

# Содержание

Введение.....	12
---------------	----

## Глава 1.

*В. И. Нижанковский, В. Г. Мокеров, Б. К. Медведев, Ю. В. Шалдин*

### Исследование влияния магнитного поля на химический потенциал

электронов в висмуте и в гетеропереходе $\text{GaAs-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ .....	17
1.1. Эксперимент.....	18
1.2. Результаты.....	22
1.2.1. Висмут.....	22
1.2.2. Гетеропереход $\text{GaAs} - \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ .....	23
1.3. Обсуждение.....	26
1.3.1. Висмут.....	26
1.3.2. Гетеропереход $\text{GaAs} - \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ .....	29
Литература.....	32

## Глава 2.

*С. А. Говорков, В. Г. Мокеров, Б. К. Медведев, А. П. Сеничкин, В. И. Тальянский*

### Краевые магнитоплазменные колебания высших типов

в двумерном электронном канале.....	34
2.1. Введение.....	34
2.2. Эксперимент.....	35
2.3. Результаты измерений.....	38
2.4. Обсуждение результатов.....	41
Литература.....	44

## Глава 3.

*В. И. Поляков, П. И. Перов, М. Г. Ермаков,*

*О. Н. Ермакова, В. Г. Мокеров, Б. К. Медведев*

### Фотоэлектрические характеристики многослойных $p^+ - i - n^+$ -структур

$\text{GaAs} - \text{AlGaAs}$ с квантовыми ямами.....	45
3.1. Результаты и их обсуждение.....	46
Литература.....	54

## Глава 4.

*Г. Б. Галиев, А. С. Игнатьев, В. Б. Копылов, В. Г. Мокеров, А. Пфлигер*

### Исследование процессов формирования $\delta$ -легированных слоев

### кремния в структурах $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ методом вторично-ионной

масс-спектропии.....	56
Литература.....	65

**Глава 5.**

*И. Н. Котельников, В. А. Кокин, Б. К. Медведев,  
В. Г. Мокеров, Ю. А. Ржанов, С. П. Анохина*

**Характеристика и особенности проводимости приповерхностных  
δ-легированных слоев в GaAs при изменении концентрации**

<b>двумерных электронов</b> .....	67
5.1. Введение.....	67
5.2. Образцы и условия измерений.....	68
5.3. Экспериментальные результаты.....	70
5.4. Самосогласованный расчет структуры двумерных подзон и обсуждение результатов.....	73
Литература.....	81

**Глава 6.**

*А. С. Игнатъев, В. Э. Каминский, В. Б. Копылов,  
В. Г. Мокеров, Г. З. Немцев, С. С. Шмелев, В. С. Шубин*

**Влияние спейсер-слоев на вольт-амперную характеристику**

<b>туннельно-резонансных диодов</b> .....	83
Литература.....	92

**Глава 7.**

*Р. М. Имамов, А. А. Ломов, В. П. Сироченко,  
А. С. Игнатъев, В. Г. Мокеров, Г. З. Немцев, Ю. В. Федоров*

**Исследование гетероструктуры InGaAs/GaAs (100) методом  
рентгеновской дифрактометрии высокого разрешения**

.....	93
Литература.....	102

**Глава 8.**

*А. В. Гук, В. Э. Каминский, В. Г. Мокеров, Ю. В. Федоров, Ю. В. Хабаров*

**Оптическая спектроскопия двумерных электронных состояний**

**в модулированно-легированных гетероструктурах N-AlGaAs/GaAs**.....
 103 |

8.1. Экспериментальная часть.....	104
8.2. Теоретические модели.....	110
8.3. Обсуждение результатов.....	114
Литература.....	120

**Глава 9.**

*Д. Ю. Адамов, Ю. Ф. Адамов, В. Г. Мокеров, И. М. Щелева*

**Прецизионные резисторы в микросхемах на арсениде галлия**

.....	121
9.1. Введение.....	121
9.2. Тестовый кристалл для исследования полупроводниковых резисторов.....	122
9.3. Эффективная ширина резисторов.....	122

9.4. Сопротивление легированного слоя, омические контакты.....	125
9.5. Количественные оценки отношений резисторов и флуктуации ширин резисторов.....	128
9.6. Выводы.....	131
Литература.....	132

## Глава 10.

*В. Г. Мокеров, Ю. В. Федоров, А. В. Гук,  
Г. Б. Галиев, В. А. Страхов, Н. Г. Яременко*

<b>Оптические свойства легированных кремнием слоев GaAs (100), выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии.....</b>	<b>133</b>
10.1. Экспериментальная часть.....	134
10.2. Обсуждение результатов.....	138
10.3. Заключение.....	140
Литература.....	141

