

Гусев Сергей Николаевич

**Наноразмерные структуры на основе
сплавов кремния и германия с 3d-элементами группы железа,
сформированные осаждением из лазерной плазмы**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена на кафедре электроники твердого тела физического факультета
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Демидов Евгений Сергеевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Фраерман Андрей Александрович

кандидат физико-математических наук
Трушин Сергей Александрович

Ведущая организация: Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова (физический факультет)

Защита состоится «16» ноября 2011 г. в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета
Д 212.166.01 при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по
адресу: 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23, корп. 3, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского
государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Автореферат разослан «14» октября 2011 г.

Отзывы направлять по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23, корп. 3.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.166.01,
доктор физико-математических наук, профессор



А.И. Машин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время ведется интенсивный поиск и исследование новых полупроводниковых и полуметаллических ферромагнитных материалов с высокой степенью спиновой поляризации носителей заряда с целью их применения в устройствах спинтроники [1]. В отличие от устройств традиционной твердотельной электроники, в спинтронных устройствах используется спин носителей заряда, как дополнительная к их поступательному движению степень свободы и, таким образом, сочетаются преимущества ферромагнитных и полупроводниковых материалов. При этом важную роль играет совмещение технологии получения ферромагнетиков и полупроводников. Значительные усилия были направлены на исследование разбавленных магнитных полупроводников (РМП) на основе соединений III-V, кремния и германия в связи с возможностью их интеграции с традиционными полупроводниковыми материалами [2]. Однако основная проблема состоит в повышении их температуры Кюри для обеспечения работоспособности спинтронных устройств при комнатной температуре. Высокотемпературные РМП являются метастабильными материалами с аморфной или сильно разупорядоченной кристаллической структурой. В литературе встречаются сведения об интересных свойствах РМП или бинарных сплавов германия с марганцем с наноразмерными включениями ферромагнитной фазы [3]. Интересной и многообещающей альтернативой РМП являются привлекающие все большее внимание полуметаллические ферромагнитные сплавы кремния и германия с 3d-элементами группы железа и, в частности, сплавы Гейслера (СГ) из-за возможности полной спиновой поляризации носителей заряда на уровне Ферми [4] и высокой температуры Кюри [5]. В магнитных туннельных переходах (МТП) с электродами из таких ферромагнетиков достигнуты большие величины туннельного магнетосопротивления [6, 7]. Вместе с тем в подавляющем большинстве исследований для синтеза РМП применялись молекулярно-лучевая эпитаксия и ионная имплантация, а формирование СГ осуществлялось преимущественно с использованием магнетронного распыления. Имеются лишь единичные сообщения о применении технологии импульсного лазерного осаждения для синтеза СГ, несмотря на то, что эта технология выгодно отличается простотой, универсальностью и высокой производительностью при нанесении наноразмерных слоев широкого спектра различных материалов [8]. Для исследования свойств слоев СГ часто применялся ограниченный комплекс методов исследования. Нередко о признаках ферромагнетизма судилось исключительно по данным измерений магнитно-полевой зависимости намагниченности. Имеются лишь единичные работы, в которых применялся метод ферромагнитного резонанса в сочетании с магнитотранспортными и магнитооптическими методами исследования. Настоящая работа посвящена изучению возможности применения технологии осаждения из лазерной плазмы для формирования наноразмерных слоев сплавов кремния и германия с 3d-элементами группы железа, кремниевых и германиевых СГ и наноразмерных слоистых структур на их основе. Для исследования свойств новых материалов в работе применялся комплекс современных магнитно-резонансных, магнитооптических, магнитотранспортных, структурных и микронзондовых методов исследования.

Цель и основные задачи исследования

Цель диссертационной работы состоит в изучении возможности применения технологии осаждения из лазерной плазмы (ЛП) для формирования слоев сплавов кремния и германия с 3d-элементами группы железа, содержащих наноразмерные включения ферромагнитных фаз, кремниевых и германиевых СГ и наноразмерных слоистых структур на их основе с применением комплекса современных магнитно-резонансных, магнитооптических, магнитотранспортных, структурных и микрозондовых методов исследования.

Для достижения данной цели решались следующие задачи:

- 1) исследование полученных осаждением из ЛП слоев РМП на основе германия, легированного марганцем, с наноразмерными включениями ферромагнитной фазы;
- 2) исследование полученных осаждением из ЛП слоев сплава кобальта с кремнием;
- 3) исследование полученных, как осаждением из ЛП, так ВЧ магнетронным распылением (МР) слоев кремниевых и германиевых СГ;
- 4) исследование возможности формирования МТП с электродами из синтезированных в работе ферромагнитных материалов.

Научная новизна работы

Научная новизна работы состоит в следующем.

- 1) Обнаружена аномальная угловая зависимость спектра ферромагнитного резонанса (ФМР) в синтезированных осаждением из ЛП при пониженной температуре (150 °С) слоях РМП Ge:(Mn, Al), связываемая с наноразмерными игольчатыми включениями ферромагнитной фазы Ge_xMn_y , ориентированными перпендикулярно к плоскости слоя.
- 2) Впервые показана возможность лазерного синтеза ферромагнитных слоев сплава CoSi с точкой Кюри выше комнатной температуры.
- 3) Показана возможность ферромагнетизма в слоях с элементным составом СГ не только на монокристаллических подложках арсенида галлия и кремния, но и подложках аморфного кварца.
- 4) Показано, что продольный транспорт тока в слоях Ge:(Mn, Al)/GaAs и CoSi/GaAs характеризуется существенной нелинейностью и гистерезисом при комнатной температуре и 77 К при сравнительно малых плотностях тока $\sim 10^3$ - 10^4 А/см².
- 5) Обнаружена сложная структура спектра ФМР с акустической и оптическими резонансными модами в МТП Co₂MnSi/MgO/Co₂MnSi с безгистерезисным отрицательным магнетосопротивлением, обусловленная ферромагнитным обменным взаимодействием между магнитными электродами Co₂MnSi и неоднородной структурой этих электродов.

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы заключается в следующем.

- 1) Показано, что лазерный синтез РМП Ge:(Mn, Al) при пониженной температуре приводит к формированию твердого раствора марганца в германии и образованию ферромагнитной фазы Ge_xMn_y . Эти эксперименты практически полезны в применении сочетания магнитно-резонансных, магнитооптических,

магнитотранспортных и микрозондовых измерений для выявления характера распределения ферромагнитных фаз.

- 2) Показана возможность лазерного синтеза ферромагнитных слоев сплава CoSi с точкой Кюри выше комнатной температуры и сравнительно большой коэрцитивной силой.
- 3) Показано, что лазерная технология позволяет формировать туннельные структуры с электродами из новых ферромагнитных материалов.
- 4) Для разработки переключаемых собственным током наноразмерных структур представляют практический интерес слои Ge:(Mn, Al)/GaAs и CoSi/GaAs, характеризующиеся существенной нелинейностью и гистерезисом в продольном переносе тока при комнатной температуре и 77 К при сравнительно малых плотностях тока $\sim 10^3$ - 10^4 А/см².
- 5) Синтезированные МТП Pt/Co₂MnSi/MgO/Co₂MnSi/Si с безгистерезисным магнетосопротивлением при дальнейшей оптимизации их характеристик могут быть перспективными для разработки приборов спинтроники, в частности, безгистерезисных датчиков магнитного поля.

Основные положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие положения.

