

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Блинов Михаил Ильич

**Магнитотранспортные свойства сплавов на основе
Ni-Mn в области магнитоструктурных переходов**

Специальность 01.03.12 (01.04.11) —
«Физика магнитных явлений»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2021

Работа выполнена на кафедре магнетизма физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова

Научный руководитель — **Прудников Валерий Николаевич**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры магнетизма, физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова

Официальные оппоненты — **Панина Лариса Владимировна**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры технологии материалов электроники «Национального Исследовательского Технологического Университета «МИСиС»

Терёшина Ирина Семёновна, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник кафедры физики твёрдого тела физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова

Юрасов Алексей Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры нанoeлектроники Физико-технологического института «МИРЭА — Российский технологический университет»

Защита диссертации состоится 16 декабря 2021 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета МГУ.01.18 Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова по адресу 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 8, криогенный корпус, конференц-зал.

E-mail: perov@magn.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М. В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/395435663/>

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

Т. Б. Шапаева

Общая характеристика работы

Актуальность

Магнитотранспортные явления, также известные как кинетические или явления переноса, представляют широкий класс свойств материалов, исследование которого является одной из центральных задач физики конденсированного состояния. Каждый этап развития теории металлов, от исследования идеализированных металлов до многокомпонентных кристаллических и некристаллических сплавов, связан в первую очередь с объяснением электронных явлений переноса.

В отличие от исследований явлений переноса в кристаллах, не содержащих атомов переходных элементов, в кристаллах переходных и редкоземельных элементов, их сплавах и соединениях возникают добавочные факторы, связанные с существованием незаполненных электронных оболочек в атомах. Существование магнитного порядка в этих кристаллах приводит к аномальным эффектам при движении носителей электрического тока во внешних электрических и магнитных полях. Тепловые флуктуации в системе d-электронов способствуют появлению нового механизма рассеяния носителей тока, связанного с их обменным взаимодействием. Существование намагниченности приводит к снятию спинового вырождения носителей тока и к появлению зависимости характеристик их спектра от величины спонтанной намагниченности. В ряде случаев, например, при образовании магнитных подрешёток из-за пространственной симметрии кристалла, последний эффект может привести к снятию пространственного вырождения, появлению новых границ Бриллюэна, к существенному изменению спектра и плотности состояний носителей тока.

Исследование явлений переноса в ферромагнитных сплавах переходных металлов, которые характеризуются незаполненной d-подзоной, показало, что электроны этих зон являются основными носителями заряда для нечётных по намагниченности кинетических эффектов. Так ранее считавшиеся пренебрежимо малыми вклады от малоподвижных электронов, ответственных за ферромагнитное упорядочение, играют ключевую роль в аномальных кинетических явлениях, а также могут оказывать значительное влияние на такие хорошо изученные явления как электрическая проводимость или термоэдс [1].

В связи с этим, наибольший интерес представляют исследования кинетических эффектов в таких переходных металлах и сплавах, в которых реализуется многообразие магнитных структур и магнитных состояний. Исследования гальваномагнитных эффектов, в том числе, эффекта Холла и эффекта изменения электрического сопротивления в магнитном поле, дают информацию как о природе самого магнетизма, так и о механизме проводимости в этих материалах. Особое значение таких исследований в последние годы связано с бурным развитием спинтроники, основанной на использовании магнитотранспортных свойств ферромагнитных структур, а также с возможностью практического применения результатов исследований для создания датчиков магнитных полей и магниторезистивных элементов памяти и других развивающихся направлений современной электроники.

По мере развития новых технологий изготовления сложных многокомпонентных, композитных или сложноструктурированных материалов появляются также и ранее неизведанные перспективы использования их нетривиальных свойств. Так развитие изготовления и исследования многослойных структур позволило наблюдать гигантское магнитосопротивление [2, 3], благодаря открытию которого произошёл скачок в технологии магнитной записи.

Открытие новых эффектов в материалах, например, эффекта переноса спина [4, 5] представляет и новые возможности. В настоящее время особое внимание уделяется материалам, обладающими перспективами в области спинтроники, магнитной оперативной памяти и датчикам [6]. Среди наиболее интересных для исследовательской деятельности оказались высокорезистивные материалы, такие как сплавы на основе $NiMnGa$ и $NiMnIn$, которые известны как сплавы с памятью формы [7, 8]. Высокая величина сопротивления усиливает наблюдаемые эффекты.

В последние годы всё возрастающее внимание уделяется разработке функциональных сплавов, обладающих сочетанием различных свойств, перспективных для практических применений. Именно к таким материалам относятся сплавы с памятью формы на основе $Ni-Mn$. Эти сплавы обладают гигантскими стрикцией, магнитокалорическим эффектом, магнитосопротивлением, аномальным эффектом Холла, магнитооптическими эффектами и другими полезными и уникальными свойствами. Несмотря на значительные усилия экспериментальных и теоретических групп, механизмы многих этих свойств остаются дискуссионными. В частности это относится и к магнитотранспортным свойствам таким, как магнитосопротивление, нормальный и аномальный эффект Холла.

Аномальный эффект Холла является центральным явлением в группе маг-

нитотранспортных свойств, определяющийся спин-орбитальным взаимодействием и механизмами рассеяния, является родоначальником всего семейства эффектов Холла (прямой и инверсный спиновый [9, 10], топологический [11] и антиферромагнитный [12] аномальный [13], квантовый [14] эффекты Холла, оптические и акустические аналоги), широко используемых в спинтронике. Природа аномального эффекта Холла в сплавах на основе *Ni-Mn* с памятью формы, особенно при мартенситных переходах, остаётся дискуссионной. Гигантские величины спинового эффекта Холла, являющегося релятивистским эффектом, не нашли объяснения. Поэтому изучение механизмов аномального эффекта Холла имеет самостоятельное научное значение. С другой стороны, аномальный эффект Холла является наиболее чувствительным явлением структурных превращений и особенностей электронной структуры. Так как аномальный эффект Холла в сплавах переходных металлов связан с d-подобными состояниями, то его изучение в сочетании с другими транспортными свойствами может дать уникальную информацию о перестройке как спин-поляризованных d-состояний, так и s-подобных состояний, в том числе и при фазовых переходах.

