

*На правах рукописи*

АФАНАСОВА Марина Михайловна

**Кинетика электронов в композитной  
наноструктуре на основе соединения  
InAs/AlSb**

01.04.04 – физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Рязань - 2007

Работа выполнена на кафедре общей и теоретической физики и МПФ Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор  
**КАДУШКИН Владимир Иванович**  
доктор физико-математических наук, профессор  
**СТЕПАНОВ Владимир Анатольевич**

Официальные оппоненты – доктор физико-математических наук, профессор  
**ВОЛКОВ Степан Степанович**

кандидат физико-математических наук, доцент  
**ШАНГИНА Елена Леонидовна**

Ведущая организация – Научно Производственное Объединение “Плазма”

Защита диссертации состоится « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2007 г. в \_\_\_ часов на заседании диссертационного совета К212.212.02 в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина» по адресу: 390000, г. Рязань, ул. Свободы, 46, ауд. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина»

Автореферат диссертации размещен на сайте университета ([www.rsru.ryazan.u](http://www.rsru.ryazan.u))

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2007 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

А.Б. Ястребков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** На протяжении ряда десятилетий повышение функциональной сложности и быстродействия электронных систем достигалось увеличением плотности размещения и уменьшением размеров элементов. При переходе к размерам элементов порядка десятков нанометров возникает новая ситуация, состоящая в том, что квантовые эффекты (размерное квантование, туннелирование, интерференционные эффекты) оказывают главное влияние на физические процессы в наноструктурах и функционирование приборов на их основе.

Одной из двумерных низкоразмерных систем, которая привлекает внимание исследователей, является структура AlSb/InAs/AlSb. Несомненно, привлекательно использовать большую величину разрыва зоны проводимости на гетерогранице ( $\approx 1.35$  eV) и малую величину эффективной массы ( $m^*/m_0 \approx 0.035 \div 0.055$ ) двумерных электронов в квантовой яме InAs. Последнее, в совокупности с высоким качеством гетерограниц, обусловленным хорошим согласованием постоянных кристаллических решеток InAs и AlSb, обеспечивает высокие величины подвижностей  $\mu$  2D электронов в квантовой яме. В образцах с концентрацией  $n \approx 10^{12}$  см<sup>-2</sup> для комнатной температуры достигнуты величины подвижностей порядка  $3 \cdot 10^4$  см<sup>2</sup>/Вс, а при гелиевых температурах величины  $\mu$  близки к  $10^6$  см<sup>2</sup>/Вс. Разработка наноструктурированных материалов с заданными свойствами, предназначенных для применения в современной электронике, требует анализа свойств, основных физических процессов, присущих объектам нанометровой геометрии и системам пониженной размерности.

**Целью настоящей работы** является исследование физических свойств гетероструктуры AlSb/InAs/AlSb с двумерным вырожденным электронным газом на основе результатов, полученных из эффекта Шубникова-де Гааза.

Достижение цели исследований требует решения следующих **задач**:

1. Установить концентрационный порог заполнения, при котором на-

чинается заселение возбужденной подзоны размерного квантования (ПРК)

2. Идентифицировать доминирующие механизмы рассеяния в сильнолегированных гетероструктурах типа InAs/AlSb

3. Объяснить явление интермодуляции осцилляций поперечного магнитосопротивления.

4. Выяснить роль электрон – электронного ( $e-e$ ) взаимодействия в процессах релаксации носителей. Определить основные причины, приводящие к наличию аномальной зависимости квантового времени релаксации от магнитного поля.

5. Установить влияние межподзонного взаимодействия на явление интермодуляции осцилляций и спиновое расщепление магнитных подзон Ландау.

#### **Научная новизна работы:**

1. Обнаружено явление сильной амплитудно-частотной модуляции осцилляций поперечного магнитосопротивления в гетеросистеме AlSb( $\delta$ -Te)/InAs/AlSb( $\delta$ -Te). Установлена и исследована зависимость интермодуляции осцилляций от температуры ( $T= 4.2\div 28.6$  К) и концентрации ( $n_s=(0.6\div 4.2)\cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>).

2. Немонотонная зависимость амплитуды осцилляций поперечного магнитосопротивления от магнитного поля обусловлена межподзонным электрон - электронным взаимодействием при  $T= 4.2\div 28.6$  К.

3. На основе анализа времени релаксации электронов установлена определяющая роль межподзонного  $e - e$  взаимодействия в формировании уширения уровней Ландау для структур AlSb( $\delta$ -Te)/InAs/AlSb( $\delta$ -Te) в диапазоне температур  $T= 4.2\div 28.6$  К.

4. Установлен немонотонный характер зависимости времен релаксации электронов от магнитного поля ( $B=2\div 7$  Тл) и температуры ( $T= 4.2\div 28.6$  К), отражающий конкуренцию механизмов внутри и межподзонной релаксации импульса.

