БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 539.216.2:539.12.043(043.3)+
544.2-126(043.3)

ГОЛОВЧУК
ВИКТОРИЯ ИВАНОВНА

Спинтронные и оптические характеристики слоев на основе 3d-металлов: Fe, Ni, Co, Mn

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Минск, 2023

Научная работа выполнена в Белорусском государственном университете.

Научный руководитель – **Лукашевич Михаил Григорьевич**,
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры физики полупроводников
и наноэлектроники
Белорусского государственного университета.

Официальные оппоненты: **Прищепа Сергей Леонидович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры защиты информации
УО «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»;

Ярмолич Марта Викторовна,
кандидат физико-математических наук,
заведующий отделом криогенных исследований
ГНПО «НПЦ НАН Беларуси
по материаловедению».

Оппонирующая организация – Белорусский национальный технический университет.

Защита состоится 02 июня 2023 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.16 при Белорусском государственном университете по адресу: г. Минск, ул. Ленинградская 8 (корпус юридического факультета), ауд. 407.

Почтовый адрес: пр-т Независимости 4, Минск, 220030.

Телефон ученого секретаря: 209-57-09; e-mail: Fedotov@bsu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан « 27 » апреля 2023 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
доктор физико-математических наук
профессор А. К. Федотов

ВВЕДЕНИЕ

После открытия гигантского магниторезистивного эффекта началось стремительное развитие нового научно-технического направления, получившего название “спинтроника”, базовыми элементами приборных структур которой являются тонко- и многослойные структуры с магнитным упорядочением, которые могут быть разделены как не магнитными, так и магнитными тонкими диэлектрическими или проводящими прослойками. Концептуальная идея спинтроники состоит в использовании при отображении информации не заряда частицы (электрона), а ее собственного магнитного момента, спина. Это вызывало резкий всплеск интереса к формированию таких структур с помощью различных технологий и оптимизации их получения с заданными электрическими, магнитными и гальваномагнитными характеристиками. Большинство исследований гальваномагнитных явлений как в диамагнитных, так и в магнитоупорядоченных средах в настоящее время фокусируется на их изучении в тонко- и многослойных структурах, нанопроволоках и ансамблях магнитных наночастиц и нахождении корреляции между электрическими, магнитными и гальваномагнитными характеристиками.

Ионно-лучевые технологии представляются наиболее перспективными для синтеза таких структур, так как совместимы с современными технологиями микро- и наноэлектроники. Они позволяют реализовать структуры с широким трехмерным масштабированием, разного структурного совершенства, разными механизмами проводимости и разным магнитным состоянием, а именно, от трехмерных до квантовых точек по обе стороны перехода диэлектрик-металл, как диамагнитных, так и магнитоупорядоченных.

При практическом изготовлении таких структур наиболее широко используются 3d-металлы такие как железо, кобальт, никель и их сплавы. Пермаллои разного состава уже достаточно давно используются в промышленности для решения ряда прикладных задач. Однако современные электронно-лучевые технологии позволяют создавать не только тонкие пленки или нанопроволоки, но и наномагниты, которые очень часто используются в качестве инжектора спин-поляризованных электронов в немагнитные нанопроволоки. С фундаментальной точки зрения надо отметить и тот факт, что до появления теории магнонного магнитосопротивления результаты изучения гальваномагнитных характеристик таких объектов интерпретировались в рамках анизотропного магниторезистивного эффекта. Однако анизотропия формы может существенно изменить вклад анизотропной и магнонной компонент магниторезистивного эффекта и усилить проявление наличия доменных стенок и эффектов тренировки.

Формирование проводящих слоев с магнитным упорядочением имплантацией ионов металлов в диамагнитные диэлектрики и полупроводники приводит не только к

изменению их электрических и магнитных характеристик из-за перехода диэлектрик-металл и диамагнетик-ферромагнетик, но и к формированию многослойной структуры с разными оптическими характеристиками тонких наноструктурированных композиционных слоев.

Поэтому установление закономерностей изменения гальваномагнитных и оптических характеристик таких структур в зависимости от режимов получения, получение с заранее заданными характеристиками, и нахождение корреляции между их электрическими, магнитными, гальваномагнитными и оптическими характеристиками является актуальным и представляет большой интерес как с фундаментальной, так и прикладной точек зрения.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами и темами

Диссертационная работа выполнена на кафедре физики полупроводников и наноэлектроники Белорусского государственного университета. Тема работы соответствует перечню приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2021 – 2025 годы №4. Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы: композиционные и многофункциональные материалы (перечень утвержден Указом президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. №156).

Диссертационные исследования выполнялись в рамках заданий государственных программ и проектов: 1) «ЭПР – диагностика процессов формирования халькопиритов в железосодержащей системе, алмаза, кубического нитрида бора и композиционных материалов на их основе» ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Материаловедение и технологии материалов» 2016 – 2018. Номер государственной регистрации 20161881; 2) «Диагностика парамагнитных и оптических характеристик композиционных материалов с полупроводниковыми свойствами и сформированных при воздействии высоких давлений микрокристаллов алмаза и кубического нитрида бора», номер государственной регистрации 20190538 государственной программы научных исследований «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», 2019-2020 годы; 3) «Разработка материалов на основе лавсана, модифицированного кластерами углерода ионно-плазменным воздействием» 2019 – 2020 ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Материалы в технике», номер государственной регистрации 20190457; 4) НИР «Лазерные методы модификации поверхности неметаллических материалов, в том числе с дополнительно нанесенными покрытиями различного назначения», №ГР20211883, сроки выполнения НИР 2021 – 2025, «Конвергенция-2025», «Микромир, плазма и Вселенная».

Цель и задачи исследования

Основная *цель работы* заключалась в установлении закономерностей изменения электрических, гальваномагнитных и оптических характеристик тонко- и многослойных структур, сформированных ионно-лучевыми методами на диэлектрических и полупроводниковых подложках в зависимости от режимов синтеза, нахождении корреляции между их магнитотранспортными и магнитными харатеристиками при проявлении размерных эффектов с целью получения высокоэффективных сред для приборных структур спинтроники и магнитооптики.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1) установить механизмы переноса носителей заряда в пленках железа и пермаллоя идентифицировать механизмы магнитотранспорта в зависимости от вида магнитной анизотропии и угла между направлением магнитного поля и плоскостью пленки, а также протекающим током;

2) изучить особенности магниторезистивного эффекта в тонкопленочном пермаллоевом диске Корбино с магнитным упорядочением в температурном интервале $T = 300 – 2$ К при разных углах между направлением внешнего магнитного поля и плоскостью диска;

3) изучить особенности обычного, экстраординарного и планарного эффектов Холла в тонких магнитоупорядоченных пленках пермаллоя в зависимости от угла между направлением магнитного поля и плоскостью пленочного холловского образца, а также направлением тока образца и магнитного поля;

4) установить основные закономерности изменения отражения и пропускания монокристаллического оксида цинка и полиамида при имплантации магнитных ионов Co^+ и методом моделирования прохождения света при его падении на имплантированную и не имплантированную стороны определить эффективный показатель преломления модифицированного слоя.

В качестве **объектов** исследований были выбраны пленки железа и пермаллоя ($Ni_{0.8}Fe_{0.2}$), синтезированные методом ионно-лучевого распыления на кремниевых и ситалловых подложках соответственно, а также пластинки монокристаллического оксида цинка и пленки полиамида, имплантированные ионами кобальта Co^+.

Выбор пермаллоя и железа для изучения возможности целенаправленного управления гальваномагнитными характеристиками обусловлен отработанной технологией получения пленок этих материалов ионно-лучевыми технологиями разной толщины с разным структурным совершенством, а также их широким использованием в приборных структурах спинтроники.

Выбор монокристаллического оксида цинка и полимерных пленок в первую очередь обусловлен их прозрачностью в видимом спектральном диапазоне, большими потенциальными возможностями получения материала с полупроводниковыми свойствами и магнитным упорядочением, т.е. перспективами использования этих модифицированных материалов не только в спинтронике, но и нанофотонике.

Предметом исследований явились закономерности изменения гальваномагнитных (поперечный и продольный магниторезистивные эффекты, обычный, экстраординарный и планарный эффекты Холла) в тонких пленках пермаллоя и нанокристаллических пленках железа, проявление в них размерных эффектов и нахождение корреляции между гальваномагнитными характеристиками при разных механизмах переноса носителей заряда и разным типом магнитной анизотропии, а также изменения оптических характеристик оксида цинка и пленок полиамида (пропускание, отражение и фотолюминесценция) при их модификации имплантацией магнитных ионов и определение эффективного показателя модифицированного слоя.

Научная новизна

Научная новизна проведенных исследований заключается в установлении закономерностей гальваномагнитных явлений в тонкопленочных магнитоупорядоченных средах при разных механизмах электронного транспорта и проявлении размерных эффектов в зависимости от типа магнитной анизотропии, а также впервые установленных закономерностях изменения оптических характеристик прозрачных монокристаллического оксида цинка и полиамида, модифицированных имплантацией ионов кобальта, и определенных показателях преломления модифицированных имплантацией слоев, включающая:

– впервые установленые закономерности изменения положения пиков магниторезистивного эффекта при перемагничивании тонкопленочного пермаллоевого диска Корбино в зависимости от температуры и угла между направлением внешнего магнитного поля и плоскостью диска;

– впервые проведена идентификация магниторезистивных эффектов в тонких нанокристаллических пленках железа при разных механизмах электронного транспорта и разным типом магнитной анизотропии и показано, что в таких магнитно-неоднородных пленках наблюдается инверсный гигантский магниторезистивный эффект;

– впервые предложена трехслойная модель для объяснения оптических характеристик оксида цинка имплантированного ионами кобальта, определены эффективные показатели преломления приповерхностного и заглубленного слоев.

