МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М. В. ЛОМОНОСОВА ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

УДК 537.311.322

ВАСИЛЬЕВСКИЙ ИВАН СЕРГЕЕВИЧ

**Электронный транспорт в связанных квантовых ямах AlxGai\_xAs/GaAs/AlxGai\_xAs и GaAs/lnyGai\_yAs/GaAs**

Специальность 01.04.09 Физика низких температур

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,

профессор Кульбачинский В. А.

Москва - 2006г.

**2**

Содержание

Введение 5

Глава 1. Квантовые ямы

1. Структуры с квантовыми ямами 17
2. Свойства двумерных электронов в квантовых ямах 23
3. Энергетический спектр, оптические свойства 23
4. Транспортные свойства 27
5. Аномальное магнетосопротивление в слабом магнитном поле 28
6. Магнетотранспорт в квантующем магнитном поле 33
7. Влияние тонкого барьера в квантовой яме на зонную структуру 35

1.3. Рассеяние двумерных электронов 37

1. Модель диэлектрического континуума для оптических фононов 38
2. Рассеяние электронов на оптических фононах 40
3. Рассеяние электронов на ионизированных примесях 41
4. Рассеяние на шероховатостях гетерограниц 43

1.4. Подвижность электронов в квантовой яме 44

1. Влияние ширины квантовой ямы на подвижность электронов 45
2. Влияние барьера в квантовой яме на подвижность

электронов при рассеянии на оптических фононах 46

1.4.3. Влияние заполнения подзон на подвижность электронов в

квантовых ямах при рассеянии на оптических фононах 49

1.5. Применение структур с квантовыми ямами 51

Глава 2. Образцы и методики исследования

1. Образцы. Структура и рост 53
2. Характеризация образцов 57

2.2.1.Исследования структуры слоев методом

масс-спектроскопии вторичных ионов (В ИМ С) 57

2.2.2 Характеризация образцов методами рентгеновской

з

дифрактометрии и рефлектометрии 61

1. Методики измерения температурных зависимостей сопротивления и гальваномагнитных эффектов *66*
2. Методики измерения спектров фотолюминесценции и фотоотражения 70

Глава 3. Зонная структура и оптические свойства квантовых ям AlxGai-xAs/GaAs/AlxGabxAs и GaAs/lnyGai-yAs/GaAs

1. Расчет зонной структуры исследованных образцов 72
2. Зонная структура образцов первого типа

с КЯ AlxGai\_xAs/GaAs/AlxGai\_xAs 80

1. Зонная структура образцов второго типа с КЯ GaAs/InyGai\_yAs/GaAs 84
2. Спектры фотолюминесценции образцов с КЯ GaAs/InyGai\_yAs/GaAs 89
3. Спектры фотоотражения образцов с КЯ

AlxGa!\_xAs/GaAs/AlxGai\_xAs 90

Глава 4. Электронный транспорт в квантующем магнитном поле в квантовых ямах AlxGa^xAs/GaAs/AlxGai-xAs и GaAs/lnyGai-yAs/GaAs

4.1. Эффект Шубникова- де Гааза и квантовый эффект Холла 95

1. Образцы первого типа с КЯ AIxGai\_xAs/GaAs/AlxGai\_xAs 95
2. Образцы второго типа с КЯ GaAsflnyGai\_yAs /GaAs 103

4.2. Магнетотранспорт в продольном магнитном поле 109

Глава 5. Электронный транспорт в слабых магнитных полях в квантовых ямах AlxGai-xAs/GaAs/AlxGai-xAs и GaAs/lnyGa^yAs/GaAs 5.1. Температурные зависимости сопротивления, слабая локализация

носителей тока 113

5.1.1. Образцы первого типа с КЯ AlxGai\_xAs/GaAs/AlxGai\_xAs 113

5.1.2 Образцы второго типа с КЯ GaAs/ InyGai\_yAs /GaAs 116

4

5.2. Температурные зависимости холловских подвижностей

и концентраций электронов 119

5.2.1. Образцы первого типа с КЯ AlxGai\_xAs/GaAs/AlxGai\_xAs 119

5.2.2 Образцы второго типа с КЯ GaAs/ InyGai\_yAs /GaAs 122

5.3. Влияние потенциальных вставок в КЯ на зонную структуру и

подвижность электронов 123

5.4. Анализ холловских подвижностей и концентраций электронов

в структурах с несколькими каналами проводимости 126

Глава 6. Отрицательное магнетосопротивление

6.1. Различные методы вычисления интерференционной квантовой

поправки к проводимости Аст 135

6.2. Новый численный метод расчета поправки Аст в произвольном
магнитном поле 137

1. Асимптотики для приведенного интеграла ILn(q) 139
2. Эффективный метод численного интегрирования для

вычисления ILn(q) 141

6.3. Экспериментальные данные по отрицательному магнетосопротивлению

и их сравнение с расчетом 146

6.3.1. Анализ магнетосопротивления в средних магнитных полях

Btr<B<BSdH 147

6.3.3. Отрицательное магнетосопротивление в структурах с одной
заполненной подзоной 152

6.3.3. Отрицательное магнетосопротивление в структурах с несколькими

заполненными подзонами 157

6.4. Анализ данных при наличии слабой спиновой релаксации 159

Основные результаты и выводы 162

Заключение 165

Литература 166

**Заключение.**

Я глубоко благодарен моему научному руководителю, профессору Владимиру Анатольевичу Кульбачинскому, за интересную тему диссертационной работы, поддержку и постоянное внимание. Я глубоко признателен старшему научному сотруднику нашей лаборатории, Роману Анатольевичу Лунину, за предоставленные им программы расчета зонной структуры и рассеяния на ионизированной примеси.

Я от всей души благодарен Талибу Бариевичу Галиеву, под руководством которого я научился тонкостям роста гетероструктур. Я благодарен В.В. Сарайкину, А.А. Ломову, С.С. Широкову, П.Ю. Бокову - за помощь в характеризации структур. Я также благодарен всем ученым и инженерам, с которыми мне довелось плодотворно сотрудничать в течение работы над диссертацией.