5. Исследование заселенности 2D электронами ПРК в интервале кон-

концентраций  $n_s=(0.6\div 4.8)\cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup> с учетом влияния эффективной массы позволило определить концентрационный порог заполнения второй ПРК.

6. Показано, что доминирующими механизмами рассеяния электронов в сильнолегированных структурах AlSb( $\delta$ -Te)/InAs/AlSb( $\delta$ -Te) в условиях низких температур  $T=(4.2\div 10.2)$  К являются ионы легирующей примеси и неоднородности гетерограниц.

7. Установлено, что рост эффективного  $g^*$  - фактора (68) в подзонах размерного квантования обусловлен межподзонным  $e$ - $e$  взаимодействием. Объяснена зависимость фактора спектроскопического расщепления от магнитного поля ( $B=2\div 7$  Тл) и концентрации  $n_s=(0.6\div 4.2)\cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>.

**Научная значимость диссертационного исследования заключается в следующем:**

1. Полученные результаты позволили определить параметры вырожденного электронного газа в InAs/AlSb и выявить основные закономерности его поведения, что может быть применено для дальнейшего развития теории гетероструктур.

2. Разработан комплексный алгоритм обработки осцилляций Шубникова – де Гааза, заключающийся в выяснении особенности релаксационных процессов носителей в легированных гетероструктурах InAs/AlSb с сильным межподзонным взаимодействием электронов.

**Практическая значимость диссертационного исследования** определяется перспективностью исследованных в работе легированных гетероструктур с 2D электронным газом в качестве основы для быстродействующих приборов среднего инфракрасного диапазона (квантово-каскадные лазеры, транзистор) и приборов спинтроники.

Важными с этой точки зрения являются следующие результаты:

1. Определено квантовое время релаксации электронов, которое составляет  $\sim 10^{-14}$  с. В области магнитных полей, где наблюдается спиновое расщепление подуровней Ландау, электроны характеризуются временем релаксации  $\sim 10^{-15}$  с, что делает возможным использование данной структуры в

качестве основы квантово-каскадных лазеров.

2. Изучено влияние магнитного поля на взаимодействие носителей, что позволяет контролировать и управлять параметрами полупроводниковой наноструктуры.

3. Разработана комплексная методика анализа осцилляций поперечного магнитосопротивления при низких температурах ( $T=4.2\div 10.2$  К), позволяющая подробно исследовать особенности релаксации носителей в гетероструктурах с вырожденным электронным газом.

**Достоверность** полученных результатов подтверждается их воспроизводимостью на большом количестве образцов, соответствием результатов, полученных с помощью независимых аналитических методов, с данными, известными из литературы.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Резонансное межподзонное взаимодействие электронов приводит к осциллирующей зависимости амплитуды поперечного магнитосопротивления в обратном магнитном поле и появлению участков с отрицательной температурой Дингла.

2. В легированной гетероструктуре InAs/AlSb ( $n_s=(0.6\div 4.2)\cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>) эффективными рассеивающими центрами электронов проводимости являются ионы примеси Te<sup>+</sup> - на большие углы, а на малые углы - неоднородности границы раздела.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы были представлены на следующих конференциях:

1. Вторая Международная конференция «Физика электронных материалов» (Калуга, 2005).

2. IX конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по физике полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалов (Владивосток, 2005).

3. V Всероссийская конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы физики полупроводников и источников света» (Саранск, 2007).

По материалам диссертации напечатано 10 печатных работ, из них 7-статьи и 3 - тезисы докладов.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Миннауки и образования РФ (грант № E02-3.4-319 и Госконтракт № 40.012.1.1.1153)

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы (57 наименований). Текст диссертации изложен на 174 страницах машинописного текста, содержит 11 таблиц и 71 рисунок.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цели и задачи исследований, отражена научная новизна полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту. Отмечена научная и практическая значимость выполненных исследований.

**В первой главе** выполнен обзор литературы, посвященной описанию свойств легированных и нелегированных гетероструктур InAs/AlSb, их энергетического спектра и ряда наиболее важных характеристик. Обзор литературы завершается постановкой конкретных задач исследования.

**Во второй главе** рассмотрены базовые теоретические аспекты низкотемпературного магнитотранспорта, определены основные характеристики двумерного электронного газа. Кратко описаны методики комплексного аналитического исследования параметров вырожденного электронного газа.

**В третьей главе** описаны слоевая архитектура исследуемых структур, химический состав слоев, геометрия экспериментальных образцов.

Образцы изготовлены в лаборатории Государственного университета Аризона, США (Department of Electrical Engineering and Center of Solid State Electronic Research). Там же проведены низкотемпературные измерения гальваномагнитных эффектов в сильных магнитных полях до 7 Тл.

