

**В. С. ДАНИЛОВ, Ю. Н. РАКОВ**

**АНАЛИЗ РАБОТЫ  
И ПРИМЕНЕНИЕ АКТИВНЫХ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ  
ЭЛЕМЕНТОВ**



**НОВОСИБИРСК  
2 0 1 4**

УДК 621.382:53(075.8)

Д 183

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор *В.А. Гридчин*  
канд. физ.-мат. наук, доцент *Е.А. Макаров*

**Данилов В.С.**

Д 183 Анализ работы и применение активных полупроводниковых элементов : учеб. пособие / В.С. Данилов, Ю.Н. Раков. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – 418 с. (Серия «Учебники НГТУ»)

ISBN 978-5-7782-2406-3

В работе представлены фундаментальные понятия и уравнения физики твердого тела; дан анализ работы биполярного транзистора в режимах большого и малого сигналов. Рассмотрены процессы, происходящие в МОП-транзисторах. Изложена физика процессов, происходящих в полевых транзисторах с барьером Шоттки на GaAs, применяемых в СВЧ-диапазоне; раскрыта электрофизика селективно легированных гетероструктурных транзисторов. Приведены новые отечественные и зарубежные разработки, проведено их сравнение по основным характеристикам.

Пособие адресовано прежде всего магистрантам и аспирантам, уже знакомым с твердотельными устройствами.

УДК 621.382:53(075.8)

ISBN 978-5-7782-2406-3

© Данилов В.С., Раков Ю.Н., 2014  
© Новосибирский государственный  
технический университет, 2014

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	8
<b>Глава 1. Начальные сведения</b> .....	9
1.1. Фундаментальные понятия и уравнения .....	9
1.1.1. Уравнение Пуассона .....	12
1.1.2. Уравнения плотности тока (или диффузионно-дрейфовые уравнения) .....	13
1.1.3. Уравнения непрерывности .....	20
1.1.4. Энергетическая диаграмма .....	24
1.2. Тепловое равновесие .....	27
1.2.1. Общие свойства равновесия полупроводников .....	28
1.2.2. Анализ в равновесии .....	33
1.3. Неравновесие .....	40
1.3.1. Уровни инжекции (экстракции) .....	40
1.3.2. Теория «ловушек» Шокли–Рида–Холла .....	42
1.3.3. Анализ неравновесной области при инжекции низкого уровня .....	46
1.3.4. Уровни Ферми в неравновесном состоянии .....	55
Задачи .....	56
Библиографический список к главе 1 .....	58
<b>Глава 2. Биполярный транзистор</b> .....	59
2.1. Биполярный транзистор в термодинамическом равновесии .....	59
2.2. Анализ биполярного транзистора при малом смещении (базовая модель) .....	64
2.2.1. Основы анализа неравновесного состояния БТ .....	64
2.2.2. Составляющие токов неосновных носителей в объемных областях .....	69
2.2.3. Составляющие тока в области р–п-перехода .....	71
2.2.4. Характеристические уравнения БТ .....	74
2.2.5. Прямой активный режим работы транзистора .....	77
2.2.6. Графики Гуммеля. Эффект уменьшения коэффициента усиления по току, при низких напряжениях на переходе эмиттер–база .....	83
2.2.7. Моделирование в случае неравномерных профилей легирования .....	85
2.2.8. Эффект Эрли .....	88
2.3. Биполярный транзистор при большом смещении .....	92
2.3.1. Сопротивление базы и смещение эмиттерного тока к краю эмиттера .....	93
2.3.2. Влияние высокого уровня инжекции .....	99
2.3.3. Ионизационное воздействие, лавинное умножение и пробой перехода коллектор–база .....	118
2.4. Динамика биполярного транзистора .....	123
2.4.1. Квасистатический режим работы БТ .....	125
2.4.2. Эквивалентные схемы БТ .....	132
Задачи .....	137
Библиографический список к главе 2 .....	142