- 1) Аномальная угловая зависимость спектра ФМР слоев РМП Ge:(Mn, Al) толщиной 50 нм, осажденных на подложку арсенида галлия при пониженной температуре (150 °С) связана с наличием, кроме твердого раствора марганца в германии, игольчатых включений ферромагнитной фазы Ge_xMn_y, ориентированных перпендикулярно плоскости пленки. Такой характер структуры подтверждается температурными измерениями ФМР, аномального эффекта Холла и магнитно-силовой микроскопией поперечного скола.
- 2) Сильнонеравновесная лазерная технология позволяет формировать ферромагнитные слои сплава CoSi с точкой Кюри не ниже комнатной температуры, в то время как в объемных силицидах 3d-переходных металлов лишь железо с кремнием образует высокотемпературные ферромагнитные сплавы. Такие слои могут быть сформированы на монокристаллических подложках, как из кремния, так и арсенида галлия.
- 3) Возможно формирование, как осаждением из ЛП, так и ВЧ МР наноразмерных слоев кремниевых и германиевых СГ Co₂MnSi, Co₂MnGe и Fe₂CrSi на монокристаллических подложках арсенида галлия, кремния и подложках аморфного кварца с ярко выраженными ферромагнитными свойствами и температурой Кюри до 500 К. Ферромагнетизм слоев проявляется в их магнитно-резонансных, магнитотранспортных и магнитооптических свойствах. Оптимальной для получения наилучших магнитных свойств СГ Co₂MnSi является температура около 350 °С. Для слоев этого сплава достигнута величина продольного отрицательного магнетосопротивления ≈ 1 % в магнитном поле с индукцией 0,7 Тл.
- 4) Лазерная технология применима для получения туннельно-прозрачных структур с диэлектрической прослойкой MgO толщиной 2-8 нм и электродами из кремниевого

СГ Co₂MnSi. В результате изучения поперечного транспорта тока в туннельных структурах с электродами из СГ Co₂MnSi показано, что их вольтамперные характеристики нелинейные, нелинейность связана с дискретным туннелированием сквозь диэлектрик MgO с наноразмерными неоднородностями. Эти туннельные контакты характеризуются величиной магнетосопротивления около 2,5 % в магнитном поле с индукцией 0,38 Тл при комнатной температуре.

- 5) Продольный транспорт тока в слоях Ge:(Mn, Al)/GaAs и CoSi/GaAs характеризуется существенной нелинейностью и гистерезисом при комнатной температуре и 77 К при сравнительно малых плотностях тока $\sim 10^3$ - 10^4 А/см².
- 6) Сложная структура спектра ФМР с акустической и оптическими резонансными модами в МТП Co₂MnSi/MgO/Co₂MnSi с гигантским магнетосопротивлением обусловлена ферромагнитным обменным взаимодействием между магнитными электродами Co₂MnSi и неоднородной структурой этих электродов.

Личный вклад автора

Автор внес определяющий вклад в проведение и обработку результатов магнитно-резонансных измерений, а также принимал непосредственное участие в проведении магнитооптических (совместно с к.ф.-м.н. М.В. Сапожниковым) и магнитотранспортных (совместно с С.А. Левчуком) измерений и обработке их результатов. Анализ и интерпретация результатов проводились совместно с научным руководителем. Магнитные структуры были получены к.ф.-м.н. В.В. Подольским, В.П. Лесниковым и Ю.А. Дудиным при участии автора. Микронзондовые измерения выполнены к.ф.-м.н. Б.А. Грибковым и к.ф.-м.н. Д.О. Филатовым. Рентгеноструктурный анализ проведен д.ф.-м.н. Ю.Н. Дроздовым, элементный анализ – к.ф.-м.н. М.Н. Дроздовым, анализ химического состава – к.ф.-м.н. Д.Е. Николичевым.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 05-02-17362 и 08-02-01222а), Международного научно-технического центра (грант G-1335), Министерства образования и науки Российской Федерации (проекты № 2.1.1/2833 и № 2.1.1/12029 АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (тема НИЧ ННГУ Н-062-0), проект № 02.740.11.0672 ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (тема НИЧ ННГУ Н-263-9)).

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XI/XII/XIII/XIV/XV Международный симпозиум «Нанозонная физика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 10-14 марта 2007 г./10-14 марта 2008 г./16-20 марта 2009 г./15-19 марта 2010 г./14-18 марта 2011 г.); Euro-Asian Symposium “Magnetism on a Nanoscale”, EASTMAG-2007 (Kazan, August 23-26, 2007); International Conference “Spin Electronics: Novel Phenomenon and Materials”, “Spin Electronics 07” (Tbilisi, Georgia, October 22-24, 2007); Moscow International Symposium on Magnetism “MISM-2008”/“MISM-2011” (Moscow, June 20-25, 2008/Moscow, August 21-25, 2011); V/VI/VII Международная конференция и IV/V/VI Школа молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и

приборов на его основе «КРЕМНИЙ-2008»/«КРЕМНИЙ-2009»/«КРЕМНИЙ-2010» (Черноголовка, 1-4 июля 2008 г./Новосибирск, 7-10 июля 2009 г./Нижний Новгород, 6-9 июля 2010 г.); 7-я Всероссийская молодежная научная школа «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение» (Саранск, 7-10 октября 2008 г.); П/Ш Всероссийская конференция «Физические и физико-химические основы ионной имплантации» (Казань, 28-31 октября 2008 г./Нижний Новгород, 26-29 октября 2010 г.); 14-я/15-я Нижегородская сессия молодых ученых (естественнонаучные дисциплины) (Нижний Новгород, 19-23 апреля 2009 г./19-23 апреля 2010 г.); XXI Международная конференция «Новое в магнетизме и магнитных материалах», НМММ XXI (Москва, 28 июня - 4 июля 2009 г.); IV Украинская научная конференция по физике полупроводников, УНКФП-4 (Запорожье, Украина, 15-19 сентября 2009 г.); II Международный, междисциплинарный симпозиум «Среды со структурным и магнитным упорядочением», MULTIFERROICS-2 (Ростов-на-Дону-Лео, 23-28 сентября 2009 г.); Workshop on Nanomagnetism, Spin-Electronics and Quantum Optics, NSEQO 2009 (Rio de Janeiro, Brazil, November 11-13, 2009).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 33 печатные работы, в том числе 5 статей [А1-А5] в ведущих рецензируемых научных журналах и 28 публикаций [А6-А33] в материалах международных, всероссийских и региональных конференций.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложения. Объем диссертации составляет 145 страниц, содержащих 94 рисунка и 4 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 139 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель и поставлены основные задачи диссертационного исследования, показана научная новизна и практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе автора, апробации работы, публикациях, объеме и структуре диссертации.

Первая глава представляет собой обзор литературы по теме диссертационного исследования. В **разделе 1.1** кратко раскрыто содержание главы. В **разделе 1.2** приведены общие сведения о явлении ФМР, рассмотрены особенности ФМР в многослойных структурах ферромагнетик/немагнитный материал/ферромагнетик, как с непрерывными, так и с прерывистыми ферромагнитными слоями. В **разделе 1.3** приведены общие сведения о МОЭК и его классификация. **Разделы 1.4** и **1.5** посвящены анализу применения методов ФМР и МОЭК для исследования бинарных сплавов (в частности сплавов германия с марганцем) и СГ. В заключение в **разделе 1.6** представлены выводы из обзора литературы, на основе которых сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена методике получения и исследования свойств магнитных структур. В **разделе 2.1** описана методика получения изучавшихся в работе структур.

Формирование как однослойных, так и многослойных структур, осуществлялось методами осаждения из ЛП в вакууме и ВЧ МР. Лазерный синтез слоев проводился в вакууме ($\sim 10^{-6}$ торр) на второй и третьей гармониках излучения твердотельного импульсного лазера на АИГ:Nd Solar LS LQ 529A. Длительность импульсов составляла 12 нс, частота следования импульсов – 10 Гц. Формирование слоев методом МР производилось с использованием магнетронной распылительной системы на базе универсального вакуумного поста ВУП-5 в ВЧ режиме с частотой 13,56 МГц и удельной мощностью плазмы до 2 Вт/см² в разреженной ($\sim 10^{-2}$ торр) атмосфере высокочистого аргона. Сильнонеравновесный метод осаждения из ЛП использовался для получения слоев метастабильных РМП и бинарных сплавов элементарных полупроводников с 3d-элементами группы железа. Для синтеза слоев термодинамически стабильных СГ применялись оба метода. Осаждение слоев производилось на монокристаллические подложки Si(100), Si(111), GaAs(100) и аморфные подложки плавленого кварца при температуре $T_g = 20-500$ °С.

Формирование структур МТП осуществлялось с применением обоих методов. Получение структур МТП методом осаждения из ЛП производилось с формированием диэлектрического слоя оксида магния (MgO) толщиной 2-8 нм путем осаждения на нижний слой СГ при температуре $T_g = 150$ °С тонкого металлического слоя магния с последующим его окислением в атмосфере кислорода при температуре $T_{ox} = 300$ °С. В магнетронном варианте формирование структур осуществлялось в едином технологическом цикле при температуре $T_g = 20-350$ °С с осаждением диэлектрического слоя оксида магния из стехиометрической мишени. Для исследования поперечного транспорта тока в структурах МТП на поверхность верхнего слоя СГ осаждением из ЛП при температуре $T_g = 150-350$ °С сквозь маску наносились круглые контакты из платины диаметром 100 и 300 мкм и толщиной 20-30 нм с последующим формированием мезоструктур путем травления в плавиковой или соляной кислоте.

