

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 ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 25.12.2017, № 24

О присуждении Миляеву Михаилу Анатольевичу, гражданину России, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Эффекты магнитной анизотропии в антиферромагнетиках и многослойных обменно-связанных наноструктурах» по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений принята к защите 22.09.2017, протокол № 15, 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 Миляев Михаил Анатольевич, 1961 года рождения, в 1985 году окончил Уральский государственный университет им. Горького, по специальности «Физик», решением Государственной экзаменационной комиссии ему присвоена квалификация «Физик. Преподаватель». В 1994 году защитил диссертацию в Ордена Трудового Красного Знамени Институте физики металлов Уральского отделения Российской академии наук на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений, по теме «Магнитные и

гальваномагнитные свойства многоосных антиферромагнетиков». Работает в должности ведущего научного сотрудника лаборатории электрических явлений в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт 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 консультант – доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН Устинов Владимир Васильевич работает заведующим лабораторией электрических явлений, является директором Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

1) Патрин Геннадий Семенович, доктор физико-математических наук, профессор, директор Института инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского федерального университета, г. Красноярск;

2) Памятных Евгений Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики Института естественных наук Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург;

3) Журавлев Михаил Евгеньевич, доктор физико-математических наук, профессор Факультета свободных искусств и наук Санкт-Петербургского государственного университета, г. С. Петербург.

– дали положительные отзывы о диссертации М.А. Миляева.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» в своем

положительном заключении, подписанном Исхаковым Рауфом Садыковичем, доктором физико-математических наук, заведующим лабораторией физики магнитных пленок ИФ СО РАН, указала, что “Автореферат правильно отражает содержание диссертационной работы. Все полученные результаты, научный и экспериментально-технологический уровень диссертации М.А. Миляева «Эффекты магнитной анизотропии в антиферромагнетиках и многослойных обменно-связанных наноструктурах» позволяют сделать вывод, что данная работа отвечает всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а диссертант – Миляев Михаил Анатольевич – заслуживает присуждения научной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 - физика магнитных явлений”.

Соискатель имеет 102 опубликованных работы, в том числе по теме диссертации 34 работы, из них статей, опубликованных в рецензируемых научных изданиях и индексируемых системой цитирования Web of Science – 33. Общий объем научных изданий 33.8 печатных листа.

В результате проведенных исследований автором получены новые экспериментальные данные и выявлены особенности магнитных и магнитотранспортных свойств тетрагональных антиферромагнетиков, спиновых клапанов и обменно-связанных сверхрешеток $[\text{Fe}/\text{Cr}]_n$, обусловленные наличием в них магнитной анизотропии. На основе установленных закономерностей были выработаны способы управления анизотропией и другими свойствами многослойных наноструктур, что позволило создать варианты магниточувствительных материалов с высокими функциональными характеристиками, представляющими интерес для практических приложений в области магнитоэлектроники и спинтроники.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Ustinov, V.V. Giant magnetoresistance of metallic exchange-coupled multilayers and spin valves [Текст] / V.V. Ustinov, M.A. Milyaev, L.I. Naumova // Physics of Metals and Metallography. – 2017. – V.118. – №13. – P. 38–97.

2. Spin-flop in synthetic antiferromagnet and anhysteretic magnetic reversal in FeMn-based spin valves [Текст] / M.Milyaev, L.Naumova, T.Chernyshova, V.Proglyado, I.Kamensky, V.Ustinov // IEEE Transactions on Magnetics. – 2016. – V.52. – №12. – P.2301104(4).
3. Гигантское магнитосопротивление сверхрешеток CoFe/Cu с буферным слоем $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$ [Текст] / Н.С.Банникова, М.А.Миляев, Л.И.Наумова, В.В.Проглядо, Т.П.Креницина, И.Ю.Каменский, В.В.УСТИНОВ // ФММ. – 2015. – Т.116. – №10. – С.1040-1046.
4. Magnetoresistance and magnetization of Fe/Cr (001) superlattices with noncollinear magnetic ordering [Текст] / V.V. Ustinov, N.G. Bebenin, L.N. Romashev, V.I. Minin, M.A. Milyaev, A.R. Del, A.V. Semerikov // Phys. Rev. B. – 1996. – V.54. – №22. – P.15958-15966.
5. Magnetization processes in multiaxial antiferromagnets [Текст] / K.B. Vlasov, R.I. Zainullina, M.A. Milyaev, V.V. Ustinov // J. Magn. Magn. Mater. – 1995. – Iss.3. – P.305-314.

