ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Кудрина Алексея Владимировича «**Ферромагнитные полупроводниковые структуры на основе слоев $A^{III}B^{V}$, легированных атомами Mn и Fe**», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.11. – «Физика полупроводников»

Рецензируемая работа Кудрина А.В. посвящена исследованиям и разработкам в области полупроводниковой спинтроники, которая занимает значительное место в современной физике полупроводников. Актуальность темы исследований обуславливается как практическим применением материалов и структур спинтроники, связанным с созданием новых полупроводниковых приборов со спин-зависимыми эффектами, так и получением новых фундаментальных знаний в области физики твердого тела и физики полупроводников, в частности. Хотя исследования в области магнитных полупроводников на базе материалов $A^{III}B^{V}$ проводятся с начала 90-х годов XX века, в настоящее время не достигнуто результатов, на основе которых можно было бы создавать практически применимые приборы полупроводниковой спинтроники. Для практического использования магнитных полупроводников необходимо создание материалов этого класса с температурой Кюри равной или превышающей комнатную.

Целью работы Кудрина А.В. является расширение существующих представлений о ферромагнитном обменном взаимодействии в магнитных структурах на основе материалов $A^{III}B^{V}$, а также синтез новых магнитных полупроводников с температурой Кюри, превышающей комнатную. Заявленные цели и полученные результаты диссертационной работы Кудрина А.В. однозначно позволяют считать её актуальной.

Диссертационная работа Кудрина А.В. состоит из введения, литературного обзора, шести глав, которые представляют результаты научной работы автора, заключения и списка цитированной литературы.

Во введении представлены все необходимые пункты, такие как актуальность, цели и задачи, новизна и значимость работы, личный вклад автора, положения, выносимые на защиту.

Первая глава является обзором состояния исследований по легированию полупроводников $A^{III}B^{V}$ (InP, GaP, GaAs, AlGaAs, GaAsP, GaSb, InAs, InSb) переходными металлами, и формированию на основе таких материалов слоев магнитных полупроводников. Рассмотрены основные достижения и имеющиеся проблемы в физике и технологии магнитных полупроводников $A^{III}B^{V}$:Mn и $A^{III}B^{V}$:Fe. Кратко рассмотрены

основные механизмы ферромагнитного обменного взаимодействия в магнитных полупроводниках.

Во второй главе рассматривается задача о переносе носителей заряда в проводящем парамагнитном слое с ферромагнитными включениями. Интерес данной задаче связан с тем, что исследования магнитотранспортных свойств слоев магнитных полупроводников, в частности, измерения магнитополевых зависимостей сопротивления Холла, являются одними из основных методов исследования их свойств. Анализ зависимостей сопротивления Холла от магнитного поля позволяет выявить проявление аномального эффекта Холла и, следовательно, установить наличие преимущественной спиновой поляризации носителей заряда. В главе 2, при рассмотрении модели проводящего слоя со сферическими ферромагнитными включениями, делается вывод, что возможно возникновение гистерезисной магнитополевой зависимости сопротивления Холла, связанной с силой Лоренца, определяемой магнитным полем включений и, следовательно, не связанной с аномальным эффектом Холла. Т.е. возможно возникновение гистерезисной магнитополевой зависимости сопротивления Холла без участия спин-зависимого рассеяния носителей заряда. Предложенная модель качественно и количественно согласуется с экспериментальными результатами по исследованию эффекта Холла в парамагнитных слоях (In,Mn)As с ферромагнитными включениями MnAs. Полученные результаты позволят корректно оценивать результаты экспериментальных исследований магнитотранспортных свойств слоев магнитных полупроводников. Для этого необходимо обязательное исследование структуры и состава слоев.

В третьей главе представлены результаты исследования GaAs структур с δ-легирующим слоем Mn. Основной целью работ, представленных в данной главе, является выяснение природы ферромагнетизма в GaAs структурах с δ-слоем Mn, полученных комбинированным методом МОС-гидридной эпитаксии и лазерного распыления. Проведены экспериментальные работы по управлению каналами проводимости в таких структурах, путем создания радиационных дефектов. Облучение структур ионами He^+ приводит к проводимости преимущественно за счет носителей заряда с энергиями, соответствующими разрешенным энергетическим состояниям примесной зоны Mn. Это сопровождается значительным возрастанием измеряемой слоевой концентрации носителей заряда. Общая проводимость GaAs структур с δ-слоем Mn представлена как комбинация проводимостей по каналу, связанному с примесной зоной Mn, и каналу, связанному с валентной зоной. По результатам исследований сделан вывод, что ферромагнитные свойства рассматриваемых структур определяются обменным взаимодействием посредством носителей заряда в примесной зоне Mn. В главе 3 также представлены результаты экспериментальных