Цели и задачи исследования

Общей целью диссертации являлась установка фундаментальной связи между магнитной структурой и поведением носителей заряда в материалах, в которых реализуется несколько магнитных состояний, в частности изучение особенностей магнитотранспортных свойств (электрическое сопротивление, магнитосопротивление и эффект Холла) четверных сплавов $Ni_{50}Mn_{35}In_{15-x}B_x$, $x = 0.5-2$ ат. % и плёнок состава $Ni_{47.3}Mn_{30.6}Ga_{22.1}$ и $Ni_{49.7}Fe_{17.4}Ga_{28.7}Co_{4.2}$ вблизи магнитных фазовых переходов. Для достижения описанной цели были поставлены следующие задачи.

1. Изучение эволюции магнитоструктурного фазового перехода в сплавах $Ni_{50}Mn_{35}In_{15-x}B_x$, $x = 0.5-2$ ат. % с последующим определением магнитотранспортных характеристик стабильных фаз и особенностей перехода между ними.
2. Исследование магнитотранспортных свойств (магнитосопротивление и эффект Холла) плёнок $Ni_{47.3}Mn_{30.6}Ga_{22.1}$ и $Ni_{49.7}Fe_{17.4}Ga_{28.7}Co_{4.2}$.
3. Создание новых методик для определения коэффициентов Холла для случаев слабомагнитного состояния и присутствия нескольких магнитных вкладов в эффект Холла.

Положения, выносимые на защиту

1. Коэффициент аномального эффекта Холла в сплавах $Ni_{50}Mn_{35}In_{15-x}B_x$, $x = 0.5-2$ ат. %, $Ni_{47}Mn_{30}Ga_{23}$, $Ni_{49}BiMn_{35}In_{15}$, $Ni_{50}Fe_{17}Ga_{28}Co_4$, испытывающих мартенситный переход, совмещённый с магнитным фазовым переходом, описывается связью с электрическим сопротивлением, отличной от характерной для однородных ферромагнетиков вследствие изменения электронной структуры, антиферромагнитных корреляций, и может зависеть от величины магнитного поля.
2. Вблизи мартенситного перехода в сплавах $Ni_{50}Mn_{35}In_{15-x}B_x$, $x = 0.5-2$ ат. %, $Ni_{47}Mn_{30}Ga_{23}$, $Ni_{49}BiMn_{35}In_{15}$ коэффициент нормального эффекта Холла изменяет знак, что свидетельствует о смене основных носителей тока, связанной с перестройкой энергетического спектра.
3. В отличие от намагниченности и электрического сопротивления магнитосопротивление является эффектом, восприимчивым к предмартенситным и межмартенситным переходам, в исследованном сплаве $Ni_{50}Fe_{17}Ga_{28}Co_4$.
4. Выше температуры перехода в парамагнитное состояние в плёнке $Ni_{47}Mn_{30}Ga_{23}$ и объёмном образце $Ni_{49}BiMn_{35}In_{15}$ обнаружен фазовый структурный переход между двумя слабомагнитными состояниями, более высокотемпературное из которых обладает признаками структурной фазы, наблюдаемой при криогенных температурах.
5. В ферромагнитной мартенситной фазе сплавов $Ni_{50}Mn_{35}In_{15-x}B_x$, $x = 0.5-2$ ат. % электрическое сопротивление не подчиняется корреляции Муиджи: зависимость электрического сопротивления от температуры является возрастающей, если величина электрического сопротивления при низких температурах превышает 150–180 мкОм·см, и убывающей, если величина электрического сопротивления ниже критического значения 150 мкОм·см.

Научная новизна

Научная новизна работы определяется выбранными объектами исследования, новыми физическими результатами, полученных при измерении эффекта Холла, магнитных и магнитотранспортных свойств сплавов $NiMnInB$, $NiMnGa$ и $NiFeGaCo$, их сопоставлением, а также применением новых методик.

Научная и практическая значимость работы

Результаты исследования магнитотранспортных свойств четверных сплавов $Ni_{50}Mn_{35}In_{15-x}B_x$, $x = 0.5-2$ ат. % продемонстрировали значительное различие между коэффициентами эффекта Холла низкотемпературной и высокотемпературной структурными фаз. Обнаружен температурный рост коэффициента аномального эффекта Холла при приближении к магнито-структурному переходу, связанный с изменением в плотности состояний вблизи уровня Ферми. Полученные результаты коррелируют с данными для других сплавов на основе $NiMnIn$, а ряд сделанных для сплава $NiMnInB$ выводов может быть обобщён на другие сплавы для объяснения наблюдаемых в них особенностей.

Исследование магнитосопротивления и эффекта Холла образцов на основе $NiMnGa$ и $NiFeGaCo$ совместно с разработанными узкоспециализированными методиками обработки результатов продемонстрировали значимость применения этих исследований при изучении магнитных фазовых переходов. Оба эффекта позволили выделить особенности, скрытые для других методик изучения, например, магнитометрии, в частности при переходе между двумя слабомагнитными состояниями. Разработанные и представленные в диссертации методики могут быть использованы при выполнении будущих исследований.

Достоверность и обоснованность результатов

Результаты, представленные в диссертации, получены в экспериментах, проведённых на современном оборудовании с применением статистических методов обработки. Достоверность полученных результатов обеспечивалась современными экспериментальными методиками, взаимодополняющими друг друга и воспроизводимостью полученных результатов. Результаты диссертационной работы опубликованы в высокорейтинговых международных и отечественных рецензируемых журналах и прошли апробацию на специализированных международных конференциях.