В главе приведены результаты комплексного анализа осцилляций поперечного магнитосопротивления (таблица 1) двумя независимыми методами. В результате анализа обнаружен целый ряд явлений, которые проявляют-

ся лишь при определенных физических условиях (магнитное поле и температуры) и связаны с особенностями слоевой структуры, зонной диаграммой энергетических уровней. К ним можно отнести: амплитудно-частотную модуляцию осцилляций, расщепление уровней Ландау вследствие спин-орбитального взаимодействия, нелинейность зависимости  $\tau_q(B)$ .

Для получения более подробной информации о квантовом времени релаксации и о его зависимости от магнитного поля и других параметров предложен новый метод идентификации экстремумов, который позволяет выявить особенности в уширении уровней Ландау, связанных с относительным расположением уровней основной и возбужденной ПРК вблизи уровня Ферми.

Анализ большого количества образцов позволил установить характер заселения 2D электронами подзон размерного квантования в зависимости от уровня легирования гетероструктуры с учетом концентрационной зависимости эффективной массы. Выполнен расчет порогового значения концентраций, при котором начинается заполнение второй подзоны размерного квантования теоретически и аналитически из зависимостей  $\rho_{xx}(B)$ .

Таблица 1. Параметры гетероструктур InAs/AlSb, измеренных при 4.2 К.

№ серий образц.	$n_m^*/n_p^*$ , $10^{12} \text{ см}^{-2}$	$\tau_q^m/\tau_q^p$ , $10^{-14} \text{ с}$	$\tau_t$ , $10^{-12} \text{ с}$	$\mu \cdot 10^5$ , $\text{см}^2/\text{В с}$	$N_{Te}$ , $10^{18} \text{ см}^{-3}$	$m^*/m_0$	$E_F$ , эВ
1	0.61/-	8.3/-	3.46	1.84	-	0.033	0.046
4	0.83/-	8.7/-	9.0	4.40	-	0.036	0.056
5	1.8/0.6	6.2/5.0	2.39	1.00	0.86	0.042	0.137
6	2.2/1.0	6.5/5.2	1.54	0.63	1.5	0.043	0.179
7	2.7/1.1	7.1/5.8	1.50	0.55	2.0	0.048	0.194
9	3.6/0.62	12.0/5.5	1.70	0.53	2.4	0.056	0.194

Исходя из данных таблицы 1, можно выделить связь между концентрациями в основной  $n_m$  и возбужденной  $n_p$  подзонах размерного квантования. На рис. 1 приведены зависимости  $n_m(n_T)$ , и  $n_p(n_T)$ , где  $n_T = n_m + n_p$ . Излом на  $n_m(n_T)$  и аппроксимация  $n_p(n_T)$  на предельное значение  $n_p = 0$  дают величину по-



пороговой концентрации  $n_c = 8.3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . Теоретическая оценка порогового значения концентрации для квантовой ямы с  $d = 150 \text{ \AA}$  равна  $6.6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ .

Можно считать, что в используемом приближении (квантовая яма с бесконечными барьерами и постоянства массы) согласие между численной оценкой  $n_c$  и экспериментом хорошее.

**В четвертой главе**, посвященной механизмам рассеяния в легированных и нелегированных структурах InAs/AlSb, установлена природа затухания квантования Ландау и определен вклад межподзонного взаимодействия электронов в процессы релаксации носителей. Идентифицированы основные механизмы рассеяния электронов на большие и малые углы в селективно легированных структурах AlSb( $\delta$ -Te)/InAs/AlSb( $\delta$ -Te).

Механизмы  $e - e$  релаксации, определяющие затухание квантования Ландау в структурах AlSb(Te<sup>+</sup>)/InAs/AlSb(Te<sup>+</sup>). Из экспериментальной зависимости поперечного магнитосопротивления от магнитного поля получены магнитополевые зависимости нормированной амплитуды осцилляций  $\ln \delta_{m,p}(1/B)_{T=const}$  - графики Дингла. Их анализ проведен в широком диапазоне концентраций и магнитных полей для 2D электронов. Обнаружены аномалии в явлении затухания квантования Ландау: 1) осциллирующая зависимость нормированной амплитуды осцилляций  $\ln \delta_{m,p}(1/B)_{T=const}$  от обратного магнитного поля; 2) участки с отрицательной температурой Дингла.

Характерный для структуры AlSb/InAs/AlSb с двумя заполненными подзонами осциллирующий вид зависимости  $\ln \delta_{m,p}(1/B)_{T=const}$ , представленный на рис. 2, указывает на сложный характер уширения  $N_m$  и  $N_p$  уровней Ландау.

