

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	10
ГЛАВА 1	
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СОБСТВЕННОСТЬ И	
СТАНДАРТЫ В ТЕХНОЛОГИИ СВЧ ТРАНЗИСТОРОВ	15
1.1. Техническое регулирование как механизм обеспечения	
технологической безопасности Российской Федерации	15
1.1.1. Концепция долгосрочного социально-экономического	
развития Российской Федерации на период до 2020 г.....	16
1.2. Проблемы интеллектуальной собственности	24
1.2.1. Основные определения предметов	
интеллектуальной собственности.....	25
1.2.2. Основные проблемы интеллектуальной	
собственности	27
1.3. Зарубежная практика технического регулирования и	
стандарты в Российской Федерации.....	31
1.3.1. Европейский комитет по стандартизации	
в области электротехники и электроники	31
1.3.2. Национальная стратегия регулирования	
рынка в США.....	32
1.3.3. Стандарты СССР и российские стандарты	
применительно к технологии и электронике	
транзисторов.....	39
1.4. Перечень документов всех уровней, используемых	
при разработках полупроводниковых приборов	40
1.4.1. Требования к видам обеспечения	42
1.4.2. Входной контроль материалов и полуфабрикатов и	
контроль технологических процессов.....	43
1.4.3. Требования, предъявляемые при постановке	
опытно-конструкторских работ (ОКР)	
по разработке СВЧ транзисторов.....	46
1.4.4. Основные этапы проектирования	46
1.4.5. Перечень измеряемых параметров	
разрабатываемых транзисторов.....	47
1.4.6. Выбор и обоснование методов и средств	
измерений измеряемых параметров,	47
1.4.7. Определение коэффициентов технологических	
запасов	48
1.5. Выводы	50

ГЛАВА 2

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ СОЗДАНИЯ СВЧ ТРАНЗИСТОРОВ НА ШИРОКОЗОННЫХ МАТЕРИАЛАХ И ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ КАЧЕСТВО ИЗДЕЛИЙ СВЧ ЭЛЕКТРОНИКИ.....	52
2.1. Введение.....	52
2.2. Свойства основных материалов твердотельной электроники.....	53
2.2.1. Основные параметры полупроводниковых материалов	53
2.2.2. Основные свойства металлов, применяющихся в твердотельной электронике.....	55
2.2.3. Свойства диэлектрических материалов и диэлектрических пленок	57
2.2.4. Подложки для широкозонных полупроводниковых гетероструктур	59
2.2.5. Спонтанная и пьезоэлектрическая поляризация. Образование двумерного газа электронов.....	59
2.2.6. Требования к подложкам.....	63
2.2.7. Технологические факторы, определяющие устойчивость процесса гетероэпитаксии нитрида галлия на подложках сапфира (МОС-гидридная технология)	70
2.2.8. Получение гетероструктур на основе нитрида галлия на подложках карбида кремния	73
2.2.9. Основные характеристики гетероструктур	75
2.2.10. Контрольно-измерительное оборудование и контроль параметров гетероструктур.....	76
2.3. Типовые технологические процессы создания СВЧ GaN НЕМТ	79
2.3.1. Сопоставление технологических операций производства Si и GaN приборов.....	79
2.3.2. Технологический маршрут изготовления кристаллов НЕМТ (последовательность технологических операций)	84
2.3.3. Базовая технология создания СВЧ МИС на широкозонных гетероэпитаксиальных структурах (на основе GaN/SiC).....	87
2.3.4. Мощные СВЧ транзисторы на основе GaN	88
2.4. Общая схема методов входного и технологического контроля.....	95
2.5. Система параметров и методы контроля подложек.....	100

2.6. Методы контроля параметров гетероэпитаксиальных структур	101
2.7. Выводы	102
ГЛАВА 3	
МЕТОДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ СВЧ ПРИБОРОВ.....	103
3.1. Введение.....	103
3.2. Измерение удельного сопротивления пластин, эпитаксиальных слоев, диффузионных, ионно-имплантированных и металлизированных слоев четырехзондовым методом.....	103
3.2.1. Принцип метода	103
3.2.2. Измерение удельного сопротивления эпитаксиальных, диффузионных и ионно-имплантированных слоев.....	104
3.2.3. Аппаратура.....	105
3.2.4. Определение слоевого сопротивления тонких металлизированных слоев и неоднородности слоевого сопротивления.....	107
3.2.5. Погрешности измерения удельного сопротивления четырехзондовым методом	109
3.3. Определение сопротивления, концентрации и подвижности носителей заряда в полупроводниковых структурах методом Ван-дер-Пау	110
3.3.1. Определение сопротивления полупроводниковых структур методом Ван-дер-Пау.....	110
3.3.2. Определение концентрации и подвижности носителей заряда в полупроводниковых структурах методом Ван-дер-Пау	113
3.4. Бесконтактные методы определения удельного сопротивления материалов, слоевого сопротивления структур и измерение времени жизни неосновных носителей заряда.....	116
3.4.1. Бесконтактные методы определения слоевого сопротивления структур.....	116
3.4.2. Бесконтактные методы измерения времени жизни носителей заряда	117
3.5. Методы контроля удельного сопротивления омических контактов и параметров барьеров Шоттки	118
3.6. Измерение вольт-фарадных характеристик полупроводниковых структур	120

3.6.1. Измерение высокочастотных вольт-фарадных характеристик МДП-структур	120
3.6.2. Измерение низкочастотных вольт-фарадных характеристик МДП-структур	124
3.7. Определение профиля распределения примесей по измерению вольт-фарадных характеристик диодов Шоттки	126
3.8. Погрешности вольт-фарадного метода	131
3.9. Методы контроля теплопроводности материалов, применяющихся в технологии СВЧ транзисторов	132
3.9.1. Стационарные методы определения теплопроводности	132
3.9.2. Нестационарные методы определения теплопроводности	135
3.10. Выводы	137

ГЛАВА 4.

ВЫЯВЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ТЕХНОЛОГИИ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ..... 138

4.1. Введение.....	138
4.2. Методы оптической микроскопии	138
4.2.1. Традиционная оптическая микроскопия	138
4.2.2. Интерференционные микроскопы.....	147
4.3. Методы эллисометрии.....	154
4.3.1. Принципы и возможности эллисометрии.....	154
4.3.2. Эллисометрическая аппаратура.....	158
4.3.3. Эллисометрический контроль процессов металлизации	160
4.3.4. Эллисометрический контроль параметров AlN/Si гетероструктур	167
4.4. Оптические методы контроля, основанные на исследовании спектральной зависимости коэффициента отражения излучения	169
4.4.1. Контроль толщины кремния в КНС- и КНИ-структурах	169
4.4.2. Оценка степени неоднородности толщины слоя кремния в КНС-пластинах и КНИ-структурах по их площади.....	172
4.5. Контроль толщины эпитаксиальных структур и гетероструктур	174
4.5.1. Определение толщины слоев GaN в гетероструктурах AlGaIn/GaN/SiC.....	176
4.6. Методы изготовления и оптического контроля шлифов	177

4.7. Исследование спектров поглощения диэлектриков, полупроводниковых материалов и структур	179
4.8. Определение поверхностной концентрации носителей заряда в полупроводниках	181
4.9. Измерение фотолюминесценции	182
4.10. Измерение спектров комбинационного (рамановского) рассеяния света	189
4.11. Методы оптического сканирования	193
4.12. Поляризационный метод	197
4.13. Выводы	201

ГЛАВА 5

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ИСХОДНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР ШИРОКОЗОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ РЕНТГЕНОВСКИМИ МЕТОДАМИ	202
--	------------

5.1. Введение	202
5.2. Методы рентгеновской дифрактометрии	202
5.2.1. Рентгеновская многокристалльная дифрактометрия	202
5.2.2. Связь ширины пиков рентгеновской дифрактометрии с технологией изготовления гетероструктур широкозонных материалов	204
5.2.3. Определение состава гетероструктур $Al_xGa_{(1-x)}As$ методами рентгеновской дифрактометрии	206
5.2.4. Определение состава гетероструктур $Al_xGa_{(1-x)}N$ методами рентгеновской дифрактометрии	208
5.2.5. Исследование фаз металлизации при создании омических контактов	214
5.3. Рентгеновские топограммы	219
5.3.1. Метод Ланга	219
5.3.2. Метод Бормана	222
5.4. Методы рентгеновской дефектоскопии	225
5.5. Выводы	227

ГЛАВА 6

КОНТРОЛЬ ИСХОДНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА СВЧ ТРАНЗИСТОРОВ МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОННОЙ И АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ	228
6.1. Введение	228
6.2. Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ)	228
6.3. Растровая электронная микроскопия (РЭМ) и рентгеноспектральный микроанализ	232

6.3.1. Растровая электронная микроскопия.....	232
6.3.2. Метод наведенного тока	240
6.3.3. Рентгеноспектральный микроанализ (РСМА)	241
6.3.4. Католюминесценция	243
6.4. Дифракция медленных и быстрых электронов.....	248
6.4.1. Дифракция медленных электронов	248
6.4.2. Дифракция быстрых электронов	249
6.5. Атомно-силовая микроскопия	251
6.6. Выводы	255

ГЛАВА 7

КОНТРОЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ГЕТЕРОСТРУКТУР И ПРИМЕСЕЙ МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОННОЙ И ИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ.....

256

7.1. Введение.....	256
7.2. Электронная Оже-спектроскопия (ЭОС)	256
7.2.1. Принцип метода ЭОС	256
7.2.2. Аппаратура	259
7.2.3. Применение метода ЭОС для контроля твердотельных структур.....	260
7.2.4. Контроль состава поверхности GaN после обработки в плазме азота.....	260
7.3. Электронная спектроскопия для химического анализа (ЭСХА)	262
7.3.1. Принцип метода	262
7.3.2. Аппаратура	264
7.3.3. Использование метода ЭСХА для контроля полупроводниковых структур	266
7.3.4. Применение метода ЭСХА для анализа взаимодействия атомов галлия с другими элементами поверхности GaN	267
7.4. Вторично-ионная масс-спектрометрия (ВИМС).....	268
7.4.1. Принцип метода	268
7.4.2. Аппаратура	272
7.4.3. ВИМС-аппаратура, основанная на измерении времени пролета ионов	276
7.4.4. Применение ВИМС для контроля состава и содержания примесей в полупроводниковых материалах и структурах	278
7.5. Спектроскопия обратного резерфордовского рассеяния.....	282
7.6. Выводы	285

ГЛАВА 8	
СВЧ АППАРАТУРА НА НИТРИД-ГАЛЛИЕВЫХ ПРИБОРАХ	287
8.1. Введение: критические технологии – основное направление создания СВЧ радиоэлектронных систем	287
8.2. Нитрид-галлиевые СВЧ транзисторы и микромодули	289
8.3. Твердотельные СВЧ модули усилителей мощности на нитрид-галлиевых СВЧ транзисторах X-диапазона	291
8.4. Приемо-передающие модули P- S ₇ и X-диапазонов	295
8.5. Выводы	299
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	300
ЛИТЕРАТУРА	302