Апробация работы

Основные результаты работы были представлены в виде 7 докладов (устные и стендовые) на Всероссийских и международных конференциях, тезисы которых опубликованы в соответствующих сборниках. По результатам работы были опубликованы 7 научных статей в ведущих российских и международных журналах. Разработанные методики легли в основу учебного пособия. Все указанные публикации соответствуют теме научно-квалификационной работы, а их список приведён в конце работы. Научно-квалификационная работа соответствует специальности 01.03.12(01.04.11) — физика магнитных явлений.

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в работе, кроме структурных исследований и определения плотности состояний энергетических уровней электронов, получены лично автором текущей работы. Сбор и анализ литературных данных проведены автором самостоятельно. Автор участвовал в подготовке научных публикаций и апробации результатов.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и библиографического списка, включающего 87 наименований. Диссертация содержит 113 страниц печатного текста, включая 41 рисунок и 3 таблицы.

Основное содержание работы

Во **введении** раскрывается актуальность выбранной темы диссертации, задачи и цели исследования, аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены апробации работы и выносимые на защиту научные положения, сведения о структуре диссертации, личном вкладе автора и публикации по теме работы.

Первая глава содержит сведения о теоретическом описании исследуемых гальваномагнитных явлений и обзор публикаций, посвящённых рассмотрению магнитотранспортных свойств материалов.

В контексте диссертации электрическое сопротивление рассматривается в качестве базового свойства материала для последующих исследований более сложных гальваномагнитных явлений.

Магнитосопротивление определено как относительное изменение электрического сопротивления при приложении магнитного поля по формуле:

$$MR = \frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\rho(H \neq 0) - \rho(H = 0)}{\rho(H = 0)}, \quad (1)$$

где $\rho(H)$ — величина электрического сопротивления в магнитном поле напряжённостью H .

В простейшем случае магнитосопротивление является следствием действия силы Лоренца на движущийся заряд в проводнике во внешнем магнитном поле. В ферромагнетиках также появляется вклад в магнитосопротивление от спин-орбитального взаимодействия, зависящий от взаимной ориентации силы тока и направления намагниченности.

Рассмотрены примеры, при которых достигаются значительные величины магнитосопротивления: в сложных многослойных структурах наблюдаются гигантские величины магнитосопротивления, превосходящие 100% [2], также достижение значительных величин магнитосопротивления возможно при наличии структурного перехода, который может быть индуцирован магнитным полем [15].

Отмечено, что исследования магнитосопротивления необходимы для выбора эффективных материалов в качестве основы для магниторезистивной

оперативной памяти, обладающей рядом преимуществ перед широко используемой динамической оперативной памятью.

Последним рассмотренным в первой главе гальваномагнитным свойством является эффект Холла — явление возникновения поперечной разности потенциалов при помещении проводника во внешнее магнитное поле. Представлено математическое описание и приведена основная формула для сопротивления Холла (ρ_{Hall}) [13]:

$$\rho_{Hall} = R_0 B + R_S M, \quad (2)$$

где R_0 — коэффициент нормального эффекта Холла (классическая зависимость, определяющая плотность эффективных носителей заряда, M — намагниченность образца, R_S — коэффициент аномального эффекта Холла.

В выражении (2) также может быть введён дополнительный член, соответствующий вкладу от топологического или антиферромагнитного эффектов Холла.

В конце первой главы содержится дополнительная информация о магнитокалорическом эффекте — явлении изменения температуры материала при адиабатическом намагничивании — и возможностях, которые он представляет при изучении фазовых магнитных переходов. Так как магнитокалорический эффект обладает ярко выраженными экстремумами вблизи температур магнитных переходов, то его использование позволяет проводить эффективную оценку качественных и количественных свойств перехода.

Вторая глава посвящена описанию исследованных образцов, экспериментальных установок и использованных методик обработки экспериментальных результатов. В рамках исследования были отобраны объёмные образцы четверных сплавов $Ni_{50}Mn_{35}In_{15-x}B_x$, $x = 0.5-2$ ат. % и $Ni_{49}BiMn_{35}In_{15}$ и плёнки с составом $Ni_{47.3}Mn_{30.6}Ga_{22.1}$ и $Ni_{49.7}Fe_{17.4}Ga_{28.7}Co_{4.2}$. Объёмные образцы были изготовлены методом дуговой плавки в атмосфере аргона из высокочистых материалов в лаборатории университета Южного Иллинойса в США, а плёнки — методом магнетронного распыления в университете страны Басков в Испании. Аттестация всех образцов проводилась с помощью рентгеноструктурного анализа в лабораториях по месту изготовления.

Выбранные образцы представляют вариации составов $Ni_{50}Mn_{35}In_{15}$ и Ni_2MnGa , которые являются хорошо известными сплавами, в которых наблюдается магнитоструктурный переход, обеспечивающий проявление эффектов памяти формы, гигантского магнитосопротивления, магнитокалорического эффекта и многих других явлений [16, 17]. Особенности, связанные с магнитотранспортными свойствами, в частности с эффектом Холла,

остаются менее изученными. Наибольший интерес представляют области, где наблюдаются магнитные переходы.

Измерение магнитных свойств образцов проводились с помощью вибрационного магнитометра фирмы LakeShore модели VSM 7407 в диапазоне магнитных полей до 16 кЭ и температур от 80 до 400 К. Исследования поведения намагниченности с изменением температуры проводились в режимах нагрева из размагниченного состояния с последующим циклом охлаждения и нагрева для точного определения температур магнитоструктурных переходов.