Точки максимумов и минимумов  $\ln \delta_m = f(1/B)$  в магнитном поле  $B$  определяются областью локализации функций плотности состояний  $D_{m,p}(E)$  для основной и возбужденной подзон размерного квантования.  $D(E)$  описывается несимметричной  $\delta$ -функцией с уширением  $kT_D + kT$  и имеет резкие границы. Перекрывание функций плотности состояний  $D_p(E)$  и  $D_m(E)$  приводит к иницированию межподзонного взаимодействия.

Магнитное поле, соответствующее резонансному выходу  $N_m$  и  $N_p$  уров-

ней Ландау на уровень Ферми и «включению» межподзонного  $e-e$  взаимодействия, определяется формулой:

$$B_{m,p} = \pi \hbar \Delta n_{m,p} / e \Delta N_{m,p}, \quad (3)$$

где  $\Delta n_{m,p} = n_m - n_p$ ,  $\Delta N_{m,p} = N_m - N_p$ .

Выполнены оценки резонансных полей согласно (3) и данным рис.2. Для серии образцов гетероструктуры InAs/AlSb с разностью концентраций в основной и возбужденной подзонах -  $\Delta n_{m,p} = (1.2 \pm 0.15) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  оценки величин  $1/B_{m,p}$  согласно (3) для указанных значений  $\Delta n_{m,p}$  и  $\Delta N_{m,p}$  следующие: 0.40, 0.32, 0.24 и 0.16 Тл<sup>-1</sup>. Из рис. 2 следует, что резонансы следует ожидать для величин  $\Delta N_{m,p}$ , близких к  $(N_m; N_p)$ : (15;5), (12;4), (9;3), (6;2), в магнитных полях: 0.40, 0.32, 0.22, 0.14 Тл<sup>-1</sup>.

Сравнивая результаты, полученные по формуле (3) и из графика – рис.2, отметим, что наблюдается хорошее совпадение теоретического расчета резонансных магнитных полей и экспериментальных данных.

Таким образом, в резонансных условиях создается возможность исследовать межподзонное  $e-e$  взаимодействие, вызывающего осциллирование зависимости логарифма нормированной амплитуды осцилляций поперечного магнитосопротивления в обратном магнитном поле.

Ломаная зависимость  $\ln \delta(I/B)_{T=const}$  аппроксимируется системой линейных участков серии  $I(a, c, e, g)$  графиков Дингла. Рассмотрим механизмы релаксации, формирующие каналы рассеяния в области магнитных полей, когда под уровнем Ферми находится некоторое число магнитных подзон Ландау в  $E_m$  и  $E_p$  подзонах размерного квантования.

Участки серии I соответствуют магнитным полям, в которых на уровне Ферми перекрываются максимумы функций плотности, приводя к инициированию магнитным полем межподзонного  $e-e$  взаимодействия. Суммарное квантовое время определено по правилу Маттисена из выражения:

$$1/\tau_q^{a,c,e} = 1/\tau_q^m + 1/\tau_q^p + 1/\tau_q^{mp}, \quad (2)$$

где  $\tau_q^m$  ( $\tau_q^p$ ) – время взаимодействия внутри подзоны  $E_m$  ( $E_p$ ),  $\tau_q^{mp}$  - время меж-

подзонного взаимодействия электронов.

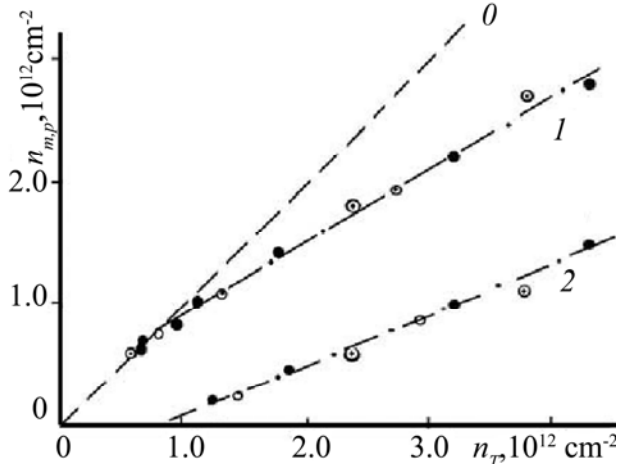


Рис. 1 Заполнение  $E_m$  и  $E_p$  подзон размерного квантования (AlSb/InAs/AlSb) при изменении суммарной концентрации  $n_T = n_m + n_p$  с ростом концентрации легирующей примеси в  $\delta$ -Te слое. Штрихпунктирные линии-зависимости  $1-n_m(n_T)$ ,  $2-n_p(n_T)$  штриховая линия - единичная биссектриса.