В разделе 2.2 описан комплекс методов исследования магнитных структур, включающий в себя магнитно-резонансные, магнитооптические, магнитотранспортные, транспортные и микронзондовые измерения, а также рентгеноструктурный анализ, послойный элементный анализ и анализ химического состава. Магнитно-резонансные измерения проводились на ЭПР-спектрометре Bruker EMX Plus в X-диапазоне (9,8 ГГц) в интервале значений индукции магнитного поля до 1,5 Тл и температуры 77-500 К. Магнитооптические измерения проводились в меридиональной геометрии МОЭК на длине волны лазерного излучения 0,63 мкм в интервале значений индукции магнитного поля до 0,3 Тл при комнатной температуре. Магнитотранспортные измерения проводились в интервале значений индукции магнитного поля до 0,75 Тл при 77 К и комнатной температуре с использованием автоматизированной измерительной системы, разработанной и сконструированной при непосредственном участии автора. Транспортные измерения проводились при 77 К и комнатной температуре с использованием прецизионного анализатора Agilent Technologies B1500A Semiconductor Device Analyzer. Исследование морфологии поверхности и латерального распределения намагниченности проводилось соответственно методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) и магнитно-силовой микроскопии (МСМ) в ИФМ РАН и НОЦ ФТНС ННГУ с использованием сканирующих зондовых микроскопов NT-MDT Solver PRO и Solver HV. Рентгеноструктурный анализ проводился в ИФМ РАН с использованием рентгеновского дифрактометра ДРОН-4.

Послойный элементный анализ проводился в ИФМ РАН методом вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) с использованием времяпролетного масс-спектрометра IONTOF TOF.SIMS 5-100. Измерение глубины кратера травления производилось на оптическом интерферометре Talysurf CCI 2000 (чувствительность по высоте 0,2 нм). Анализ химического состава проводился в НОЦ ФТНС ННГУ методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на комплексе Omicron Multiprobe RM.

Третья глава посвящена изучению свойств наноразмерных слоев сплавов кремния и германия с 3d-металлами, а также кремниевых и германиевых СГ, полученных осаждением из ЛП и МР. Вводный **раздел 3.1** отражает содержание главы.

В **разделе 3.2** рассмотрены свойства слоев РМП Ge:(Mn, Al) толщиной 110 нм, полученных на подложках GaAs(100) и Si(100) осаждением из ЛП при температуре $T_g = 150$ °С. Было обнаружено, что слои Ge:(Mn, Al) с содержанием марганца и алюминия 10 ат. % характеризуются аномальной угловой зависимостью спектра ФМР при комнатной температуре. Температурное изменение спектров ФМР в перпендикулярной и параллельной геометрии (рисунок 1) свидетельствовало о неоднородном распределении магнитных свойств внутри слоев: при температуре ниже 212 К имела место нормальная, характерная для плоского ферромагнетика, а выше 230 К – аномальная анизотропия спектра ФМР.

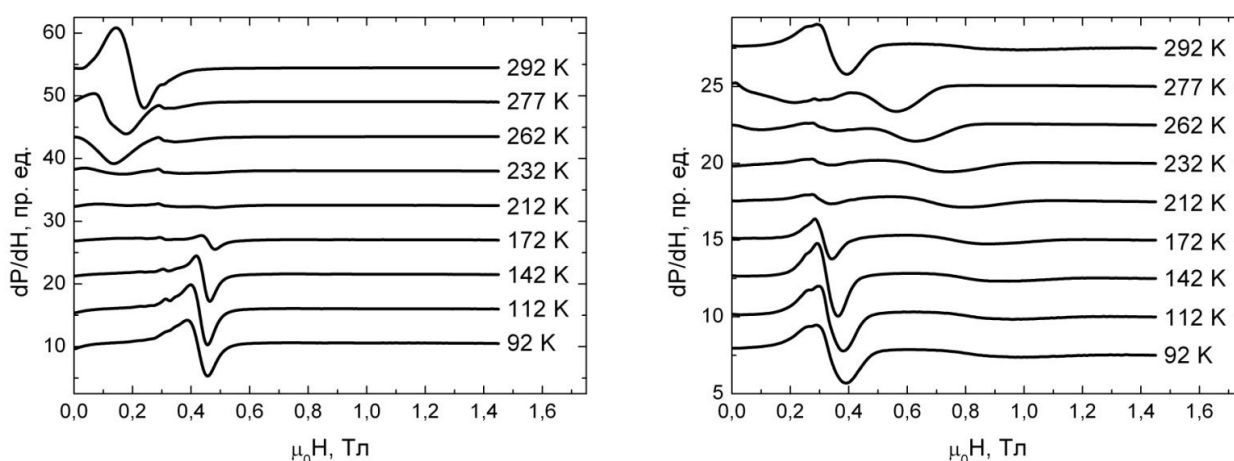


Рисунок 1 – Температурная зависимость спектра ФМР в перпендикулярной ($\theta_H = 0^\circ$) (слева) и параллельной ($\theta_H = 90^\circ$) (справа) геометрии для слоя Ge:(Mn, Al)/GaAs(100) толщиной 110 нм, осажденного из ЛП при $T_g = 150$ °С (θ_H – угол между направлением постоянного магнитного поля и нормалью к плоскости слоя)

Предполагалось, что аномальная угловая зависимость спектра ФМР обусловлена поперечной магнитной анизотропией, связанной с наличием в слое Ge:(Mn, Al) иглообразных областей с повышенной намагниченностью, ориентированных перпендикулярно плоскости слоя. Показано, что спектр ФМР при комнатной температуре может быть описан моделью цилиндрического (игловидного) ферромагнетика. Существование поперечной магнитной анизотропии в слоях Ge:(Mn, Al)/GaAs(100) подтверждалось данными АСМ и МСМ поперечного скола: изображение АСМ не обнаруживало резких скачков профиля на границе слой/подложка, тогда как картина МСМ отражала повышенную неоднородность намагниченности на этой границе. Слои Ge:(Mn, Al) характеризовались дырочной проводимостью. При комнатной температуре наблюдался (рисунок 2) нормальный

(линейный), а при 77 К – аномальный (гистерезисный) эффект Холла (АЭХ), свидетельствуя о проявлении низкотемпературной ферромагнитной фазы.

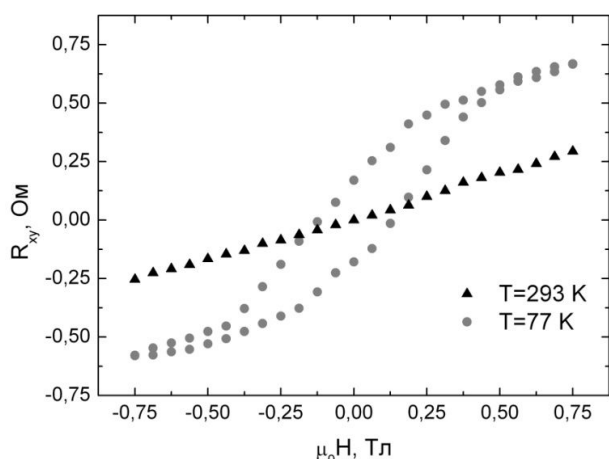


Рисунок 2 – Зависимость холловского сопротивления R_{xy} от напряженности магнитного поля при 77 и 293 К для слоя Ge:(Mn, Al)/GaAs(100) толщиной 110 нм, осажденного из ЛП при $T_g = 150$ °С

синтезированных осаждением из ЛП при $T_g = 350$ °С на монокристаллических подложках Si(100) и Si(111). При комнатной температуре и 77 К слои Co_xSi_y/Si характеризовались металлической дырочной проводимостью, гистерезисным АЭХ и отрицательным магнетосопротивлением (ОМС) величиной $\approx 0,3$ % в магнитном поле 0,75 Тл. Спектр ФМР слоев сплава Co_xSi_y при комнатной температуре существенно зависел от кристаллографической ориентации подложки. Слои $Co_xSi_y/Si(100)$ проявляли аномальную анизотропию формы, свидетельствующую о существовании в них включений ферромагнитной фазы, тогда как слои $Co_xSi_y/Si(111)$ обнаруживали классическую анизотропию формы однородного плоского ферромагнетика. Ферромагнетизм слоев $Co_xSi_y/Si(111)$ подтверждался гистерезисным характером меридионального МОЭК при комнатной температуре. Наблюдавшаяся сильная анизотропия МОЭК, вероятно, связана с существованием в плоскости слоя наноразмерных продольных неоднородностей, не проявляющихся на изображениях АСМ и МСМ.