исследований GaAs структуры с δ-слоем Mn и квантовой ямой InGaAs, расположенной вблизи δ-слоя. Основой результат исследования такой структуры состоит в том, что наличие квантовой ямы не имеет определяющего влияние на ферромагнитное обменное взаимодействие, поскольку концентрация носителей заряда в квантовой яме на несколько порядков величины меньше концентрации в примесной зоне Mn,

Четвертая глава посвящена получению и исследованию слоев нового магнитного полупроводника (In,Fe)Sb. Слои (In,Fe)Sb толщиной ~ 40-80 нм были выращены методом импульсного лазерного осаждения. Исследования структуры и состава слоев (In,Fe)Sb показали, что при температурах роста 200 и 250°C слои являются эпитаксиальными и однофазными. Полученные слои (In,Fe)Sb обладают *n*-типом проводимости, хотя Fe в полупроводниках $A^{III}B^{V}$ традиционно рассматривается как акцепторная примесь. Исследования оптических свойств показали сохранение для слоев (In,Fe)Sb зонной структуры InSb, не смотря на очень высокую концентрацию атомов Fe, находящихся преимущественно в подрешетке индия.

В пятой главе представлены результаты исследования природы ферромагнетизма в слоях (In,Fe)Sb. Проведены работы по исследованию влияния концентрации и типа носителей заряда на феррмагнетизм в слоях (In,Fe)Sb. Для изменения концентрации носителей заряда использовался метод создания радиационных дефектов путем облучения слоев (In,Fe)Sb ускоренными ионами He^{+}. Радиационные точечные дефекты являются электрически активными в (In,Fe)Sb, что позволяет значительно менять концентрацию основных носителей заряда при фиксированной концентрации атомов Fe. Результаты исследований показали, что ферромагнитные свойства однофазных слоев (In,Fe)Sb устойчивы к изменению концентрации и типу носителей заряда. Это позволило заключить, что ферромагнетизм в (In,Fe)Sb не связан с механизмом косвенного обменного взаимодействия посредством носителей заряда, характерным для магнитных полупроводников $A^{III}B^{V}$:Mn.

Шестая глава посвящена получению и исследованию слоев нового магнитного полупроводника GaAs:Fe. Слои GaAs:Fe толщиной ~ 40 нм формировались на подложке *i*-GaAs методом импульсного лазерного осаждения путем распыления мишеней GaAs и Fe. Исследования структуры и состава слоев GaAs:Fe, сформированных при температурах 180 и 200°C и средней концентрацией Fe около 20 ат. %, показали, что они являются однофазными с относительно высоким кристаллическим совершенством. Особенностью слоев GaAs:Fe с очень высокой концентрацией Fe является то, что атомы Fe практически в равных количествах замещают как Ga так и As. Полученные слои являются проводящими, что связывается с переносом носителей заряда по примесной зоне Fe. Исследования

магнитотранспортных и магнито-оптических свойств показали, что слои GaAs:Fe с концентрацией Fe около 20 ат. % являются собственным ферромагнитным полупроводником с температурой Кюри превышающей комнатную. Сделано предположение, что ферромагнетизм связан с механизмом двойного *d-d* обмена Зинера.

В седьмой главе представлены данные по созданию многослойных гетероструктур на основе различных слоев магнитных полупроводников $A^{III}B^{V}$:Fe. Гетероструктуры выращивались методом импульсного лазерного распыления трех различных мишеней. Гетероструктуры с различными слоями $A^{III}B^{V}$:Fe ((In,Fe)Sb, (Ga,Fe)Sb, (InGa,Fe)Sb и (In,Fe)AsSb), выращенные при температуре 200-220°C, являлись эпитаксиальными, однофазными и обладали относительно высоким кристаллическим совершенством. Также были созданы и исследованы одиночные слои (InGa,Fe)Sb и (In,Fe)AsSb. Показано, что свойства магнитных полупроводников $A^{III}B^{V}$:Fe на основе тройных твердых растворов зависят от соотношения компонентов полупроводниковой матрицы. Так ферромагнитные свойства (In,Fe)AsSb ослабевают с увеличением соотношения As:Sb, что указывает на ферромагнитное обменное взаимодействие посредством сверхобмена через атомы Sb. В зависимости от отношения In:Ga, тип проводимости магнитного полупроводника (InGa,Fe)Sb может быть изменен с *n* на *p*.