Для уточнения характеристик переходов для серии образцов $Ni_{50}Mn_{35}In_{15-x}B_x$, $x = 0.5-2$ ат. % были проведены исследования магнитокалорического эффекта на установке MagEq MMS 801, позволяющей адиабатически создавать магнитное поле величиной до 18 кЭ с помощью системы подвижных постоянных магнитов.

Для исследования электрического сопротивления и гальваномагнитных свойств образцов, описанных в диссертации, была использована установка «Кинетика», позволяющая проводить одновременные измерения магнитосопротивления и эффекта Холла в широком диапазоне температур (80–415 К) и в магнитных полях свыше 20 кЭ.

Высокая точность стабилизации температур и определения магнитных и магнитотранспортных характеристик исследуемых образцов на всех установках достигалась с помощью использования современного измерительного оборудования, методик ведения эксперимента и статистических методов.

Во второй главе также приведено описание методик, использованных при обработке результатов измерений, в частности способы разделения вкладов нормального и аномального эффектов Холла. Предложена методика разделения вкладов с помощью численных методов, разработанная автором специально для исследованных образцов.

В **третьей главе** приведены результаты исследования магнитных и магнитотранспортных свойств серии образцов $Ni_{50}Mn_{35}In_{15-x}B_x$, $x = 0.5-2$ ат. %. Проведено исследование магнитных свойств всех образцов серии, после чего образцы были изучены с помощью магнитокалорического эффекта для определения температур перехода и качественной оценки энергетических характеристик переходов. На основе полученных результатов измерений были отобраны два образца с составами $Ni_{50}Mn_{35}In_{14.25}B_{0.75}$ и $Ni_{50}Mn_{35}In_{14.5}B_{0.5}$ для последующего изучения их магнитотранспортных свойств.

Для образца с содержанием бора 0.75 ат. % была обнаружена зависимость

намагниченности от температуры, свидетельствующая о наличии обширных диапазонов существования стабильных ферромагнитных низкотемпературной и высокотемпературной структурных фаз, что позволило изучить особенности обеих фаз отдельно.

Продemonстрировано, что обе структурные фазы обладают значительно отличающимися характеристиками: намагниченность насыщения, удельное электрическое сопротивление и коэффициенты эффектов Холла. Разница в величине проводимости обеих фаз также привела к значительному наблюдаемому магнитосопротивлению, превышающему 10% при приложении магнитного поля величиной 20 кЭ.

В третьей главе проведено сопоставление результатов измерения зависимостей намагниченности и эффекта Холла от величины магнитного поля $Ni_{50}Mn_{35}In_{14.25}B_{0.75}$ и $Ni_{50}Mn_{35}In_{14.5}B_{0.5}$ и использованы новые методики обработки результатов с целью разделения коэффициентов эффекта Холла. Показано, что коэффициент нормального эффекта Холла меняет знак при магнитоструктурном переходе, что указывает на смену эффективного носителя заряда при превращении.

Коэффициент аномального эффекта Холла, температурная зависимость которого представлена на рис. 1, претерпел значительный, ранее не наблюдавшийся на данном классе материалов, скачок при магнитоструктурном переходе. Указано, что подобная особенность поведения может быть связана с влиянием бора, как элемента с малым атомарным радиусом, облегчающим протекание значительных изменений структуры при переходах. Также отмечается, что использование точного численного метода разделения коэффициентов увеличивает различие между коэффициентами эффекта Холла двух фаз.

Вторым образцом для исследования магнитортранспортных свойств в третьей главе является сплав $Ni_{50}Mn_{35}In_{14.5}B_{0.5}$. Изучение магнитокалорических свойств образца показало максимальную величину эффекта среди всей серии образцов при магнитоструктурном переходе, то есть образец является наиболее интересным для изучения особенностей переходов.

Для образца с содержанием бора 0.5 ат. % были определены коэффициенты нормального и аномального эффекта Холла, которые отличались для высокотемпературной и низкотемпературной фаз также как и для предыдущего образца. Отмечено, что в окрестностях магнитоструктурного перехода наблюдаются экстремальные зависимости коэффициентов Холла со значительным увеличением стандартного отклонения используемых численных методов, что связано с нестабильностью состояния фазового перехода.

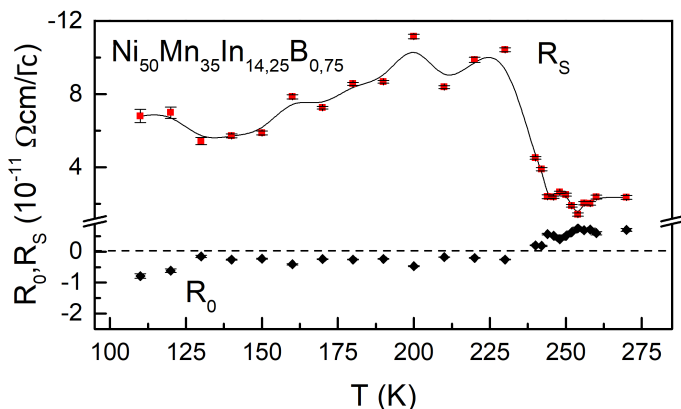


Рис. 1. Температурные зависимости коэффициентов нормального (R_0) и аномального (R_S) эффекта Холла сплава $Ni_{50}Mn_{35}In_{14.25}B_{0.75}$.

При высоких температурах, выше температуры перехода в парамагнитное состояние сплава $Ni_{50}Mn_{35}In_{14.5}B_{0.5}$, было продемонстрировано наличие зависимости величины коэффициента аномального эффекта Холла от температуры.

Для исследованных образцов был отмечен температурный рост коэффициента аномального эффекта Холла в низкотемпературной фазе при приближении к магнитоструктурному переходу. Причины данного поведения связываются с изменениями в электронном заполнении энергетических уровней d-подзоны при приближении к магнитному переходу.

