

ОТЗЫВ

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

Актуальность темы. Многослойные магнитные наноструктуры привлекают к себе внимание многочисленными практическими приложениями, в частности, они используются в качестве магниточувствительных материалов в различных высокочувствительных сенсорах, устройствах записи и хранения информации, в измерительных и переключающих устройствах. Особенностью такого рода наноструктур является возможность определять их транспортные и магнитотранспортные свойства, подбирая состав и толщину слоев. Несмотря на длительное время изучения указанных магниточувствительных материалов, их исследование активно продолжаются, что обусловлено как синтезом новых соединений, так и многообразием факторов, влияющих на транспортные свойства магнитных многослойных наноструктур. Создаются особые типы многослойных наноструктур, изучаются новые закономерности, выявляются способы улучшения функциональных параметров как самих многослойных пленок, так и микрообъектов, созданных на их основе. Особенностью данного направления исследований является быстрое использование полученных научных результатов на практике. В диссертационной работе М.А. Миляева рассмотрены вопросы, касающиеся исследований различных свойств и оптимизации функциональных параметров двух типов наноструктур с эффектом гигантского магнитосопротивления – магнитных металлических сверхрешеток и нескольких типов металлических спиновых клапанов. Также в ней уделено внимание свойствам массивных антиферромагнетиков и обменно-связанных сверхрешеток с необычными процессами перемагничивания, связанными с наличием анизотропии, что имеет непосредственное отношение к активно обсуждаемым современным вопросам физики магнитных явлений и физики магнитных наноструктур. Указанные направления исследований диссертационной работы, несомненно, **являются актуальными**.

Достоверность и обоснованность результатов исследования.

Экспериментальные результаты, включенные в диссертационную работу, получены на современных автоматизированных и аттестованных установках, использующих высокоточные приборы. Достоверность полученных результатов сомнений не вызывает.

Физическое обоснование части полученных экспериментальных результатов построено на сравнении с разработанными теоретическими моделями и опубликованными результатами других исследователей. Полученные в работе оригинальные результаты не противоречат ранее опубликованным данным.

Оценка содержания диссертации.

Диссертационная работа Миляева М.А. состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка работ автора, списка обозначений и списка литературы.

В первой главе дан обзор феноменологических теорий процессов намагничения антиферромагнетиков с доменной структурой; особое внимание уделяется теоретическому описанию обратимого и необратимого смещения доменных границ. Представленные теории обобщены автором на случай антиферромагнетиков с двумя осями антиферромагнетизма в базисной плоскости. Разработанные теоретические подходы применены для описания полученных экспериментальных данных для монокристалла антиферромагнетика FeGe_2 , который по типу кристаллической и магнитной симметрии соответствует рассмотренным в теории типам упорядочения. Приведены также данные об исследовании кривых намагничивания монокристалла $\text{Fe}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Ge}_2$ с высокими внутренними напряжениями. Показано, что в зависимости от направления магнитного поля в исследованных антиферромагнетиках могут протекать как обратимые, связанные с вращением векторов антиферромагнетизма, так и необратимые процессы намагничивания, связанные со смещением 90-градусных доменных границ в магнитном поле. Рассчитаны тензор магнитной восприимчивости и константы магнитной анизотропии. Из сравнения теории и эксперимента определены температурные зависимости этих постоянных. Получено хорошее согласие между теоретическими и экспериментальными полевыми зависимостями намагниченности, обратной восприимчивости, продольного и поперечного магнитосопротивлений. На основе анализа полученных результатов сделан вывод о том, что в исследованных антиферромагнетиках доменная структура определяется распределением упругих напряжений, а особенности обратимых и необратимых процессов смещения доменных границ связаны с неоднородностью упругих напряжений. В частности, в работе указаны два необратимых процессах, к которым относятся скачки Баркгаузена, вызванные неоднородностью антиферромагнетика, и процессы аннигиляции 90-градусных доменных границ. Последний тип необратимости приводит к тому, что «девственная» кривая намагничивания проходит вне петли гистерезиса. Также в первой главе рассмотрена теория гальваномагнитных явлений в одноосных и многоосных антиферромагнетиках и определены кинетические постоянные, фигурирующие в теории.

