуальные проблемы оптики и лазерной физики, включая физику фотонных кристаллов, новые оптические материалы, технологии и приборы;*

— *современные проблемы радиофизики, в том числе радиофизические методы диагностики окружающей среды.*

## Публикации в сфере исследований, которым посвящена диссертация

### 1. Structural and magnetic resonance investigations of CuCr<sub>2</sub>S<sub>4</sub> nanoclusters and nanocrystals

Pankrats, A. I.; Vorotynov, A. M.; Tugarinov, V. I.; и др. JOURNAL OF APPLIED PHYSICS Том: 116  
Выпуск: 5 Номер статьи: 054302 Опубликовано: AUG 7 2014

### 2. The bias-controlled giant magnetoimpedance effect caused by the interface states in a metal-insulator-semiconductor structure with the Schottky barrier Volkov, N. V.; Tarasov, A. S.; Smolyakov, D. A.; и др. APPLIED PHYSICS LETTERS Том: 104 Выпуск: 22 Номер статьи: 222406 Опубликовано: JUN 2 2014

### 3. Direct and inverse magnetoelectric effects in HoAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)(4) single crystal

Freydman, A. L.; Balaev, A. D.; Dubrovskiy, A. A.; и др. JOURNAL OF APPLIED PHYSICS Том: 115  
Выпуск: 17 Номер статьи: 174103 Опубликовано: MAY 7 2014

### 4. Visible magnetic circular dichroism spectroscopy of the Pr<sub>0.8</sub>Sr<sub>0.2</sub>MnO<sub>3</sub> and Pr<sub>0.6</sub>Sr<sub>0.4</sub>MnO<sub>3</sub> thin films

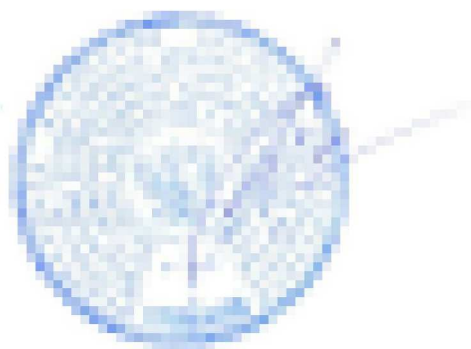
Edelman, I.; Greben'kova, Yu.; Sokolov, A.; и др. AIP ADVANCES Том: 4 Выпуск: 5 Номер статьи: 057125 Опубликовано: MAY 2014



5. Spectroscopic properties of HoAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> single crystal Ikonnikov, D. A.; Malakhovskii, A. V.; Sukhachev, A. L.; и др. OPTICAL MATERIALS Том: 37 Стр.: 257-261 Опубликовано: NOV 2014
6. Dynamics of self-organized aggregation of resonant nanoparticles in a laser field Slabko, V. V.; Tsipotan, A. S.; Aleksandrovsky, A. S.; и др. APPLIED PHYSICS B-LASERS AND OPTICS Том: 117 Выпуск: 1 Стр.: 271-278 Опубликовано: OCT 2014
7. Comparison of the electronic structure of the Hubbard and t - J models within the cluster perturbation theory Kuz'min, V. I.; Nikolaev, S. V.; Ovchinnikov, S. G. PHYSICAL REVIEW B Том: 90 Выпуск: 24 Номер статьи: 245104 Опубликовано: DEC 1 2014
8. General analysis of the angle-resolved photoemission line shape for strongly correlated electron systems Ovchinnikov, S. G.; Shneyder, E. I.; Kordyuk, A. A. PHYSICAL REVIEW B Том: 90 Выпуск: 22 Номер статьи: 220505 Опубликовано: DEC 1 2014
9. Unexpected impact of magnetic disorder on multiband superconductivity Korshunov, M. M.; Efremov, D. V.; Golubov, A. A.; и др. PHYSICAL REVIEW B Том: 90 Выпуск: 13 Номер статьи: 134517 Опубликовано: OCT 27 2014
10. Magnetic anisotropy in Fe films deposited on SiO<sub>2</sub>/Si(001) and Si(001) substrates / S.V.Komogortsev, S.N.Varnakov, S.A.Satsuk et al // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2014.–V.–351.– P.104–108.

08.11.2016

Ученый секретарь ИФ СО РАН,  
кандидат физ.-мат. наук



С.И. Попков