

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.003.01 НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
НАУКИ ИНСТИТУТА ФИЗИКИ МЕТАЛЛОВ ИМЕНИ М.Н. МИХЕЕВА  
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИФМ УрО РАН) ФЕДЕРАЛЬНОГО АГЕНСТВА НАУЧНЫХ  
ОРГАНИЗАЦИЙ ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ  
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 16.12.2016, № 13

О присуждении Банниковой Наталье Сергеевне, гражданке России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Структурные, магнитные и магнитотранспортные свойства сверхрешеток на основе меди и сплавов 3-d металлов» по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений принята к защите 07.10.2016, протокол № 7 диссертационным советом Д 004.003.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской Академии наук (ИФМ УрО РАН), Федеральное агентство научных организаций, 620990, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18, приказы Минобрнауки РФ № 714/нк от 02.11.2012 и № 188/нк от 26.02.2015.

Соискатель Банникова Наталья Сергеевна, 1981 года рождения, в 2005 году окончила Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский государственный университет им. Горького», по окончании решением Государственной аттестационной комиссии присуждена степень Магистра физики по направлению «Физика». Освоила программу подготовки научно-педагогических кадров в очной аспирантуре при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского

отделения Российской Академии наук, год окончания аспирантуры 2009, работает в должности научного сотрудника в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Федеральное агентство научных организаций.

Диссертация выполнена в лаборатории электрических явлений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Федеральное агентство научных организаций.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук Миляев Михаил Анатольевич, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, лаборатория электрических явлений, ведущий научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

1. Овчинников Владимир Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией пучковых воздействий, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.
2. Балымов Константин Геннадьевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт естественных наук и математики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» , г. Екатеринбург.

Ведущая организация 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» в своем положительном

заклучении, подписанном Исхаковым Рауфом Садыковичем, доктором физико-математических наук, заведующим лабораторией физики магнитных пленок ИФ СО РАН, указала, что диссертационная работа Банниковой Н.С. «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».

Соискатель имеет 57 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 18 работ, из них: статей, опубликованных в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях – 5; статей, опубликованных в сборниках тезисов и докладов в материалах всероссийских и международных конференций – 13. Общий объем научных изданий по теме диссертации 4.5 печатных листа. Автором разработана методика получения многослойных наноструктур с гигантским магниторезистивным эффектом при использовании метода магнетронного напыления. Получены новые данные о физических закономерностях влияния различных буферных слоёв на структурные, магнитные и магнитотранспортные свойства сверхрешёток на основе меди и сплавов 3d-металлов для получения материалов с большими значениями магнитосопротивления в сочетании с высокой магниторезистивной чувствительностью и слабым гистерезисом. Исследована температурная стабильность магниторезистивных характеристик и ширины петли гистерезиса сверхрешёток  $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}]_n$  с различным буферным слоем.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Миляев, М.А. Гигантские изменения магнитных и магниторезистивных свойств сверхрешёток  $\text{CoFe}/\text{Cu}$  при субнанометровой вариации толщины буферного слоя хрома [Текст] / М.А. Миляев, Л.И. Наумова, В.В.

Проглядо, Т.П. Криницина, А.М. Бурханов, Н.С. Банникова, В.В. Устинов // Физика металлов и металловедение. — 2011. — Т. 112. — С. 146—154.

2. Milyaev, M.A. Giant drop of magnetic hysteresis with decreasing thickness of Cr-buffer layer of CoFe/Cu superlattices [Текст] / M.A. Milyaev, L.I. Naumova, V.V. Proglyado, T.P. Krinitsina, N.S. Bannikova, V.V. Ustinov // Sol. Stat. Phenomena. — 2011. — V. 168-169. — P. 303—306.
3. Банникова, Н.С. Гигантское магнитосопротивление сверхрешёток CoFe/Cu с буферным слоем (Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>)<sub>60</sub>Cr<sub>40</sub> [Текст] / Н.С. Банникова, М.А. Миляев, Л.И. Наумова, В.В. Проглядо, Т.П. Криницина, И.Ю. Каменский, В.В. Устинов // Физика металлов и металловедение. — 2015. — Т. 116. — С. 1040—1047.
4. Банникова, Н.С. Влияние отжига на магнитосопротивление и микроструктуру многослойных систем CoFe/Cu с различным буферным слоем [Текст] / Н.С. Банникова, М.А. Миляев, Л.И. Наумова, В.В. Проглядо, Т.П. Криницина, Т.А. Чернышова, В.В. Устинов // Физика металлов и металловедение. — 2015. — Т. 116. — С. 165—170.
5. Банникова, Н.С. Сверхрешётки NiFeCo/Cu с высокой магниторезистивной чувствительностью и слабым гистерезисом [Текст] / Н.С. Банникова, М.А. Миляев, Л.И. Наумова, Т.П. Криницина, Е.И. Патраков, В.В. Проглядо, Т.А. Чернышова, В.В. Устинов // Физика твёрдого тела. — 2016. — Т. 58. — № 10. — С. 1940—1946.