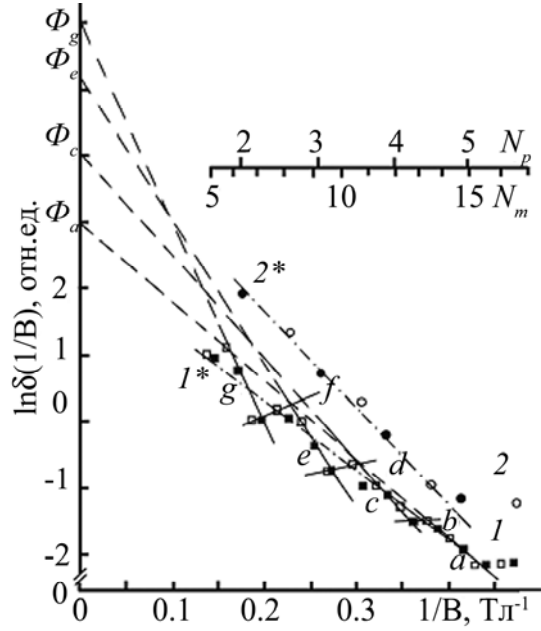


Рис.2 Зависимости нормированной на конечную температуру ( $T=4.2$  К) амплитуды осцилляций  $\ln[\delta(1/B)]$  от обратного магнитного поля  $1/B$  образца для структуры InAs/AlSb основной  $E_m$  (1) и возбужденной  $E_p$  (2) ПКР.  $\blacksquare, \bullet(\square, \circ)$ -max(min) осцилляций ШдГ.

Параметр  $\tau_q^{mp}$ , входящий в соотношение (2) для областей «a», «c» и «e» различен. Наклон участков  $I$  (a, c, e, g) на рис. 2 позволил установить параметрическую зависимость времени столкновительного уширения от магнитного поля:  $\tau_q \sim B^{-0.6}$  (рис. 3). Уменьшение  $\tau_q$  при увеличении  $B$  связано с “примешиванием” к внутриподзонному  $e$ - $e$  взаимодействию (на участках серии  $I$   $\tau_q$  определяется величинами  $\tau_q^m$  и  $\tau_q^p$ ) другого механизма. На участках магнитных полей «b», «d» и «f» (рис. 1), когда максимумы плотности состояний  $D_m(E)$  с номером  $N_m$  в  $E_m$  подзоне попадают в энергетический зазор между  $D_p(E)$   $N_p$  и  $N_{p+1}$  уровней Ландау, время нетеплового уширения  $\tau_q^{b,d,f}$  определяется временем внутриподзонной релаксации 2D электронов  $E_m$  и  $E_p$  из выражения:

$$1/\tau_q^{b,d,f} = 1/\tau_q^m + 1/\tau_q^p. \quad (3)$$

Из соотношений (2) и (3) определяется время межподзонной релаксации для участков «a», «c», «e», «g» относительно участков «b», «d», «f» и его зависимость от магнитного поля. Исследования показали, что для структуры InAs/AlSb невозможно определить время столкновительного уширения на участках серии II  $\tau_q^{b,d,f}$ . Подавление межподзонного взаимодействия магнитным полем является настолько резким, что приводит к изменению наклона графика Дингла с инверсией знака; наблюдаются участки  $\ln \delta_{m,p}(1/B)_{T=const}$  с отрицательной температурой Дингла  $T_D$ :  $\Delta \ln \delta(1/B)/\Delta(1/B) < 0$ . На участках «b», «d», «f» параметр  $T_D$ , не имеет физического смысла.

Оценка погрешности результатов, представленных на рис.2, составила не более 10%, включая погрешность графического метода и коэффициентов в методе наименьших квадратов.

Исследования затухания квантования Ландау в сильнолегированных структурах AlSb/InAs/AlSb позволяют сделать вывод, о том, что наблюдаемая осциллирующая зависимость в магнитном поле определяется в резонансных условиях сильным межподзонным взаимодействием.

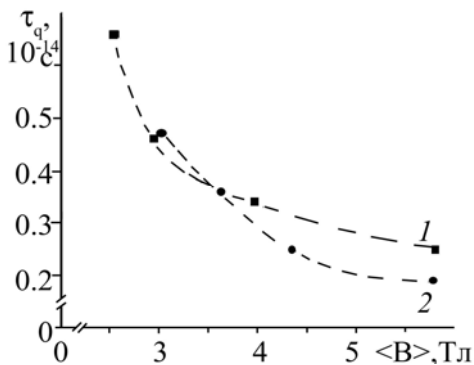


Рис.3. Зависимость времени релаксации на участках a, c, e от B для образцов с разной концентрацией  $n_s \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ : 1-  $2.4 \pm 0.15$ , 2 -  $3.6 \pm 0.2$ .

