

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Миляева Михаила Анатольевича «*Эффекты анизотропии в антиферромагнетиках и многослойных обменно-связанных наноструктурах*», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 – *физика магнитных явлений*

Актуальность темы. Диссертация М.А. Миляева посвящена одному из активно развивающихся направлений физики конденсированного состояния вещества, а именно, к изучению наноразмерных многослойных материалов, обладающих эффектом гигантского магнитосопротивления (ГМС). Интерес к исследованию таких искусственных материалов обусловлен как необычными магнитными и магнитотранспортными свойствами, управляемыми технологическим процессом их приготовления, так и своими функциональными возможностями, представляющими большой интерес для использования их в качестве магниточувствительных материалов в различных изделиях магнитоэлектроники и спинtronики. ГМС наноструктуры уже нашли свое применение в различных датчиках магнитного поля, в переключающих, измерительных и управляющих устройствах, входящих в состав автомобилей и робототехники. Любые найденные новые подходы в синтезе и исследовании ГМС материалов, позволяющие улучшить их практически значимые свойства, представляют большой интерес. Результаты таких исследований могут быть в короткие сроки использованы на практике. Диссертация М.А. Миляева посвящена синтезу и исследованию двух классов ГМС наноструктур – обменно-связанных сверхрешеток и спиновых клапанов с эффектом гигантского магнитосопротивления. В работе, наряду с технологическими вопросами приготовления таких наноструктур, изучению их структурных, магнитных и магнитотранспортных свойств, большое внимание уделяется вопросам, направленным на получение наноструктур с высокими функциональными ГМС-параметрами, что, несомненно, является важным моментом. Помимо вопросов, имеющих прикладную направленность, в работе также исследованы новые эффекты, связанные с наличием выраженной магнитной анизотропией в массивных металлических антиферромагнетиках и магнитных сверхрешетках. Все это и определяет **актуальность** настоящих исследований.

Достоверность и обоснованность результатов исследования обосновывается тем, что все проведенные исследования выполнены на современных научных установках, с использованием высокоточных приборов и апробированных экспериментальных методик. Полученные экспериментальные результаты обработаны и проанализированы в рамках современных теоретических представлений с применением хорошо развитых подходов и моделей, и подтверждаются другими независимыми исследованиями.

Оценка содержания диссертации.

Диссертационная работа Миляева М.А. состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка работ автора, списка обозначений и списка использованной литературы и изложена на 256^{ти} страницах.

Первая глава диссертации посвящена исследованиям особенностей кривых намагничивания и магнитосопротивления многоосных антиферромагнетиков, в которых могут происходить процессы смещения доменных границ под действием магнитного поля. Экспериментальные исследования выполнены на монокристаллах соединений FeGe_2 и $\text{Fe}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Ge}_2$, которые имеют тетрагональную симметрию и обладают металлической проводимостью. При низких температурах в них реализуется коллинеарный антиферромагнитный, где вектор антиферромагнетизма лежит в базисной плоскости.

Приведены экспериментальные данные для кривых намагничивания, обратимой восприимчивости, продольного и поперечного магнитосопротивления. В работе подробно рассмотрены теоретические модели, использованные для описания полученных экспериментальных данных, проведено сравнение теоретических и экспериментальных результатов, получены численные значения входящих в теорию материальных постоянных, определены их температурные зависимости. На основе анализа полученных результатов сделаны выводы, в частности, о важной роли внутренних упругих напряжений, влияющих на обратимые и необратимые процессы намагничивания.

Вторая глава содержит результаты исследований процессов намагничивания и магнитосопротивления сверхрешеток $[\text{Fe}/\text{Cr}]_n$ с одно- и двухосной магнитной анизотропией в плоскости слоев. Описаны особенности технологии для роста указанных сверхрешеток на установке молекулярно-лучевой эпитаксии с использованием различных монокристаллических подложек, а также методические вопросы, касающиеся методов исследования магнитной анизотропии, кривых намагничивания и магнитосопротивления пленочных образцов. Показано, что в сверхрешетках Fe/Cr с относительно толстыми слоями железа, выращенных на подложках $(100)\text{MgO}$, в плоскости слоев наблюдается анизотропия 4-го порядка. В таких сверхрешетках, находящихся изначально в