Положения, выносимые на защиту

1. Установленные закономерности магниторезистивного эффекта в тонкопленочном магнитоупорядоченном пермаллоевом ($Ni_{0.8}Fe_{0.2}$) диске Корбино в температурном диапазоне T = 300 – 2 К при разных углах φ между направлением магнитного поля и плоскостью диска, включающие:

– большую величину отрицательного эффекта при φ = 90°, обусловленную доминированием анизотропного МС, когда направление тока в диске перпендикулярно намагниченности;

– изменение положения пика МС в интервале $B_п$ = 0.2 – 8 мТл при изменении угла от φ = 0° до φ = 90°, а также температурный сдвиг пика МС в интервале $B_п$ = 0.2 – 6 мТл и $B_п$ = 8 – 22 мТл при φ = 0° и φ = 90° соответственно.

2. Совокупность экспериментальных и теоретических результатов изучения в температурном диапазоне T = 300 – 2 К электронно-транспортных и магнито-транспортных характеристик тонких нанокристаллических пленок железа с разным видом магнитной анизотропии, полученных методом ионно-ассистированного осаждения на кремниевые подложки, при разных углах φ, которые устанавливают корреляцию между их электрическими, гальваномагнитными и магнитными характеристиками, на основании которых:

– установлены доминирующие механизмы переноса электронов в исходных пленках, а именно: перколяционный при 150 < T < 300 К, диффузионный при 35 < T < 150 К, процессы слабой локализации при 2 < T < 35 К, и отожженных пленках: перколяционный при 260 < T < 300 К, диффузионный при 2 < T < 260 К;

– показано, что в пленках с перпендикулярной магнитной анизотропией и перколяционной проводимостью наблюдается смена знака МС с положительного на отрицательный при изменении φ от φ = 0° до φ = 90° из-за доминирования отрицательного анизотропного МС, когда направление тока перпендикулярно намагниченности, а в сильном поле – уменьшение величины отрицательного эффекта обусловлено доминированием положительной компоненты перколяционного МС;

– в слабом поле, меньшем поля насыщения намагниченности, при φ = 0° обнаружено инверсное гигантское МС, обусловленное магнитной неоднородностью пленок и резкие пики его увеличения и уменьшения при $B_п$ = 12 – 35 мТл и $B_п \approx 0{,}5$ Тл, обусловленные движением доменных стенок как при перемагничивании, так и размагничивании пленок.

3. Установленные закономерности изменения оптических характеристик (пропускание и отражение) монокристаллического оксида цинка и пленок полиамида при имплантации ионов кобальта с энергией 40 кэВ в интервале доз $D = 2{,}5\cdot10^{16}$–$1{,}0\cdot10^{17}$ см$^{-2}$ и плотности ионного тока j = 4 мкА/см^2, заключающиеся:

– в обнаружении трех полос поглощения в имплантированном оксиде цинка при $\lambda_1 = 567$, $\lambda_2 = 610$ и $\lambda_3 = 660$ нм, которые обусловлены формированием при имплантации не только приповерхностного, но и заглубленного модифицированного слоя, содержащего фазу твердого раствора оптически активных ионов Co^{2+} с внутрицентровыми *d-d* электронными переходами;

– в определении методом моделирования прохождения света при его падении на имплантированную и не имплантированную стороны величины эффективного показателя преломления приповерхностного и заглубленного модифицированных слоев, изменяющиеся в интервале 1,6 – 2,6 и 1,5 – 2,2 соответственно в зависимости от дозы, а также эффективный показатель преломления модифицированного слоя полиамида, изменяющийся в интервале n = 1.3 – 2.1 в зависимости от дозы имплантации;

– а также феноменологическую модель формирующейся при имплантации трехслойной структуры, включающей приповерхностный слой, содержащий нанокластеры кобальта и заглубленный слой, содержащий ионы Co^{2+};

Личный вклад соискателя ученой степени

Экспериментальные исследования магнитотранспортных (температурные зависимости сопротивления, магниторезистивный эффект и эффект Холла), электронно-транспортных тонких пленок железа и пермаллоя и оптических характеристик (пропускание, отражение, фотолюминесценция) оксида цинка пленок полиимида, полиамида и стекла, имплантированных ионами переходных металлов, обработка результатов и формулирование выводов были проделаны соискателем. Диссертационная работа выполнена под руководством доктора физико-математических наук профессора Лукашевича М.Г., сформулировавшего научное направление исследований, его цель и задачи, принимавшего участие в обсуждении результатов. Соавторами работ Базаровым В.В., Валеевым В.Ф., Нуждиным В.И. была проведена имплантация исследованных образцов. Остальные соавторы Бринкевич Д.И., Бринкевич С.Д., Бумай Ю.А., Вабищевич С.А., Вабищевич Н.В., Гумаров А.И., Лядов Н.М., Оджаев В.Б., Хайбуллин Р.И. и Просолович В.С принимали участие в обсуждении результатов. В диссертационную работу не включены результаты, которые были получены другими соавторами или с другими соавторами. Материалы совместных публикаций использованы соискателем в объеме авторского вклада.

Апробация в диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: 73-й научной конференции студентов и аспирантов Белорус. гос. ун-та (г. Минск, 16 – 25 мая 2016 г.); VII-VIII-IX Международной научной

конференции «Материалы и структуры современной электроники» (г. Минск, Беларусь, 12 – 13 октября 2016, 10 – 12 октября 2018 , 14 – 16 октября 2020); XXV Республиканской научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов «Физика конденсированного состояния» (Гродно, 2017 г.); 12-й-13-й-14-й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом» (г. Минск, Беларусь, 19–22 сентября, 2017 г., 30 сентября – 3 октября 2019, 21-24 сентября 2021); XXIV Международной конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов-2017» (г. Москва, 2017 г.); VIII Международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела» (г. Минск, 24–28 сентября 2018); Международная конференция с участием студентов, аспирантов и молодых исследователей «Неделя науки в СПбПУ» (Санкт-Петербург: Политехнический университет Петра Великого, 19–24 ноября 2018 г.

Опубликованность результатов диссертации

Результаты диссертационной работы опубликованы в 33 научных работах, в числе которых 7 статей в научных журналах в соответствии с пунктом 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 5,13 авторских листа), 4 статьи в других изданиях, 15 статей в сборниках трудов конференций, 7 тезисов докладов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и одного приложения. Полный объем диссертации составляет 135 страниц, включая 44 рисунка, занимающих в совокупности 25 страниц, 2 таблицы на 1 странице и одно приложение на 4 страницах. Библиографический список содержит 135 наименований на 13 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Первая глава содержит аналитический обзор литературы. Рассмотрены основные теоретические подходы для описания электронного транспорта и магнитотранспорта в магнитоупорядоченных средах. Проведен анализ исследований по изучению электрических, гальваномагнитных и оптических характеристик тонкослойных структур с магнитным упорядочением, полученных ионно-лучевыми технологиями, и нахождению корреляции между электронно-транспортными, оптическими, гальваномагнитными и их магнитными характеристиками. Отмечается, что, несмотря на то, что гальваномагнитные эффекты достаточно хорошо изучены в магнитоупорядоченных средах при диффузионном механизме проводимости, тем не менее, имеются разрозненные

данные о влиянии механизма проводимости на магнитотранспортные характеристики тонкопленочных структур.

Анализ моделей, используемых для описания оптических характеристик полученных ионной имплантацией структур, показал, что в основном используется двухслойная модель, учитывающая наличие только приповерхностного модифицированного слоя. Однако такая модель не всегда позволяет согласовать результаты моделирования с экспериментом из-за неравномерного распределения по глубине слоя размера формирующихся включений или формирования более сложных структур. Это требует при моделировании рассмотрения более сложных структур, как минимум трехслойной. Сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

В главе 2 описаны методики получения объектов исследований и проведения измерений. Пластинки оксида цинка были имплантированы ионами кобальта (Co^+) с энергией 40 кэВ в интервале доз $D = 5\cdot10^{16}$–$1{,}5\cdot10^{17}$ $см^{-2}$ при плотности ионного тока в пучке $j = 4$ мкА/$см^2$. Ионная имплантация осуществлялась в режиме постоянного ионного тока при комнатной температуре в остаточном вакууме не хуже $P = 10^{-5}$ Па на имплантатор ИЛУ-3. (Казанский физико-технический институт). Пленки полиамида $(H_{11}C_6N_1O_1)_n$ (ПА) толщиной 40 мкм также имплантировались ионами Co+ с энергией 40 кэВ в интервале доз $D = 2.5\cdot10^{16} – 1.5\cdot10^{17}$ $см^{-2}$ при $j = 4$ мкА/$см^2$. Исследовались также пленки полиимида (ПИ) $(C_{22}H_{10}O_5N_2)_n$, имплантированные высокой дозой ионов марганца $D = 2.5\cdot10^{16}$-$1.5\cdot10^{17}$ $см^{-2}$ с энергией 40 кэВ. Для сравнения изучалось стекло, имплантированное ионами меди (Cu^+) с энергией 40 кэВ в интервале доз $D = 2.5\cdot10^{16} – 1.5\cdot10^{17}$ $см^{-2}$ при $j = 4$ мкА/$см^2$.