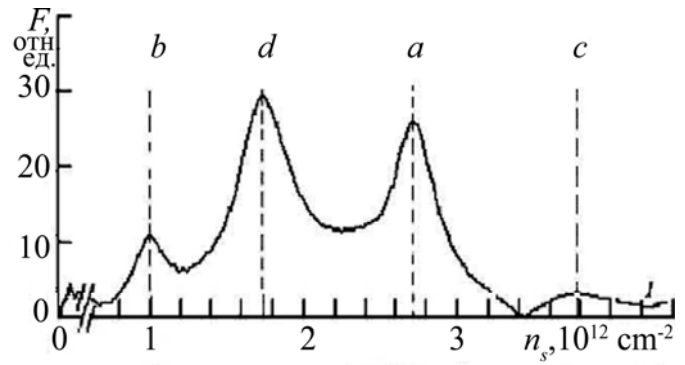


Рис. 4. Фурье-спектр осцилляций поперечного магнитосопротивления.

Существенно большая контрастность резонансов на  $\delta(1/B)_{T=const}$  рис. 2 обусловлена двумя причинами:

1. В исследуемой гетероструктуре InAs/AlSb электроны  $E_m$  и  $E_p$  подзон двумерные и функции плотности состояний  $D_{m,p}(E)$  имеют  $\delta$  - образную форму

(с уширением  $k(T+T_D)$ ).

2. С другой стороны, распределение электронной плотности  $|\psi_{m,p}(z)|^2$  в квантовой яме гетероструктуры InAs/AlSb симметрично и возмущающий потенциал ионизованных примесей  $\delta$ -Te воспринимает вся 2D электронная  $m$  - и  $p$  - система.

Идентификация доминирующих механизмов рассеяния. Аппроксимация экспериментальных зависимостей 1 и 2 (рис. 2) зависимостями  $1^*$  и  $2^*$  позволяет противопоставить сложному процессу релаксации в системе 2D электронов подзон в исследуемом интервале магнитных полей некий гипотетический процесс с усредненным механизмом и уширением  $kT_D^m$  и  $kT_D^p$  для каждой из подзон размерного квантования.

Основной механизм, определяющий релаксацию 2D электронов в активном канале, - это рассеяние электронов на большие и малые углы при взаимодействии с потенциалом ионизованных примесей. Характерным масштабом, на котором 2D электроны чувствуют кулоновский потенциал, является длина экранирования  $l_D$ :  $l_D^{-1} = 2 \frac{g_v}{a^*}$ , где  $g_v$  - коэффициент долинного вырождения ( $g_v = 1$ ),  $a^* = \frac{a_0}{m^*/m_0}$  - эффективный радиус Бора,  $a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{m_0e^2}$ ;  $\epsilon(\epsilon_0)$  - диэлектрическая проницаемость среды (вакуума),  $m^*$  - эффективная масса,  $m_0$  - масса свободного электрона. Для структуры InAs/AlSb с учетом изменения эффективной массы  $m^*/m_0 = 0.033 \div 0.055$  длина экранирования  $l_D = 190 \div 120$  нм. Так как ионизованные примеси Te находятся на расстоянии  $150 \text{ \AA}$  от гетерограниц квантовой ямы, в пределах длины экранирования ( $l_D > L$ ), ионы примеси являются эффективными рассеивателями 2D электронов в квантовой яме InAs.

Источником рассеяния 2D электронов являются дефекты гетерограницы, которые искажают потенциальный рельеф. В данной структуре постоянные решеток InAs и AlSb рассогласованы на 15 %. Среди основных можно

отметить следующие дефекты: 1) трехмерные, обусловленные неупорядоченностью атомов выше границы раздела; 2) одномерные дефекты (ступеньки границы раздела) обусловлены обменом элементов; 3) точечные дефекты (антисостояния, вакансии и примеси).

Таким образом, можно выделить два источника рассеяния электронов: кулоновское и рассеяние на шероховатостях гетерограниц. Подтверждением являются результаты, полученные из осцилляций ШдГ графическим методом и Фурье-спектроскопии.

Фурье - спектр осцилляций ШдГ представлен на рис.4. Здесь присутствуют пики основных частот  $F_m(a)$  и  $F_p(b)$ , соответствующих основной и возбужденной подзонам, пики комбинационных частот: суммарной – пик  $d$ , разностной – пик  $c$ .

Таблица 2. Соотношения параметров электронного газа в  $E_m$  и  $E_p$  подзонах, полученных графическим методом – 2 и 3 столбцы, методом Фурье – 4 и 5.