антиферромагнитном состоянии, в магнитном поле наблюдается смена направления эффективных осей анизотропии. Показано, что в структурах $[Fe/Cr]_n$, выращенных на особых подложках $(100)MgO$, в слоях Fe формируется одноосная магнитная анизотропия, существенно изменяющая характер процессов перемагничивания. Если при намагничивании в плоскости слоев вдоль трудной оси наблюдается плавное изменение намагченности, то при направлении магнитного поля вдоль легкой оси наблюдается многоступенчатое изменение намагченности. В работе показано, что многоступенчатый характер кривых намагничивания и магнитосопротивления обусловлен послойным перемагничиванием отдельных слоев Fe. Получены данные для аналогичных сверхрешеток, но с различным набором ступенчатых аномалий. С помощью магнитооптических методов визуализирована доменная структура, образующаяся во внутренних слоях железа. Указано, что возможной причиной перемагничивания слоев Fe в различных магнитных полях является существенно неоднородное изменение внутренних упругих напряжений, вызванных подложкой, вдоль нормали к поверхности пленки. Все эти результаты являются оригинальными и представляются мне весьма интересными.

В третьей главе приведены результаты исследования различных типов металлических спиновых клапанов на основе антиферромагнетиков $Fe_{50}Mn_{50}$ и $Mn_{75}Ir_{25}$, приготовленных методом магнетронного напыления. Основной задачей исследований М.А. Миляев поставил выявление факторов, влияющих на гистерезис перемагничивания свободного ферромагнитного слоя, и получение спиновых клапанов, сочетающих большое изменение магнитосопротивления, минимальный гистерезис в области слабых магнитных полей и высокую магниторезистивную чувствительность. Это непростая задача, сочетающая ряд взаимоисключающих моментов. Автор показал, что одним из факторов, влияющих на гистерезис, является качество текстуры $<111>$, сформированной в слояхnanoструктуры в процессе напыления. В серии спиновых клапанов с антиферромагнетиком MnIr установлена количественная зависимость ширины гистерезисной петли магнитосопротивления от степени совершенства текстуры $<111>$. М.А. Миляев разработал условия для создания безгистерезисных спиновых клапанов с сильным и слабым межслойным взаимодействием. Получено качественное соответствие полученных результатов и ранее установленной фазовой диаграммой, определяющей возможные моды перемагничивания свободного слоя в зависимости от соотношения параметров взаимодействия между ферромагнитными слоями и направления магнитного поля относительно осей анизотропии. Значительное внимание он уделил исследованиям магнитных и магниторезистивных свойств спиновых клапанов с синтетическим антиферромагнетиком и определил варианты композиций, обладающих наиболее высокой

рабочей температурой. Описана процедура термомагнитной обработки, использующая спин-флоп состояния в синтетическом антиферромагнетике, что позволяет создавать безгистерезисную и линейную в слабых магнитных полях зависимость магнитосопротивления.

В четвертой главе приведены результаты исследований магнитных сверхрешеток с малыми полями насыщения, представляющими интерес для практических приложений. Основной целью исследований было получение ГМС сверхрешеток с максимальной величиной магнитосопротивления в сочетании с малыми полями насыщения и слабым гистерезисом. В работе исследованы три типа многослойных структур с различными материалами магнитных слоев: CoFe/Cu, Ni₆₅Fe₁₅Co₂₀/Cu и Ni₇₆Fe₁₀Co₁₄/Cu. Диссертант проделал большую работу при достижении заданных свойств. Здесь было исследовано влияние различных по составу и толщине буферных слоев на кристаллическую структуру, текстуру, гистерезис перемагничивания и величину магнитосопротивления. Чрезвычайно высокая чувствительность магнитных свойств сверхрешеток к структуре буферного слоя продемонстрирована на примере системы CoFe/Cu. При использовании буферного слоя хрома в таких сверхрешетках было обнаружено резкое, в 10 раз, возрастание ширины магнитного гистерезиса при изменении номинальной толщины буферного слоя с 15 до 20 ангстрем. Исследовано влияние толщины и материала буферного слоя на температурную стабильность характеристик сверхрешеток CoFe/Cu. В работе найдены и использованы эффективные варианты буферного слоя ((Ni₈₀Fe₂₀)₆₀Cr₄₀ и Ta/(Ni₈₀Fe₂₀)₆₀Cr₄₀), позволяющие повысить магнитосопротивление и уменьшить гистерезис и поле магнитного насыщения при одинаковых составах сверхрешеток. Автор показал, что изменение указанных характеристик коррелирует с изменением микроструктуры сверхрешеток (размером и формой зерен), а также с особенностями кристаллической текстуры <111>. Приведены варианты оптимизированных сверхрешеток со значениями магнитосопротивления, превышающие значения ранее исследованных аналогичных сверхрешеток. Описан вариант сверхрешетки CoFe/Cu, обладающий рекордным для металлических сверхрешеток магнитосопротивлением.