При исследовании зависимости электрического сопротивления от температуры образцов $Ni_{50}Mn_{35}In_{14.25}B_{0.75}$ и $Ni_{50}Mn_{35}In_{14.5}B_{0.5}$ было выявлено отклонение температурных зависимостей от правила Муиджи: вопреки критерию образец с высоким электрическим сопротивлением обладает убывающей температурной зависимостью электросопротивления в низкотемпературной структурной фазе, а образец с электрическим сопротивлением выше критического — возрастающей.

Четвёртая глава посвящена изучению магнитных и магнитотранспортных свойств плёнки $Ni_{47.3}Mn_{30.6}Ga_{22.1}$. Исследования температурных и полевых зависимостей намагниченности материала позволили установить наличие магнитоструктурного перехода, а также признаки остаточной низкотемпературной структурной фазы в области высоких температур, выше температуры перехода в парамагнитное состояние. Исследование электрическо-

го сопротивления также подтвердило наличие фазового перехода при высоких температурах, выше температуры Кюри.

В качестве результатов исследования эффекта Холла в диссертации представлены полевые зависимости сопротивления Холла при различных температурах для областей низкотемпературной структурной фазы, высокотемпературной и области перехода (рис. 2). Зависимости сопротивления Холла от величины магнитного поля для высокотемпературной фазы представляют характерные для ферромагнетиков кривые, а в низкотемпературной области эффект Холла проявляет немонотонную зависимость от магнитного поля, что является нетипичным поведением для ферромагнетика.

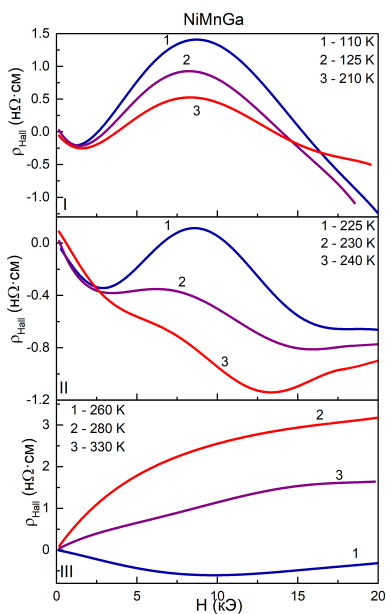


Рис. 2. Зависимости приведённого сопротивления Холла ρ_{Hall} $Ni_{47.3}Mn_{30.6}Ga_{22.1}$ от величины магнитного поля (H) при различных температурах для состояний: I — низкотемпературное состояние, II — область магнитоструктурного перехода, III — высокотемпературное сильномагнитное состояние.

Ввиду немонотонного поведения эффекта Холла при монотонном росте намагниченности от величины магнитного поля стандартные методики опре-

деления коэффициентов Холла не применимы, поэтому в работе использовались численные методы аппроксимации результатов в ограниченных диапазонах магнитных полей, что позволило разделить вклады от нормального и аномального эффектов Холла в выделенных интервалах магнитных полей. При этом коэффициент аномального эффекта Холла оказался значительно зависящим от выбора диапазона внешних магнитных полей. Коэффициент нормального эффекта Холла — в меньшей степени.

Определение коэффициентов эффекта Холла позволило экстраполировать результаты с помощью выражения (2) на весь диапазон магнитных полей и выделить вклад, определяющий особенность немонотонного поведения эффекта Холла. Результаты выделения вклада представлены на рис. 3. Полученный в результате выделения вклад ограничивается диапазоном малых магнитных полей и растёт по абсолютной величине с уменьшением температуры.

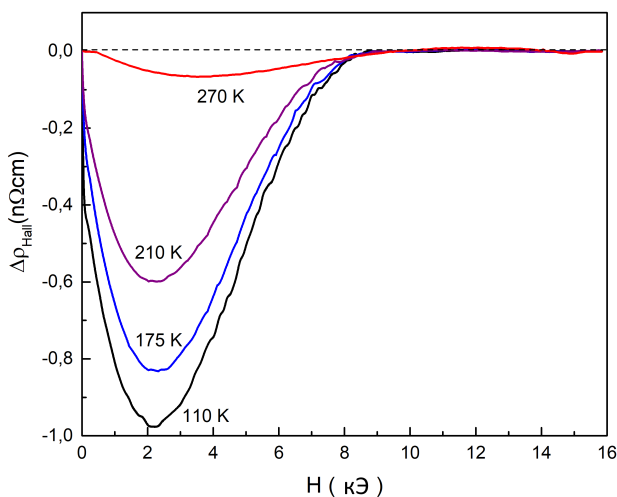


Рис. 3. Разность экспериментальной зависимости сопротивления Холла ($\Delta\rho_{Hall}$) от величины магнитного поля (H) и экстраполяции из высоких магнитных полей.

Для объяснения природы наблюдаемого явления были предложены несколько гипотез, среди которых рассмотрены вклад от скирмионов, обеспечивающих топологический эффект Холла, однако их наличие в материале представляется маловероятным ввиду необходимости магнитной анизотропии,

а величины эффекта отличаются более чем на порядок от представленных в литературе для скирмионного вклада. Другой, более вероятной, гипотезой является наличие вклада от неколлинеарных антиферромагнитных структур, которые могут существовать в сплавах на основе $Ni - Mn$.

В **пятой главе** представлены результаты экспериментальных исследований магнитных и магнитотранспортных свойств плёнки состава $Ni_{49.7}Fe_{17.4}Ga_{28.7}Co_{4.2}$. В результате исследования зависимостей намагниченности от температуры и величины магнитного поля явных признаков магнитоструктурного перехода обнаружено не было.