Во второй главе приведены результаты исследований сверхрешеток Fe/Cr с различным типом магнитной анизотропией в плоскости слоев. На основе теоретического анализа кривых намагничивания обменно-связанных сверхрешеток построена фазовая диаграмма, определяющая область существования в них коллинеарных и неколлинеарных фаз. Приведена информация о методике роста сверхрешеток методом молекулярно-лучевой эпитаксии и экспериментальном оборудовании, использованном для исследования кривых намагничивания, магнитной анизотропии и магнитосопротивления. Показано, что использованный в работе метод приготовления сверхрешеток позволяет выращивать сверхрешетки в виде монокристаллических пленок с различным типом магнитной анизотропии в плоскости слоев. При использовании подложек (100)MgO получены сверхрешетки Fe/Cr с анизотропией 4-го порядка в плоскости (100), а при использовании подложек (211)MgO – с анизотропией 2-го порядка. Для сверхрешеток с различным типом анизотропии приведены результаты исследования кривых намагничивания и магнитосопротивления. Установлено, что в первом типе сверхрешеток наблюдается смена направлений эффективных осей легкого намагничивания при изменении напряженности магнитного поля. Во втором типе сверхрешеток характер изменения намагниченности качественно изменяется при намагничивании вдоль «легкой» и «трудной» оси. В первом случае проявляется необычное многоступенчатое изменение кривой намагничивания, в то время как во втором случае наблюдается плавное изменение намагниченности. На основе анализа полученных данных для намагниченности и магнитосопротивления в работе установлено, что наблюдаемые ступенчатые аномалии связаны с послойным перемагничиванием сверхрешетки. Для определения последовательности перемагничивания слоев Fe были проведены магнитооптические исследования, которые позволили также визуализировать доменную структуру в отдельных слоях Fe сверхрешетки. На основе установленной последовательности перемагничивания слоев Fe и анализа влияния отжига на процессы перемагничивания сверхрешеток был сделан вывод о том, что изменение от слоя к слою упругих напряжений, вызванных большим рассогласованием параметров решетки подложки и пленки, создает условия для перемагничивания отдельных слоев Fe в различных по напряженности магнитных полях.

Третья глава посвящена исследованиям металлических спиновых клапанов различного состава. Основной целью проведенных исследований, результаты которых включены в третью главу, было получение безгистерезисных спиновых клапанов, у которых резкое изменение магнитосопротивления в слабых магнитных полях сочетается с минимально возможным гистерезисом вблизи поля переключения. Рассмотренные в диссертационном исследовании спиновые клапаны представляют собой существенно анизотропные многослойные объекты, в которых четыре типа магнитной анизотропии

влияют на их магнитные и магниторезистивные свойства: кристаллографическая магнитная анизотропия, наведенная одноосная анизотропия, односторонняя анизотропия и анизотропия формы. Теоретические исследования таких структур предпринимались ранее. В рамках модели Стонера-Вольфарта проводились численные расчеты и были построены фазовые диаграммы, определяющие области реализации гистерезисных и безгистерезисных мод перемагничивания свободного слоя в аналогичных спиновых клапанах в зависимости от величин параметров межслойного взаимодействия и направления магнитного поля. В связи с этим, доктором наук решалась задача создания экспериментальных образцов безгистерезисных спиновых клапанов различных композиций. Теоретический анализ, подтвержденный экспериментальными исследованиями доктора наук, демонстрирует, что пути оптимизации характеристик реальных спиновых клапанов различны для конкретных композиций и использованных различных антиферромагнетиков. Особое внимание в представленном анализе уделено роли межслойного обменного взаимодействия. В частности, для ряда спиновых клапанов получено качественное согласие эксперимента с расчетной фазовой диаграммой. В данной главе также исследована корреляция между степенью совершенства текстуры $<111>$ и шириной петли гистерезиса магнитосопротивления. Значительное внимание уделено исследованиям спиновых клапанов с синтетическим антиферромагнетиком. В частности, измерены полевые и температурные зависимости магнитосопротивления. Получена информация об их температурной стабильности в случае использования антиферромагнетика FeMn. Указано, что несмотря на низкую температуру блокировки для данного антиферромагнитного материала и возможности изменения свойств спинового клапана при повышении температуры, его свойства могут быть восстановлены с помощью последующей термомагнитной обработки. Детально описана последовательность термомагнитной обработки, необходимой для получения в спиновом клапане с синтетическим антиферромагнетиком скрещенной конфигурации магнитной анизотропии, с помощью которой автору удалось получить линейное и безгистерезисное изменение магнитосопротивления, что представляет интерес для практических приложений. В целом, в данной главе успешно решена задача создания спиновых клапанов, сочетающих значительную величину магнитосопротивления и практического отсутствия гистерезиса.