## Глава 11.

*В. Г. Мокеров, Г. Б. Галиев, Ю. В. Слепнев, Ю. В. Хабаров*

<b>Влияние кристаллографической ориентации поверхности роста при молекулярно-лучевой эпитаксии на оптические свойства легированных кремнием слоев арсенида галлия.....</b>	<b>142</b>
11.1. Введение.....	142
11.2. Экспериментальная часть.....	143
11.3. Результаты измерений.....	144
11.3.1. «Нормальные» и повышенные значения $\gamma$ : $16 < \gamma < 77$ .....	144
11.3.2. Малые значения $\gamma$ ( $10 < \gamma < 15$ ).....	149
11.4. Обсуждение результатов.....	149
Литература.....	152

## Глава 12.

*Г. Б. Галиев, В. Г. Мокеров, В. Ю. Волков,  
Р. М. Имамов, Ю. В. Слепнев, Ю. В. Хабаров*

<b>Особенности молекулярно-лучевой эпитаксии GaAs на подложках ориентацией (111)A, (111)B.....</b>	<b>153</b>
12.1. Введение.....	153
12.2. Получение пленок и методы исследования.....	154
12.3. Результаты исследований.....	155
12.4. Заключение.....	166
Литература.....	167

**Глава 13.**

*В. Г. Мокеров, Ю. В. Федоров, А. В. Гук, В. Э. Каминский,  
Д. В. Амелин, Л. Э. Великовский, Е. Н. Овчаренко,  
А. П. Лисицкий, В. Кумар, Р. Муралидхаран*

**Субчетвертьмикронная технология полевых транзисторов**

<b>на псевдоморфных гетероструктурах с квантовой ямой</b> .....	168
13.1. Введение.....	168
13.2. Экспериментальная часть.....	169
13.2.1. Молекулярно-лучевая эпитаксия псевдоморфных гетероструктур.....	169
13.2.2. Технология изготовления субчетверть на микронных <i>P</i> -НЕМТ.....	172
13.3. Обсуждение результатов.....	173
13.3.1. Вольт-амперные характеристики <i>P</i> -НЕМТ-приборов.....	173
13.3.2. Оценка параметров <i>P</i> -НЕМТ-структуры из измерений С-V-характеристик транзисторов.....	178
13.3.3. Частотные характеристики <i>P</i> -НЕМТ.....	180
13.3.3.1. Измерение коэффициента усиления.....	180
13.3.3.2. Исследование шумовых характеристик.....	180
13.4. Заключение.....	186
Литература.....	187

**Глава 14.****Транспортные и оптические свойства  $\delta$ -легированных оловом**

<b>GaAs-структур</b> .....	188
<i>В. А. Кульбачинский, В. Г. Кытин, Р. А. Лунин, В. Г. Мокеров, А. П. Сеничкин, А. С. Бугаев, А. Л. Карузский, А. В. Пересторонин, R.T.F. van Schaijk, A. de Visser</i>	
14.1. Введение.....	188
14.2. Образцы и методика измерений.....	189
14.3. Проводимость и магнитосопротивление исследованных структур.....	190
14.4. Энергетический спектр и фотолюминесценция GaAs ( $\delta$ -Sn)-структур.....	196
14.5. Осцилляции сопротивления в параллельном к $\delta$ -слою магнитном поле.....	202
14.6. Заключение.....	206
Литература.....	206

**Глава 15.****Квантово-механические особенности эффекта поля**

<b>в гетеротранзисторах с модуляционным и <math>\delta</math>-легированием</b> .....	209
<i>В. А. Гергель, В. Г. Мокеров, М. В. Тимофеев</i>	
15.1. Введение.....	209

15.2. Эффективная (самосогласованная) плотность электронных состояний в канале гетеротранзистора.....	211
15.3. Расчет электронных концентраций в канале гетеротранзистора.....	216
15.4. Заключение.....	220
Литература.....	220

## Глава 16.

*Г. Б. Галиев, В. Э. Каминский, В. Г. Мокеров,  
В. К. Неволин, В. В. Сарайкин, Ю. В. Слепнев*

<b>Исследование распределения и перераспределения кремния в тонких легированных слоях арсенида галлия, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках с ориентациями (100), (111)А, (111)В.....</b>	<b>221</b>
16.1. Введение.....	221
16.2. Экспериментальная часть.....	222
16.3. Результаты измерений и обсуждение.....	223
16.4. Заключение.....	231
Литература.....	232

