

ПАНКОВ Михаил Александрович

**ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА  
ДВУМЕРНЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ СТРУКТУР  
 $\text{GaAs}(\delta\langle\text{Mn}\rangle)/\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}/\text{GaAs}$**

01.04.07. – физика конденсированного состояния

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва - 2011 г.

Работа выполнена в НБИК-центре Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук  
Аронзон Борис Аронович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Кульбачинский Владимир Анатольевич  
кандидат физико-математических наук  
Дмитриев Алексей Иванович

Ведущая организация: ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 200\_\_ г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета, шифр Д 520.029.01 в НИЦ «Курчатовский институт» (123182, г. Москва, пл. ак. Курчатова, д.1).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
НИЦ «Курчатовский институт»

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета

А.В. Мерзляков

## Общая характеристика работы

Диссертационная работа посвящена экспериментальному исследованию электронного транспорта и магнитных свойств двумерных структур на основе разбавленных магнитных полупроводников (РМП), а именно квантовой ямы GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>(1-x)</sub>As/GaAs легированной δ-слоем Mn.

### Актуальность темы

Интерес к электронным свойствам РМП систем типа квантовых ям GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>(1-x)</sub>As/GaAs легированных δ-слоем Mn, связан как с изучением фундаментальных закономерностей магнитного упорядочения и спинзависимого дырочного транспорта в данных структурах, так и с перспективами развития спинтроники, многообещающей области микроэлектроники, в которой для передачи и хранения информации используется не только заряд, но и спин электрона. В то же время понимание и описание свойств данных структур и механизмов магнитного упорядочения в них далеки от завершения.

В основном исследования РМП проводились в объёмных образцах [1,2], а работ посвящённых изучению двумерных РМП (гетероструктуры) относительно мало, однако и в тех из них [3-5], которые были исследованы, спектр носителей заряда (в силу малой подвижности < 5 см<sup>2</sup>/Вс) оставался трёхмерным. В то же время для создания спинтронных приборов использующих электронный транспорт, необходимы структуры с управляемым двумерным каналом проводимости. С фундаментальной точки зрения интерес к объектам с двумерным спектром носителей связан с тем, что при понижении размерности ряд эффектов проявляется гораздо ярче, а многие из них просто отсутствуют в трёхмерном случае.

Существенной особенностью РМП является сильная, *естественная* разупорядоченность объектов исследований. Причиной беспорядка в низкоразмерных объектах, изготовленных на основе разбавленных магнитных полупроводниковых структур, является содержание случайно распределённых встроенных заряженных ионов Mn. Дело в том, что Mn в III-V РМП является не только магнитной примесью, но и двойственной (амбивалентной) примесью, которая проявляет как акцепторные, так и донорные свойства, в зависимости от её положения в решётке матрицы. Для обеспечения относительно высоких температур перехода в ферромагнитное спиновое упорядоченное состояние приходится использовать достаточно высокие концентрации марганца (до 10<sup>13</sup> - 10<sup>14</sup> атомов/см<sup>2</sup> Mn в δ-слое). Это приводит к большой амплитуде флуктуационного потенциала и неоднородному распределению магнитного момента. Флуктуационный потенциал и спиновое упорядочение определяет как полевые, так и температурные зависимости проводимости структуры, изучение влияния беспорядка на свойства двумерных РМП структур является актуальной задачей.

### Объекты исследования

Выбор объектов исследований не случаен, он определялся стремлением получить структуры с двумерным спектром носителей заряда и достаточно высокими температурами Кюри. На рис. 1 изображены схемы использованных структур, содержащих In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As квантовую яму шириной  $d \approx 10$  nm в GaAs матрице, которые были созданы двумя методами

cap-слой GaAs, 30-40 нм	cap-слой GaAs, 60-80 нм
δ-Mn	δ-Mn
спейсер GaAs, 3 нм	спейсер GaAs, 1-5 нм
канал InGaAs, 9-10 нм	канал InGaAs, 9-10 нм
GaAs, 15-18 нм	GaAs, 5 нм
δ-C	δ-Be
буфер GaAs, 0.4-0.5 мкм	буфер GaAs, 25 нм
подложка GaAs, (100)	подложка GaAs, (100)

а)

б)

Рис. 1 Схемы исследуемых структур: а) МОС гидридная эпитаксия, б) молекулярно лучевая эпитаксия