На основе совокупности экспериментальных данных сделан вывод о том, что ферромагнетизм слоев Co_xSi_y/Si обусловлен существованием в слое наноразмерных областей, в которых атомы кобальта находятся в высокоспиновом состоянии, хотя, несмотря на наименьшую термодинамическую стабильность в ряду Co, Co_2Si , CoSi, $CoSi_2$ [9], не исключается и наличие наноразмерных включений металлического кобальта, являющегося одним из наиболее высокотемпературных ферромагнетиков.

Раздел 3.4 посвящен сравнительному анализу свойств слоев СГ Co_2MnSi толщиной 30-150 нм, полученных осаждением из ЛП и МР на монокристаллических подложках GaAs(100), Si(100) и аморфных подложках плавного кварца при $T_g = 20-350$ °С.

Рентгеноструктурный анализ показал в осажденных из ЛП слоях наличие кристаллической фазы Co_2MnSi , проявление которой усиливалось после вакуумного термического отжига при $T_a = 560$ °С, тогда как сформированные МР слои имели аморфную структуру. Анализ состава методом РФЭС подтвердил качественное соответствие

синтезированных слоев распыляемым мишеням в том и другом случае, но обнаружил высокое содержание кислорода.

Исследование морфологии поверхности методом АСМ показало, что шероховатость полученных осаждением из ЛП слоев не превышает 5 нм, а в случае сформированных МР слоев достигнута атомарная гладкость. При этом в обоих случаях не наблюдалось корреляции между рельефом поверхности и латеральным распределением намагниченности по данным МСМ.

Ферромагнитное поведение слоев СТ $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{GaAs}(100)$, $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{Si}(100)$ и $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{SiO}_2$, синтезированных как осаждением из ЛП, так и МР, проявилось при комнатной температуре в ФМР с характерной для плоского ферромагнетика анизотропией формы. Осажденные из ЛП слои $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{GaAs}(100)$ обнаруживали признаки магнитной однородности. Температурная зависимость намагниченности слоев $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{GaAs}(100)$, рассчитанная из относительного положения линий ФМР в перпендикулярной и параллельной геометрии, свидетельствовала о величине точки Кюри около 500 К. Осажденные из ЛП слои $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{SiO}_2$ имели сильно неоднородную магнитную структуру, в отличие от полученных МР слоев, характеризующихся узкими резонансными линиями и большей величиной намагниченности. Вакуумный термический отжиг при $T_a = 560$ °С осажденных из ЛП слоев в независимости от вида подложки приводил к нарушению их магнитной однородности и уменьшению намагниченности.

Ферромагнетизм слоев СТ $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{GaAs}(100)$, $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{Si}(100)$ и $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{SiO}_2$, полученных как осаждением из ЛП, так и МР, подтверждался наблюдением нелинейного и гистерезисного МОЭК при комнатной температуре. Независимо от метода получения слои СТ $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{GaAs}(100)$, $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{Si}(100)$ и $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{SiO}_2$ демонстрировали дырочную проводимость и характеризовались преимущественно безгистерезисным АЭХ и ОМС при комнатной температуре и 77 К. Величина ОМС осажденных из ЛП слоев СТ $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{GaAs}(100)$ и $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{Si}(100)$ достигала $\approx 0,1$ %, а сформированных МР – ≈ 1 % в магнитном поле 0,75 Тл при 77 К. Осажденные из ЛП слои СТ $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{SiO}_2$ в аналогичных условиях, наоборот, проявляли большую (≈ 1 %) величину ОМС, чем полученные методом МР слои ($\approx 0,2$ %).

В разделе 3.5 рассмотрены свойства слоев СТ $\text{Fe}_2\text{CrSi}/\text{GaAs}(100)$ толщиной 50 нм, полученных осаждением из ЛП при $T_g = 300$ °С. В слоях СТ $\text{Fe}_2\text{CrSi}/\text{GaAs}(100)$ наблюдалась высокая полуметаллическая дырочная проводимость и гистерезисный АЭХ как при 77 К, так и при комнатной температуре, но ОМС было неразличимым на фоне шумов. По данным ФМР при комнатной температуре слои проявляли классическую анизотропию формы, но имели сильно неоднородную магнитную и, вероятно, фазовую структуру.

В разделе 3.6 сформулированы основные выводы по главе.

В четвертой главе приведены результаты исследования наноразмерных слоистых структур на основе сплавов кремния и германия с 3d-металлами. Во вступительном разделе 4.1 подчеркнут интерес к переключаемым собственным током магнитным слоистым структурам и отражено содержание главы.

Раздел 4.2 посвящен исследованию продольного транспорта тока в осажденных из ЛП наноразмерных слоях РМП $\text{Ge}:(\text{Mn}, \text{Al})/\text{GaAs}(100)$ и сплава $\text{CoSi}/\text{GaAs}(100)$ толщиной соответственно 110 и 40 нм. При комнатной температуре и сравнительно невысокой плотности тока $\sim 10^3$ А/см² слои $\text{Ge}:(\text{Mn}, \text{Al})/\text{GaAs}(100)$ проявляли существенную

нелинейность ($\approx 4\%$) и гистерезис ($\approx 1\%$) вольтамперной характеристики (ВАХ) при прямом и обратном ходе изменения тока. Понижение температуры до 77 К приводило к возрастанию удельного сопротивления слоев на 130-140 %, связываемому с проявлением обменного взаимодействия между ионами марганца в твердом растворе марганца в германии. В меньшей степени наблюдалась нелинейность ($\approx 2\%$) и гистерезис ($\approx 0,5\%$) ВАХ. Вакуумный термический отжиг при $T_a = 400\text{ }^\circ\text{C}$ приводил к возрастанию электропроводности слоев за счет перехода части ионов марганца из твердого раствора во включения второй фазы и, как следствие, роста подвижности носителей тока. Как и в случае неотожженных слоев, при комнатной температуре и плотности тока $\sim 10^3\text{ A/cm}^2$ имела место существенная нелинейность ($\approx 2\%$) и гистерезис ($\approx 0,5\%$) ВАХ при прямом и обратном ходе изменения тока. Охлаждение до 77 К приводило к небольшому (на 11-13 %) возрастанию удельного сопротивления слоев. В меньшей степени проявились нелинейность ($\approx 1\%$) и гистерезис ($\approx 0,5\%$) ВАХ.

По сравнению со слоями Ge:(Mn, Al)/GaAs(100) слои CoSi/GaAs(100) при комнатной температуре имели на порядок меньшее удельное сопротивление. При плотности тока до $5 \cdot 10^4\text{ A/cm}^2$ имела место существенная нелинейность ($\approx 3\%$) и гистерезис ($\approx 1\%$) ВАХ при прямом и обратном ходе изменения тока, причем нелинейность имела нечетный вид и характеризовалась узкими пиками при $j \approx \pm 6 \cdot 10^3\text{ A/cm}^2$ (рисунок 3 (слева)). Понижение температуры до 77 К приводило к незначительному (на 5-13 %) уменьшению удельного сопротивления слоев, при этом ВАХ имела ассиметричную форму с доминирующей четной составляющей, нелинейность составляла $\approx 12\%$, а гистерезис проявлялся лишь в узких пиках при $j \approx \pm 6 \cdot 10^3\text{ A/cm}^2$ (рисунок 3 (справа)).