№ серий обр. параметр	$T_D^m / T_D^p$	$\tau_q^m / \tau_q^p$	$A_{F_m} / A_{F_p}$	$\tau_q^p / \tau_q^m$
5	0.81 <1	1.2 >1	1.13 >1	0.88 <1
6	0.63 <1	1.60 >1	1.8 >1	0.57 <1
7	0.81 <1	1.2 >1	2.44 >1	0.41 <1
9	0.44 <1	2.3 >1	5.40 >1	0.19 <1

Для всех исследованных образцов (таблица 2), отличающихся только уровнем легирования и температурой опыта, выполняются соотношения:

$$A_{F_m} / A_{F_p} > 1 \quad (5) \quad \text{и} \quad \tau_q^m / \tau_q^p > 1 \quad (6)$$

Где  $A_{F_m}$  ( $A_{F_p}$ )- амплитуда пика Фурье-спектра, соответствующего основной (возбужденной) подзоне размерного квантования. Допустив, что транспортные времена в  $E_m$  и  $E_p$  подзонах определяются рассеянием на кулоновском потенциале примесей  $\tau_i^m / \tau_i^p > 1$ , тогда соотношения (5) и (6), объясняются тем, что транспортное время  $\tau_i^{m,p}$  электронной системы контролируется кулоновским рассеянием электронов на ионизированных примесях, а малоугловое

время - рассеянием на шероховатостях гетерограниц.

**Пятая глава** посвящена исследованию явления интермодуляции в гетероструктуре InAs/AlSb. Для изучения причин, ее обуславливающих, использовались спектры Фурье осцилляций магнитосопротивления. Изучены частотные и амплитудные особенности спектров Фурье для данного соединения.

Анализ Фурье – спектров (рис. 4) и данных таблицы 2 показал:

1. Для образцов InAs/AlSb во всем интервале температур выполняется неравенство:  $\frac{A_{F_m}}{A_{F_p}} > 1$ . Соотношение пиков  $A_{F_m}$  и  $A_{F_p}$  в спектрах определяется

механизмом восприятия возмущения от внешних источников.

2. В результате возрастания числа электронов в  $E_m$  подзоне размерного квантования внутриподзонное  $e-e$  взаимодействие становится более интенсивным. На Фурье – спектре увеличение интенсивности отражается в росте амплитуды пика основной гармоники.

3. В спектрах Фурье осцилляций (рис. 4) для образцов InAs/AlSb хорошо разрешимы комбинационные частоты: суммарная  $F_m + F_p$  (c) и разностная  $F_m - F_p$  (d). Выяснено, что амплитуда пиков  $F_m \pm F_p$  зависит от интенсивности переходов электронов между подзонами, вызванных переходами внутри подзоны и интенсивности внутриподзонных переходов. Наличие комбинационных пиков и их амплитуда определяются межподзонным взаимодействием.

В этой же главе проведен анализ фактора спектроскопического расщепления в легированных и нелегированных структурах InAs/AlSb.

В гетероструктуре InAs/AlSb было обнаружено расщепление уровней Ландау в основной и возбужденной подзонах в системе 2D вырожденных электронов, вследствие спин- орбитального взаимодействия. Фактор спектроскопического расщепления в сильных магнитных полях принимал значения  $|g^*|=68$  в  $E_m$  подзоне,  $|g^*|=60$  в  $E_p$  подзоне.

В структурах с двумя заполненными подзонами изменение эффективного  $g$ - фактора зависит от взаимного расположения уровней Ландау основ-

ной ( $E_m$ ) и возбужденной подзон ( $E_p$ ) вблизи уровня Ферми. Вследствие сильного  $e$ - $e$  взаимодействия эти уровни не являются независимыми. При совпадении максимума плотности состояний (дна уровня Ландау)  $E_p$  подзоны с минимумом спин - расщепленных уровней, на уровне Ферми число состояний резко возрастает и  $e$  -  $e$  взаимодействие усиливается, что дает рост эффективного  $g$  – фактора. Увеличение магнитного поля вызывает рост фактора спектроскопического расщепления. Последовательный выход уровней Ландау за уровень Ферми сопровождается опустошением уровней и переходом электронов на ниже расположенные уровни Ландау, приводя к увеличению числа состояний. Рост числа состояний на уровнях приводит к усилению  $e$  -  $e$  взаимодействия, следовательно, увеличению эффективного  $g$ -фактора.

Анализ большого числа образцов показал, что уменьшение значения  $g$  – фактора с ростом концентрации носителей до  $|g^*|= 15$ , характерного для объемного полупроводника InAs, является результатом уменьшения длины кулоновского рассеяния.

### **Основные выводы и результаты диссертационной работы**

1. Рассмотрены аномалии малоугловой релаксации электронов в сильнолегированных наноструктурах InAs/AlSb с двумя заполненными ПРК. Показано, что такой характер зависимости обусловлен сильным межподзонным электрон - электронным взаимодействием.
2. Установлен характер заселения 2D электронами подзон размерного квантования в зависимости от уровня легирования гетероструктуры InAs/AlSb с учетом концентрационной зависимости эффективной массы.
3. Установлено, что повышение затухания квантования Ландау в структуре InAs/AlSb, относительно арсенид - галлиевой системы обусловлено архитектурой слоев гетероструктуры, а именно  $\delta$  - Те слой находится на расстоянии в пределах длины экранирования от гетерограницы.
4. Показано, что сильная контрастность резонансного модулирования амплитуды осцилляции основной  $F_m$  гармоники осцилляциями возбужденной гармоники зависит от соотношения концентраций основной и возбужденной



подзон размерного квантования.