МОС - гидридной эпитаксией (рис.1а) и молекулярно лучевой эпитаксией (МЛЭ) (рис.1б). При использовании МОС-гидридной технологии квантовая яма и окружающие её слои GaAs (буфер, нижний и верхний спейсеры) были выращены при температуре 600 °С, тогда как Mn и покровный GaAs слои выращивались при 450 °С. Дельта слой с содержанием Mn до 10<sup>14</sup> атомов/см<sup>2</sup>, удалённый от квантовой ямы спейсером толщиной 3 - 5 нм, наносился лазерным осаждением. Для компенсации эффектов обеднения квантовой ямы со стороны

буфера был помещён также акцепторный  $\delta$  - слой С ( $2 \cdot 10^{12}$  атомов/см<sup>2</sup>), отделённый от ямы спейсером шириной около 10 нм.

При использовании метода МЛЭ квантовая яма и окружающие её слои GaAs были выращены при температуре 550-600 °С. Дельта слой с содержанием Mn  $\approx 10^{14}$  -  $10^{15}$  атомов/см<sup>2</sup>, удалённый от квантовой ямы спейсером толщина которого варьировалась в диапазоне от 1 нм до 5 нм, наносился при температуре излучателя  $T_{Mn} = 770$  °С. Для компенсации эффектов обеднения квантовой ямы со стороны буфера был помещён также акцепторный  $\delta$ -слой Be ( $10^{12}$  -  $10^{13}$  атомов/см<sup>2</sup>), отделённый от ямы спейсером шириной около 5 нм.

Для проведения электрофизических измерений были приготовлены структуры в геометрии двойного Холловского креста полной шириной 1,5 мм (ширина между Холловскими зондами – 0,5 мм) и длиной 6 мм (длина между потенциальными зондами – 4,5 мм). Длина структуры в данном случае выбиралась много большей корреляционной длины перколяционного кластера в структуре.

### **Целью работы**

Целью работы являлось экспериментальное исследование спин-зависящих эффектов в электронном транспорте GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs систем с удалённым  $\delta$ -слоем Mn путём измерений их электрофизических и магнитных свойств.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- Создана экспериментальная установка для прецизионных измерений транспортных характеристик объектов в диапазоне температур 5 – 300 К в полях до 3 Тл;
- На основе пакета LabView разработано программное обеспечение экспериментальной установки;
- Изучены зависимости магнитных и электронно-транспортных свойств структур GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs с  $\delta$ -слоем Mn от их структурных параметров, удалённости  $\delta$ -слоя Mn от квантовой ямы, «глубины» квантовой ямы (концентрации In) и содержания магнитной примеси;
- Особенное внимание было уделено изучению магнитолевых, температурных и концентрационных зависимостей эффекта Холла и магнетосопротивления. На основе полученных зависимостей выяснены основные механизмы аномального эффекта Холла в двумерных ферромагнитных полупроводниковых структурах.

### **Практическая значимость**

Практическая значимость диссертации обусловлена тем, что полученные в настоящей работе данные позволяют оценить степень перспективности использования ферромагнитных полупроводниковых структур для устройств спинтроники и степень влияния неупорядоченности в системе на характер проводимости и магнитные свойства подобных структур. Результаты работы актуальны для современной микроэлектроники еще и тем, что получены для структур на основе легко интегрируемого в технологический процесс материала – GaAs.

**Научная новизна** полученных результатов заключается в следующем:

1. Исследованы структурные, магнитные и электрофизические свойства двумерных ферромагнитных полупроводниковых структур, представляющих собой квантовую яму с удалённой от канала проводимости магнитной примесью Mn. Эти структуры отличаются, от ранее исследованных структур РМП, относительно высокими значениями подвижности и двумерным спектром энергии носителей заряда в квантовой яме;
2. Продемонстрирована возможность установления магнитного упорядочения в структурах со слоем магнитной примеси удалённой от канала проводимости;
3. Исследованы связь магнитных свойств и дырочного транспорта двумерных структур типа квантовая яма Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>As с  $\delta$ -слоями Mn со структурными характеристиками объектов;
4. Впервые вблизи температуры ферромагнитного упорядочения обнаружена смена знака аномального эффекта Холла (АЭХ) в зависимости от температуры;