Температурная зависимость электрического сопротивления также не продемонстрировала особенностей поведения, характерных для магнито-структурных фазовых переходов. Однако на температурной зависимости магнитосопротивления, изображённой на рис. 4, был выявлен ярко выраженный максимум вблизи температуры 225 К.

Зависимости сопротивления Холла от величины магнитного поля для образца $NiFeGaCo$, типичные для традиционного ферромагнетика, позволили определить коэффициенты нормального и аномального эффекта Холла. Оба коэффициента обладают возрастающей зависимостью от температуры, однако при температуре, соответствующей максимуму магнитосопротивления, было отмечено возрастание вычислительного отклонения и возрастания в математическом смысле неустойчивости модели, что косвенно свидетельствует о наличии неравновесного термодинамического состояния, то есть области фазового перехода.

По полученным результатам магнитосопротивления и косвенно по результатам обработки эффекта Холла в работе сделано заключение о наличии скрытого фазового магнитного перехода в образце $Ni_{49.7}Fe_{17.4}Ga_{28.7}Co_{4.2}$, детектирование которого с помощью магнитотранспортных методов (магнитосопротивление и эффект Холла) обладает большей чувствительностью, чем исследования намагниченности или электрического сопротивления.

Шестая глава диссертационной работы посвящена исследованию объёмного образца $Ni_{49}BiMn_{35}In_{15}$. С этой целью были проведены температурные и полевые исследования намагниченности, электро- и магнитосопротивления и эффекта Холла.

В результате исследований намагниченности было установлено наличие магнитоструктурного фазового перехода, окончание которого происходит за пределами рабочего диапазона температур установки, ниже 80 К.

При приложении магнитного поля величиной 5 кЭ при температуре 190 К был зафиксирован магнитоструктурный переход, индуцированный магнитным полем. Зависимости намагниченности от величины магнитного поля в

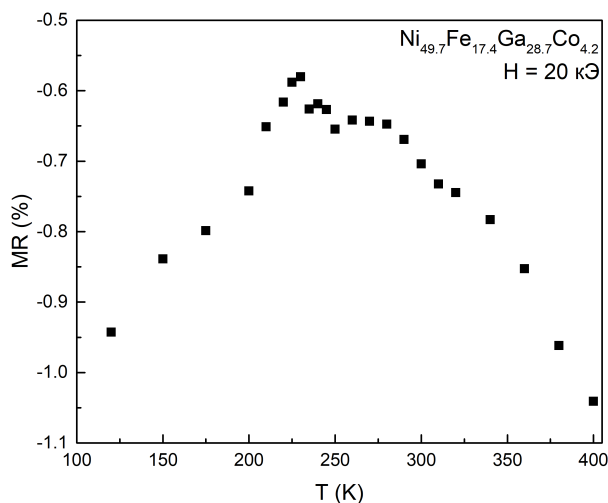


Рис. 4. Температурная зависимость магнитосопротивления MR $NiFeGaCo$ в магнитном поле 20 кЭ.

отдалении от области магнитоструктурного перехода проявляют типичное поведение для ферромагнетиков.

Результаты исследования электрического сопротивления продемонстрировали растущие с температурой зависимости для обеих структурных фаз. Величины электросопротивления низкотемпературного состояния значительно превышают величины высокотемпературного. Переход между ними осуществляется с температурным гистерезисом в области температур перехода, совпадающей с полученной из исследований намагниченности.

В работе продемонстрированы результаты исследования зависимости магнитосопротивления от температуры, которая проявляет экстремумы вблизи установленных в предыдущих экспериментах температур магнитоструктурного перехода и температуры Кюри высокотемпературной фазы.

Результаты исследования зависимостей сопротивления Холла от величины магнитного поля при различных температурах представлены на рис. 5. Зависимости эффекта Холла сильномагнитного состояния высокотемпературной структурной фазы представляют типичные для ферромагнетика за-

висимости, однако в области низких температур результаты исследования сопротивления Холла от величины внешнего магнитного поля, также как и в случае с образцом $NiMnGa$, показали немонотонную зависимость наблюдаемого эффекта.

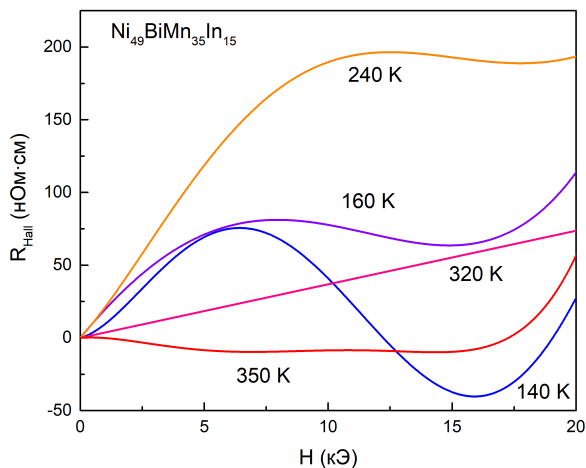


Рис. 5. Зависимости эффекта Холла (R_{Hall}) от величины магнитного поля (H) сплава $NiBiMnIn$ при различных температурах.

Немонотонная особенность поведения эффекта Холла в случае с образцом $NiBiMnIn$ находится в области высоких магнитных полей, поэтому возникновение аномалии в результате действия скирмионов не представляется возможным. Влияние антиферромагнитных взаимодействий потребовало бы также наличия полноценных антиферромагнитных структур для смещения эффекта в область более высоких полей — маловероятное, но возможное состояние структуры.

В высокотемпературной области, выше температуры Кюри, обнаружены нелинейные зависимости эффекта Холла, обладающие признаками низкотемпературной фазы. Полученные в результате обработки по отдельным диапазонам магнитных полей коэффициенты Холла также указывают на возможность наличия связи между низкотемпературной структурной фазой и состоянием выше температуры Кюри.