Пленки железа получены методом ионно-ассистированного осаждения на кремниевые подложки. Толщина пленок, измеренная интерференционным микроскопом «МИИ-11», была $d = 80 \pm 7$ нм. Пленки подвергались термическому отжигу в вакууме ($P = 10^{-2}$ Pa) при температуре $T = 450$°C в течение 15 мин. Пленки пермаллоя $Ni_{80}Fe_{20}$ получены методом магнетронного распыления пермаллоевой мишени на диэлектрическую подложку во внешнем магнитном поле с индукций $B = 0.01$ Тл. В качестве подложки использовался ситалл. Толщина полученных пленок варьировалась в пределах $d = 80$–280 нм.

Морфология поверхности и магнитная микроструктура пленок и подложек исследовалась методом атомно-силовой и магнитосиловой микроскопии на приборе Solver P47-PRO с использованием кантилеверов серии NSG01 и MFM0.

Температурная зависимость сопротивления, МС и эффект Холла измерялись в температурном диапазоне $T = 300 – 2$ К, с использованием бескриогенной измерительной системы HFMS и сканировании магнитного поля до $B = \pm 8$ Тл. Низкотемпературные измерения проведены в центре

коллективного пользования БГУ. МС и эффект Холла при T = 300 К также измерялись в катушке Гельмгольца с индукцией до B =±10 мТл. Петли гистерезиса кинетических коэффициентов регистрировались в автоматическом режиме с длительностью развертки поля 4 минуты. Все измерения проводились в режиме генератора тока на линейном участке вольтамперной характеристики образца при разных углах между направлением внешнего магнитного поля и нормалью к поверхности пленочного образца φ= 0–360°, а также направлением протекающего в образце тока (Θ = 0 – 90°).

Спектры пропускания и отражения регистрировались при комнатной температуре спектрофотометром PROSCAN MC-122 в диапазоне 200 – 1100 нм, и PHOTON-RT в диапазоне 200-3000 нм. Приведены также погрешности использованных методик.

В главе 3 представлены и обсуждены электрические и гальваномагнитные характеристики пленок пермаллоя. На рисунке 1 [1,17] показаны петли гистерезиса МС диска Корбино диаметром 5 мм и толщиной d = 120 нм, измеренные при параллельной (φ = 0°, кривая 1) и перпендикулярной (φ = 90°, кривая 2) ориентациях направление магнитного поля - плоскость диска. Стрелками указано направление изменения поля. В обоих случаях, как в области слабых полей, меньших поля технического насыщения намагниченности, так и в более сильных знак эффекта отрицателен. В слабом поле величина отрицательного МС не сильно отличается, а при B > 1Тл и φ = 90° оно почти в три раза больше. В области насыщения намагниченности магнитополевая зависимость МС близка к линейной при φ = 0°, а при φ = 90° и B > 0,75 Тл в МС отчетливо проявляется тенденция к насыщению (кривая 2).

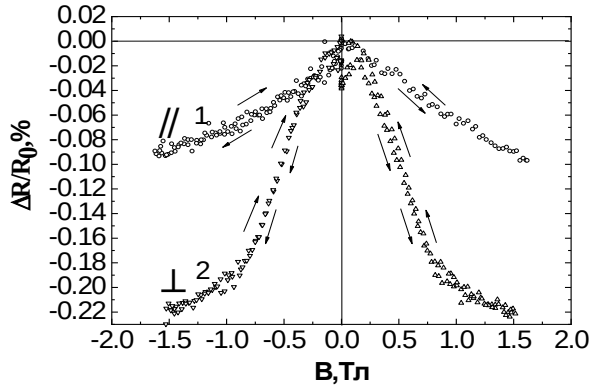


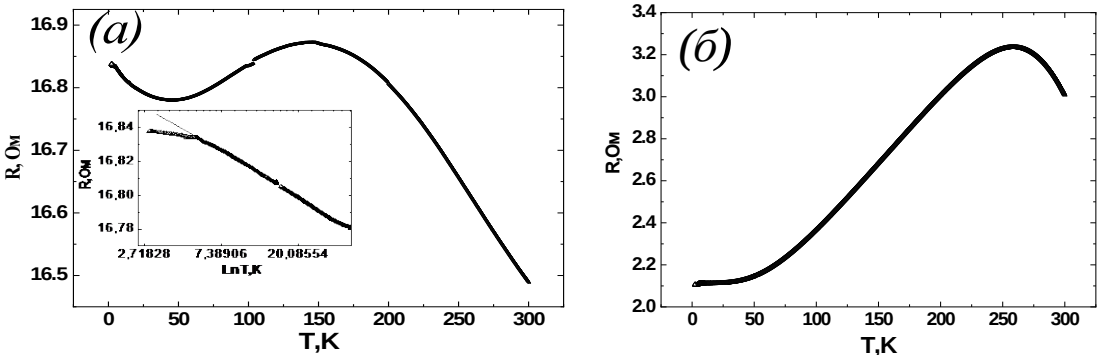
Рисунок 1. – Гистерезис магнитосопротивления пермаллоевого диска Корбино при параллельной (1) и перпендикулярной (2) ориентации направления магнитного поля - плоскость диска

На рисунке 1 можно видеть резкий и узкий пик отрицательного МС в области очень слабых (B < 10 мТл) полей, достигающий по величине до 0,05%. Положение пика, его амплитуда и полуширина зависят от φ, а при φ = 90° наблюдается инверсия знака пика МС на положительный. При этом в области положительного МС полуширина пика значительно больше и на нем отчетливо проявляется колебательный характер изменения сопротивления образца,

обусловленный перестройкой доменной структуры. При уменьшении магнитного поля до нуля, и повторном увеличении в том же направлении пик МС не наблюдается. Резкое изменение сопротивления вызывается рассеянием электронов доменными стенками.

Как видно из положения пика и его полуширины наиболее легкая перестройка доменной структуры происходит при малых углах, что согласуется с величиной размагничивающего фактора диска, который для аксиальной оси диска много больше, чем для радиального направления в его плоскости.

В главе 4 представлены результаты изучения МС в тонких нанокристаллических пленках железа, которые в температурном интервале Т = 300 – 2 К имели разные механизмы переноса электронов (рисунок 2), а тип магнитной анизотропии при отжиге изменялся от перпендикулярной до параллельной плоскости пленки [6, 26].



На вставке (а) – показана температурная зависимость сопротивления исходной пленки железа в интервале Т=35 – 2К в логарифмическом масштабе

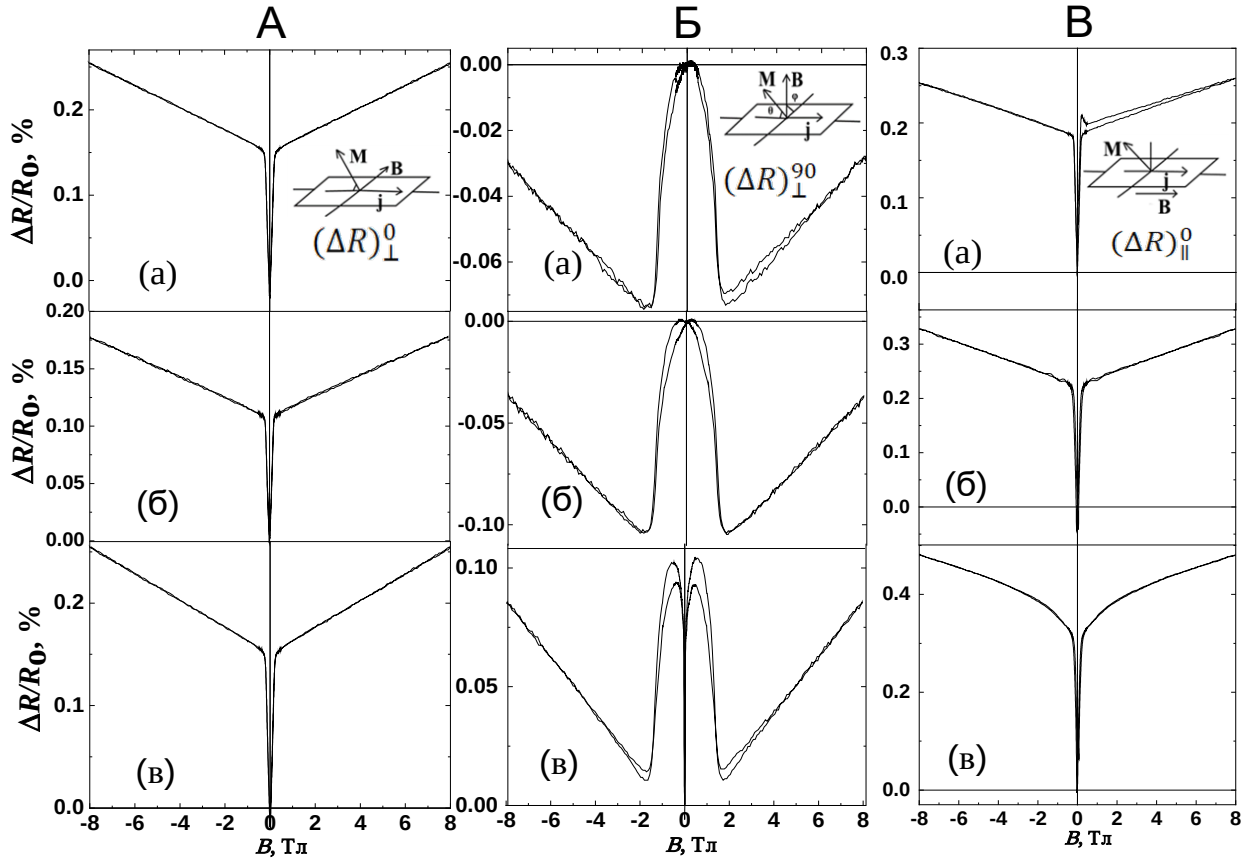
Рисунок 2. – Температурная зависимость сопротивления исходной (а) и отожженной (б) пленки железа