5. Наблюден сдвиг магнитного гистерезиса относительно нулевого поля в структурах GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs с δ- слоем Mn;
6. Предложена качественная модель для описания обнаруженных особенностей в квантовых ямах с удаленным от неё слоем Mn. Ферромагнитное (ФМ) упорядочение в них объясняется, как косвенным обменным взаимодействием ионов марганца через носители заряда в канале проводимости, так и установлением ферромагнитного порядка в Mn – содержащем слое за счет зонного механизма ФМ упорядочения. Взаимодействие ФМ – состояния в слое приводит к спиновой поляризации носителей заряда - «дырок» в квантовой яме.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. В двумерных РМП структурах на основе GaAs, типа квантовая яма GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs с относительно высокой подвижностью носителей заряда ( $\mu \approx 2000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ) и удаленным от неё δ- слоем магнитной примеси (Mn), продемонстрировано наличие магнитного упорядочения и спиновой поляризации носителей заряда в канале проводимости;
2. Зависимость температуры магнитного упорядочения в двумерных РМП от концентрации Mn и глубины ямы  $\Delta E$  (содержания In) носит немонотонный характер, определяя вкуче с толщиной спейсера ( $d_s$ ), разделяющего квантовую яму и слой Mn, оптимальную комбинацию этих параметров ( $\approx 0.3 \text{ Мл}$ ,  $\Delta E \approx 130 \text{ меВ}$ ,  $d_s \leq 30 \text{ \AA}$ ). Аномальный эффект Холла и спиновая поляризация носителей заряда наблюдаются до температур  $\leq 80 \text{ К}$ ;
3. Аномальный эффект Холла в системе квантовая яма с удаленным от неё слоем Mn и двумерным спектром носителей заряда определяется комбинацией двух механизмов: «собственного» и механизмом с рассеянием носителей заряда типа боковых прыжков, это подтверждается согласием его величины с теоретическими расчетами и сменой знака АЭХ при изменении температуры;
4. Наличие разупорядоченности в распределении магнитной примеси ведет к образованию областей как с ферромагнитным, так и антиферромагнитным упорядочением, сопровождаемая сдвигом петли магнитного гистерезиса относительно нулевого магнитного поля;
5. Ферромагнетизм и спиновая поляризация в квантовых ямах с удаленным от неё слоем Mn являются результатом как косвенного обменного взаимодействия ионов марганца через носители заряда в канале проводимости, так и образования в центральной части слоя Mn магнитного упорядочения по механизму формирования собственного (зонного) ферромагнетизма, аналогично объемным Ga(Mn)As системам. Установление ферромагнитного порядка в этом слое сопровождается появлением квази-двумерных спин-поляризованных состояний, которые взаимодействуют с дырками квантовой ямы, приводя к их спиновой поляризации.

### **Апробация работы и публикации**

Основные результаты работы были доложены на следующих Российских и международных научных конференциях:

1. Восьмая российская конференция по физике полупроводников, 30 сентября – 5 октября 2007г., г. Екатеринбург.
2. Конференция по физике конденсированного состояния, сверхпроводимости и материаловедению. 26-30 ноября 2007г., г. Москва.
3. XXI Международная конференция «Новое в магнетизме и магнитных материалах», 28 июня – 4 июля 2009 г., г. Москва.
4. XXXV Совещание по физике низких температур (НТ-35), 29 сентября – 2 октября 2009 г., г. Черногоровка.
5. IX Российской конференции по физике полупроводников, 28 сентября – 3 октября 2009г., г. Новосибирск-Томск.
6. XIV Национальная конференция по росту кристаллов, 6 – 10 декабря 2010г., г. Москва.
7. 18 Международный симпозиум. “Наноструктуры: Физика и технология”, 20-25 июня 2011 г., г. Екатеринбург.

По теме диссертации имеется 12 публикаций в научных журналах и сборниках конференций. Список работ приведен в конце автореферата.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитированной литературы. Объем диссертации составляет 94 страницы, включая 25 рисунков и 5 таблиц.

### **Содержание работы**

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы и выбор объектов исследования, формулируются цели и задачи работы, её научная новизна и выносимые на защиту положения, её практическая значимость.

В **первой главе** дается обзор литературы посвященной исследованию магнитотранспортных свойств систем на основе объемных переходных металлов и ферромагнитных полупроводников. В частности, кратко описаны явления гигантского магнетосопротивления (ГМС) в магнитных структурах. Представлен краткий обзор особенностей структур РМП [1-5,12] с различной размерностью.

Затем изложены основные положения теоретического рассмотрения проводимости РМП [14-16,20] в зависимости от параметров слоя с Mn в отсутствие магнитного поля и при приложении внешнего магнитного поля. Рассмотрен эффект Холла в ферромагнитных полупроводниковых системах, в частности, аномальный эффекта Холла (АЭХ) и методика анализа намагниченности магнитных систем с использованием АЭХ.