Наиболее важными результатами работы являются следующие:

1. Выявленные особенности экспериментального проявления нелинейных зависимостей сопротивления Холла от магнитного поля в проводящих слоях с ферромагнитными включениями, необходимо принимать во внимание при анализе магнитотранспортных свойств магнитных полупроводников.

2. Экспериментально продемонстрирована возможность подавления проводимости по валентной зоне в GaAs:Mn структурах с сохранением их ферромагнитных свойств после перехода к проводимости по примесной зоне.

3. Получены новые высокотемпературные однофазные ферромагнитные полупроводники на основе материалов $A^{III}B^{V}$, сильно легированных Fe. Особенно следует отметить, что впервые получен ферромагнитный материал GaAs:Fe с температурой Кюри превышающей комнатную.

Достоверность приведенных в диссертации экспериментальных данных определена применением современных обоснованных методов исследований. В работе представлены результаты, обладающие практической ценностью. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, имеющихся в диссертации, не вызывает сомнений. Результаты работы Кудрина А.В., представленные в диссертации являются новыми. Их

новизна, научная и практическая ценность подтверждаются публикациями соискателя в рецензируемых научных журналах, среди которых можно отметить статьи в Physical Review B, Journal of Applied Physics, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Semiconductor Science and Technology, Физика и техника полупроводников.

По диссертационной работе имеется ряд замечаний:

Вопросы при изучении диссертации:

1) Главы 2 и 6

При обсуждении примесной зоны в GaAs:Mn не принимается во внимание обменное взаимодействие спинов марганца с полным моментом локализованной дырки. Примесная зона формируется именно за счет гибридных состояний 3d электронов и дырки с моментом 3/2.

При формирование примесной зоны в GáAs:Fe также не обсуждается взаимодействие спинов 3d электронов с полным моментом локализованных дырок.

2) Глава 3, стр.143

Профили распределения Mn и In на рис. 3.14 приблизительно одинаковый, но один профиль назван δ распределением, второй - профилем квантовой ямы.

3) Глава 4, стр.227:

«Дихроизм-это зависимость коэффициента поглощения света от поляризации света, зависимость коэффициента отражения от поляризации-эффект Керра»

4) Глава 5 .стр.262 и стр.278.

В структурах GaAs:Fe рассогласование параметров решетки 0,4-0,7 %. Это означает возникновение деформаций, но влияние напряжений на свойства структуры не пояснено. Спектр отражения не чувствителен к деформациям при T=300, но при более низких температурах это влияние должно быть.

5) Глава 6, стр.275

На рис. 6.12 и 6.13 приведен профиль распределения Fe в подложке арсенида галлия. Можно ли по этому рисунку оценить коэффициент диффузии Fe при T=200C и согласуется ли это с другими данными

6) Глава 5, стр.283

Не понятна фраза про электронный тип проводимости по примесной зоне, сформированной акцепторами

7) Глава 6, стр.290

Магнитный циркулярный дихроизм имеет порог при энергии кванта света порядка E_g, а есть ли влияние примесной зоны?

Сделанные замечания не уменьшают общей ценности диссертационной работы. Диссертация Кудрина А.В. «Ферромагнитные полупроводниковые структуры на основе

слоев $A^{III}B^{V}$, легированных атомами Mn и Fe» выполнена на высоком уровне, обладает внутренним единством, ее содержание и структура соответствует поставленной цели. Содержание диссертации достаточно полно отражено в реферируемых российских и иностранных журналах, а также в материалах конференций. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации. Диссертация полностью отвечает требованиям, предъявляемым к диссертациям, представленным на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, в том числе критериям II раздела Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года, № 842, а автор диссертационной работы Кудрин Алексей Владимирович заслуживает присуждения ему степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.11. – «Физика полупроводников».

Официальный оппонент:
доктор физико-математических наук
(01.04.10. Физика полупроводников),
профессор, главный научный сотрудник,
заведующий сектором теории оптических
и электрических явлений в полупроводниках
центра физики наногетероструктур
федерального государственного бюджетного
учреждения науки Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

[redacted] Аверкиев Никита Сергеевич

11 мая 2022 г.

Адрес: 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26
Тел.: + 7[redacted]2
E-mail: a[redacted]offe.ru

Подпись Аверкиева Н.С. заверяю

Ученый Секретарь ФТИ им. А.Ф. Иоффе
кандидат физико-математ[redacted] Патров М.И.
Патров М.И.