Новизна полученных результатов заключается в том, что:

- подробно изучены особенности магнитных и гальваномагнитных свойств монокристалла FeGe₂, в котором могут протекать обратимые и необратимые процессы смещения 90-градусных доменных границ. В рамках единого подхода, использующего

зависимости концентраций магнитных фаз от напряженности магнитного поля, дано теоретическое описание наблюдаемых полевых зависимостей обратимой восприимчивости, продольного и поперечного магнитосопротивления;

- при использовании различных подложек MgO в обменно-связанных сверхрешетках Fe/Cr может быть сформирована как двухосная, так и одноосная магнитная анизотропия в плоскости слоев. Для сверхрешеток Fe/Cr с одноосной анизотропией выявлены условия, необходимые для наблюдения послойного перемагничивания, сопровождающегося многоступенчатым изменением намагниченности и магнитосопротивления;
- для спиновых клапанов различных композиций выявлены условия получения безгистерезисного изменения магнитосопротивления в слабых магнитных полях. Созданы спиновые клапаны, сочетающие большие значения магнитосопротивления, слабый гистерезис и высокую магниторезистивную чувствительность, что представляет интерес для использования разработанных магниточувствительных наноматериалов в практических приложениях.
- на основе изучения корреляции между структурой, зависящей от типа используемых буферных слоев, и магнитными и магнитотранспортными свойствами разработаны подходы, позволившие получить ГМС сверхрешетки, обладающие высокими функциональными характеристиками, в том числе, сверхрешетки CoFe/Cu с рекордной величиной магнитосопротивления.

Научная и практическая значимость работы состоит в том, что получены теоретические и экспериментальные результаты, расширяющие существующие представления о процессах намагничивания в антиферромагнитных кристаллах и сверхрешетках с выраженной магнитной анизотропией в плоскости слоев. Основным достоинством диссертации является разработка технологических методов, позволивших создать управляемые материалы, обладающие практическими значимыми характеристиками обменно-связанных сверхрешеток и спиновых клапанов с эффектом гигантского магнитосопротивления. Найдены эффективные варианты композицийnanoструктур, обладающих высокими функциональными характеристиками. В результате проведенных исследований изготовлены магниточувствительные nanoструктуры с оптимизированными характеристиками, и они уже используются на отечественных предприятиях радиоэлектронной промышленности для создания новых изделий магнитоэлектроники.

Результаты исследований, представленные в диссертации М.А. Миляева, широко обсуждались на Международных и Всероссийских конференциях и симпозиумах, хорошо известны в научном сообществе и цитируются в научной литературе. По теме диссертационной работы опубликовано 34 статьи в ведущих российских и зарубежных журналах, 33 из которых входят в Перечень ВАК и индексируются в системе Web of Science.

Работа написана лаконичным языком, все её положения логично обосновываются. Нареканий не вызывает. Однако в качестве замечания отмечу то, что при рассмотрении влияния анизотропии на магнитные свойства многослойных пленок совсем упущен из виду такой механизм, как интерфейсная анизотропия. Этому эффекту в последнее время уделяется достаточно много внимания, и в ряде случаев именно этот тип анизотропии определяет особенности поведения слоистой структуры. Тем более, что глубина интерфейса часто и составляет 2 – 4 нм.

Также, по-видимому, в формуле (1.39) содержится опечатка, и под $\rho_{i,k}$ следует понимать не тензор электропроводности, а тензор электросопротивления.

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в организациях, исследующих как фундаментальные аспекты физики наноразмерных тонкопленочных материалов, так и разрабатывающих на их основе функциональные устройства и приборы: Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт». Институт общей физики им. А. М. Прохорова (Москва), Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону), Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН (Красноярск), Томский государственный университет. Сибирский федеральный университет (Красноярск), Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург), Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Санкт-Петербургский государственный университет.