Понижение температуры исходных пленок до Т = 150 К приводит к увеличению сопротивления, что обусловлено наличием как металлических, так и оксидных фаз железа (перколяционный механизм) и доминированием проводимости последних. Уменьшение сопротивления в интервале 35 К<Т<150 К вызывается доминированием проводимости по нанокластерам железа, а увеличение при Т < 35 К свидетельствует о доминировании процессов слабой электронной локализации. В отожженных пленках температура перехода к диффузионной проводимости больше (Т = 260 К), и процессов слабой локализации не наблюдается, что обусловлено увеличением размера нанокристаллитов железа и уменьшением доли аморфных прослоек.

На рисунке 3 приведены петли гистерезиса поперечного (А и В) и продольного (Б) МС исходной пленки, измеренные при параллельной и перпендикулярной ориентациях направления магнитного поля - плоскость пленки.

Поперечное при φ = 0º и продольное МС (рисунок 3 (А) и (В)) независимо от направления и величины магнитного поля, достаточно хорошо коррелируют. Это подтверждает доминирование перколяционной проводимости вблизи

комнатных температур. Изменение ориентации магнитного поля от φ = 0º до φ = 90º (А и Б) приводит к изменениям знака, величины и вида поперечного МС, в то время как понижение температуры до Т = 2 К незначительно изменяет величину эффекта, за исключением φ = 90º (Б), когда при Т = 2 К наблюдается смена знака МС на положительный.

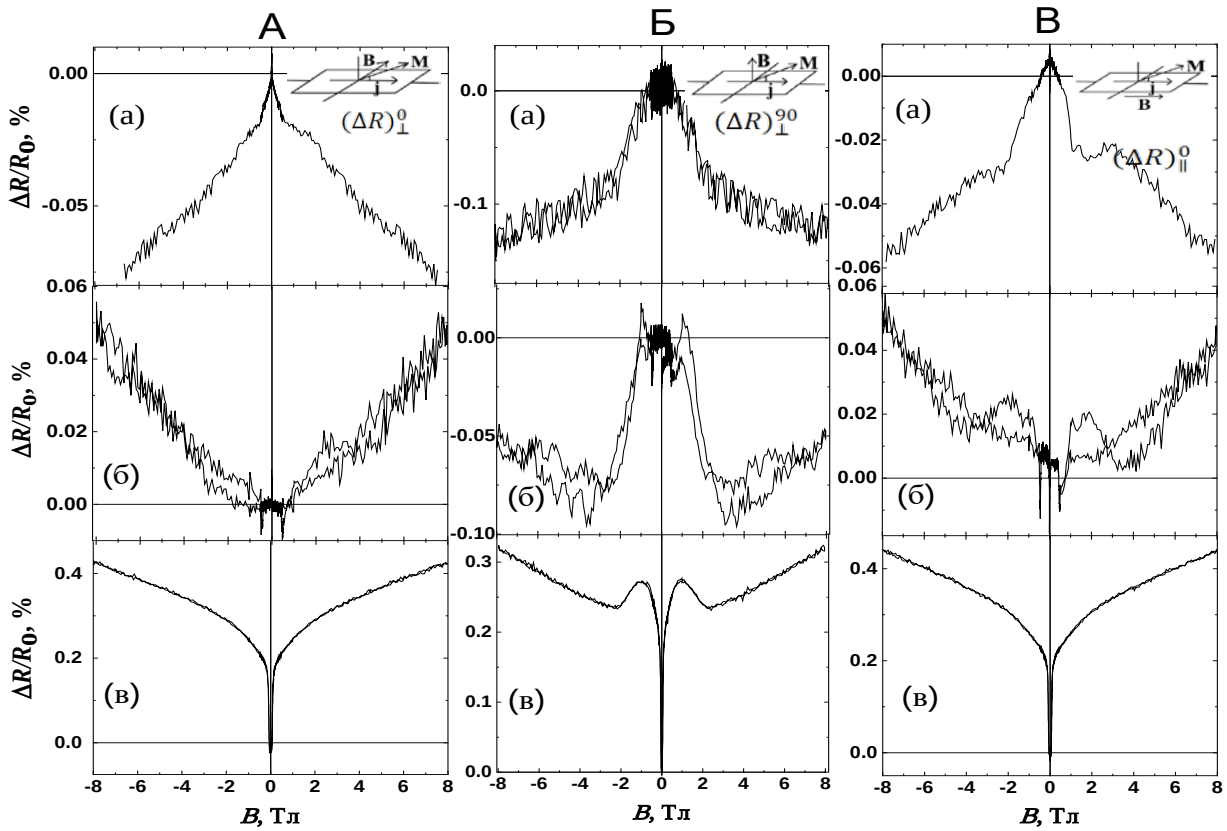


На вставках показана ориентация электрического и магнитного полей относительно плоскости пленки Т, К: (а) – 300; (б) – 100; (в) – 2

Рисунок 3. – Петли гистерезиса поперечного магнитосопротивления исходной пленки железа при φ = 0° (А), φ = 90° (Б) и продольного (В), измеренные при разных температурах

На МС исходных образцов можно выделить три характерные области. Так как продольное лоренцевское МС (ЛМС) равно нулю, а поперечное очень мало и квадратично зависит от поля, то можно заключить, что основной вклад в измеряемый эффект могут давать следующие компоненты: анизотропное МС (АМС), магнонное МС (ММС), гигантское МС (ГМС) и влияние магнитного поля на процессы перколяции или слабой локализации электронов. Отжиг образцов приводит к доминированию намагниченности в плоскости пленки и, как следствие, к кардинальным изменениям МС.

На рисунке 4 приведены петли гистерезиса поперечного (А и В) и продольного (Б) МС отожженной пленки, измеренные при параллельной (А и В) и перпендикулярной (Б) ориентациях поле - плоскость пленки [6, 26].



На вставках показана ориентация электрического и магнитного полей, а также намагниченности относительно плоскости пленки
Т, К: (а) -300; (б) – 100; (в) -2

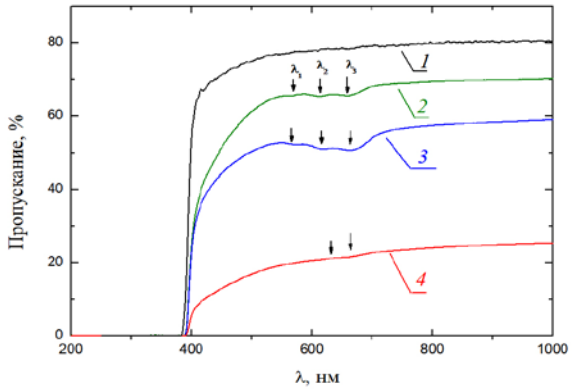
Рисунок 4. – Петли гистерезиса поперечного магнитосопротивления отожженной пленки железа при φ = 0° (А), φ = 90°(Б) и продольного (В), измеренные при разных температурах

Отметим изменение при отжиге знака поперечного при φ = 0° и продольного МС с положительного на отрицательный при Т = 300 К (рисунок 3 – исходная пленка и рисунок 4 – отожженная пленка). Понижение температуры до Т = 100 К приводит к смене знака эффекта с отрицательного на положительный. При φ = 90° знак эффекта остается отрицательным, однако в сильном поле наклон магнитополевой зависимости сменяется с отрицательного на положительный (рисунок 4 (Б)) отражая доминирование положительной компоненты перколяционного МС. Линейность отрицательного МС в области сильных магнитных полей обуславливается доминированием магнонного рассеяния. Уменьшение числа магнонов при понижении температуры приводит к доминированию влияния поля на перколяционные процессы и, как следствие, к близким величинам положительного поперечного и продольного МС (рисунок 4 (А, В)), а также доминированию положительной компоненты при отрицательном знаке поперечного МС в магнитном поле В > 2 Тл и φ = 90° (рисунок 4 (Б)).

Доминирование при Т = 2 К диффузионного переноса в отожженных пленках позволяет выделить две компоненты МС: АМС в области слабых магнитных полей и положительное МС с близкой к линейной зависимостью в сильном поле

независимо от геометрии измерения. Как и в исходных образцах в сильном поле поперечный и продольный эффекты незначительно отличаются по величине (рисунок 4 (В)), что свидетельствуют о доминировании перколяционного переноса электронов. Отметим, что в поле до $B \approx 0{,}5$ Тл при $T < 100$ К проявляются резкие пики МС из-за движения доменных стенок. Они наиболее отчетливо проявляются при взаимно перпендикулярной ориентации поле-плоскость пленки при $T = 300$ К (рисунок 4 (Б)) и не наблюдаются при $T = 2$ К независимо от угла.