На диссертацию и автореферат поступило 7 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 Звездина Анатолия Константиновича, доктора физико-математических наук, профессора, главного научного сотрудника Института общей физики им АМ Прохорова РАН, г. Москва; от Шаврова Владимира Григорьевича, доктора физико-математических наук, профессора, главного научного сотрудника, заведующего лабораторией магнитных явлений в микроэлектронике Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва; от Бержанского Владимира Наумовича, доктора физико-математических наук, профессора, заведующего кафедрой экспериментальной физики Физико-технического института ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», г. Симферополь.

Замечания содержатся в следующих отзывах:

1. От Огнева Алексея Вячеславовича, доктора физико-математических наук, доцента, ведущего научного сотрудника кафедры физики низкоразмерных структур Школы естественных наук ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», г. Владивосток.

Замечания: 1) на рисунке 13 представлены петли магнитного гистерезиса сверхрешеток Fe/Cr с толщиной слоев Fe равной 82, 87, 88 Å, при этом толщина прослойки Cr изменяется от 13.4 до 14.3 Å. Известно, что косвенное обменное взаимодействие очень чувствительно к изменению толщины немагнитной прослойки. Рассматривал ли автор в качестве одной из причин, приводящих к образованию «ступеней» на кривых гистерезиса, биквадратичное взаимодействие (J_2). Известно, что оно может приводить к неколлинеарному упорядочению намагниченности и изменению хода процесса намагничивания;

2) на рисунке 19 представлены изображения магнитных полей рассеивания образца $(211)\text{MgO/Cr}(80\text{Å})/[\text{Fe}(85\text{Å})/\text{Cr}(13,4\text{Å})]_{12}$. При сравнении полей зарождения доменных границ и переключения намагниченности в слоях с петлей магнитного гистерезиса (см. рисунок 18) наблюдается несоответствие полей. Так, в поле 402 Э зарождаются домены, а в поле 396 Э наблюдается однодоменное состояние. В то же время на петле гистерезиса в диапазоне полей от 420 до 300 Э намагниченность не изменяется;

3) в работе представлен качественный экспериментальный материал, однако иногда не хватает теоретического описания полученных результатов и микромагнитного моделирования. Например, при интерпретации данных о доменной структуре и множественных магнитных «спин-флип» переключениях намагниченности в сверхрешетках Fe/Cr микромагнитное моделирование позволило бы подтвердить и проиллюстрировать наблюдаемые переходы. Не проведены теоретические оценки вкладов структуры и шероховатости слоев в коэрцитивную силу сверхрешеток CoFe/Cu с изменением толщины буферного слоя Cr;

4) несмотря на то, что получены спиновые клапаны с характеристиками, позволяющие создавать высокочувствительные сенсоры магнитного поля, автором не было подано заявок на патенты. Патентоспособными были результаты разработки технологии оптимизации функциональных характеристик сверхрешеток с помощью буферных слоев. Это не снижает научной значимости полученных результатов, но затрудняет оценку потенциала их практического использования.

2. От Свалова Андрея Владимировича, доктора физико-математических наук, старшего научного сотрудника кафедры магнетизма и магнитных наноматериалов Института естественных наук и математики ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Замечания: 1) на стр. 28 автореферата, где обсуждаются детали формирования однонаправленной анизотропии в паре слоев ферромагнетик/антиферромагнетик с помощью термомагнитной обработки, в частности, говорится: «Если слой антиферромагнетика напылен на ферромагнитный слой, помещенный в магнитное поле, то намагниченность в ФМ слое будет совпадать с направлением поля и, за счет магнитострикции, будет оказывать влияние на направление атомных магнитных моментов в антиферромагнитном слое». Данное утверждение представляется спорным, так как согласно устоявшейся точке зрения однонаправленная анизотропия обусловлена обменным взаимодействием магнитных моментов ферромагнитного и антиферромагнитного слоев на межслойной границе;

2) при исследовании сверхрешеток CoFe/Cu, приготовленных с использованием различных буферных слоев, в работе получен интересный результат – добавление нескольких номинальных атомных слоев хрома в буферном слое приводит к принципиальному изменению структуры всего многослойного образца. Хотелось бы, чтобы автор высказал предположения о возможном механизме влияния толщины буферного слоя хрома на структуру всего многослойного образца.

3. От Курляндской Галины Владимировны, доктора физико-математических наук, профессора-исследователя кафедры магнетизма и магнитных наноматериалов Института естественных наук и математики ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Замечания: 1) в первой главе утверждается, что «наличие двух осей антиферромагнетизма L1 и L2 показывает, что в общем случае в антиферромагнетике рассматриваемой симметрии могут существовать домены, разделенные как 180° , так и 90° доменными границами», но экспериментально особенности доменной структуры не исследуются;

2) в третьей главе утверждается, что «Одним из полученных в данной работе результатов является установленная количественная связь между степенью совершенства текстуры <111> и гистерезисом перемагничивания свободного слоя». Для этой цели были приготовлены спиновые клапаны на основе антиферромагнетика $Mn_{75}Ir_{25}$. Однако, из текста автореферата неясно, как оценивались вклады от прослойки Cu и от закрепленного слоя $CoFe$. Может быть, логичнее было установить связь между гистерезисом свободного слоя и особенностями только его текстуры на специально приготовленных образцах?