На диссертацию и автореферат поступило 5 отзывов. Все отзывы положительные. В них отмечается актуальность темы диссертационной работы, научная новизна полученных результатов, их теоретическая и практическая значимость. Отзывы без замечаний поступили от: Варнакова Сергея Николаевича, кандидата технических наук, доцента, старшего научного сотрудника ФГБОУ ВО «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнёва», г. Красноярск, Трапезникова Михаила Борисовича, кандидата технических

наук, заместителя генерального директора АО «НПО автоматики» имени академика Н.А. Семихатова, г. Екатеринбург.

Замечания содержатся в следующих отзывах:

1. От Дровосекова Алексея Борисовича, кандидата физико-математических наук, научного сотрудника Института физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, г. г. Москва

Замечание: В работе подробно обсуждается роль кристаллической структуры буфера на магниторезистивные свойства сверхрешёток. На первый взгляд, текстура буферного слоя в большой степени должна определяться кристаллической структурой подложки. Однако по результатам диссертации складывается впечатление, что выбор подложки слабо влияет на магниторезистивные свойства сверхрешеток. На мой взгляд, этот момент требует более подробного обсуждения.

2. От Вдовичева Сергея Николаевича, кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника отдела магнитных наноструктур Института физики микроструктур РАН – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», г. Нижний Новгород.

Замечания: 1) В автореферате отсутствуют электрофизические характеристики исследуемых сверхрешёток (удельное сопротивление, значения рабочих напряжений и токов при измерениях). Эти данные позволили бы оценить потенциальную возможность использования подобных сверхрешёток в датчиках магнитного поля. 2) В части автореферата посвящённой 4 главе диссертации явно не хватает зависимости намагниченности структур Co/Cu от внешнего магнитного поля (петли гистерезиса). Полученные результаты о магнитосопротивлении до 100 % при низких температурах (54 % при комнатной температуре) явно являются рекордными, и данная информация позволила бы наглядно и однозначно связать зависимости  $M(H)$  и  $R(H)$ , характеризующих ГМР-эффект.

3. От Демидова Евгения Сергеевича, доктора физико-математических наук, профессора, заведующего кафедрой электроники твердого тела

Нижегородского государственного университета (ННГУ) им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород.

Замечание по автореферату следующее: Не обсуждается влияние величины и знака обменного взаимодействия между магнитными слоями на магнитотранспортные свойства сверхрешёток. Для диссертации на физико-математические науки не помешало бы привести в автореферате некие ключевые формулы.

Выбор официальных оппонентов доктора физико-математических наук, профессора, Владимира Владимировича Овчинникова и кандидата физико-математических наук Константина Геннадьевича Балымова, а также ведущей организации обосновывается публикациями оппонентов, основными научными направлениями ведущей организации, тематикой структурного подразделения и публикациями доктора физико-математических наук Рауфа Садыковича Исхакова, относящимися к сфере исследований, которым посвящена диссертация.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

1. Показано, что в сверхрешётках  $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}]_n$  использование хрома в качестве буферного слоя приводит к резкому увеличению магнитного гистерезиса, что обусловлено исчезновением аксиальной текстуры  $\langle 111 \rangle$  в слоях сверхрешётки.

2. Определен интервал температурной стабильности магниторезистивных характеристик сверхрешёток  $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}]_n$ . Показано, что максимальная температура, до которой не изменяется величина магнитосопротивления, зависит от толщины и материала буферного слоя.