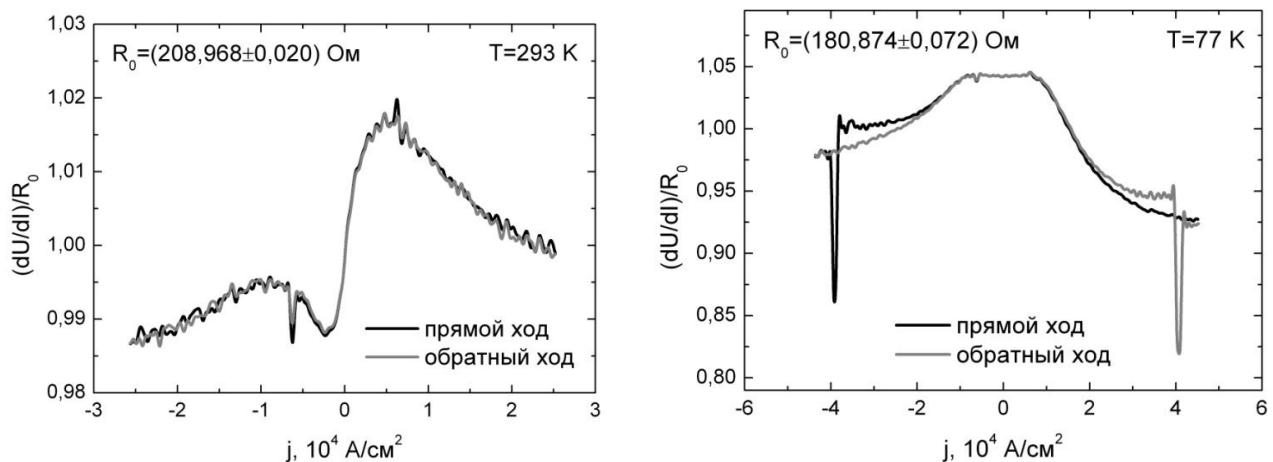


Рисунок 3 – Зависимость относительного дифференциального сопротивления от плотности тока при 293 К (слева) и 77 К (справа) для слоя сплава CoSi/GaAs(100) толщиной 40 нм, осажденного из ЛП при $T_g = 350\text{ }^\circ\text{C}$

В разделе 4.3 рассмотрены свойства полученных осаждением из ЛП трехслойных туннельных структур $\text{Co}_2\text{MnSi/MgO/Co}_2\text{MnSi/GaAs}(100)$ и $\text{Co}_2\text{MnSi/MgO/Co}_2\text{MnSi/Si}(100)$ с технологической толщиной электродов 20-50 нм и диэлектрической прослойки 2-16 нм. По данным ФМР при комнатной температуре в структурах с толщиной диэлектрического слоя 2 нм наблюдалось проявление ферромагнитного межслойного обменного взаимодействия (МОВ) [10, 11]. Увеличение толщины оксидного слоя приводило к ослаблению МОВ. Изучение поперечного транспорта тока выявило характерные признаки туннелирования

носителей тока сквозь диэлектрический барьер. Наблюдавшаяся нелинейность и асимметрия ВАХ, вероятно, обусловлена дискретным туннелированием [12] носителей тока сквозь наноразмерные гранулы металлического магния, присутствие которых в слое оксида магния связано с неполным его окислением. При комнатной температуре структуры характеризовались величиной магнетосопротивления $\approx 2,5\%$ в магнитном поле 0,38 Тл.

В разделе 4.4 описаны свойства аналогичных, но сформированных МР, трехслойных структур. В экспериментах по ФМР при комнатной температуре, как и в случае полученных осаждением из ЛП структур, было обнаружено проявление ферромагнитного МОВ [10, 11]. Структуры Co_2MnSi (20 нм)/ MgO (2-8 нм)/ Co_2MnSi (20 нм)/ $\text{Si}(100)$ характеризовались бимодальным распределением МОВ. С ростом толщины диэлектрической прослойки наблюдалась эволюция акустической и оптических линий спектра, свидетельствующая об ослаблении МОВ (рисунок 4).

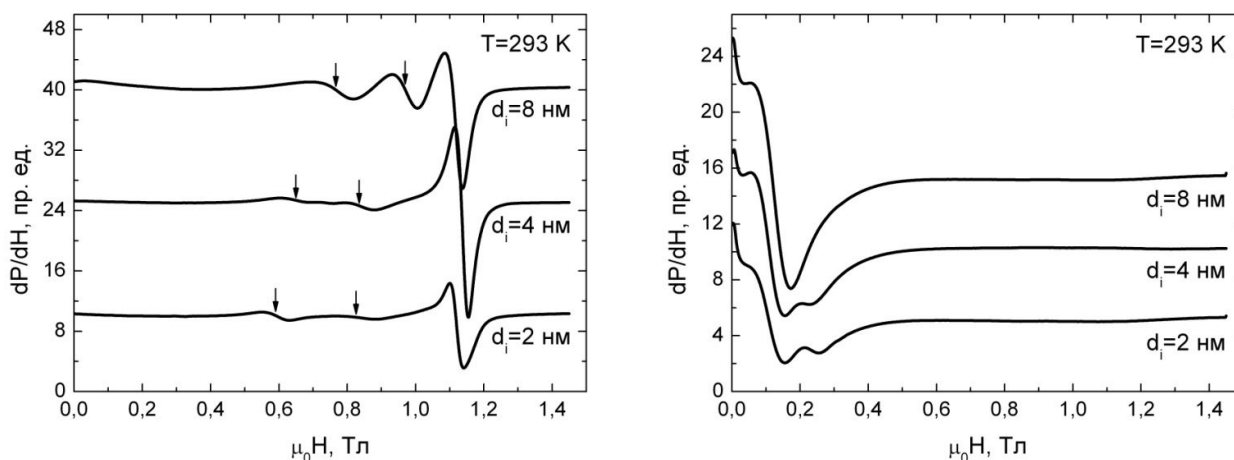


Рисунок 4 – Спектр ФМР в перпендикулярной ($\theta_H = 0^\circ$) (слева) и параллельной ($\theta_H = 90^\circ$) (справа) геометрии при 293 К для трехслойных структур Co_2MnSi (20 нм)/ MgO (d_i нм)/ Co_2MnSi (20 нм)/ $\text{Si}(100)$ с различными толщинами диэлектрического слоя d_i (θ_H – угол между направлением постоянного магнитного поля и нормалью к плоскости слоя). Вертикальными стрелками показано положение оптических линий

Ферромагнетизм слоев СГ в структурах Co_2MnSi (20 нм)/ MgO (2-8 нм)/ Co_2MnSi (20 нм)/ $\text{Si}(100)$ подтверждался нелинейным гистерезисным МОЭК при комнатной температуре. Послойный элементный анализ этих структур методом ВИМС показал, что истинный профиль распределения химических элементов по глубине существенно отличается от задававшегося в процессе формирования структур: реальные толщины слоев СГ и диэлектрической прослойки меньше технологических, имеет место сильная асимметрия состава слоев СГ. Кроме того, наблюдалось повышенное содержание кислорода в слоях.

Как и для осажденных из ЛП структур, имела место нелинейность ВАХ, вероятно, обусловленная вкладом в общий туннельный ток дискретного туннелирования [12] сквозь наноразмерные гранулы металлического магния или компонентов СГ в оксидном слое, присутствие которых связано с размывом границы между слоями СГ и диэлектрической прослойкой, но асимметрии ВАХ не наблюдалось. При комнатной температуре структуры характеризовались безгистерезисным ОМС величиной до 1,5 % в магнитном поле 0,3 Тл, которое было максимальным при параллельной и резко спадало до нуля при перпендикулярной ориентации магнитного поля к плоскости структуры.

Предполагалось, что бимодальное распределение МОВ в структурах Co_2MnSi (20 нм)/ MgO (2-8 нм)/ Co_2MnSi (20 нм)/ Si (100) является следствием магнитной неоднородности электродов и обусловлено суперпозицией вкладов в МОВ преимущественно от областей двух типов:

- 1) с высоким значением намагниченности в верхнем или нижнем слое СГ;
- 2) с высоким значением намагниченности и в верхнем и в нижнем слое СГ.

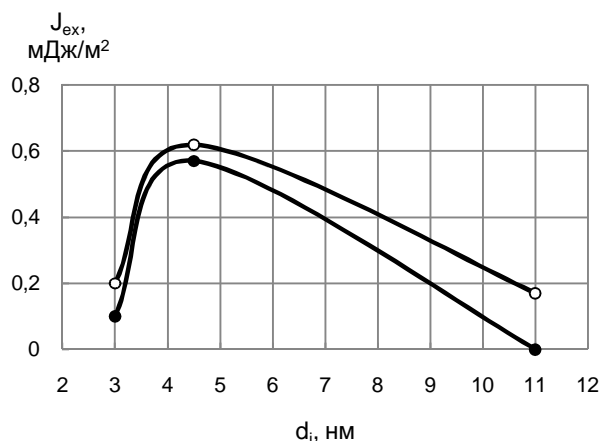


Рисунок 5 – Зависимости постоянной МОВ в структурах Co_2MnSi (20 нм)/ MgO (d_i нм)/ Co_2MnSi (20 нм)/ Si (100) от толщины d_i диэлектрического слоя, рассчитанной с использованием численного моделирования спектров ФМР

Наблюдалась (рисунок 5) немонотонная зависимость постоянной МОВ от толщины диэлектрической прослойки, качественно согласующаяся с теорией [13, 14], в рамках которой ферромагнитный характер МОВ может быть обусловлен двойным антиферромагнитным сверхобменом через магнитные гранулы в оксидном слое. Однако, вследствие флуктуаций толщины диэлектрического слоя не исключается существование между электродами структуры узких перемычек из ферромагнитного материала, обеспечивающих между ними слабую ферромагнитную связь.

