



# СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>8</b>
Литература .....	9

## **ГЛАВА 1.**

### **СВОЙСТВА ШИРОКОЗОННЫХ**

### **ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И**

### **ГЕТЕРОСТРУКТУР** ..... **11** |

1.1. Основные параметры широкозонных полупроводниковых материалов и гетероструктур .....	11
1.2. Полупроводниковые материалы для гетеропереходов .....	14
1.3. Плотность состояний в объемных (3D) материалах и в тонких пленках (в 2D-системах) .....	16
1.4. Транспортные явления в широкозонных полупроводниках .....	18
Контрольные вопросы .....	28
Литература .....	29

## **ГЛАВА 2.**

### **СВЧ ТРАНЗИСТОРЫ НА ШИРОКОЗОННЫХ**

### **МАТЕРИАЛАХ И ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ** ..... **31** |

2.1. Зонная диаграмма гетеропереходов .....	31
2.2. Структуры СВЧ НЕМТ на основе AlGaIn/GaN .....	37
2.3. Гетеробиполярные транзисторы на основе соединений Ga1-XAlXAs/GaAs .....	45
2.4. Биполярные гетеротранзисторы на основе нитридов III группы .....	51
2.5. СВЧ транзисторы на алмазе .....	53
2.5.1. Приборы с $\delta$ -легированным бором каналом .....	56
2.5.2. Приборы с поверхностью, обработанной плазмой водорода .....	58
2.6. Транзисторы на SiC .....	66
2.6.1. Ключевые MOSFET на карбиде кремния .....	67
2.6.2. Приборы на основе карбида кремния для жестких условий эксплуатации .....	70
2.6.3. Бескорпусные SiC СВЧ MESFET транзисторы .....	71

Контрольные вопросы .....	73
Литература .....	75

### **ГЛАВА 3.**

#### **ТЕХНОЛОГИЯ НЕМТ НА ОСНОВЕ GaN .....**

3.1. Подложки для GaN-гетероэпитаксиальных структур, и основные требования к их параметрам .....	79
3.1.1. Карбид кремния (SiC) .....	80
3.1.2. Сапфир (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) .....	81
3.1.3. Подложки на основе кремния, монокристаллов GaN и AlN .....	86
3.2. Гетероэпитаксия GaN и AlGaN методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (MOC-гидридная эпитаксия – MOCVD) .....	88
3.2.1. Физико-химические основы MOCVD .....	89
3.2.2. Влияние условий роста на структуру и морфологию слоев .....	91
3.2.3. Аппаратура для эпитаксии слоев и методика эпитаксиального выращивания пленок .....	92
3.2.4. Методика эпитаксиального выращивания слоев GaN или AlN .....	96
3.3. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии .....	109
3.3.1. Основные элементы аппаратуры .....	110
3.3.2. Молекулярные источники .....	111
3.3.3. Нитридизация сапфировых подложек .....	117
3.3.4. Исследование условий роста изолирующих буферных слоев GaN .....	118
3.4. Омические контакты НЕМТ на основе GaN .....	124
3.5. Затворы полевых НЕМТ: барьеры Шоттки .....	132
3.6. Изоляция поверхности .....	135
3.7. Типичные технологические маршруты .....	138
3.8. Технология создания InAlN/GaN НЕМТ .....	141
3.9. Особенности литографических процессов .....	142
Контрольные вопросы .....	144
Литература .....	145

**ГЛАВА 4.****МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ИСХОДНЫХ СТРУКТУР И GAN ПРИБОРОВ В ПРОЦЕССЕ**

<b>РАЗРАБОТКИ И ПРОИЗВОДСТВА.....</b>	<b>151</b>
4.1. Оптические методы контроля.....	151
4.1.1. Традиционная оптическая микроскопия .....	152
4.1.2. Методы, основанные на явлении рассеяния света на неровностях поверхности .....	156
4.1.3. Фотолюминесцентные методы .....	157
4.1.4. Измерение спектров комбинационного рассеяния света .....	159
4.1.5. Контроль оптического отражения <i>in situ</i> для исследования процессов роста III-нитридов в MOCVD – аппаратуре.....	161
4.2. Рентгеновские методы контроля.....	162
4.2.1. Рентгеновская многокристаллическая дифрактометрия .....	162
4.2.2. Использование аппаратуры с линзами Кумахова .....	169
4.2.3. Построение карт распределения величин FWHM по площади подложек с гетероструктурами $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ .....	175
4.2.4. Метод использования малоуглового падения рентгеновского луча на исследуемую поверхность .....	177
4.2.5. Метод контроля рассеяния рентгеновских лучей в условиях полного внешнего отражения без соблюдения условия брэгговской дифракции .....	179
4.2.6. Метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (электронная спектроскопия для химического анализа (ЭСХА) .....	180
4.3. Электронно-микроскопические методы исследования структурного совершенства широкозонных полупроводников и гетероструктур.....	180