Заключительная часть главы посвящена краткому обзору современных представлений о процессах, происходящих в полупроводниковых гетероструктурах с Mn. Приведены недавние результаты, полученные в других экспериментальных группах [6-9], посвященные исследованию систем подобных рассмотренным в диссертации, и сформулированы задачи работы.

Во **второй главе** описаны объекты исследования и методики, примененные при их исследовании.

В первом разделе главы приведены схемы основных узлов автоматизированной установки для гальваномагнитных измерений и вакуумной вставки в транспортный гелиевый сосуд, составляющих единую систему, созданную для выполнения исследований в рамках данной работы. Установка позволяет производить измерения в диапазоне температур 4.2 – 300 К, в магнитных полях до 3 Тл и широком диапазоне сопротивлений образца ( $10^{10} - 1$  Ом).

В разделе 2.2 описаны методы получения структур, при изготовлении которых использовалась либо МОС-гидридная технология (образцы изготовлены и протестированы в НИФТИ ННГУ), а также молекулярно-лучевая эпитаксия (образцы изготовлены в университете Буффало).

В разделе 2.3 главы приведены результаты структурных исследований. Использование методов X-ray дифрактометрии и рефлектометрии позволило определить основные параметры структур: содержание In в квантовых ямах и, что наиболее существенно, распределение Mn и его концентрацию.

В **третьей главе** приведены исследования магнитотранспортных свойств структур GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs с различными параметрами их роста. Приведены экспериментальные и расчетные данные, позволяющие оценить температуры Кюри ( $T_c$ ) и магнитное упорядочение в структурах.

В разделе 3.1 приведены результаты исследований зависимости сопротивления от температуры, которые свидетельствуют о наличии магнитного упорядочения, сопровождаемого проявлением «горба» сопротивления вблизи температуры Кюри. Температурные зависимости сопротивления  $R_{xx}(T)$  для разных образцов представлены на (рис.1). Главной особенностью этих зависимостей является наблюдение максимума в  $R_{xx}(T)$  для образцов 1-3 при  $T = 25 - 40$  К, и отсутствие его в образце 4, в котором Mn в качестве легирующей примеси заменен на углерод (немагнитный акцептор).

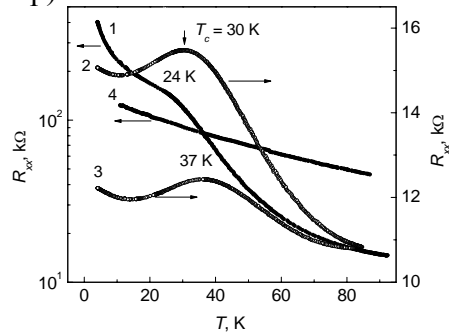


Рис. 1 Температурные зависимости сопротивления  $R_{xx}(T)$  исследуемых структур.

В разделе 3.2 главы представлены зависимости сопротивления структур от магнитного поля. Поле при этих измерениях прикладывалось перпендикулярно плоскости структуры и протекающему току. На рис. 2 представлены результаты измерения

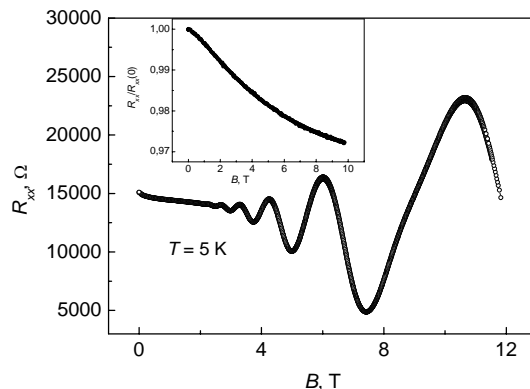


Рис. 2 Зависимости продольного сопротивления  $R_{xx}$  от магнитного поля для одной из структур.

продольного сопротивления  $R_{xx}$  в зависимости от магнитного поля для одного из образцов. Для доказательства двумерности энергетического спектра носителей заряда проведены измерения в сильных магнитных полях перпендикулярных плоскости структуры, демонстрирующие отчетливые осцилляции Шубникова – де Газа (рис.2), которые отсутствуют при приложении магнитного поля в плоскости образца (рис.2, вставка). Данное поведение является характерной особенностью двумерного электронного газа.