В разделе 4.5 сформулированы основные выводы по главе.

В **Заключении** сформулированы

основные результаты диссертационной работы и выводы.

В **Приложении** приведено аналитическое выражение для мнимой части магнитной восприимчивости, использовавшееся для численного моделирования спектров ФМР трехслойных структур.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

- 1) Обнаружена аномальная угловая зависимость спектра ФМР слоев РМП $\text{Ge}:(\text{Mn}, \text{Al})/\text{GaAs}$ толщиной 50 нм, полученных осаждением из ЛП при температуре $T_g = 150$ °С. Совокупность результатов измерений температурной зависимости ФМР, АЭХ, АСМ и МСМ свидетельствует о двойственной природе ферромагнетизма слоев $\text{Ge}:(\text{Mn}, \text{Al})$, обусловленного твердым раствором марганца в германии и игольчатыми включениями фазы Ge_xMn_y , ориентированными перпендикулярно плоскости слоя $\text{Ge}:(\text{Mn}, \text{Al})$.
- 2) Впервые обнаружен высокотемпературный ферромагнетизм с точкой Кюри выше комнатной температуры и высокой коэрцитивной силой в осажденных из ЛП на подложки из монокристаллического кремния наноразмерных слоях сплава CoSi , не являющегося ферромагнитным при обычном формировании объемного сплава кобальта и кремния. Ферромагнетизм слоев CoSi проявился при 77 К и комнатной температуре в ФМР, гистерезисных АЭХ и МОЭК.

- 3) Осаждением из ЛП, как на монокристаллических подложках из кремния и арсенида галлия, так и на аморфных подложках из плавленого кварца при температуре $T_g = 20-350$ °С получены слои СГ Co_2MnSi с точкой Кюри выше 500 К. Наблюдался ярко выраженный спектр ФМР с узкими резонансными линиями и сильной анизотропией, характерной для плоского ферромагнетика, гистерезисный МОЭК при комнатной температуре, гистерезисный АЭХ при 77 К и комнатной температуре. Проявление ферромагнетизма слоев не критично к атомной упорядоченности и отклонению от стехиометрии. Аналогичные результаты получены для СГ Co_2MnGe и Fe_2CrSi с точкой Кюри выше комнатной температуры.
- 4) Наибольшая величина ОМС ≈ 1 % в магнитном поле 0,75 Тл достигнута в случае слоев СГ Co_2MnSi , осажденных методом МР на подложки из кремния или арсенида галлия. Магнетосопротивление слоев СГ Co_2MnSi , полученных осаждением из ЛП, было на порядок меньше, несмотря на то, что слои, осажденные МР, отличались повышенным содержанием кислорода.
- 5) В продольном транспорте тока слоев РМП $\text{Ge}:(\text{Mn}, \text{Al})/\text{GaAs}$ и кремниевого сплава CoSi/GaAs обнаружена существенная нелинейность и гистерезис, как при комнатной температуре, так и при 77 К для сравнительно малых плотностей тока 10^3-10^4 А/см². В случае $\text{Ge}:(\text{Mn}, \text{Al})/\text{GaAs}$ при 77 К нелинейность ВАХ составляла ≈ 2 %, гистерезис – ≈ 1 %, а ВАХ CoSi/GaAs показали нелинейность 10-20 %, гистерезис ≈ 5 %. Такие структуры представляют практический интерес для разработки переключаемых собственным током ячеек магниторезистивной памяти.
- 6) Показана возможность получения методом осаждения из ЛП туннельных структур с наноразмерной диэлектрической прослойкой из оксида магния толщиной 2-8 нм и электродами из кремниевого СГ Co_2MnSi . Туннельные контакты на основе этих структур обладают нелинейными ВАХ. Нелинейность связана с дискретным туннелированием сквозь диэлектрический слой MgO с наноразмерными неоднородностями. Туннельные контакты при комнатной температуре характеризуются магнетосопротивлением около 2,5 % в магнитном поле до 0,4 Тл.
- 7) Методом МР синтезированы туннельные структуры с диэлектрической прослойкой из оксида магния толщиной 3-11 нм и электродами из кремниевого СГ Co_2MnSi , характеризующиеся ОМС $\approx 1,5$ % в магнитном поле до 0,4 Тл. В этих структурах с применением техники ФМР обнаружено ферромагнитное МОВ того же порядка величины, что и в аналогичных структурах с металлической прослойкой. Численное моделирование спектров ФМР показало, что величина МОВ немонотонно меняется с ростом толщины слоя MgO , как и предсказывают известные теории сверхобмена в магнитных туннельных структурах, а его положительный знак может быть связан с наличием магнитных гранул в диэлектрическом слое. Другой причиной такого характера МОВ может быть существование тонких ферромагнитных перемычек в слое MgO , обеспечивающих слабую ферромагнитную связь между электродами. Вместе с тем численное моделирование показало, что простые оценки величины МОВ по интервалу между оптическими и акустическими линиями могут дать ошибку до порядка величины.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах

- A1 Ферромагнетики на основе алмазоподобных полупроводников GaSb, InSb, Ge и Si, пересыщенных примесями марганца или железа при осаждении из лазерной плазмы / Е.С. Демидов, В.В. Подольский, В.П. Лесников, М.В. Сапожников, Д.М. Дружнов, С.Н. Гусев, Б.А. Грибков, Д.О. Филатов, Ю.С. Степанова, С.А. Левчук // ЖЭТФ. 2008. Т. 133. В. 1. С. 1-8;
- A2 High-temperature ferromagnetism in laser-deposited layers of silicon and germanium doped with manganese or iron impurities / E.S. Demidov, B.A. Aronzon, S.N. Gusev, V.V. Karzanov, A.S. Lagutin, V.P. Lesnikov, S.A. Levchuk, S.N. Nikolaev, N.S. Perov, V.V. Podolskii, V.V. Rylkov, M.V. Sapozhnikov, A.V. Lashkul // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2009. Vol. 321. No. 7. PP. 690-694;
- A3 Аномальный ферромагнитный резонанс в осажденных из лазерной плазмы слоях германия, легированного марганцем и алюминием / Е.С. Демидов, В.В. Подольский, В.П. Лесников, С.А. Левчук, С.Н. Гусев, В.В. Карзанов, Д.О. Филатов // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 90. В. 12. С. 852-855;
- A4 Наноразмерные слои ферромагнитных сплавов кремния и марганца, полученные осаждением из лазерной плазмы / В.В. Подольский, В.П. Лесников, Е.С. Демидов, Д.Е. Николичев, В.Г. Бешенков, С.Н. Гусев, С.Ю. Зубков, С.А. Левчук, М.В. Сапожников // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2010. № 5. С. 10-17;
- A5 Наноразмерные слои осажденных из лазерной плазмы ферромагнитных полупроводников и сплавов Гейслера на основе кремния и германия / Е.С. Демидов, В.В. Подольский, Б.А. Аронзон, В.В. Рыльков, В.П. Лесников, В.В. Карзанов, М.В. Сапожников, С.Н. Гусев, С.А. Левчук // Известия РАН. Серия физическая. 2010. Т. 74. №. 10. С. 1450-1452;