В четвертой главе приведены результаты исследований магнитных сверхрешеток с эффектом гигантского магнитосопротивления, приготовленных методом магнетронного распыления. Выбранные три типа сверхрешеток, которые уже были в той или иной степени исследованы ранее: $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}$, $\text{Ni}_{65}\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}/\text{Cu}$ и $\text{Ni}_{76}\text{Fe}_{10}\text{Co}_{14}/\text{Cu}$. Основной задачей автора было не воспроизведение соединений, полученных ранее, с хорошими функциональными свойствами, а изучение факторов, в значительной степени влияющих

на их магнитные и магнитотранспортные свойства, и использование этих факторов для получения сверхрешеток с заданными функциональными характеристиками. Основной метод заключался в формировании особой структуры и текстуры в слоях сверхрешеток с помощью использования различных буферных слоев. В частности, при использовании буферного слоя Cr в сверхрешетках CoFe/Cu был обнаружен эффект многократного изменения гистерезиса при субнанометровых вариациях толщины буферного слоя. Найденный эффект наблюдается для многослойных систем, выращенных на различных подложках. Впервые для магнитных металлических сверхрешеток был применен буферный слой «пермаллой-хром», при использовании которого в сверхрешетках CoFe/Cu наблюдается высокие значения магнитосопротивления. Найден эффективный составной буферный слой тантал – «пермаллой-хром», улучшающий текстуру $<111>$ в слоях сверхрешетки и уменьшающий размер кристаллитов, в результате чего уменьшается влияние кристаллографической магнитной анизотропии и ослабляется гистерезис. Использование разработанных подходов в работе позволило получить значения магнитосопротивления, превышающие известные в литературе значения для аналогичных сверхрешеток. При этом для системы CoFe/Cu получена рекордная для металлических обменно-связанных сверхрешеток величина магнитосопротивления в 81%.

Новыми и наиболее важными результатами диссертации являются следующие.

- 1) Предложены теоретические модели и получены выражения для описания кривых намагничивания, обратимой восприимчивости, продольного и поперечного магнитосопротивлений антиферромагнетиков тетрагональной симметрии с двумя взаимно перпендикулярными осями антиферромагнетизма в базисной плоскости. Получено согласие между теорией и экспериментальными данными для монокристалла FeGe₂.
- 2) Впервые выращены сверхрешетки Fe/Cr с выраженной одноосной анизотропией в плоскости слоев. Выявлены условия, при которых в указанных сверхрешетках может наблюдаться многоступенчатый характер изменения в магнитном поле намагченности и магнитосопротивления.
- 3) Предложен способ термомагнитной обработки с использованием спин-флоп состояния в синтетическом антиферромагнетике, позволяющий сформировать в спиновых клапанах скрещенную конфигурацию магнитной анизотропии и получить полевые зависимости магнитосопротивления с линейным участком вблизи нулевого магнитного поля.
- 4) Разработаны экспериментальные подходы и установлен тип составного буферного слоя, позволяющие получать в магнитных металлических сверхрешетках высокие значения магнитосопротивления.
- 5) Впервые изготовлены металлические сверхрешетки CoFe/Cu с величиной магнитосопротивления выше 80%.

Научная и практическая значимость работы.

К наиболее важным в практическом отношении результатам диссертационной работы следует отнести результаты, полученные при исследовании магнитных сверхрешеток. В этой части работы найдены экспериментальные и технологические подходы, позволяющие существенно изменять магнитотранспортные свойства сверхрешеток, предложены конкретные варианты сверхрешеток с сочетанием высоких значений магнитосопротивления и относительно малых полей магнитного насыщения и слабого гистерезиса, что представляет интерес для практических приложений, а также получены варианты наноструктур с рекордными значениями магнитосопротивления, что представляет интерес для фундаментальной науки. Синтезированные сверхрешетки с эффектом гигантского магнитосопротивления уже используются для создания новых изделий магнитоэлектроники на предприятиях радиоэлектронной промышленности.

В работе также получены результаты, важные для физики магнитных явлений. Прежде всего это касается теоретических и экспериментальных данных, относящихся к влиянию процессов смещения доменных границ на магнитные и гальваномагнитные свойства многоосных антиферромагнетиков, а также на процессы послойного перемагничивания сверхрешеток Fe/Cr с одноосной анизотропией в плоскости слоев.

Следует также отметить высокий технологический уровень проведенных исследований, который позволил выращивать монокристаллические образцы сверхрешеток Fe/Cr с уникальными свойствами, а также создавать спиновые клапаны и функциональные магнитные сверхрешетки с характеристиками, находящимися на уровне или превышающими характеристики, полученные на аналогичных объектах в ведущих зарубежных исследовательских центрах.

Несмотря на достаточно большой объем информации, включенной в диссертацию, хорошо проработанный текст с большим количеством иллюстраций, работа вызывает ряд замечаний:

1) Для значительной части образцов, исследованных в диссертационной работе, измерялось гигантское магнитосопротивление (ГМС). В ряде случаев, полученные результаты анализировались в рамках феноменологических теорий. На мой взгляд, следовало бы уделить больше места анализу механизмов ГМС в исследованных сверхрешетках, тем более, что – и это отмечено автором – на величину ГМС влияет ряд разнородных факторов.