В главе 5 представлены результаты изучения оптических характеристик пластинок оксида цинка и пленок полиамида (ПА), имплантированных ионами кобальта. Уменьшение коэффициента пропускания имплантированных образцов (рисунок 5) обусловлено появлением разупорядоченного имплантацией приповерхностного дефектного слоя с толщиной порядка проецированного пробега ионов, а также зарождением и формированием в нем наноразмерных включений кобальта [2,14].



Доза имплантации D, $см^{-2}$:
2- $0.5 \cdot 10^{17}$;3- $1.0 \cdot 10^{17}$;
4- $1.5 \cdot 10^{17}$

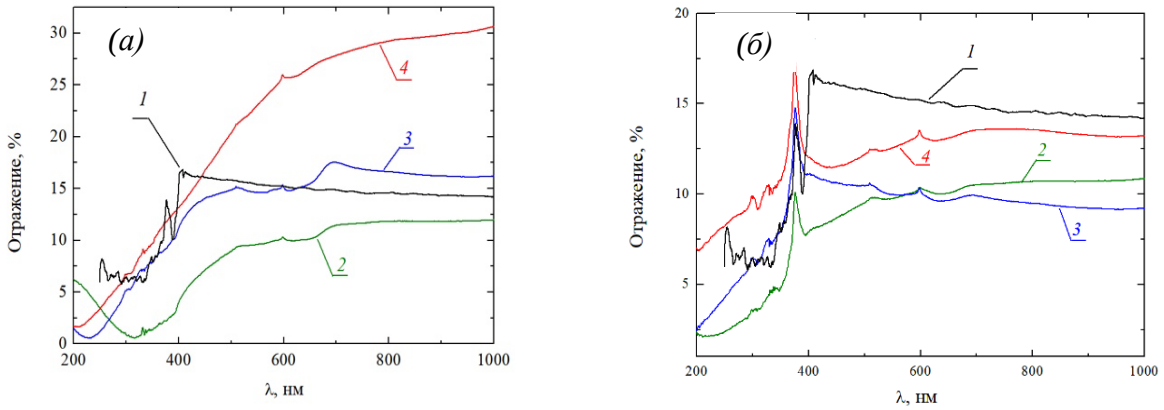
Рисунок 5. – Спектры пропускания исходной (1) и имплантированных ионами кобальта пластинок ZnO

В имплантированных образцах отчетливо проявляются три полосы поглощения, которые при дозе $D = 5 \cdot 10^{16}$ $см^{-2}$ соответствуют длинам волн $\lambda_1 = 567$, $\lambda_2 = 610$ и $\lambda_3 = 660$ нм. С увеличением дозы имплантации полосы смещается в длинноволновую область спектра. Сдвиг может отражать изменение дефектности структуры модифицированного слоя и/или появление взаимодействия в подсистеме ионов Co^{2+}. Эти полосы связаны с внутрицентровыми *d–d*-электронными переходами в двухвалентных ионах Co^{2+} (конфигурация $3d^7$), находящимися в тетраэдрическом кристаллическом поле в высокоспиновом состоянии ($S = 3/2$), т. е. когда они замещают катионы Zn^{2+} в матрице ZnO.

Спектральные зависимости коэффициента отражения существенно различаются при падении света на имплантированную и не имплантированную поверхности (рисунок 6 (а) и (б)) [2]. Для исходной пластинки (кривые *1*) при уменьшении длины волны в области $\lambda \sim 400$ нм, происходит скачкообразное падение коэффициента отражения, обусловленное уменьшением вклада в

отражение обратной стороны пластинки.

Отражение, регистрируемое в области прозрачности ZnO, монотонно увеличивается с длиной волны и особенно ярко проявляется с имплантированной стороны. При λ = 800 нм и дозе $D = 1.5 \cdot 10^{17}$ см$^{-2}$ оно более чем в два раза превосходит отражение от исходной пластинки, что обусловлено дополнительным вкладом от сформировавшихся в приповерхностном слое наночастиц кобальта, коэффициент отражения которого при λ = 800 нм более чем в три раза превышает отражение оксида цинка. Резкий и интенсивный пик отражения при λ = 375 нм для исходного и имплантированного образцов при падении света на не имплантированную сторону обусловлен экситонным отражением, так как оксид цинка имеет достаточно высокую энергию связи экситонов (E_{ex} ≈ 60 мэВ). Разупорядочение кристаллической структуры приповерхностного слоя приводит к отсутствию экситонной структуры в отражении имплантированной стороной (рисунок 6 (а)).



Доза имплантации D, см$^{-2}$: 2 - $5 \cdot 10^{16}$, 3 - $1.0 \cdot 10^{17}$ и 4 - $1.5 \cdot 10^{17}$

Рисунок 6. – Спектры отражения исходной (*1*) и имплантированной ионами кобальта пластинки ZnO при падении света на имплантированную (*а*) и не имплантированную (*б*) стороны

Моделирование прохождения света в рамках двухслойной модели не позволяет согласовать результаты моделирования с измерениями. В рамках трехслойной модели, включающей приповерхностный слой с толщиной 20 нм, содержащий кластеры кобальта, а также заглубленный слой с толщиной 100 нм, представляющий собой твердый раствор замещения, позволило их согласовать и определить зависимость эффективных показателей преломления этих слоев (рисунок 7), которые в зависимости от дозы имплантации изменяются в интервале 1,6 – 2,6 и 1,5 – 2,2 соответственно [2,19]. Незначительное уменьшение эффективного показателя преломления обоих слоев при первой дозе имплантации может вызываться уменьшением их плотности. Измерение магнитных характеристик имплантированных пластинок при послойном травлении

подтвердило формирование трехслойной структуры [14,19].

Оптические характеристики пленок полиамида, имплантированных ионами Co^+ [3], достаточно хорошо интерпретируются в рамках процессов карбонизации приповерхностного слоя и формирования в нем включений кобальта.

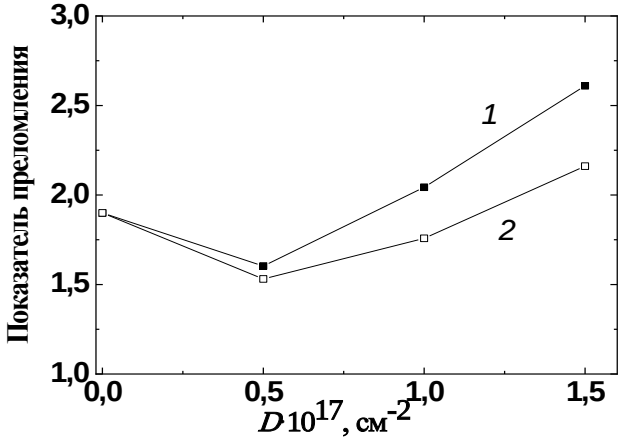


Рисунок 7. – Дозовые зависимости эффективных показателей преломления при λ = 800 нм для модифицированных имплантацией ионами кобальта слоев ZnO:
***1* – приповерхностный слой**
***2* – заглубленный слой**

Моделирование прохождения света и сравнение с результатами измерений позволило определить эффективный показатель преломления модифицированного слоя, который в зависимости от дозы имплантации изменяется в интервале n=1,3 – 2,1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Впервые в тонкопленочном магнитоупорядоченном пермаллоевом ($Ni_{0.8}Fe_{0.2}$) диске Корбино и датчике Холла в температурном диапазоне T = 300 – 2 K установлены особенности магниторезистивного эффекта, а также обычного, экстраординарного и планарного эффектов Холла, включающие:

– большую величину отрицательного эффекта при взаимно перпендикулярной ориентации направления магнитного поля и плоскости диска, обусловленную доминированием анизотропного МС при взаимно перпендикулярной ориентации направления тока в диске и его намагниченности;

– угловую зависимость магнитного поля положения резкого пика отрицательного МС при его перемагничивании, которое изменяется в интервале $B_п$ = 0.2 – 8 мТл при изменении угла между направлением магнитного поля и плоскостью диска от φ = 0° до φ = 90° и его температурный сдвиг в интервале $B_п$ = 0.2 – 6 мТл и $B_п$ = 8 – 22 мТл при φ = 0° и φ = 90° соответственно и понижении температуры от T = 300 до T = 2 K;

– угловую зависимость положения пика холловского сопротивления в экстраординарном эффекте Холла, которое изменяется в интервале $B_п$ = 0.2 – 5 мТл при изменении угла от φ = 0° до φ = 90°, а также его немонотонную зависимость в интервале $B_п$ = 0.15 – 0,25 мТл [1,4,7,17,20].

2. Установлено, что в исходных нанокристаллических пленках железа, синтезированных на кремниевых подложках методом ионно-ассистированного осаждения в температурном интервале Т = 300 – 150 К доминирует перколяционный механизм проводимости, в интервале Т = 150 К – 35 К – диффузионный, а при Т < 35 К – процессы слабой локализации. Показано, что отжиг пленок в вакууме при Т = 450 °С в течении 15 мин приводит отсутствию процессов слабой электронной локализации при Т < 35 К вследствие улучшения структурного и магнитного совершенства и увеличению температуры перехода от перколяционного к диффузионному механизму проводимости с Т = 150 К до Т = 260 К [6,25,26].