Основные результаты и выводы работы

1. Исследованы магнитные и магнитоструктурные свойства сплавов $Ni_{50}Mn_{35}In_{15-x}B_x$, $x = 0.5-2$ ат. % в магнитном поле до 20 кЭ в интервале температур 80–400 К. В области температур 250–340 К для всех сплавов обнаружен магнитоструктурный переход. Определены коэффициенты эффекта Холла сплавов $Ni_{50}Mn_{35}In_{14.25}B_{0.75}$ и $Ni_{50}Mn_{35}In_{14.5}B_{0.5}$ во всём изученном диапазоне температур.
2. Обнаружена смена знака эффективного носителей тока при магнито-структурном фазовом переходе в сплавах $Ni_{50}Mn_{35}In_{14.25}B_{0.75}$ и $Ni_{50}Mn_{35}In_{14.5}B_{0.5}$. Выявлен рост коэффициента аномального эффекта Холла при приближении к магнитоструктурному переходу, объяснённое изменением плотности электронных d-состояний. Обнаружено различие в величине эффекта Холла для низкотемпературной и высокотемпературной фаз.
3. В низкотемпературной фазе $Ni_{47.3}Mn_{30.6}Ga_{22.1}$ и $Ni_{49}BiMn_{35}In_{15}$ обнаружена немонотонная зависимость эффекта Холла от внешнего магнитного поля и установлена полевая зависимость коэффициента аномального эффекта Холла. В высокотемпературной области, выше температуры Кюри, обнаружен структурный переход между слабомагнитными состояниями, более высокотемпературное из которых проявляет свойства структурного состояния, наблюдаемого при криогенных температурах.
4. В результате исследования магнитных и магнитотранспортных свойств $Ni_{49.7}Fe_{17.4}Ga_{28.7}Co_{4.2}$ была продемонстрирована возможность обнаружения скрытых магнитоструктурных переходов со слабоизменяющейся намагниченностью с помощью изучения особенностей магнитосопротивления и эффекта Холла.

Список публикаций по теме работы

Статьи в журналах, рецензируемых Scopus и Web of Science

1. Magnetic, transport, and magnetocaloric properties of boron doped Ni-Mn-In alloys / S. Pandey, A. Quetz, I. D. Rodionov, A. Aryal, **M. I. Blinov**, I. S. Titov, V. N. Prudnikov, A. B. Granovsky, I. Dubenko, S. Stadler, N. Ali // **Journal of Applied Physics**. — 2015. — 117. — 183905–6. (Импакт-фактор: 2.389)
2. Магнитокалорический эффект в сплаве Гейслера Ni₅₀Mn₃₅In₁₅ в слабых и сильных полях / И. Д. Родионов, Ю. С. Кошкидько, Я. Цвик, А. Кюйтц, С. Пандей, А. Арял, И. С. Дубенко, Ш. Стадлер, Н. Али, И. С. Титов, **М. И. Блиннов**, М. В. Прудникова, В. Н. Прудников, Э. Ладеранта, А. Б. Грановский // **Письма в «Журнал экспериментальной и теоретической физики»**. — 2015. — 101. — 6. — 417–421. (Импакт-фактор: 1.532)
3. Peculiarities of giant magnetocaloric effect in Ni₅₀Mn₃₅In₁₅ alloys in the vicinity of martensitic transition / I. D. Rodionov, Y. S. Koshkid'ko, J. Cwik, A. Quetz, S. Pandey, A. Aryal, I. S. Dubenko, S. Stadler, N. Ali, I. S. Titov, **M. Blinov**, V. N. Prudnikov, E. Lahderanta, I. Zakharchuk, A. B. Granovsky // **Physics Procedia**. — 2015. — 75. — 1353–1359. (Импакт-фактор: 0.75)
4. Giant field-induced adiabatic temperature changes in In-based off-stoichiometric Heusler alloys / S. Pandey, A. Quetz, A. Aryal, I. S. Dubenko, **M. Blinov**, I. Rodionov, V. Prudnikov, D. Mazumdar, A. B. Granovsky, S. Stadler, N. Ali // **Journal of Applied Physics**. — 2017. — 121. — 133901. (Импакт-фактор: 2.389)
5. Effects of magnetic and structural phase transitions on the normal and anomalous Hall effects in Ni-Mn-In-B Heusler alloys / **M. Blinov**, A. Aryal, S. Pandey, I. Dubenko, S. Talapatra, V. Prudnikov, E. Lähderanta, S. Stadler, V. Buchelnikov, V. Sokolovskiy, M. Zagrebin, A. Granovsky, N. Ali // **Physical Review B**. — 2020. — 101. — 9. — 094423. (Импакт-фактор: 4.036)
6. Anomalous Hall effect in Ni_{47.3}Mn_{30.6}Ga_{22.1}/MgO(001) thin films / **M. I. Blinov**, V. Chernenko, V. N. Prudnikov, I. R. Aseguinolaza, J. M. Barandiaran, E. Lahderanta, A. B. Granovsky // **Physical Review B**. — 2020. — 102. — 6. — 064413. (Импакт-фактор: 4.036)

7. Магнитотранспортные свойства тонких пленок $\text{Ni}_{49.7}\text{Fe}_{17.4}\text{Co}_{4.2}\text{Ga}_{28.7}$ / **М. И. Блинов**, В. А. Черненко, В. Н. Прудников, И. Р. Асегуинолаза, Ж. М. Барандиаран, Э. Лахдеранта, В. В. Ховайло, А. Б. Грановский // **Журнал экспериментальной и теоретической физики**. — 2021. — 159. — 3. — 546–552. (Импакт-фактор: 1.290)