В разделе 3.3 описаны результаты исследований влияния параметров структур (содержания Mn в дельта слое, глубины квантовой ямы и толщины спейсера) на значения температуры ферромагнитного упорядочения.

Зависимость температуры ферромагнитного упорядочения  $T_c$  от концентрации Mn в  $\delta$ -слое ведет себя немонотонно с увеличением содержания Mn. Именно такая ситуация возникает и в случае ферромагнитных пленок  $Ga_{1-y}Mn_yAs$  вблизи, так называемого “reentrant” перехода металл-изолятор, наблюдаемого при изменении  $N_{Mn}$  в диапазоне  $\approx 4-7$  % [10-11]. Такое поведение объемных пленок  $Ga_{1-y}Mn_yAs$  объясняется увеличением степени компенсации материала (при  $N_{Mn} \geq 5$  ат.%) вследствие вхождения атомов Mn в межузельные положения, где они выступают в качестве двойных доноров [12, 13]. Эта особенность, по-видимому, имеет место и в наших образцах. Однако, падение  $T_c$  с увеличением содержания Mn, заметно меньше, чем в пленках  $Ga_{1-y}Mn_yAs$  [10-11] и сопровождается аналогичной зависимостью концентрации

носителей заряда. Причина такого поведения объясняется увеличением размытия слоя атомов Mn при увеличении их концентрации.

Рисунок 3а демонстрирует зависимость температуры Кюри от толщины GaAs «спейсера».

Если установление ферромагнитного порядка в структуре связано обменом между ионами Mn через носители в квантовой яме, то температура Кюри должна зависеть от концентрации носителей в яме и от высоты барьера разделяющего их и ионы Mn. Глубина квантовой ямы (КЯ) регулировалась с помощью вариации концентрации In. В мелкой яме уровень энергии носителей находится выше уровня энергии Mn (110 мэВ) и концентрация носителей в яме невелика, однако увеличивается при возрастании глубины КЯ, когда её глубина станет меньше энергии уровня Mn. Однако с ростом глубины КЯ амплитуда волновой функции носителей быстро падает за пределами КЯ [14], из-за увеличения барьера разделяющего Mn и носители заряда в КЯ. Это приводит к немонотонной зависимости  $T_c$  от глубины КЯ, как это видно на (рис.3б).

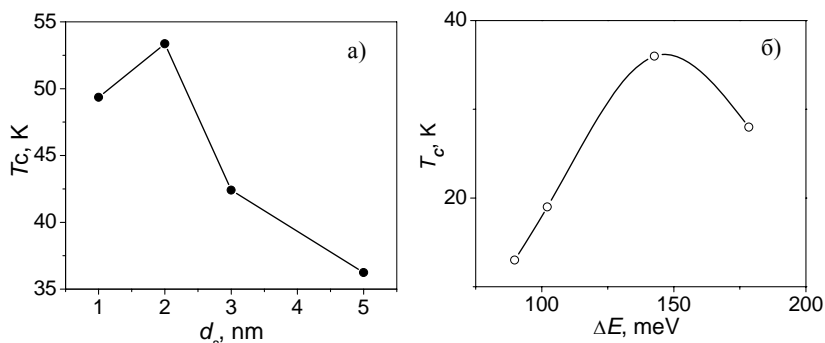


Рис. 3 Зависимости температуры Кюри от: а) величины GaAs «спейсера»; б) от глубины КЯ.

В разделе 3.4 описаны результаты исследований аномального эффекта Холла. Измерения магнитополевой зависимости поперечного (холловского) сопротивления  $R_{xy}(H)$  проводились при различных температурах в геометрии, когда магнитное поле прикладывалось перпендикулярно плоскости образца.

На рисунке 4 приведена магнитополевая зависимость  $R_{xy}^a(B)$  из которой явно видна ее нелинейность, соответствующая АЭХ, насыщающемуся вместе с магнитным моментом.