3. Впервые установлено, что в исходных нанокристаллических пленках железа с перпендикулярной магнитной анизотропией и перколяционным переносом электронов до поля насыщения намагниченности наблюдается смена знака поперечного и продольного магниторезистивного эффекта с положительного на отрицательный при изменении направления магнитного поля от параллельного плоскости пленки до перпендикулярного, из-за доминирования анизотропной компоненты отрицательного магнитосопротивления, когда направление тока перпендикулярно намагниченности, а также обнаружен инверсный гигантский магниторезистивный эффект, обусловленный магнитной неоднородностью пленок [6, 26].

4. Впервые установлено, что в отожженных нанокристалличесих пленках железа с анизотропией в плоскости при Т = 300 К, независимо от геометрии измерения, в области слабых магнитных полей доминирует компонента анизотропного магниторезистивного эффекта, а в области сильных – линейное отрицательное магнонное магнитосопротивление. Обнаружены смена знака поперечного и продольного эффектов с отрицательного на положительный при параллельной ориентации поле-плоскость и понижении температуры из-за вымораживания магнонов, а также резкие пики его увеличения и уменьшения при $B_п$ = 14 – 35 мТл и $B_п$ = 12 мТл, обусловленные движением доменных стенок и эффектами тренировки при перемагничивании пленок [6,18,26].

5. Показано, что при комнатной температуре характеристические поля изменения знака и вида магнитополевой зависимости магниторезистивного эффекта в нанокристаллических пленках железа при измерении когда магнитное поле параллельно и перпендикулярно плоскости пленки, достаточно хорошо согласуются с характеристическими полями петель гистерезиса намагниченности, а именно: коэрцитивной силой и полем насыщения намагниченности, измеренными в выше указанных геометриях измерения [6,18,26].

6. Методами оптической спектроскопии (спектральные зависимости пропускания, отражения и фотолюминесценции) установлены закономерности изменения оптических характеристик монокристаллического оксида цинка при

высокодозной $D = 2{,}5 \cdot 10^{16} – 1{,}0 \cdot 10^{17}$ см$^{-2}$ имплантации ионов кобальта с энергией 40 кэВ и плотности ионного тока $J = 4$ мкА/см^2, заключающейся:

– в уменьшении пропускания не менее, чем на 55%, изменении отражения как имплантированной, так и не имплантированной сторонами;

– обнаружении трех полос поглощения при $\lambda_1 = 567$, $\lambda_2 = 610$ и $\lambda_3 = 660$ нм, обусловленных формированием в имплантированных образцах заглубленного слоя, содержащего фазу твердого раствора оптически активных ионов Co^{2+};

– установлении методом моделирования величины показателя преломления приповерхностного и заглубленного модифицированных слоев, изменяющихся в интервале 1,6 – 2,6 и 1,5 – 2,2 соответственно, в зависимости от дозы имплантации [2,16].

7. Показано, что имплантация ионов кобальта с энергией 40 кэВ в интервале доз $D = 2.5 \cdot 10^{16} – 1.5 \cdot 10^{17}$ см$^{-2}$ при плотности ионного тока $j = 4$ мкА/см^2 в пленки полиамида приводит к существенному до 80% уменьшению коэффициента пропускания вследствие поглощения света карбонизированным слоем и содержащимися в нем включениями кобальта, а также к увеличению отражения как имплантированной, так и не имплантированной сторонами. Методом моделирования прохождения света при его падении на имплантированную и не имплантированную стороны пленки с учетом многократных отражений от границ раздела и поглощений в модифицированных слоях в рамках двух- и трехслойной моделей определен эффективный показатель преломления модифицированного слоя, изменяющийся в интервале от 1,3 до 2,1 в зависимости от дозы имплантации [3,5,21].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты проведенных исследований использовались при постановке новых лабораторных работ «Имплантация ионов переходных металлов в оксид цинка: переход диэлектрик-металл и диамагнетик-ферромагнетик. Диагностика прямым измерением электрических, магнитных и оптических характеристик» и «Изучение спин-зависимых процессов переноса электронов в магнитоупорядоченных средах». Получено 2 акта о внедрении в учебный процесс кафедры физики полупроводников и наноэлектроники. Результаты могут быть использованы при чтении специальных курсов лекций «Электронные состояния и процессы в конденсированных средах», «Наноэлектроника» и «Спинтроника», а также при разработке датчиков величины, направления и пороговых датчиков магнитного поля. Установленные закономерности изменения оптических характеристик оксида цинка и полиамида, имплантированных ионами кобальта, могут быть физической основой формирования многослойных структур оптоэлектроники с заданными показателями преломления.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях, включенных в Перечень изданий, и в иностранных научных изданиях

1. Головчук, В.И. Магнитная микроструктура и магниторезистивный эффект в диске корбино с магнитным упорядочением / В.И. Головчук, М.Г. Лукашевич // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. – 2018. - № 3. – С. 46-53.
2. Спектры пропускания и отражения оксида цинка, имплантированного ионами кобальта с высокой дозой / Ю.А. Бумай, В.Ф. Валеев, В.И. Головчук, А.И. Гумаров, М.Г. Лукашевич, В.И. Нуждин, В.Б. Оджаев, А.А. Харченко, Р.И. Хайбуллин // Журнал прикладной спектроскопии. – 2019. – Т. 86, № 6. – С. 925-931.
3. Модификация оптических характеристик пленок полиамида имплантацией ионов кобальта / В.В. Базаров, Ю.А. Бумай, В.Ф. Валеев, В.И. Головчук, М.Г. Лукашевич, В.И. Нуждин, В.Б. Оджаев, А.А. Харченко, Р.И. Хайбуллин // Журнал прикладной спектроскопии. – 2020. – Т. 87, № 3. – С. 448-453.
4. Halauchuk, V.I. Extraordinary and Planar Hall Effects in thin Permalloy Films / V.I. Halauchuk, M.G. Lukashevich // Journal of the Belarusian State University. Physics. – 2021. - № 2. – С. 53-60.
5. Оптические характеристики пленок полиимида имплантированных высокой дозой ионов марганца / А.С. Сорока, Ю.А. Бумай, В.И. Головчук, М.Г. Лукашевич, В.Б. Оджаев, Р.И. Хайбуллин // Полимерные материалы и технологии. – 2021. - № 3. – С. 48-54.
6. Корреляция электрических, гальваномагнитных и магнитных характеристик нанокристаллических пленок железа, полученных методом ионно-ассистированного осаждения / В.И. Головчук, Ю.А. Бумай, М.Г. Лукашевич, Н.М. Лядов, И.А. Файзрахманов, Р.И. Хайбуллин // Физика твердого тела. – 2021. – Т. 63, вып. 12. – С. 2096-2105.
7. Halauchuk, V.I. Peculiarity of the Low Temperature Magnetoresistive Effect in the Corbino Disk with Magnetic Ordering / V.I. Halauchuk, M.G. Lukashevich // Journal of the Belarusian State University. Physics. – 2021. - № 3. – С. 12-19.

Статьи в других научных изданиях

8. Морфология поверхности пленок теллурида кадмия, полученных методом вакуумного напыления на подложках из кремния и теллурида кадмия / А.Т. Акобирова, В.И. Головчук, М.Г. Лукашевич, Н.С. Султонов,

Р.Б. Хамрокулов // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2017. - № 2. – С. 69-75.

9. Структурные и оптические характеристики силикатного стекла, имплантированного ионами меди / В.И. Головчук, А.А. Харченко, Д.И. Бринкевич, М.Г. Лукашевич, С.А. Вабищевич, Н.В. Вабищевич // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. – 2017. - № 12. – С. 42-49.

10. Прочностные свойства нейтронно-облученных эпитаксиальных пленок CdTe / А.Т. Акобирова, Д.И. Бринкевич, С.А. Вабищевич, Н.В. Вабищевич, В.И. Головчук, М.Г. Лукашевич, Б.И. Махсудов // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2018. - № 1. – С. 73-79.

11. Модификация поверхности пленок политэтилентерефталата при имплантации высокоэнергетичными ионами инертных газов с удельной энергией 1 МэВ / нуклон / В.И. Головчук, Д.И. Бринкевич, М.Г. Лукашевич, В.Б. Оджаев, В.С. Просолович, А.А. Харченко, С.А. Вабищевич, Н.В. Вабищевич // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. – 2018. - № 4. – С. 154-158.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

12. Морфология поверхности пленок теллурида кадмия, полученных на кремниевой подложке методом вакуумного напыления / А.Т. Акобирова, В.И. Головчук, М.Г. Лукашевич, Н. Султонов, Р.Б. Хамрокулов // Материалы и структуры современной электроники: сб. научн. тр. VII Междунар. науч. конф., посвящ. 50-летию кафедры физики полупроводников и наноэлектроники, Минск, 12–13 октября 2016 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2016. – С. 16-19.