## Глава 17.

*Г. Б. Галиев, В. Г. Мокеров, Э. Р. Ляпин, В. В. Сарайкин, Ю. В. Хабаров*

<b>Исследование электрофизических и оптических свойств <math>\delta</math>-легированных кремнием слоев GaAs, выращенных методом МЛЭ на разориентированных в направлении <math>[2\bar{1}\bar{1}]</math> поверхностях (111)А GaAs.....</b>	<b>233</b>
17.1. Введение.....	233
17.2. Получение эпитаксиальных пленок и методы исследования.....	235
17.3. Обсуждение результатов.....	237
Литература.....	245

## Глава 18.

*В. Г. Мокеров, Г. Б. Галиев, Ю. Пожела, К. Пожела, В. Юцене*

<b>Подвижность электронов в квантовой яме AlGaAs/GaAs/AlGaAs.....</b>	<b>247</b>
18.1. Введение.....	247
18.2. Структуры AlGaAs/GaAs/AlGaAs, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии.....	248
18.3. Зависимость подвижности электронов от толщины квантовой ямы.....	248
18.4. Подвижность электронов в квантовых ямах AlGaAs/GaAs/AlGaAs при вырождении электронного газа.....	253
18.5. Заключение.....	255
Литература.....	257

**Глава 19.**

*Э. М. Пашаев, С. Н. Якунин, А. А. Зайцев,  
В. Г. Мокеров, Ю. В. Федоров, Р. М. Имамов*

<b>Характеризация селективно-легированных многослойных гетероструктур на основе GaAs с квантовыми точками InAs</b> .....	258
19.1. Введение.....	258
19.2. Эксперимент.....	260
19.3. Экспериментальные результаты и обсуждение.....	262
19.4. Заключение.....	270
Литература.....	271

**Глава 20.**

*В. А. Кульбачинский, Р. А. Лукин, В. А. Rogozin, В. Г. Мокеров,  
Ю. В. Федоров, Ю. В. Хабаров, Е. Нарюми, К. Киндо, А. де Виссер*

<b>Латеральный электронный транспорт в короткопериодных сверхрешетках InAs/GaAs на пороге образования квантовых точек</b> .....	275
20.1. Введение.....	275
20.2. Образцы.....	276
20.3. Результаты измерений и их обсуждение.....	279
20.3.1. Температурные зависимости сопротивления.....	279
20.3.2. Магнетосопротивление, эффект Шубникова — де-Гааза.....	281
20.3.3. Фотолуминесценция и энергетический спектр.....	283
20.3.4. Анизотропия проводимости.....	288
20.4. Заключение.....	289
Литература.....	290

**Глава 21.**

*А. М. Афанасьев, Г. Б. Галиев, Р. М. Имамов, Е. А. Климов, А. А. Ломов,  
В. Г. Мокеров, В. В. Сарайкин, М. А. Чуев*

<b>Структурная характеристика двойных квантовых ям AlGaAs/GaAs/AlGaAs с тонкими разделяющими AlAs-слоями с помощью рентгеновской дифракции</b> .....	291
21.1. Введение.....	291
21.2. Образцы и экспериментальные измерения.....	293
21.3. Результаты и обсуждение.....	295
21.4. Заключение.....	302
Литература.....	303

**Глава 22.**

*В. Г. Мокеров, Ю. К. Пожела, Ю. В. Федоров*

<b>Электронный транспорт в униполярных гетероструктурных транзисторах с квантовыми точками в сильных электрических полях</b> .....	305
22.1. Введение.....	305

22.2. Структура транзистора с квантовыми точками.....	306
22.3. Заселенность квантовых точек в канале транзистора.....	306
22.4. Ток стока в полевом транзисторе с квантовыми точками.....	308
22.5. Коэффициент усиления полевого транзистора с квантовыми точками.....	314
22.6. Заключение.....	316
Литература.....	316

### Глава 23.

*Г. Б. Галиев, М. В. Карачевцева, В. Г. Мокеров,  
В. А. Страхов, Г. Н. Шкердин, Н. Г. Яременко*

#### **Фотолюминесцентные исследования двойных квантовых ям**

<b>AlGaAs/GaAs/AlGaAs с тонким разделяющим AlAs-слоем.....</b>	<b>318</b>
23.1. Введение.....	318
23.2. Эксперимент.....	320
23.3. Результаты расчета.....	322
23.4. Обсуждение результатов.....	324
23.5. Заключение.....	329
Литература.....	329

### Глава 24.

*И. С. Васильевский, Г. Б. Галиев, Г. В. Ганин, Р. М. Имамов, Е. А. Климов,  
А. А. Ломов, В. Г. Мокеров, В. В. Сарайкин, М. А. Чуев*

#### **Влияние легирования барьерных слоев AlGaAs на структурные и электрофизические свойства системы n-AlGaAs/GaAs/n-AlGaAs**