2) Прикладной аспект играет значительную роль в проведенных исследованиях. Следовало бы указать, какие свойства изучаемых магнитных структур составляют их

преимущество по сравнению с другими типами структур, в которых наблюдаются значительные амплитуды магнитосопротивления.

3) В третьей главе на графиках представлены полевые зависимости относительного изменения сопротивления, $\Delta R / R$, в то же время в ряд формул, которые отсылают к этим рисункам, входит абсолютное значение сопротивления (например, формула (3.7)). Желательно было бы указать абсолютные значения сопротивления.

Отмеченные недостатки касаются отдельных частных моментов, не ставят под сомнение достоверность экспериментальных результатов и корректность выводов и не снижают общей высокой оценки работы.

Общий вывод. Диссертация Миляева М.А. представляет собой завершенную работу, в которой изучены эффекты и особенности магнитных и магнитотранспортных свойств, связанные с наличием магнитной анизотропии в антиферромагнетиках и искусственных многослойныхnanoструктурах. В диссертации получен ряд новых результатов и разработаны важные для практического использования варианты металлических спиновых клапанов и магнитных сверхрешеток с эффектом гигантского магнитосопротивления. Диссертация написана на основе результатов, опубликованных в 34 статьях в ведущих российских и зарубежных журналах; 33 работы входят в Перечень ВАК и индексируются в системе Web of Science. Результаты диссертации многократно докладывались на российских и международных конференциях и хорошо известны специалистам.

Диссертационная работа соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Миляев М.А., несомненно, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.

Профессор кафедры проблем
конвергенции естественных и гуманитарных наук
факультета свободных искусств и наук СПбГУ,
доктор физико-математических наук

М.Е. Журавлев

Адрес: 199034, Россия, Санкт-Петербург, Университет
государственное бюджетное образовательное учреждение
«Санкт-Петербургский государственный университет»
Тел: +7 (812) 328-20-00, http://spbu.ru/, e-mail: m.zhur@spbu.ru

Федеральное
учреждение
«Санкт-Петербургский государственный университет»

ПОДПИСЬ РУКИ

Журавлев М.Е.
Хомутская Л.П.

ЗАМЕСТИТЕЛЬ НАЧАЛЬНИКА
УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ ГУО

Хомутская Л.П.

УДОСТОВЕРЯЮ

С оговорами однокоманды.

Миляев М.А.

11.12.2017.

01.12.2017

Сведения об официальном оппоненте

ФИО: Журавлев Михаил Евгеньевич

Ученая степень: доктор физико-математических наук, специальность 01.04.11 – физика магнитных явлений

Полное наименование организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Должность: профессор

Почтовый адрес: 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

Тел.: +7 (812) 3282000

E-mail: m.zhuravlev@spbu.ru

Публикации в сфере исследований, которым посвящена диссертация

1. M.Ye. Zhuravlev, A.V. Vedyayev, M.S. Titova, N.V. Ryzhanova. Surface current at non-magnetic metal/ferromagnetic insulator interface due to Rashba spin-orbit interaction. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **441**, 572-577 (2017).
2. T. Li, P. Sharma, A. Lipatov, H. Lee, J.W. Lee, M.Y. Zhuravlev, T.R. Paudel, Y.A. Genenko, C.B. Eom, E.Y. Tsymbal, A. Sinitskii, A. Gruverman. Polarization-Mediated Modulation of Electronic and Transport Properties of Hybrid MoS₂-BaTiO₃-SrRuO₃ Tunnel Junctions. *Nano Letters* **17**, 922-927 (2017).
3. X.Liu, J.Burton, M.Ye. Zhuravlev, and E.Tsymbal. Electric Control of Spin Injection into a Ferroelectric Semiconductor. *Physical Review Letters*, **114**, 046601 (2015).
4. H.Lu, A.Lipatov, S.Ryu, D.Kim, H.Lee, M.Y. Zhuravlev, C.Eom, E.Tsymbal, A.Sinitskii, and A.Gruverman. Ferroelectric Tunnel Junctions with Graphene Electrodes. *Nature Communications*, **5**, 5518 (2014).
5. A.Vedyayev, M.Titova, N.Ryzhanova, M.Ye. Zhuravlev, and E.Tsymbal. Anomalous and Spin Hall Effects in Magnetic Tunnel Junction with Rashba Spin-orbit Coupling. *Applied Physics Letters*. **103**, 032406 (2013).



Ч. О. журавля ФСИН СПбГУ
мэр, член-корр РАН
(Черниговская Т.В.)