13. Магнетизм нанокластеров 3d-металлов, полученных методом ионной имплантации в диэлектрической и полупроводниковой матрицах / В.И. Головчук, В.А. Карпович, М.Г. Лукашевич, А.А. Харченко, Р.И. Хайбуллин, В.Б. Оджаев // Материалы и структуры современной электроники: сб. научн. тр. VII Междунар. науч. конф., посвящ. 50-летию кафедры физики полупроводников и наноэлектроники, Минск, 12–13 октября 2016 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2016. – С. 232-234.

14. Модификация оптических свойств оксида цинка имплантацией ионов кобальта / В.И. Головчук, А.И. Гумаров, Ю.М. Бумай, М.Г. Лукашевич, В.Б. Оджаев, А.А. Харченко, Р.И. Хайбуллин // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 12-й Междунар. конф., Минск, 19-22 сентября 2017 г. / Мин. обр. Респ. Бел.; НАН Беларуси ; БРФФИ ; Бел. гос. ун-т ; редкол.: В.В. Углов (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 225-227.

15. Силикатное стекло, имплантированное ионами меди / В.И. Головчук, А.А. Харченко, М.Г. Лукашевич, С.А. Вабищевич, Н.В. Вабищевич, Д.И. Бринкевич // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 12-й Междунар. конф., Минск, 19-22 сентября 2017 г. / Мин. обр. Респ. Бел.; НАН Беларуси ; БРФФИ ; Бел. гос. ун-т ; редкол.: В.В. Углов (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 228-230.

16. К вопросу о природе ферромагнетизма в оксиде цинка, имплантированном ионами кобальта / А.И. Гумаров, В.Ф. Валеев, В.И. Головчук, Н.М. Лядов, М.Г. Лукашевич, В.И. Нуждин, Л.Р. Тагиров, И.А. Файзрахманов, Р.И. Хайбуллин // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 12-й Междунар. конф., Минск, 19-22 сентября 2017 г. / Мин. обр. Респ. Бел.; НАН Беларуси ; БРФФИ ; Бел. гос. ун-т ; редкол.: В.В. Углов (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 231-233.

17. Головчук, В.И. Морфология поверхности и магнитная микроструктура пленок пермаллоя на ситалловой подложке / В.И. Головчук, М.Г. Лукашевич // Материалы и структуры современной электроники : материалы VIII Междунар. науч. конф., Минск, 10-12 октября 2018 г. / Бел. гос. ун-т ; редкол.: В.Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2018. – С. 38-41.

18. Магниторезистивный эффект в пленках железа, полученных методом ионно-ассистированного осаждения на кремниевых подложках / В.И. Головчук, М.Г. Лукашевич, Р.И. Хайбуллин, Н.М. Лядов, И.А. Файзрахманов // Материалы и структуры современной электроники : материалы VIII Междунар. науч. конф., Минск, 10-12 октября 2018 г. / Бел. гос. ун-т ; редкол.: В.Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2018. – С. 42-47.

19. Моделирование поглощения и отражения света в оксиде цинка, имплантированном ионами кобальта / В.И. Головчук, А.И. Гумаров, Ю.А. Бумай, В.Ф. Валеев, М.Г. Лукашевич, В.И. Нуждин, В.Б. Оджаев, А.А. Харченко, Р.И. хайбуллин // ФТТ-2018. Актуальные проблемы физики твердого тела : сб. докл. VIII Междунар. науч. конф., Минск, 24-28 сент. 2018 г. / НПЦ НАН Беларуси по материаловедению (Институт физики твердого тела и полупроводников) ; БРФФИ ; редкол.: Н.М. Олехнович (пред.) [и др.]. – Минск, 2018. – С. 192-194.

20. Головчук, В.И. Магниторезистивный эффект в диске корбино с магнитным упорядочением / В.И. Головчук, М.Г. Лукашевич // ФТТ-2018. Актуальные проблемы физики твердого тела : сб. докл. VIII Междунар. науч. конф., Минск, 24-28 сент. 2018 г. / НПЦ НАН Беларуси по материаловедению (Институт физики твердого тела и полупроводников) ; БРФФИ ; редкол.: Н.М. Олехнович (пред.) [и др.]. – Минск, 2018. – С. 259-261.

21. Оптические характеристики пленок полиамида, имплантированных ионами кобальта / В.В. Базаров, Ю.А. Бумай, В.И. Головчук, М.Г. Лукашевич, В.Б. Оджаев, А.А. Харченко // Взаимодействие излучений с твердым телом = Interaction of Radiation with Solids : материалы 13-й Междунар. науч. конф., Минск, 30 сент. – 03 окт. 2019 г. / Бел. гос. ун-т ; НАН Беларуси ; Мин. обр. Респ. Бел.; БРФФИ ; редкол.: В.В. Углов (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2019. – С. 40-42.

22. Магниторезистивный эффект в тонких пленках железа с перпендикулярной магнитной анизотропией / В.И. Головчук, Ю.А. Бумай, М.Г. Лукашевич, И.А. Файзрахманов, Р.И. Хайбуллин // Взаимодействие излучений с твердым телом = Interaction of Radiation with Solids : материалы 13-й Междунар. науч. конф., Минск, 30 сент. – 03 окт. 2019 г. / Бел. гос. ун-т ; НАН Беларуси ; Мин. обр. Респ. Бел. ; БРФФИ ; редкол.: В.В. Углов (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2019. – С. 371-374.

23. Головчук, В.И. Особенности низкотемпературного магнитосопротивления диска корбино с магнитным упорядочением / В.И. Головчук, М.Г. Лукашевич // Материалы и структуры современной электроники : материалы IX Междунар. науч. конф., Минск, 14-16 октября 2020 г. / Белорусский государственный университет ; редкол.: В.Б. Оджаев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2020. – С. 305-311.

24. Головчук, В.И. Особенности изучения сплин-зависимых электронных состояний и процессов в курсе лекций «Спинтроника» и проведении лабораторных работ / В.И. Головчук, М.Г. Лукашевич // Материалы и структуры современной электроники : материалы IX Междунар. науч. конф., Минск, 14-16 октября 2020 г. / Белорусский государственный университет ; редкол.: В.Б. Оджаев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2020. – С. 473-477.

25. Модификация оптических характеристик пленок полиамида имплантацией высокой дозой ионов марганца / А.С. Сорока, Ю.А. Бумай, В.И. Головчук, М.Г. Лукашевич, В.Б. Оджаев, Р.И. Хайбуллин // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 14-й Междунар. конф., посвящ. 100-летию Белорус. гос. ун-та, Минск, 21-24 сент. 2021 г. / Бел. гос. ун-т ; редкол.: В.В. Углов (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2021. – С. 349-353.

26. Электрические и гальваномагнитные характеристики нанокристаллических пленок железа с перпендикулярной магнитной анизотропией, сформированных методом ионно-стимулированного осаждения / В.И. Головчук, Ю.А. Бумай, М.Г. Лукашевич, Н.М. Лядов, И.А. Файзрахманов, Р.И. Хайбуллин // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 14-й Междунар. конф., посвящ. 100-летию Белорус. гос. ун-та, Минск, 21-24 сент. 2021 г. / Бел. гос. ун-т ; редкол.: В.В. Углов (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2021. – С. 434-438.

Тезисы

27. Головчук, В.И. Морфология поверхности пленок теллурида кадмия, полученных на кремниевой подложке методом вакуумного напыления / В.И. Головчук // Физика конденсированного состояния : материалы XXIV Междунар. науч.-практич. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 21 апреля 2016 г. / УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы». – Минск, 2016. – С. 36-38.

28. Головчук, В.И. Влияние травления и облучения тепловыми нейтронами на морфологию поверхности пленок теллурида кадмия, полученных на кремниевой подложке методом вакуумного напыления / В.И. Головчук // Сборник работ 73-й научной конференции студентов и аспирантов Белорусского государственного университета, Минск, 16-25 мая 2016 г. В 3 ч. / Мин. обр. Респ. Бел. ; Бел. гос. ун-т. – Минск, 2016. – Ч. I. - С. 123-126.

29. Головчук, В.И. Структурные исследования пленок теллурида кадмия, выращенных на подложках монокристаллического теллурида кадмия и кремния / В.И. Головчук // Новые горизонты – 2016 : сб. материалов III Белорусско-китайского молодежного инновационного форума, Минск, 29-30 ноября 2016 г. / Белорусский национальный технический университет ; Научно-технологич. парк БНТУ «Политехник». – Минск, 2016. – С. 184-185.

30. Головчук, В.И. Изучение морфологии поверхности и магнитной микроструктуры тонких пленок пермаллоя методами атомно- и магнитно-силовой микроскопии / В.И. Головчук // Физика конденсированного состояния : материалы XXV Междунар. науч.-практич. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 20 апреля 2017 г. / УО «Гродн. гос. ун-т имени Янки Купалы»; редкол. : В.Г. Барсуков (гл. ред.) [и др.]. – Гродно, 2017. – С. 27-29.

31. Модификация оптических свойств полиэтилен-терефталата облучением тепловыми нейтронами / В.И. Головчук, Ю.А. Бумай, М.Г. Лукашевич, Б.И. Махсудов, С.Х. Табаров // Материалы Междунар. конф. «Перспективы развития физической науки», посвящ. памяти (80-летию) Заслуженного деятеля науки и техники Республики Таджикистан, члена-корреспондента НА РТ, доктора физико-математических наук, профессора Хакимова Ф.Х., Душанбе, 22-26 мая 2017 г. / Таджикский национальный ун-т. – Душанбе, 2017. – С. 33-35.