Общий вывод. Диссертация Миляева М.А. представляет собой завершенную работу, в которой установлены новые физические закономерности, разработаны технологические подходы полученияnanoструктур с высокими функциональными характеристиками и созданы новые магниточувствительные материалы с эффектом гигантского магнитосопротивления, перспективные для практических применений.

Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации.

Диссертационная работа «Эффекты анизотропии в антиферромагнетиках и многослойных обменно-связанных наноструктурах» соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Михаил Анатольевич Миляев, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.

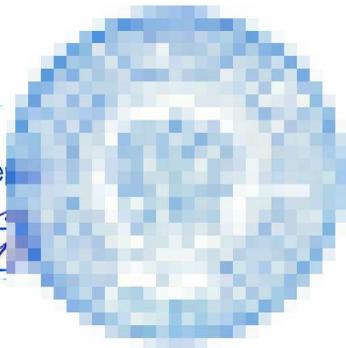
Директор Института инженерной
физики и радиоэлектроники Сибирского
федерального университета,
доктор физ.-мат. наук, профессор

Патрин Геннадий Семенович

« 17 » ноября 2017 г.

660074, г. Красноярск, ул. академика Л.В. Киренского, д. 28,
Институт инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского федерального университета
Тел.: 8(391)2912967
E-mail: patrin@iph.krasn.ru

ФГАОУ ВО СФУ
Подпись Патрин Г.С. заве
Начальник общего отдела Миляев М.А.
« 18 » 11 2017



С отчайом однажды.
Миляев М.А.
30.11.2017г.

Сведения об официальном оппоненте

ФИО: Патрин Геннадий Семенович

Ученая степень, звание: доктор физико-математических наук (специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния вещества), профессор

Полное наименование организации: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ)

Должность: директор Института инженерной физики и радиоэлектроники (ИИФиРЭ)

Почтовый адрес: 660074, г. Красноярск, ул. академика Л.В. Киренского, д. 28, ИИФиРЭ СФУ

Тел.: 8(391)2912967

E-mail: patrin@iph.krasn.ru

Публикации в сфере исследований, которым посвящена диссертация

1. Г.И. Фролов, С.Я. Кипарисов, В.А. Середкин, К.П. Полякова, **Г.С. Патрин**, В.С. Жигалов, А.Д. Балаев. *Особенности процесса перемагничивания обменно-связанной ферро-ферромагнитной пленочной структуры NiFe/CoP* // Письма в ЖТФ.-2014.-Т.40.-В.6.-С.28-34.
2. Л.Е. Быкова, В.Г. Мягков, И.А. Тамбасов, О.А. Баюков, В.С. Жигалов, К.П.Полякова, Г.Н. Бондаренко, И.В. Немцев, В.В. Поляков, **Г.С. Патрин**, Д.А. Великанов. *Твердофазный синтез нанокомпозита ZnO–Fe₃O₄: структурные и магнитные свойства.* // ФТТ.-2015.-Т.57.-№2.- С.366-370
3. **G.S. Patrin**, Ya. Shiyan, K.G. Patrin, G.Yu. Yurkin. *Synthesis and magnetic properties of [(CoP)_{soft}/NiP/(CoP)_{hard}/NiP]_n films.* // J. Low Temp. Phys.-2016.-V.182.-Nos. 3/4.-P.73-81.
4. К.Г. Патрин, С.А. Яриков, **Г.С. Патрин**, В.Ю. Яковчук, А.И. Лямкин. *Магниторезонансные исследования трехслойных пленок FeNi/Bi/FeNi.* // ЖЭТФ.-2017.-Т.151.-В.5.-С.916-923
5. A.S. Tarasov, A.V. Lukyanenko, I.A. Tarasov, I.A. Bondarev, T.E. Smolyarova, N.N. Kosyrev, V.A. Komarov, I.A. Yakovlev, M.N. Volochaev, L.A. Solovyov, A.A. Shemukhin, S.N. Varnakov, S.G. Ovchinnikov, **Г.С. Патрин**, N.V. Volkov. *Approach to form planar structures based on epitaxial Fe_{1-x}Si_x films grown on Si(111).* // Thin Solid Films.-2017.-V.642.-N.9.-P.20-24.

Ученый секретарь СФУ

ФГАОУ ВО СФУ
Подпись Реестровая С.В.
Начальник общего отдела М.В. Егорова
« 17 » 11 20

С.В. Филиппова