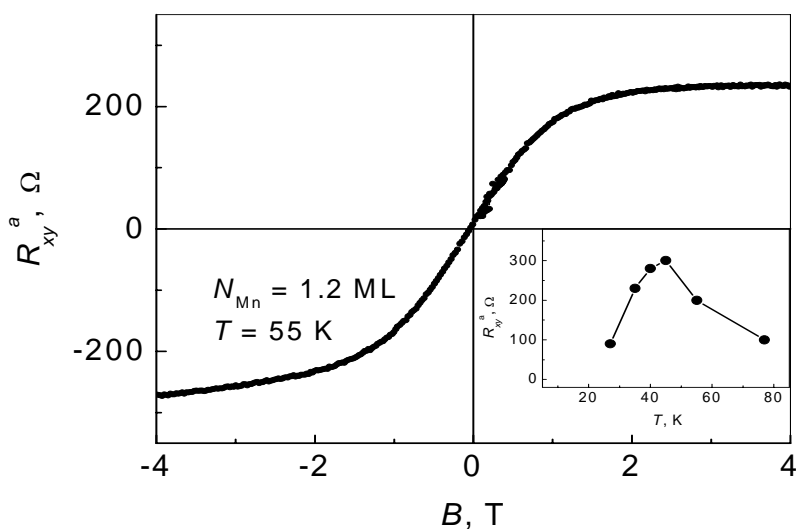


Рис. 4 Зависимость  $R_{xy}^a(B)$  от магнитного поля для одной из структур.

Температурная зависимость  $R_{xy}^a$ , представлена на вставке. Видно, что АЭХ наблюдается вплоть до температуры  $\approx 80$  К. С учетом того, что АЭХ обычно начинает наблюдаться при температурах ниже  $T \approx (2 - 3)T_c$ , получим в нашем случае  $T_c \approx 30 - 40$  К, что хорошо коррелирует с температурой максимума на зависимости  $R_{xx}(T)$ .



Полученные из эксперимента значения проводимости для металлического и диэлектрического образцов составляют  $\sigma_{xy}^a \cong 0.17e^2/h$  и  $\sigma_{xy}^a \cong 0.07e^2/h$ , соответственно, что хорошо согласуется с результатами теоретических расчетов АЭХ в двумерных структурах [15, 16], согласно которым величина  $\sigma_{xy}^a \sim 0.1e^2/h$ . Эти вычисления предполагают существенную роль «собственного» механизма АЭХ, что соответствует результатам наших экспериментов. Существенная роль «собственного» механизма АЭХ подтверждается изменением знака АЭХ в зависимости от температуры и, тем самым, наличием двух вкладов в сигнал аномального эффекта Холла, происходящих от различных его механизмов.

В **четвертой главе** приведены результаты исследования магнитных свойств этих же структур GaAs/Mn/GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs.

В разделе 4.1 рассмотрены результаты магнитометрических измерений, которые проводились с помощью СКВИД-магнитометра на образцах с характерными размерами 0.5 x 5 x 5 мм. Измерения магнитного момента проводились отдельно на пустом магнитометре, на тефлоне и клее крепежа, на подложке, на структуре с квантовой ямой и δ-слоем Mn и, наконец, на структуре без квантовой ямой и δ-слоя Mn (образец со стравленной структурой).

В исследуемых структурах наблюдалась центрированная в нулевом магнитном поле гистерезисная зависимость  $M(B)$  с петлями гистерезиса сдвинутыми от нуля в сторону сильных магнитных полей, он связывается с наличием двух фаз (ферромагнитной и антиферромагнитной). В нашей системе появление антиферромагнитной фазы на фоне ферромагнитной согласуется с более высоким содержанием Mn в отличие от образцов, изученных в [17], где наблюдался обычный характер магнитного гистерезиса. Это связано с неоднородностью пространственного распределения атомов Mn в δ-слое, наиболее ярко проявляющиеся при большом содержании Mn. Величина магнитного момента, экстраполированная к нулевой температуре, составляет в последнем случае  $(3.3 \pm 0.6) \cdot 10^{-5}$  Гс·см<sup>3</sup>.

В разделе 4.2 рассмотрено влияние неоднородности в пространственном распределении Mn на магнитные характеристики структур. Согласно этим предположениям, в области расположения номинального δ-слоя Mn формируется квазидвумерная магнитная фаза в форме отдельных металлических нанобластей ("островков") Ga<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>As с высоким содержанием Mn. Магнитные моменты отдельных ферромагнитных "островков" ориентированы случайно. Во внешнем поле при понижении температуры происходит выстраивание магнитных моментов отдельных ферромагнитных "островков" и становится возможным переход в фазу с дальним ферромагнитным порядком.

В **пятой главе** рассмотрены качественные модели установления ферромагнитного упорядочения в структуре GaAs/Mn/GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs.

В наши структурах расплывшийся вследствие диффузии δ-слой Mn представляет собой разбавленный магнитный полупроводник Ga<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>As, который разбивается на ряд ферромагнитных "островков". В отличие от объемных структур магнитный слой и канал проводимости квантовой ямы пространственно разделены, для описания ФМ упорядочения в подобных системах предложено два механизма [14,18].