<b>с тонким разделяющим AlAs-слоем внутри GaAs.....</b>	<b>330</b>
24.1. Введение.....	330
24.2. Образцы и методы измерений.....	333
24.3. Результаты и обсуждение.....	335
24.3.1. Вторично-ионная масс-спектрометрия.....	335
24.3.2. Двухкристальная рентгеновская дифрактометрия.....	337
24.3.3. Измерения подвижности носителей заряда.....	345
24.4. Заключение.....	349
Литература.....	350

### Глава 25.

*Ю. К. Пожела, В. Г. Мокеров*

#### **Большое повышение максимальной дрейфовой скорости электронов в канале полевого гетеротранзистора.....**

25.1. Введение.....	352
25.2. Квантование моментов оптических фононов и увеличение дрейфовой скорости в слоистой гетероструктуре.....	353

25.3. Экспериментальное наблюдение повышения дрейфовой скорости.....	357
25.4. Заключение.....	361
Литература.....	361
<b>Глава 26.</b>	
<i>Г. Б. Галиев, И. С. Васильевский, Е. А. Климов, В. Г. Мокеров, А. А. Черечукин</i>	
<b>Влияние температуры роста спейсерного слоя на подвижность двумерного электронного газа в РНЕМТ-структурах.....</b>	<b>363</b>
26.1. Введение.....	363
26.2. Профиль зоны проводимости и распределение электронной плотности.....	365
26.3. Образцы и методы исследований.....	369
26.4. Результаты и их обсуждение.....	370
26.5. Заключение.....	372
Литература.....	373
<b>Глава 27.</b>	
<i>И. С. Васильевский, Г. Б. Галиев, Е. А. Климов, В. Г. Мокеров, С. С. Широков, Р. М. Имамов, И. А. Субботин</i>	
<b>Электрофизические и структурные свойства двусторонне <math>\delta</math>-легированных РНЕМТ-гетероструктур на основе <math>\text{AlGaAs}/\text{InGaAs}/\text{AlGaAs}</math>.....</b>	<b>374</b>
27.1. Введение.....	374
27.2. Теоретический анализ и оптимизация РНЕМТ-структуры.....	376
27.3. Образцы и методы исследований.....	382
27.4. Результаты и их обсуждение.....	384
27.5. Заключение.....	391
Литература.....	391
<b>Глава 28.</b>	
<i>Н. Г. Яременко, Г. Б. Галиев, М. В. Карачевцева, В. Г. Мокеров, В. А. Страхов</i>	
<b>Нестехиометрические дефекты в Si-легированных эпитаксиальных слоях GaAs, выращенных на подложках с ориентациями (111)A и (111)B.....</b>	<b>393</b>
Литература.....	402
<b>Глава 29.</b>	
<i>В. Г. Мокеров, И. С. Васильевский, Г. Б. Галиев, Ю. Пожела, К. Пожела, А. Сужделис, В. Юцене, Ч. Пашкевич</i>	
<b>Дрейфовая скорость электронов в квантовой яме в сильных электрических полях.....</b>	<b>404</b>
29.1. Введение.....	404
29.2. Образцы.....	405

29.3. Дрейфовая скорость электронов в квантовой яме AlGaAs/GaAs.....	406
29.4. Дрейфовая скорость электронов в структуре $\text{Al}_{0,36}\text{Ga}_{0,64}\text{As}/\text{In}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$ .....	412
29.5. Заключение.....	413
Литература.....	414

### Глава 30.

*В. Г. Мокеров, А. Л. Кузнецов, Ю. В. Федоров, Е. Н. Енюшкина, А. С. Бугаев,  
А. Ю. Павлов, Д. Л. Гнатюк, А. В. Зувев, Р. Р. Галиев, Е. Н. Овчаренко,  
Ю. Н. Свешников, А. Ф. Цацульников, В. М. Устинов*

<b>AlGaN/GaN-СВЧ НЕМТ-транзисторы с пробивным напряжением выше 100 В и с предельной частотой усиления по мощности <math>f_{\text{max}}</math> до 100 ГГц.....</b>	<b>415</b>
30.1. Введение.....	415
30.2. Выращивание гетероструктур AlGaN/GaN.....	416
30.3. Технология формирования НЕМТ-транзисторов.....	417
30.4. Вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики транзисторов.....	418
30.5. СВЧ-характеристики транзисторов.....	421
30.6. Зависимости предельной частоты усиления по мощности $f_{\text{max}}$ и коэффициента усиления $K_p$ от параметров топологии.....	425
30.7. Выбор оптимальной топологии секционированных затворов для различных частот функционирования транзисторов.....	427
30.8. Мощностные характеристики базовых AlGaN/GaN-НЕМТ-транзисторов.....	428
30.9. Заключение.....	429
Литература.....	430
<b>Список авторов.....</b>	<b>431</b>