4.3.1. Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ).....	180
4.3.2. Просвечивающая электронная микроскопия высокого разрешения (ВРЭМ) .....	183
4.3.3. Растровая электронная микроскопия (РЭМ), и рентгеновский микроанализ .....	185
4.4. Дифракция электронов .....	195
4.4.1. Дифракции медленных электронов .....	195
4.4.2. Дифракция быстрых электронов на отражение ....	196
4.5. Атомно-силовая микроскопия .....	199
4.6. Электрические методы контроля параметров гетероструктур. ....	203
4.6.1. Определение удельного сопротивления, концентрации и подвижности .....	203
4.6.2. Эффект Холла в неоднородных материалах и структурах .....	205
4.6.3. Измерение вольт-фарадных характеристик (ВФХ) барьеров Шоттки .....	208
4.7. Прочие методы контроля .....	211
4.7.1. Масс-спектрометрия .....	211
4.7.2. Вторично-ионная масс-спектроскопия.....	211
4.7.3. Измерение катодolumинесценции. ....	213
4.7.4. Исследование подложек и гетероэпитаксиальных структур в поляризованном свете .....	213
4.8. Система параметров и методы контроля подложек и гетероэпитаксиальных структур .....	214
4.8.1. Система параметров и методы контроля подложек. ....	214
4.8.2. Система параметров и методы контроля гетероэпитаксиальных структур .....	215
4.9. Пооперационные методы контроля параметров структур GaN НЕМТ в процессе производства .....	218
4.9.1. Методы контроля качества фотолитографических процессов .....	218
4.9.2. Методы контроля качества омических контактов и барьеров Шоттки .....	219

4.10. Контроль сопротивления омических контактов и качества диэлектрических слоев.....	224
4.10.1. TLM- метод .....	224
4.10.2. Методы контроля качества диэлектрических слоев. ....	225
Контрольные вопросы .....	226
Литература.....	227

## **ГЛАВА 5**

### **КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ И НАДЕЖНОСТИ GAN**

#### **СВЧ ТРАНЗИСТОРОВ..... 234**

5.1. Методы контроля основных параметров GaN СВЧ транзисторов .....	234
5.1.1. Метод измерения крутизны .....	235
5.1.2. Метод измерения порогового напряжения и напряжения отсечки.....	236
5.1.3. Методы измерения начального тока стока.....	237
5.1.4. Методика измерения выходной мощности, коэффициента усиления и КПД. ....	238
5.1.5. Методика измерения коэффициента шума.....	239
5.2. Проблемы надежности GaN транзисторов и методы испытаний на надежность .....	240
5.2.1. Основные механизмы ненадежности НЕМТ .....	241
5.2.2. Деградация параметров GaN НЕМТ и «коллапс» тока .....	242
5.2.3. Ускоренные и особые испытания на надежность.....	244
5.3. Параметры СВЧ транзисторовна широкозонных материалах .....	248
Контрольные вопросы .....	252
Литература.....	252

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ ..... 254**

## **ВВЕДЕНИЕ**

Экстремальные требования, предъявляемые к электронной компонентной базе в современных радиоэлектронных системах, требуют создания специальных СВЧ приборов, интегрированных в аппаратуру, и схемотехнических решений, оптимизирующих их использование. Важнейшее значение при этом имеет выбор полупроводникового материала, на котором реализуются СВЧ приборы.

Внедрение СВЧ приборов на новых широкозонных полупроводниковых материалах (нитрид галлия, карбид кремния, алмаз и др.) позволит существенно повысить уровень излучаемой мощности во всех частотных диапазонах и расширить диапазон рабочих частот радиоэлектронных систем до КВЧ и ГВЧ [В1].

В литературе имеется целый ряд книг и учебников, посвященных, в частности, физике и технологии транзисторов на кремнии и арсениде галлия, а также — широкозонным полупроводникам [В2–В4].