5. Обнаружена и объяснена зависимость эффективного  $g^*$  – фактора от концентрации и магнитного поля для структуры InAs/AlSb с несколькими заполненными ПРК.

6. Показано, что доминирующие механизмы рассеяния в селективно легированных структурах AlSb( $\delta$ -Te<sup>+</sup>)/InAs/AlSb( $\delta$ -Te<sup>+</sup>) определяются пространственным распределением зарядов и шероховатостями гетерограниц.

7. Предложен новый метод идентификации экстремумов, который позволяет выявить особенности в уширении уровней Ландау, связанных с относительным расположением подуровней вблизи уровня Ферми основной и возбужденной ПРК.

8. Большая величина  $g$ -фактора ( $> 60$ ) второй ПРК определяется интенсивным межподзонным  $e - e$  взаимодействием.

**Основные результаты диссертации** изложены в публикациях автора общим объемом 5 п.л.:

1. Афанасова М.М., Горбунова Ю.Н., Устинов А.М. Особенности проявления межподзонной  $e - e$  релаксации в Фурье-спектрах осцилляций магнитосопротивления Шубникова – де Гааза// Труды IX конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по физике полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалов, Владивосток. – Владивосток, 2005 – с. 29-32 (0,2 п.л.).

2. Кадушкин В.И., Афанасова М.М., Горбунова Ю.Н., Устинов А.М. Резонансная модуляция  $e - e$  релаксации квантующим магнитным полем// Материалы 2-ой Международной конференции «Физика электронных материалов», Калуга. – Калуга, 2005. - Т. 1. - с. 248-251 (0,2 п.л.).

3. Кадушкин В.И., Афанасова М.М. Низкотемпературный магнитотранспорт 2D и 3D электронов// Рязанский государственный университет им. С.А. Есенина.-Рязань, 2006.-21 с.,ил., библи.20.- Рус.-Деп. в ВИНТИ 17.05.06 №667-В2006(1.3 п.л.)

4. Афанасова М.М. Механизмы рассеяния в сильно легированных

структурах  $\text{AlSb}(\delta - \text{Te}^+)/\text{InAs}/\text{AlSb}(\delta - \text{Te}^+)$  с вырожденным 2D электронным газом// Электроника: сборник научных трудов. Рязань. РГРТУ. 2006.С. 108-120.(0.8 п.л.)

5. Афанасова М.М. Эффективный  $g^*$ -фактор спектроскопического расщепления в нелегированных и селективно легированных структурах  $\text{AlSb}/\text{InAs}$ // Электроника: сборник научных трудов. Рязань. РГРТУ. 2006. С.99 -107.(0.5 п.л.)

6. Афанасова М.М., Степанов В.А. Аномалии затухания квантования Ландау в гетероструктурах  $\text{AlSb}(\text{Te}^+)/\text{InAs}/\text{AlSb}(\text{Te}^+)$  с вырожденным 2D электронным газом // Материалы 5-ой Всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы физики полупроводников и источников света», -Саранск.- 2007.- С. 60 (0.1 п.л.)

7. Кадушкин В.И., Афанасова М.М., Горбунова Ю.Н. Эффективный  $g^*$ -фактор спектроскопического расщепления в селективно легированных гетероструктурах  $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$  и  $\text{AlSb}/\text{InAs}$ // [zhurnal.gpi.ru/articles/2006/205.pdf](http://zhurnal.gpi.ru/articles/2006/205.pdf) (0.6 п.л.)

8. Афанасова М.М., Степанов В.А. Особенности Фурье-спектров осцилляций Шубникова де Гааза в гетеросистеме  $\text{InAs}/\text{AlSb}$ // Вестник Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина. Рязань. 2007, №2. С.114 – 120. (0.5 п.л.)

9. Афанасова М.М., Степанов В.А. Роль электрон - электронного взаимодействия в явлениях низкотемпературного магнитотранспорта вырожденных 2D электронов// Вестник Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина. Рязань. 2007, №3.- С. 91 – 93. (0.3 п.л.)

10. Афанасова М.М., Степанов В.А. Сравнительный анализ параметров и свойств вырожденного двумерного электронного газа в структурах  $\text{InAs}/\text{AlSb}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ // Вестник Рязанской радиотехнической академии. РГТУ. Рязань. 2007. Вып. 22. С. 52 – 59. (0.5 п.л.)