3. Показано, что, изменяя температуру отжига сверхрешёток  $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}]_n$  с буферным слоем  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ , можно управлять величинами магнитосопротивления и коэрцитивной силы.

4. Впервые показано, что использование буферного слоя из немагнитного

сплава  $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$  приводит к формированию в последующих слоях сверхрешёток  $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}]_n$  более совершенной кристаллической структуры по сравнению со сверхрешётками с буферными слоями Cr, Fe или  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ .

5. Показано, что использование составного буферного слоя  $\text{Ta}/(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$  в сверхрешётках  $[\text{Ni}_{65}\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}/\text{Cu}]_n$  и  $[\text{Ni}_{76}\text{Fe}_{10}\text{Co}_{14}/\text{Cu}]_n$  приводит из-за формирования острой аксиальной текстуры  $\langle 111 \rangle$  к существенному, в 3–5 раз, уменьшению ширины петли гистерезиса по сравнению с аналогичными сверхрешётками с буферным слоем  $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$ .

**Теоретическая значимость** исследования состоит в том, что:

1. Получены систематические данные о влиянии различных типов материалов, используемых в качестве буферного слоя, на структурные и магниторезистивные свойства магнитных металлических сверхрешёток на основе меди и сплавов 3-d металлов. 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 для получения высоких значений магнитосопротивления в сверхрешётках.

3. Показана возможность управления гистерезисом магнитосопротивления и магниторезистивной чувствительностью сверхрешёток путем использования различных буферных слоев и термообработок.

**Практическая значимость** работы заключается в разработке технологии изготовления магниточувствительных материалов перспективных для практических приложений. Оптимизация процесса изготовления позволила получить магнитные металлические сверхрешётки

Co/Cu и Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>/Cu с высокими значениями магнитосопротивления до 54 % при комнатной температуре. Представляют практический интерес данные о роли составного буферного слоя Ta/(Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>)<sub>60</sub>Cr<sub>40</sub> в сверхрешётках [Ni<sub>65</sub>Fe<sub>15</sub>Co<sub>20</sub>/Cu]<sub>n</sub> и [Ni<sub>76</sub>Fe<sub>10</sub>Co<sub>14</sub>/Cu]<sub>n</sub>, при использовании которого получено сочетание высокой магниторезистивной чувствительности до 0.3 %/Э, больших значений магнитосопротивления 12-16 % и относительно малого гистерезиса (≤ 10 Э) при комнатной температуре. Предложенная технология изготовления сверхрешеток с повышенными функциональными характеристиками может быть использована при разработке промышленной технологии производств магнито-чувствительных элементов.

**Достоверность** полученных в работе данных обеспечивается использованием сертифицированного оборудования для синтеза, аттестации и исследования образцов. Результаты исследований, полученные разными методами, согласуются между собой и не противоречат известным в научной литературе данным и представлениям.

**Личный вклад соискателя.** Совместно с научным руководителем автор участвовал в постановке задач и выборе объектов исследования. Автором лично методом магнетронного напыления изготовлена серия образцов сверхрешеток [Co/Cu]<sub>n</sub> и (Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>)<sub>60</sub>Cr<sub>40</sub>/[Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>/Cu]<sub>n</sub>. Образцы сверхрешёток [Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>/Cu]<sub>n</sub>, [Ni<sub>65</sub>Fe<sub>15</sub>Co<sub>20</sub>/Cu]<sub>n</sub> и [Ni<sub>76</sub>Fe<sub>10</sub>Co<sub>14</sub>/Cu]<sub>n</sub> получены при участии автора. Автором лично выполнены термообработки образцов и измерения магнитосопротивления, а также проведена большая часть магнитных измерений. Автор принимал непосредственное участие в обсуждении результатов работы, написании статей и тезисов докладов, представлял результаты на конференциях.

Диссертация представляет собой научно-квалификационную работу и соответствует критериям п.9 и п.14, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

На заседании 16.12.2016 года диссертационный совет принял решение присудить Банниковой Наталье Сергеевне ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 7 докторов по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, проголосовали: за – 18, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Заместитель председателя диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук



Н.Г. Бебенин

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук

Т.Б. Чарикова

19 декабря 2016 г.