Публикации в материалах международных, всероссийских и региональных конференций

- A6 Ферромагнетики на основе алмазоподобных полупроводников GaSb, InSb, Ge и Si, пересыщенных примесями марганца или железа при осаждении из лазерной плазмы / Е.С. Демидов, В.В. Подольский, В.П. Лесников, М.В. Сапожников, Д.М. Дружнов, С.Н. Гусев, Б.А. Грибков, Д.О. Филатов, Ю.С. Степанова, С.А. Левчук // Труды XI международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 10-14 марта 2007 г.). Нижний Новгород: ИФМ РАН. 2007. Т. 1. С. 150-153;
- A7 High temperature ferromagnetism in laser deposited layers of silicon and germanium doped by manganese or iron impurities / E.S. Demidov, V.P. Lesnikov, V.V. Podolskii, D.M. Druzhnov, S.N. Gusev, S.A. Levchuk, M.V. Sapozhnikov // Abstract book of ESTMAG 2007 "Magnetism on nanoscale" (Kazan, August 23-26, 2007). 2007. P. 118;
- A8 Ферромагнетизм осажденных из лазерной плазмы легированных марганцем слоев кремния и германия / Е.С. Демидов, В.П. Лесников, В.В. Подольский,

- Д.М. Дружнов, С.Н. Гусев, С.А. Левчук, М.В. Сапожников // Тезисы докладов IX международной конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы» (Ульяновск, 24-30 сентября 2007 г.). 2007. С. 153;
- A9 New diluted ferromagnetics on the basis of diamondlike semiconductors GaSb, InSb, InAs, Ge and Si, supersaturated by manganese or iron impurities at laser epitaxy / V.V. Podolskii, Yu.A. Danilov, B.N. Zvonkov, E.S. Demidov, V.P. Lesnikov, O.V. Vikhrova M.V. Sapozhnikov, V.V. Karzanov, D.M. Druzhnov, S.N. Gusev, S.A. Levchuk // Abstracts of the international conference "Spin electronics: novel phenomenon and materials", "Spin electronics 07" (Tbilisi, Georgia, October 22-24, 2007). 2007. PP. 16-17;
- A10 Наноразмерные ферромагнитные слои Si и Ge, легированные примесями марганца или железа при осаждении из лазерной плазмы / Е.С. Демидов, В.В. Подольский, В.П. Лесников, М.В. Сапожников, Б.А. Грибков, Д.М. Дружнов, С.Н. Гусев, С.А. Левчук // Труды XII международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 10-14 марта 2008 г.). Нижний Новгород: ИФМ РАН. 2008. Т. 2. С. 263-264;
- A11 Nanosized laser deposited layers of high temperature ferromagnetics based on silicon and germanium doped by manganese or iron impurities / E.S. Demidov, V.V. Podolskii, V.P. Lesnikov, M.V. Sapozhnikov, V.V. Karzanov, B.A. Gribkov, D.M. Druzhnov, S.N. Gusev, S.A. Levchuk // Abstracts MISM-2008 (Moscow, June 20-25, 2008). 2008. P. 192;
- A12 Наноразмерные слои разбавленных ферромагнитных полупроводников на основе легированных марганцем Si и Ge, полученные осаждением из лазерной плазмы / С.А. Левчук, В.В. Подольский, Е.С. Демидов, В.П. Лесников, С.Н. Гусев // Тезисы докладов V международной конференции и IV школы молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе «КРЕМНИЙ-2008» (Черноголовка, 1-4 июля 2008 г.). 2008. С. 160;
- A13 Лазерный синтез высокотемпературных полупроводников на основе Ge и Si, легированных переходными элементами группы железа / Е.С. Демидов, В.В. Подольский, В.П. Лесников, В.В. Карзанов, М.В. Сапожников, С.Н. Гусев, С.А. Левчук, Б.А. Грибков // Тезисы докладов X международной конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы» (Ульяновск, 4-11 октября 2008 г.). 2008. С. 136;
- A14 Наноразмерные слои разбавленных ферромагнитных полупроводников на основе легированных марганцем и железом Si, полученные осаждением из лазерной плазмы / В.В. Подольский, Е.С. Демидов, В.П. Лесников, С.А. Левчук, С.Н. Гусев // Тезисы докладов 7-й всероссийской молодежной научной школы «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение» (Саранск, 7-10 октября 2008 г.). 2008. С. 144-145;
- A15 Ферромагнитный резонанс и эффект Керра в полученных лазерным осаждением наноразмерных слоях разбавленных магнитных полупроводников на основе германия и кремния, легированных марганцем / С.Н. Гусев, Е.С. Демидов, В.В. Подольский, В.П. Лесников, С.А. Левчук // Тезисы докладов 7-й

- всероссийской молодежной научной школы «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение» (Саранск, 7-10 октября 2008 г.). 2008. С. 143-144;
- A16 Высокотемпературные магнитные полупроводники на основе соединений A^3B^5 , Ge и Si с примесями группы железа / Е.С. Демидов, В.В. Подольский, В.П. Лесников, В.В. Карзанов, М.В. Сапожников, С.Н. Гусев, С.А. Левчук, Б.А. Грибков // Тезисы докладов II всероссийской конференции «Физические и физико-химические основы ионной имплантации» (Казань, 28-31 октября 2008 г.). Нижний Новгород: ННГУ им. Н.И. Лобачевского. 2008. С. 33-34;
- A17 Наноразмерные слои ферромагнитных дискретных сплавов кремния и марганца, полученные осаждением из лазерной плазмы / В.В. Подольский, В.П. Лесников, Е.С. Демидов, Д.Е. Николичев, С.Ю. Зубков, В.Г. Бешенков, М.В. Сапожников, С.Н. Гусев, С.А. Левчук // Труды XIII международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 16-20 марта 2009 г.). Нижний Новгород: ИФМ РАН. 2009. Т. 2. С. 500-501;
- A18 Осажденные из лазерной плазмы наноразмерные слои ферромагнитных полупроводников и сплавов Гейслера на основе кремния, германия и 3d-металлов Cr, Mn, Fe и Co / Е.С. Демидов, В.В. Подольский, В.П. Лесников, М.В. Сапожников, Б.А. Грибков, Д.О. Филатов, С.Н. Гусев, С.А. Левчук // Труды XIII международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 16-20 марта 2009 г.). Нижний Новгород: ИФМ РАН. 2009. Т. 1. С. 88-89;
- A19 Магнитнорезонансные и магнитооптические свойства полученных лазерным осаждением наноразмерных слоев разбавленных магнитных полупроводников и сплавов Гейслера на основе кремния, кобальта и марганца / С.Н. Гусев, С.А. Левчук, Е.С. Демидов, В.В. Подольский, В.П. Лесников // Тезисы докладов 14-й Нижегородской сессии молодых ученых (естественнонаучные дисциплины) (Нижний Новгород, 19-23 апреля 2009 г.). 2009. С. 6-7;
- A20 Магнитотранспортные свойства полученных лазерным осаждением наноразмерных слоев разбавленных магнитных полупроводников и сплавов Гейслера на основе кремния, кобальта и марганца / С.А. Левчук, С.Н. Гусев, Е.С. Демидов, В.В. Подольский, В.П. Лесников // Тезисы докладов 14-й Нижегородской сессии молодых ученых (естественнонаучные дисциплины) (Нижний Новгород, 19-23 апреля 2009 г.). 2009. С. 10-11;
- A21 Ферромагнитные полупроводники и сплавы Гейслера на основе кремния, германия и 3d-металлов Cr, Mn, Fe и Co, синтезированные осаждением из лазерной плазмы / Е.С. Демидов, В.В. Подольский, В.П. Лесников, В.В. Карзанов, М.В. Сапожников, С.Н. Гусев, С.А. Левчук // Тезисы докладов XI международной конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы» (Ульяновск, 25-30 мая 2009 г.). 2009. С. 319;
- A22 Наноразмерные слои осажденных из лазерной плазмы ферромагнитных полупроводников и сплавов Гейслера на основе кремния и германия / Е.С. Демидов, В.В. Подольский, Б.А. Аронзон, В.В. Рьльков, В.П. Лесников, В.В. Карзанов, М.В. Сапожников, С.Н. Гусев, С.А. Левчук // Сборник трудов XXI