Мощные высокотемпературные и радиационностойкие СВЧ транзисторы на широкозонных гетероструктурах нитрида галлия уже сейчас позволяют создавать новейшие перспективные радиоэлектронные системы гражданского и специального назначения. СВЧ транзисторы на нитриде галлия позволяют устранить основную причину, сдерживающую создание твердотельных радиолокационных станций в диапазоне частот 4–18 ГГц, а именно: недостаточный уровень выходной мощности СВЧ транзисторов на основе арсенида галлия [В1].

В настоящее время большое число ученых и научных групп в разных странах занято решением проблем создания приборов на широкозонных полупроводниках. К 2011 году опубликовано несколько тысяч научных статей и обзоров, среди которых следует, прежде всего, отметить достаточно обстоятельный обзор на английском языке [В5] и на русском языке — обзоры [В6–В10].

Следует отметить, что в области СВЧ техники наша страна всегда занимала ведущие позиции. Авторы надеются, что эта

книга поможет пробудить интерес студентов ВУЗов к специализации в области твердотельной СВЧ электроники на широкозонных полупроводниках.

В первой главе настоящей книги рассмотрены параметры широкозонных полупроводников, физика двумерного газа и транспортные явления в гетеропереходах.

Во второй главе рассмотрены физика гетеропереходов на широкозонных полупроводниках и структуры транзисторов на основе GaN, алмаза и карбида кремния.

В третьей главе рассмотрена технология создания GaN СВЧ транзисторов.

В четвертой главе рассмотрены методы контроля параметров GaN СВЧ приборов на стадии их разработки и производства [B11–B13].

В пятой главе рассмотрены методы контроля параметров и проблемы надежности СВЧ транзисторов на широкозонных полупроводниках.

При написании этого учебного пособия использован опыт чтения лекций авторами книги на факультете электроники МИРЭА для студентов различных специальностей, в частности для студентов базовой кафедры «Твердотельная электроника» при ФГУП «НПП «Пульсар».

В книге также использован опыт разработки СВЧ транзисторов на широкозонных полупроводниках, накопленный в течение последнего десятилетия в ФГУП «НПП «Пульсар».

Авторы выражают благодарность сотрудникам ФГУП «НПП «Пульсар», а также рецензентам профессору Таирову Ю.М. и профессору Тришенкову М.А., замечания которых способствовали улучшению содержания настоящей книги.

## Литература

- B1. Васильев А.Г., Колковский Ю.В., Концевой Ю.А. СВЧ приборы и устройства на широкозонных полупроводниках. М.: ТЕХНОСФЕРА. 2011. 416 с. ил.



- V2. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы. Учебник для вузов по спец. «Полупроводники и диэлектрики» и «Полупроводниковые и микроэлектронные приборы» – 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа., 1987. – 470 с. ил.
- V3. Таиров Ю.М., Цветков В.Ф. Технология полупроводниковых и диэлектрических приборов. 3-е изд. СПб.: Лань, 2002. – 424 с. ил
- V4. Таиров Ю.М. Технология полупроводниковых и диэлектрических материалов. 2-е изд., перер. и доп. – М.: Высш. шк., 1990 – 423 с.: ил.
- V5. Quay R. Gallium Nitride Electronics. – Freiburg Springer Verlag: – 2008. – 469 p.
- V6. Ковалев А.Н. Изв. Вузов. Материалы электронной техники. – №2. – С. 4–14 (2001).
- V7. Ковалев А.Н. Изв. Вузов. Материалы электронной техники. № 2. – С. 4–15 (2002)
- V8. Ковалев А.Н. Изв. Вузов. Материалы электронной техники. –№ 2. – С. 4–13. (2005).
- V9. Ковалев А.Н. Изв. Вузов. Материалы электронной техники. – №2. – С. 4–17 (2007)
- V10. Ковалев А.Н. Изв. Вузов. Материалы электронной техники. – 2008. – № 2. – С. 4–21.
- V11. Батавин В.В., Концевой Ю.А., Федорович Ю.В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь. 1985. – 264 с. ил.
- V12. Колковский Ю.В., Концевой Ю.А. Структурные и оптические методы контроля параметров материалов микроэлектроники. Методические указания по выполнению лабораторных работ. М.: МИРЭА, 2011. 52 с., ил.
- V13. Колковский Ю.В., Концевой Ю.А. Электрические методы контроля параметров материалов и структур микроэлектроники. Методические указания по выполнению лабораторных работ. М.: МИРЭА, 2011. 32 с., ил.