32. Оптические характеристики пленок CdTe, полученных в квазизамкнутом объеме на разных подложках / А.Т. Акобирова, В.И. Головчук, М.Г. Лукашевич, Н.С. Султонов, Р.Б. Хамрокулов // Материалы Междунар. конф. «Перспективы развития физической науки», посвящ. памяти (80-летию)

Заслуженного деятеля науки и техники Республики Таджикистан, члена-корреспондента НА РТ, доктора физико-математических наук, профессора Хакимова Ф.Х., Душанбе, 22-26 мая 2017 г. / Таджикский национальный ун-т. – Душанбе, 2017. – С. 228-230.

33. Головчук, В.И. Структурные и оптические характеристики пленок теллурида кадмия, полученных методом вакуумного напыления на разных подложках / В.И. Головчук // Международный молодежный форму «ЛОМОНОСОВ-2017» (подсекция «Физика твердого тела») : сб. тез. докл., Москва, 10-14 апреля 2017 г. / Мин. обр. и науки РФ ; МГУ имени М.В. Ломоносова. – М., 2017. – С. 647-649.

РЕЗЮМЕ

Головчук Виктория Ивановна

Спинтронные и оптические характеристики слоев на основе 3d-металлов: Fe, Ni, Co, Mn

Ключевые слова: пленка, пермаллой, полиамид, железо, оксид цинка, магниторезистивный эффект, ионы кобальта.

Цель работы: установить закономерности изменения электрических, гальваномагнитных и оптических характеристик тонко- и многослойных структур, сформированных ионно-лучевыми методами на диэлектрических и полупроводниковых подложках в зависимости от режимов синтеза, найти корреляции между их электрическими, магнитотранспортными и магнитными харатеристиками при проявлении размерных эффектов с целью получения высокоэффективных сред приборных структур спинтроники и магнитооптики.

Методы исследования и использованная аппаратура: структурные исследования (микроскопы Solver P47HT-МДТ и LEO-1455 VP), измерение температурных зависимостей сопротивления, магнитосопротивления. Оптическая спектроскопия (PROSCAN MC-122, PHOTON-RT, спектрометрия NanofinderHighEnd).

Полученные результаты и их новизна: 1) установлены закономерности положения пиков магниторезистивного эффекта при перемагничивании тонкопленочного пермаллоевого диска Корбино в зависимости от температуры и угла между направлением внешнего магнитного поля и плоскостью диска; 2) проведена идентификация магниторезистивных эффектов в тонких нанокристаллических пленках железа при разных механизмах электронного транспорта и разным типом магнитной анизотропии; 3) предложена трехслойная модель для объяснения оптических характеристик оксида цинка и полиамида, имплантированных ионами кобальта, определены эффективные показатели преломления приповерхностного и заглубленного слоев, 4) обнаружены внутрицентровые *d-d* – электронные переходы в заглубленном модифицированном слое оксида цинка.

Рекомендации по использованию: установленные закономерности изменения оптических характеристик оксида цинка и полиамида, имплантированных ионами кобальта, могут быть физической основой формирования многослойных структур оптоэлектроники с заданными характеристиками показателей преломления, а также в учебном процессе при чтении курсов лекций «Электронные состояния и процессы в конденсированных средах», «Наноэлектроника» и «Спинтроника».

Область применения: результаты исследования гальваномагнитных характеристик тонких проводящих слоев с разными механизмами переноса электронов и разной магнитной анизотропией могут быть использованы при разработке датчиков величины, направления и пороговых датчиков магнитного поля, на основе магниторезистивного эффекта, экстраординарного и планарного эффектов Холла.

РЭЗЮМЭ

Галаўчук Вікторыя Іванаўна

Спінтронныя і аптычныя характарыстыкі пластоў на аснове 3d-металаў: Fe, Ni, Co, Mn

Ключавыя словы: плёнка, пермалой, поліамід, жалеза, аксід цынку, магнітарэзістыўны эфект, іёны кобальту.

Мэта працы: усталяваць заканамернасці змены электрычных, гальванамагнітных і аптычных характарыстык тонка- і шматслойных структур, сфармаваных іённа-прамянёвымі метадамі на дыэлектрычных і паўправадніковых падкладках у залежнасці ад рэжымаў сінтэзу, знайсці карэляцыі паміж іх электрычнымі, магнітатранспартнымі і магнітнымі характарыстыкамі пры праяве размерных эфектаў з мэтай атрымання высокаэфектыўных асяроддзяў прыборных структур спінтронікі і магнітаоптыкі.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура: структурныя (мікраскопы Solver P47HT-МДТ і LEO-1455 P) вымярэнне электрычных, магнітных і гальванамагнітных характарыстык, аптычныя спектраметрыя (спектрафатометр PHOTON-RT, PROSCAN MC-122, спектрометрыя NanofinderHighEnd).

Атрыманы новыя вынікі: 1) Упершыню ўстаноўлены заканамернасці становішча пікаў магнітарэзістыўнага эфекту пры перамагнічванні тонкаплёнкавага пермалоевага дыска Карбіна ў залежнасці ад тэмпературы і кута паміж кірункам магнітнага поля і плоскасцю дыска; 2) упершыню праведзена ідэнтыфкацыя магнітарэзістыўных эфектаў у тонкіх нанакрысталічных плёнках жалеза пры розных механізмах электроннага транспарту і розным тыпам магнітнай анизатрапіі; 3) упершыню прапанаваная трохслаёвая мадэль для тлумачэння аптычных характарыстык аксіду цынку і поліаміду імплантаваных іёнамі кобальту, вызначаны эфектыўныя паказчыкі праламлення прыпаверхневага і заглыбленага пластоў; 4) выяўлены ўнутрыцэнтровыя *d-d* – электронныя пераходы ў заглыбленым мадыфікаваным пласце.

Рэкамендацыі па выкарыстанню: установленыя заканамернасці змены аптычных характарыстык аксіду цынку і поліаміду, імплантаваных іёнамі кобальту, могуць быць фізічнай асновай фарміравання шматслойных структур оптаэлектронікі з зададзенымі характарыстыкамі паказчыкаў праламлення, а таксама ў навучальным працэсе пры чытанні спецыяльных курсаў лекцый «Электронныя станы і працэсы ў кандэнсаваных асяроддзях», «Нанаэлектроніка» і «Спінтроніка».

Галіна ўжывання: вынікі даследавання гальванамагнітных характарыстык тонкіх праводзячых слаёў з рознымі механізмамі пераносу электронаў і рознай магнітнай анізатрапіей могуць быць выкарыстаны пры распрацоўцы датчыкаў велічыні, напрамку і парогавых датчыкаў магнітнага поля, на аснове магнітарэзістыўнага эфекту, экстраардынарнага і планарнага эфектаў Хола.

SUMMARY

Golovchuk Victoria Ivanovna

Spintronic and optical characteristics of layers based on 3d-metals: Fe, Ni, Co, Mn

Key words: permalloy, polyamide, iron films, zinc oxide plates, magnetoresistive effect, cobalt ions.

Goal of the present work: to establish the patterns of change in the electrical, galvanomagnetic and optical characteristics of thin and multilayer structures formed by ion-beam methods on dielectric and semiconductor substrates depending on the synthesis modes, to find correlations between their electrical, magnetotransport and magnetic characteristics in the manifestation of size effects in order to obtaining highly efficient media for device structures of spintronics and magneto-optics.

Methods of investigation: structural studies (Solver P47NT-MDT and LEO-1455 VP microscopes), measurement of temperature dependences of resistance, magnetoresistance. Optical spectroscopy (PROSCAN MC-122, PHOTON-RT, spectrometry NanofinderHighEnd).

Results obtained results and their novelty: 1) the regularities of the position of the peaks of the magnetoresistive effect during magnetization reversal of a thin-film permalloy Corbino disk were established depending on the temperature and the angle between the direction of the external magnetic field and the plane of the disk; 2) identification of magnetoresistive effects in thin nanocrystalline iron films with different mechanisms of electron transport and different types of magnetic anisotropy; 3) a three-layer model was proposed to explain the optical characteristics of zinc oxide and polyamide implanted with cobalt ions, the effective refractive indices of the near-surface and buried layers were determined, 4) intracenter *d-d* electronic transitions were found in the buried modified layer of zinc oxide.

Recommendations for use: the established patterns of changes in the optical characteristics of zinc oxide and polyamide implanted with cobalt ions can be the physical basis for the formation of multilayer structures of optoelectronics with specified characteristics of refractive indices, as well as in the educational process when reading lecture courses "Electronic states and processes in solids condensed media", "Nanoelectronics" and "Spintronics".

Field of application: the results of studying the galvanomagnetic characteristics of thin conductive layers with different electron transfer mechanisms and different magnetic anisotropy can be used in the development of magnitude, direction and threshold magnetic field sensors based on the magnetoresistive effect, extraordinary and planar Hall effects.

Подписано в печать 20.04.2023. Формат 60×84 $^{1}/_{16}$. Бумага офсетная.
Цифровая печать. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,55.
Тираж 60 экз. Заказ 86.

Отпечатано с оригинала-макета заказчика
в республиканском унитарном предприятии
«Издательский центр Белорусского государственного университета».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 2/63 от 19.03.2014.
Ул. Красноармейская, 6, 220030, Минск.