- международной конференции «Новое в магнетизме и магнитных материалах» (НМММ XXI) (Москва, 28 июня - 4 июля 2009 г.). 2009. С. 442-444;
- A23 Получение осаждением из лазерной плазмы наноразмерных слоев разбавленных магнитных полупроводников и сплавов Гейслера на основе кремния / Е.С. Демидов, В.В. Подольский, В.П. Лесников, С.А. Левчук, С.Н. Гусев, В.В. Карзанов // Тезисы докладов VI международной конференции и V школы молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе «КРЕМНИЙ-2009» (Новосибирск, 7-10 июля 2009 г.). 2009. С. 125-126;
- A24 Магниторезонансные, транспортные и магнитооптические свойства осажденных из лазерной плазмы наноразмерных слоев магнитных полупроводников на основе Si, Ge и соединений III-V / Е.С. Демидов, В.В. Подольский, В.П. Лесников, В.В. Карзанов, М.В. Сапожников, С.Н. Гусев, С.А. Левчук // Тезисы докладов IV Украинской научной конференции по физике полупроводников (УНКФП-4) (Украина, Запорожье, 15-19 сентября 2009 г.). 2009. С. 54-55;
- A25 Наноразмерные слои ферромагнитных полупроводников и сплавов Гейслера на основе кремния, германия и 3d-металлов, осажденные из лазерной плазмы / Е.С. Демидов, В.В. Подольский, В.П. Лесников, С.А. Левчук, С.Н. Гусев, М.В. Сапожников, Д.О. Филатов // Труды II международного, междисциплинарного симпозиума «Среды со структурным и магнитным упорядочением» (MULTIFERROICS-2) (Ростов-на-Дону-Лео, 23-28 сентября 2009 г.). 2009. С. 59-61;
- A26 Ferromagnetic semiconductors and Heusler alloys on the basis of compounds III-V, Si and Ge synthesized by deposition from laser plasma / E.S. Demidov, S.N. Gusev, V.V. Karzanov, V.P. Lesnikov, S.A. Levchuk, V.V. Podolskii, M.V. Sapozhnikov // Abstracts of workshop on nanomagnetism, spin-electronics and quantum optics (NSEQO 2009) (Rio de Janeiro, Brazil, November 11-13, 2009). 2009. P. 63;
- A27 Наноразмерные слои ферромагнитных полупроводников и сплавов Гейслера на основе кремния, германия и 3d-металлов / Е.С. Демидов, В.В. Подольский, В.П. Лесников, В.В. Карзанов, М.В. Сапожников, Б.А. Грибков, С.Н. Гусев, С.А. Левчук // Труды XIV международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 15-19 марта 2010 г.). Нижний Новгород: ИФМ РАН. 2010. Т. 1. С. 201-202;
- A28 Магнитные свойства наноразмерных слоев сплавов CoSi и Co₂MnSi, полученных методом импульсного лазерного осаждения / С.Н. Гусев, Е.С. Демидов, В.В. Подольский, В.П. Лесников, С.А. Левчук, М.В. Сапожников // Тезисы докладов 15-й Нижегородской сессии молодых ученых (естественнонаучные дисциплины) (Нижний Новгород, 19-23 апреля 2010 г.). 2010. С. 70-71;
- A29 Транспорт тока в наноразмерных слоях разбавленных магнитных полупроводников и сплавов Гейслера на основе кремния / Е.С. Демидов, В.В. Подольский, В.П. Лесников, В.В. Карзанов, М.В. Сапожников, Б.А. Грибков, С.Н. Гусев, С.А. Левчук // Тезисы докладов VII международной конференции по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе «КРЕМНИЙ-2010» (Нижний

- Новгород, 6-9 июля 2010 г.). Нижний Новгород: ННГУ им. Н.И. Лобачевского. 2010. С. 163;
- A30 Магнитные свойства наноразмерных пленок кремния, легированного марганцем, полученных импульсным лазерным осаждением / С.А. Левчук, Е.С. Демидов, В.В. Подольский, В.П. Лесников, С.Н. Гусев, Б.А. Аронзон, В.В. Рыльков // Тезисы докладов VII международной конференции по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе «КРЕМНИЙ-2010» (Нижний Новгород, 6-9 июля 2010 г.). Нижний Новгород: ННГУ им. Н.И. Лобачевского. 2010. С. 164;
- A31 Магнитные свойства наноразмерных слоев сплава CoSi и сплава Гейслера Co₂MnSi, полученных методом импульсного лазерного осаждения / С.Н. Гусев, Е.С. Демидов, С.А. Левчук, В.В. Подольский, В.П. Лесников, М.В. Сапожников // Тезисы докладов VII международной конференции по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе «КРЕМНИЙ-2010» (Нижний Новгород, 6-9 июля 2010 г.). Нижний Новгород: ННГУ им. Н.И. Лобачевского. 2010. С. 208;
- A32 Наноразмерные слоистые структуры на основе ферромагнитных полупроводников и сплавов Гейслера / Е.С. Демидов, В.В. Подольский, В.П. Лесников, В.В. Карзанов, М.В. Сапожников, Б.А. Грибков, С.Н. Гусев, С.А. Левчук, А.А. Тонов // Труды XV международного симпозиума «Нанозифика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 15-19 марта 2011 г.). Нижний Новгород: ИФМ РАН. 2011. Т. 1. С. 79-80;
- A33 Nanosized layered structures on a basis of ferromagnetic semiconductors and Heusler alloys / E.S. Demidov, V.V. Podolskii, V.P. Lesnikov, M.V. Sapozhnikov, V.V. Karzanov, B.A. Gribkov, S.N. Gusev, S.A. Levchuk, A.A. Tronov // Moscow International Symposium on Magnetism (MISM) (Moscow, August 21-25, 2011) Book of Abstracts. 2011. P. 286.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Prinz G.A. Magnetoelectronics // Science. 1998. V. 282. P. 1660-1663;
- 2 Origin and control of high-temperature ferromagnetism in semiconductors / Kuroda S., Nishizawa N., Takita K., Mitome M., Bando Y., Osuch K., Dietl T. // Nature Materials. 2007. V. 6. P. 440-446;
- 3 Dopant segregation and giant magnetoresistance in manganese-doped germanium / Li A.P., Zeng C., Van Benthem K., Chisholm M.F., Shen J., Nageswara Rao S.V.S., Dixit S.K., Feldman L.C., Petukhov A.G., Foygel M., Weitering H.H. // Physical Review B. 2007. V. 75. P. 201201-1-201201-4;
- 4 Galanakis I., Mavropoulos Ph., Dederichs P.H. Electronic structure and Slater-Pauling behaviour in half-metallic Heusler alloys calculated from first principles // Journal of Physics D: Applied Physics. 2006. V. 39. P. 765-775;
- 5 Heusler alloy/semiconductor hybrid structures / Hirohata A., Kikuchi M., Tezuka N., Inomata K., Claydon J.S., Xu Y.B., Van der Laan G. // Current Opinion in Solid State and Materials Science. 2006. V. 10. P. 93-107;

- 6 Giant tunneling magnetoresistance in $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{Al}-\text{O}/\text{Co}_2\text{MnSi}$ magnetic tunnel junctions / Sakuraba Y., Hattori M., Oogane M., Ando Y., Kato H., Sakuma A., Miyazaki T., Kubota H. // *Applied Physics Letters*. 2006. V. 88. P. 192508-1-192508-3;
- 7 Large tunnel magnetoresistance in magnetic tunnel junctions using a Co_2MnSi Heusler alloy electrode and a MgO barrier / Tsunegi S., Sakuraba Y., Oogane M., Takanashi K., Ando Y. // *Applied Physics Letters*. 2008. V. 93. P. 112506-1-112506-3;
- 8 Eason R. Pulsed laser deposition of thin films: applications-led growth of functional materials / Hoboken : John Wiley & Sons, Inc., 2007. 682 p.;
- 9 Maex K., Van Rossum M. Properties of metal silicides / London : INSPEC, the Institution of Electrical Engineers, 1995. 335 p.;
- 10 Heinrich B., Bland J.A.C. Ultrathin magnetic structures II: Measurement techniques and novel magnetic properties / Berlin : Springer, 2005. 362 p.;
- 11 Lindner J., Baberschke K. In situ ferromagnetic resonance: an ultimate tool to investigate the coupling in ultrathin magnetic films // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2003. V. 15. P. R193-R232;
- 12 Демидов Е.С., Демидова Н.Е. Экспоненциальный полевой рост проводимости в гранулированных средах, обусловленный кулоновской блокадой туннелирования // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия: Физика твердого тела*. 2007. № 4. С. 39-46;
- 13 Slonczewski J.C. Conductance and exchange coupling of two ferromagnets separated by a tunneling barrier // *Physical Review B*. 1989. V. 39. P. 6995-7002;
- 14 Goncalves da Silva C.E.T., Falicov L.M. Theory of magnetic properties of rare earth compounds (Localized moments and hybridization effects) // *Journal of Physics C: Solid State Physics*. 1972. V. 5. P. 63.