Тезисы докладов конференций

1. Magnetocaloric effect in quaternary Heusler Alloys Ni-Mn-In-Z (Z= Co, Cu, Al, B, Cr, Si) / V. N. Prudnikov, I. D. Rodionov, I. S. Titov, **M. I. Blinov**, A. I. Novikov, E. A. Gan'shina, A. Sokolov, I. Zakharchuk, E. Lähderanta, A. B. Granovsky // **Book of abstracts of the 20th International Conference on Magnetism**. — Spain Barcelona, 2015. — Th.C-P40
2. Peculiarities of giant magnetocaloric effect in $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{35}\text{In}_{15}$ alloys in the vicinity of martensitic transition / I. D. Rodionov, Yu. S. Koshkid'ko, J. Cwik, A. Quetz, S. Pandey, A. Aryal, I. S. Dubenko, S. Stadler, N. Ali, I. S. Titov, **M. Blinov**, V. N. Prudnikov, E. Lähderanta, I. Zakharchuk, A. B. Granovsky // **Book of abstracts of the 20th International Conference on Magnetism**. — Spain Barcelona, 2015. — Mo.L-P03
3. Особенности магнитокалорического эффекта в сплавах Гейслера, допированных бором / **М.И. Блинов** // **Конференция «Ломоносов - 2015»**. — Россия Москва. — 2015.
4. Изменение магнитной энтропии в сплавах Гейслера, допированных бором вблизи фазовых переходов / **М.И. Блинов** // **Конференция «Ломоносов - 2016»**. — Россия Москва. — 2016.
5. Инверсный магнитокалорический эффект в сплавах Гейслера на основе Ni-Mn-In / А.Б. Грановский, Ю.С. Кошкидко, J. Cwik, В.Н. Прудников, Е.А. Ганьшина, И.Д. Родионов, **М.И. Блинов** // **Материалы 21-го международного симпозиума «Нанозлектроника»**, Нижний Новгород, Россия. — 2017.
6. Инверсный магнитокалорический эффект и магнитоструктурный мартенситный переход в сплавах Гейслера на основе Ni-Mn-In / И. Д. Родионов, **М. И. Блинов**, Ю. С. Кошкидко, В. Н. Прудников, М. Н. Прудникова, Е. А. Ганьшина, А. Б. Грановский // **Тезисы докладов Восемнадцатой ежегодной научной конференции ИТПЭ РАН**. — Россия, Москва, 2017. — 1. — 165–166.

7. Магнитные свойства метаманитного сплава Гейслера $Ni_{49}BiMn_{35}In_{15}$ / **М. И. Блинов**, М. В. Прудникова, В. Н. Прудников и др. // **Сборник трудов НМММ XXIV**. — Россия, Москва, 2021. — 7-1–7-3.

Учебное пособие

Экспериментальные методики «Лаборатории магнитных измерений» / **М. И. Блинов** // Отдел оперативной печати физического факультета МГУ. — 2021. — 124 страницы.

Список использованных источников

- [1] Кинетические явления в неупорядоченных ферромагнитных сплавах // А. В. Ведяев, А. Б. Грановский, О. А. Котельникова / Издательство Московского университета. –1992.
- [2] Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices / M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, et al. // Phys. Rev. Lett. –1988. –61. –21 –2472–2475.
- [3] Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange / M. N. Binasch, et al. // Phys. Rev. B. –1989. –39. –7. –4828–4830.
- [4] Current-driven excitation of magnetic multilayers / J. Slonczewski // JMMM. –1996. –159. –1/2. –L1–L7.
- [5] Currents and torques in metallic magnetic multilayers / Slonczewski // JMMM. –2002. –247. –3. –324–338.
- [6] Review on spintronics: Principles and device applications / A. Hirohata, K. Yamada, Y. Nakatani, et al. // JMMM. –2020. –509. –1. –166711.
- [7] Ферромагнитки с памятью формы / А. Н. Васильев, В. Д. Бучельников, Т. Такаги и др. // УФН. –2003. –173. –6. –577–608.
- [8] Basics and prospective of magnetic Heusler compounds / C. Felser, L. Wollmann, S. Chadov, et al. // APL Materials. –2015. –3. –041518.
- [9] Observation of the Spin Hall Effect in Semiconductors / Y. K. Kato // Science. –2004. –306. –5703. –1910–1913.
- [10] Experimental Observation of the Spin-Hall Effect in a Two-Dimensional Spin-Orbit Coupled Semiconductor System / J. Wunderlich, et al. // Phys. Rev. Lett. –2005. –94. –4. –7204.
- [11] Topological Hall Effect in a Topological Insulator Interfaced with a Magnetic Insulator / P. Li, J. Ding, S. S.-L. Zhang, et al. // Nano Lett. –2021. –21. –1. –84–90.

- [12] Large anomalous Hall effect in a non-collinear antiferromagnet at room temperature / S. Nakatsuji, N. Kiyohara, T. Higo // *Nature*. – 2015. – 527. – 212–215.
- [13] Anomalous Hall effect / N. Nagaosa, J. Sinova, S. Onoda, et al. // *Reviews of Modern Physics*. – 2010. – 82. – 1539–1592.
- [14] Quantum anomalous Hall effect in time-reversal-symmetry breaking topological insulators / C.-Z. Chang, M. Li // *J. Phys.: Condens. Matter*. 2016. – 28. – 123002.
- [15] Large magnetoresistance in Ni₅₀Mn₃₄In₁₆ alloy / V. K. Sharma, et al. // *APL*. – 2006. – 89. – 2225093.
- [16] Shape memory alloys / C. M. Wayman // *MRS Bulletin*. – 1993. – 18. – 4. – 49–56.
- [17] Magnetic, Magnetocaloric, Magnetotransport, and Magneto-optical Properties of Ni–Mn–In-Based Heusler Alloys: Bulk, Ribbons, and Microwires / I. Dubenko et al. // *Novel Functional Magnetic Materials Fundamentals and Applications* – Springer International Publishing. – 2016. – 41–82.