3) в работе практически отсутствуют методы динамической аттестации магнетиков, которые могут быть полезны при анализе особенностей различных вкладов в эффективную магнитную анизотропию.

4. От Трушина Олега Станиславовича, кандидата физико-математических наук, заведующего лабораторией № 4 Ярославского филиала ФБГУН Физико-технологического института РАН (ЯФ ФТИАН РАН), г. Ярославль.

Замечания: 1) в тексте автореферата мало внимания уделено описанию используемых измерительных стендов, и, в частности, не указано каким методом измерялись петли перемагничивания многослойных магнитных структур;

2) недостаточно подробно описана практическая значимость работы и, в частности, не были приведены характеристики сенсоров, создаваемых на основе спиновых клапанов, полученных в диссертационной работе.

Выбор официальных оппонентов доктора физ.-мат. наук, профессора Г.С. Патрина, доктора физ.-мат. наук, профессора Е.А. Памятных и доктора физ.-мат. наук, профессора М.Е. Журавлева, а также ведущей организации обосновывается публикациями оппонентов, тематикой структурного подразделения ведущей организации и публикациями доктора физ.-мат. наук Р.С. Исхакова, относящимися к сфере исследований, которым посвящена диссертация.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- экспериментально *установлено*, что в монокристаллах FeGe_2 и $\text{Fe}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Ge}_2$ в области температур существования коллинеарного антиферромагнитного порядка под действием магнитного поля происходят обратимые и необратимые изменения намагниченности и магнитосопротивления; *показана* возможность определения концентраций магнитных фаз из магниторезистивных данных;

- впервые *получены* сверхрешетки $(210)[\text{Fe}/\text{Cr}]_n$ с одноосной магнитной анизотропией в плоскости слоев и *показано*, что в случае направления магнитного поля вдоль «легкой оси» проявляется многоступенчатый характер полевых зависимостей намагниченности, а при намагничивании вдоль «трудной оси» наблюдается монотонное изменение намагниченности;

- магнитооптическим методом с использованием индикаторной пленки железо-иттриевого граната *визуализирована* доменная структура в отдельных внутренних слоях Fe сверхрешетки $(210)[\text{Fe}/\text{Cr}]_n$ и *показано* отличие доменной структуры, возникающей при перемагничивании слоев Fe;

- экспериментально *установлены* условия реализации режима безгистерезисного перемагничивания свободного слоя в спиновых клапанах различных композиций; *предложен* способ получения скрещенной конфигурации магнитной анизотропии путем реализации в синтетическом антиферромагнетике состояния типа «спин-флоп»;

- в сверхрешётках $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}]_n$ с буферным слоем хрома различной толщины *обнаружен* переход между низкокоэрцитивным и высококоэрцитивным состояниями; *показано*, что субнанометровые изменения толщины буферного слоя Cr приводят к многократному изменению ширины петли магнитного гистерезиса.

- установлено, что использование буферного слоя Ta/(Ni₈₀Fe₂₀)₆₀Cr₄₀ приводит к повышению степени совершенства текстуры <111>, уменьшению размеров кристаллитов и значительному ослаблению гистерезиса в трех типах сверхрешеток: [Co₉₀Fe₁₀/Cu]_n, [Ni₆₅Fe₁₅Co₂₀/Cu]_n и [Ni₇₆Fe₁₀Co₁₄/Cu]_n.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- в рамках феноменологического подхода с учетом анизотропии 4-го порядка и зависимости концентраций магнитных фаз *получены* выражения для кривых намагничивания, обратимой восприимчивости, а также для продольного и поперечного магнитосопротивления антиферромагнетиков тетрагональной симметрии с двумя осями антиферромагнетизма в базисной плоскости, *объяснены* соответствующие экспериментальные данные для антиферромагнетиков типа FeGe₂;

- *показано*, что в обменно-связанных сверхрешетках [Fe/Cr]_n с конкурирующими энергиями межслойного обменного взаимодействия и магнитной анизотропии в плоскости слоев процесс перемагничивания может иметь многоступенчатый характер, обусловленный послойным перемагничиванием отдельных слоев Fe в многослойной структуре;