В первом механизме [14], рассматривается косвенное взаимодействие между ионами Mn через носители в квантовой яме за счет провисания их волновой функции в область, где расположены магнитные примеси. При этом интенсивность взаимодействия, а с ней и температура Кюри должна немонотонно зависеть от глубины КЯ. Экспериментальное подтверждение данного механизма (зависимость температуры Кюри от глубины ямы) представлено в третьей главе, рисунок 3б. Однако следует отметить, что слабая зависимость  $T_c$  от величины спейсера ( $d_s$ ), которая должна при этом механизме носить экспоненциальный характер, говорит о наличии дополнительного механизма ферромагнитного упорядочения.

Согласно второму механизму [18]. Mn содержащий слой может сам по себе оказаться ферромагнитным, как это происходит в объемных материалах. Взаимодействие дырок в δ-слое Mn и в КЯ оказывается спин – зависящим и определяется ферромагнитным состоянием в Mn – содержащем слое. Наличие КЯ в этом механизме практически не влияет на ферромагнитное

упорядочение в слое Mn и зависимость  $T_c$  от толщины спейсера практически отсутствует, либо очень мала. Результаты измерения зависимости  $T_c$  от толщины спейсера, рисунок 3а в третьей главе, хорошо описываются данным механизмом. Тем не менее, наличие слабых зависимостей  $T_c$  от  $d_s$  и зависимости  $T_c$  от глубины ямы свидетельствует о заметной роли первого механизма обмена через хвосты волновых функций дырок в КЯ. Таким образом, за ферромагнитное упорядочение в системе и спиновую поляризацию дырок в КЯ ответственны действующие параллельно (совместно) два механизма.

В заключении кратко сформулированы основные результаты, полученные в работе.

### **Основные результаты**

1. Исследованы структурные, магнитные и электрофизические свойства двумерных ферромагнитных полупроводниковых структур, представляющих собой квантовую яму с удаленной от канала проводимости магнитной примесью Mn. Эти структуры отличаются, от ранее исследованных структур РМП, относительно высокими значениями подвижности и двумерным спектром энергии носителей заряда в квантовой яме при сохранении магнитных свойств;

2. Продемонстрирована возможность установления магнитного упорядочения в двумерных полупроводниковых структурах со слоем магнитной примеси удаленной от канала проводимости;

3. Исследованы связь магнитных свойств и дырочного транспорта двумерных структур типа квантовая яма  $Ga_{1-x}In_xAs$  с  $\delta$ -слоями Mn со структурными характеристиками объектов;

4. Впервые экспериментально продемонстрирована существенная роль «собственного» механизма аномального эффекта Холла в системе квантовая яма с удаленным от неё слоем Mn и двумерным спектром носителей заряда, что подтверждается согласием его величины с теоретическими расчетами и сменой знака АЭХ при изменении температуры;

5. Наблюден сдвиг магнитного гистерезиса относительно нулевого поля в структурах  $GaAs/In_xGa_{1-x}As/GaAs$  с  $\delta$ - слоем Mn;

6. Предложена качественная модель для описания особенностей электронного транспорта и магнитных свойств полупроводниковых структур типа квантовая яма с удаленным слоем Mn. Ферромагнитное упорядочение в них объясняется, как косвенным обменным взаимодействием ионов марганца через носители заряда в канале проводимости, так и в предположении, что центральная часть этого слоя образует собственный (зонный) ферромагнетик, который взаимодействуя с дырками в квантовой яме приводит к их спиновой поляризации.