<b>Глава 3. МОП-транзистор</b>	143
3.1. Основная структура инверсного МОП-транзистора (металл – окисел – полупроводник)	143
3.2. МОП-транзистор под напряжением смещения	144
3.2.1. Основные положения неравновесного анализа МОП-транзистора	144
3.2.2. Анализ поверхностной области полупроводника	147
3.2.3. Анализ тока через прибор при сильной инверсии	165
3.2.4. Упрощенный анализ тока через прибор при сильной инверсии	173
3.2.5. Анализ тока при пороговом состоянии	176
3.3. Основные принципы структурной оптимизации	179
3.3.1. Ограничения при проектировании	179
3.3.2. Пороговый механизм управления	184
3.4. Вторичные эффекты	186
3.4.1. Быстрое насыщение	187
3.4.2. Модуляция длины канала	188
3.4.3. Смыкание (прокол области канала)	191
3.4.4. Эффекты короткого и узкого каналов	197
3.4.5. Ударная ионизация и лавинный пробой	201
3.5. Динамические характеристики МОП-транзистора	203
Задачи	213
Библиографический список к главе 3	215
<b>Глава 4. Полевой СВЧ-транзистор с барьером Шоттки на основе арсенида галлия. Аналитическая модель</b>	217
4.1. Обзор результатов исследования физики работы GaAs ПТШ с помощью математических моделей	219
4.2. Аналитическая модель GaAs ПТШ	223
Режим работы ПТШ с управлением тока канала ОПЗ БШ	223
4.3. Выбор малосигнальной электрической эквивалентной схемы ПТШ	228
4.4. Определение элементов электрической эквивалентной схемы ПТШ	233
4.4.1. Использование аналитической модели ПТШ	233
4.4.2. Учет в физико-топологической модели и эквивалентной схеме мощного СВЧ ПТШ распределенных эффектов структуры	249
4.4.3. Паразитные межэлектродные емкости ПТШ	250
4.4.4. Паразитные емкости корпуса	256
4.5. Параметры переноса носителей заряда (электронов)	257
4.6. Моделирование мощного СВЧ ПТШ на GaAs Учет саморазогрева канала и влияния температуры окружающей среды	259
4.6.1. Определение температуры в канале ПТШ	260
4.6.2. Температурные зависимости параметров GaAs и барьера Шоттки	261
4.6.3. Определение теплового сопротивления мощного ПТШ	266
4.6.4. Экспериментальная проверка результатов расчета ВАХ, зависимостей элементов СВЧ ЭС ПТШ от режима смещения и S-параметров при прямом монтаже кристалла ПТШ	268



4.7. Температурные изменения параметров GaAs ПТШ .....	282
4.8. Влияние субмикронной длины затвора на характеристики GaAs ПТШ .....	285
Контрольные вопросы.....	287
Библиографический список к главе 4 .....	288
<b>Глава 5. Гетероструктурные полевые транзисторы .....</b>	<b>291</b>
5.1. Гетеропереход и перенос электронов в двумерный электронный газ в равновесном состоянии .....	292
5.1.1. Энергетический спектр разрешенных состояний в треугольной квантовой яме.....	294
5.1.2. Связь между поверхностной плотностью носителей на границе ге- тероперехода и положением энергетических уровней подзон.....	296
5.2. Транспортные свойства гетероструктур.....	306
5.3. Связь между зарядом и напряжением .....	311
5.4. Вывод уравнений вольт-амперных характеристик селективно легирован- ного ГСПТ .....	313
5.5. Сравнение результатов измерений и расчета по модели ВАХ ГСПТ .....	323
5.6. Малосигнальная СВЧ эквивалентная схема ГСПТ .....	325
5.7. Мощные гетероструктурные полевые транзисторы с квантовыми ямами в GaAs и $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ .....	328
Контрольные вопросы.....	346
Библиографический список к главе 5 .....	346
<b>Глава 6. Применение транзисторов в монолитных схемах СВЧ .....</b>	<b>349</b>
6.1. Используемые подложки и технологии изготовления МИС.....	354
6.1.1. СВЧ МИС на кремниевых биполярных транзисторах .....	354
6.1.2. СВЧ МИС на полевых транзисторах на основе GaAs и InP .....	356
6.2. Пассивные элементы МИС СВЧ .....	358
6.2.1. Линии передачи СВЧ.....	358
6.2.2. Спиральные индуктивности.....	360
6.2.3. Встречно-штыревой конденсатор .....	361
6.2.4. Конденсатор металл – диэлектрик – металл .....	361
6.2.5. Диффузионные резисторы из GaAs и тонкопленочные металличе- ские резисторы.....	362
6.2.6. Схемы суммирования в СВЧ-усилителях мощности .....	363
6.3. МИС на основе GaAs ПТШ .....	366
6.4. МИС на основе ГС ПТ, выращенных на подложках GaAs и InP .....	377
6.5. МИС на основе биполярных транзисторов на кремнии .....	401
6.6. МИС на основе комплементарных МОП-транзисторов на кремнии.....	407
Контрольные вопросы.....	413
Библиографический список к главе 6 .....	414