- для серии приготовленных спиновых клапанов на основе антиферромагнетика MnIr *установлена* зависимость ширины низкополевой петли гистерезиса от угла рассеяния текстуры <111>, что может быть использовано при теоретическом исследовании и прогнозировании гистерезисных свойств спиновых клапанов.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- *разработана* методика прецизионного магнетронного напыления многослойных наноструктур с эффектом гигантского магнитосопротивления, обладающих высокими функциональными характеристиками;

- предложены варианты эффективных буферных слоев, при использовании которых в магнитных сверхрешетках $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}]_n$, $[\text{Ni}_{65}\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}/\text{Cu}]_n$ и $[\text{Ni}_{76}\text{Fe}_{10}\text{Co}_{14}/\text{Cu}]_n$ получены значения магнитосопротивления, превышающие достигнутый уровень для аналогичных сверхрешеток, исследованных за рубежом;

- созданы сверхрешетки $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}]_n$ с величиной магнитосопротивления 81 % ($T = 293 \text{ K}$), которая является рекордной для всех типов металлических обменно-связанных сверхрешеток с эффектом гигантского магнитосопротивления;

- для спиновых клапанов различных композиций экспериментально установлены условия реализации безгистерезисного перемагничивания свободного слоя и получены варианты наноструктур, обладающие большими значениями магнитосопротивления в сочетании с малым гистерезисом и высокой чувствительностью к магнитному полю;

- созданные магниторезистивные наноструктуры с оптимизированными характеристиками уже используются отечественными предприятиями радиоэлектронной промышленности для разработки новых изделий магнитоэлектроники и спинтроники.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- экспериментальные результаты получены с применением апробированных взаимодополняющих методик изучения структурного состояния, исследования магнитных и магниторезистивных свойств образцов многослойных наноструктур, полученных с помощью современных методов синтеза на аттестованных установках; выводы работы не имеют принципиальных расхождений с имеющимися экспериментальными и теоретическими данными других исследователей.

- теоретические результаты хорошо описывают полученные диссертантом экспериментальные данные для кривых намагничивания, обратимой восприимчивости и магнитосопротивления для двух типов

антиферромагнитных кристаллов и не противоречат современным научным представлениям о процессах намагничивания антиферромагнетиков.

Личный вклад соискателя состоит:

в постановке цели и задач исследований, разработке экспериментальных методик, создании устройств и измерительных установок, участии в создании технологической базы, используемой для создания многослойных наноструктур методами магнетронного напыления и молекулярно-лучевой эпитаксии, в проведении исследований структуры, магнитных и магниторезистивных свойств значительной части образцов и обработке экспериментальных данных. Автором или при его прямом участии дана интерпретация представленных в диссертации экспериментальных результатов.

Диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, в которой содержится решение актуальной научной задачи по установлению закономерностей поведения магнитных и магнитотранспортных свойств, связанных с наличием магнитной анизотропии в антиферромагнетиках и многослойных наноструктурах, по разработке эффективных методов управления их анизотропией и гистерезисом и по получению высокочувствительных материалов на основе эффекта гигантского магнитосопротивления и соответствует критериям «Положения о присуждении ученых степеней» в редакции, утвержденной Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 с изменениями от 21.04.2016 г. № 335.

На заседании 25.12.2017 года диссертационный совет принял решение присудить Миляеву Михаилу Анатольевичу ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации 01.04.11 – Физика магнитных явлений, 5

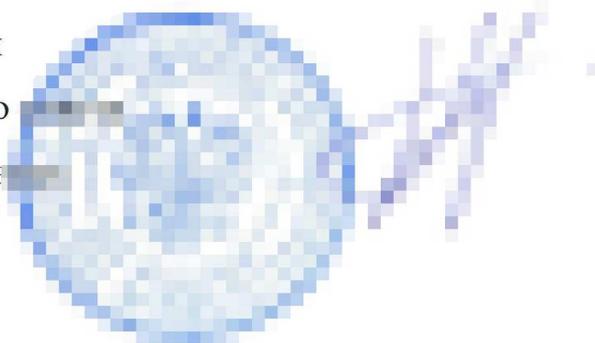
докторов наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния, 6 докторов наук по специальности 05.16.01 – Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallorv, uchastvovavshih v zasiedanii, iz 21 cheloveka, vkhodyashih v sostav soвета, dopolnitelno vvedeny na razovuyu zashchitu – net, progolosovali: za – 16, protiv – net, neдействительных бюллетеней – 1.

Председатель заседания,

зам. председателя

диссертационного

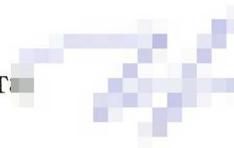
доктор физ.-мат. н



Н.Г. Бебенин

Ученый секретарь диссертационного совет

доктор физ.-мат. наук



Т.Б. Чарикова

27 декабря 2017 г.