### **Цитируемая литература**

1. D.D. Awschalom, D. Loss, N. Samarth (Eds.), *Semiconductor Spintronics and Quantum Computation*, Springer, (2002);
2. S. Sugahara, M. Tanaka, // *J. Appl. Phys.* 97, 10D503 (2005);
3. T. Wojtowicz, W.L. Lim, X. Liu et al., // *Appl. Phys. Lett.* 83, 4220 (2003);
4. A.M. Nazmul, T. Amemiya, Y. Shuto et al., // *Phys. Rev. Lett.* 95, 017201 (2005);
5. A.M. Nazmul, S. Sugahara, M. Tanaka, // *Phys. Rev. B* 67, 241308 (2003).
6. D. Stich, J. H. Jiang, T. Korn, R. Schulz, D. Schuh, W. Wegscheider, M. W. Wu, and C. Schüller // *Phys. Rev. B*, 76, 073309 (2007);
7. Кульбачинский В.А., Щурова Л.Ю. // *ЖЭТФ*, 2009 г., Том 136, Вып. 1, стр. 135 (2009);
8. Дмитриев А.И., Таланцев А.Д., Зайцев С.В., Данилов Ю.А., Дорохин М.В., Звонков Б.Н., Коплак О.В., Моргунов Р.Б. // *ЖЭТФ*, Том 140, Вып. 1, стр. 158 (2011);
9. Дмитриев А.И., Моргунов Р.Б., Зайцев С.В. // *ЖЭТФ*, Том 139, Вып. 2, стр. 367 (2011);
10. F. Matsukura, H. Ohno, A. Shen, and Y. Sugawara. // *Phys. Rev. B* 57, 2037R (1998);
11. A. Oiwa, S. Katsumoto, A. Endo et al., // *Solid State Commun.* 103, 209 (1997);
12. T. Jungwirth, Jairo Sinova, J. Mašek et al., // *Rev. Mod. Phys.* 78, 809 (2006);

13. K.W. Edmonds, P. Boguslavski, K.Y. Wang et al., // *Phys. Rev. Lett.* 92, 037201 (2004);
14. Е.З. Мейлихов, Р.М. Фарзетдинова. // *Письма ЖЭТФ*, 87, 568 (2008);
15. S.Y. Liu, X.L. Lei, // *Phys. Rev. B* 72, 195329 (2005);
16. V.K. Dugaev, P. Bruno, M. Taillefumier et al., // *Phys. Rev. B* 71, 224423 (2005);
17. Б. А. Аронзон, В. А. Кульбачинский, П. В. Гурин, А. Б. Давыдов, В. В. Рыльков, А. Б. Грановский, О.В. Вихрова, Ю. А. Данилов, Б. Н. Звонков, Y. Horikoshi, K. Onomitsu // *Письма ЖЭТФ*, 85, 32 (2007);
18. V. N. Men'shov, V. V. Tugushev, S. Caprara, P. M. Echenique, and E. V. Chulkov. // *Phys. Rev. B*, 80, 035315 (2009).

### Список работ автора

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в журналах, включённых ВАК РФ в перечень реферируемых журналов и изданий, а также в 7 тезисах докладов на международных и российских конференциях:

1. В.А. Aronzon, M.V. Kovalchuk, E.M. Pashaev, M.A. Chuev, V.V. Kvardakov, I.A. Subbotin, V.V. Rylkov, M.A. Pankov, I.A. Likhachev, B.N. Zvonkov, Yu.A. Danilov, O.V. Vihrova, A.V. Lashkul and R. Laiho. Structural and transport properties of GaAs/ $\delta$ -Mn/GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs quantum wells. // *J. Phys.: Condens. Matter* 20 (2008).
2. В. Aronzon, A. Lagutin, V. Rylkov, M. Pankov, A. Lashkul and R. Laiho. Disorder effects in GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs quantum well delta doped with Mn. // *Phys. stat. sol. (c)* 5, No. 3, 814–818 (2008)
3. Панков М.А., Аронзон Б.А., Рыльков В.В., Давыдов А.Б., Мейлихов Е.З., Фарзетдинова Р.М., Пашаев Э.М., Чуев М.А., Субботин И.А., Лихачев И.А., Звонков Б.Н., Лашкул А.В., Лайхо Р. Ферромагнитный переход в структурах GaAs/Mn/GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs с двумерным дырочным газом. // *ЖЭТФ*, Том 136, Вып. 2 (8), 346-355 (2009).
4. Панков М.А., Лихачев И.А., Давыдов А.Б., Веденеев А.С., Субботин И.А., Дорофеев А.А., Рыльков В.В. Ферромагнетизм низкоразмерных структур на основе III-Mn-V полупроводников в окрестности перехода изолятор-металл. // *Радиотехника и электроника*, Том 54, Вып. 9, 1099-1109 (2009).
5. В.А. Aronzon, M.A. Pankov, V.V. Rylkov, E.Z. Meilikhov, A.S. Lagutin, E.M. Pashaev, M.A. Chuev, V.V. Kvardakov, I.A. Likhachev, O.V. Vihrova, A.V. Lashkul, E. Lähderanta, A.S. Vedeneev, and P. Kervalishvil. Ferromagnetism of low-dimensional Mn-doped III-V semiconductor structures in the vicinity of the insulator-metal transition. // *JAP*, 107, 023905 (2010).