

А. Е. ОТБЛЕСК
В. Е. ЧЕЛНОВ

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ
В СИЛОВОЙ
ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ
ЭЛЕКТРОНИКЕ

А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р

НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО КОМПЛЕКСНОЙ ПРОБЛЕМЕ

«НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОФИЗИКИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ»

А. Е. ОТБЛЕСК

В. Е. ЧЕЛНОКОВ

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ В СИЛОВОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Ответственный редактор
академик В. М. ТУЧКЕВИЧ



ЛЕНИНГРАД · «НАУКА»
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
1984

Отблеск А. Е., Челноков В. Е. Физические проблемы в силовой полупроводниковой электронике. — Л. : Наука, 1984. 238 с.

В книге сделана попытка создания целостного представления о прогрессе и основных физических проблемах в современной силовой полупроводниковой электронике. Рассмотрены физические процессы, протекающие в кремниевых силовых приборах, новые виды структур и гибридных приборов. Приведены сведения о технологии, параметрах и перспективах разработки силовых приборов на основе широкозонных полупроводниковых материалов. Библиогр. — 386 назв. Ил. — 120. Табл. 9.

Рецензенты

И. В. ГРЕХОВ, Ю. М. ТАИРОВ

О Г Л А В Л Е Н И Е

Стр.
3

Предисловие	3
-----------------------	---

Часть I

СОВРЕМЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ, ПРОТЕКАЮЩИХ В СИЛОВЫХ КРЕМНИЕВЫХ ПРИБОРАХ

Глава 1. Феноменологическое описание проводимости в кремнии	5
§ 1.1. Рассеяние носителей заряда фононами	5
§ 1.2. Рассеяние носителей заряда примесными ионами	6
§ 1.3. Электронно-дырочное рассеяние (ЭДР)	8
§ 1.4. Рассеяние носителей заряда в сильных электрических полях	11
§ 1.5. Одновременное действие нескольких механизмов рассеяния и анизотропия времени релаксации	12
§ 1.6. Примесная рекомбинация	13
§ 1.7. Ударная (Оже-) рекомбинация	19
§ 1.8. Эффекты сильного легирования	23
Глава 2. Стационарные изотермические процессы в электронно-дырочной плазме силового кремниевого прибора	25
§ 2.1. Граничные условия и расчетная модель диодной $p^+ - n - n^+$ -структуры с резкими $p - n$ -переходами	25
§ 2.2. Инжекционная способность кремниевых $p - n$ -переходов	27
§ 2.3. Распределение инжектированных носителей, электрического поля, потенциала и плотностей токов в базе симметричного $p^+ - n - n^+$ -диода	29
§ 2.4. Прямая ветвь вольт-амперной характеристики $p^+ - n - n^+$ -структуры и ее составляющие	34
§ 2.5. О стационарных изотермических процессах в тиристорах и транзисторах	36
§ 2.6. Область объемного заряда резкого $p^+ - n$ -перехода при больших токах	37
§ 2.7. Диффузионные $p - n$ -переходы	38
Глава 3. Неустойчивости тока в силовых приборах	42
§ 3.1. Тепловое шнурование тока в диодах и тиристорах при импульсной перегрузке током большой амплитуды	43
§ 3.2. Физические причины шнурования тока в тиристорах вследствие эффекта dj/dt	52
§ 3.3. Вторичный пробой в транзисторах	59
§ 3.4. Лавинный пробой, обусловленный эффектом dj/dt	60

Глава 4. Переходные процессы в сильных электрических полях	63
§ 4.1. Переходный процесс включения диода и тиристора при высоком уровне инжекции	63
§ 4.2. К вопросу о максимальной скорости включения $p^+ - n - p - n^+$ структур	65
§ 4.3. Переходный процесс выключения диода при выведении заряда большим обратным током	67
§ 4.4. Переходный процесс выключения тиристора при выведении заряда большим обратным током	72
Глава 5. Неоднородные физические процессы в многослойных структурах	74
§ 5.1. Критический заряд включения тиристора	74
§ 5.2. Теория распространения включенного состояния в тиристоре	75
§ 5.3. Высокий уровень инжекции в двухмерном транзисторе	88
§ 5.4. Влияние флуктуаций электрофизических параметров кремния по площади структуры на ее характеристики	90

Часть II

ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ НОВЫХ СИЛОВЫХ ПРИБОРОВ И УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ

Глава 6. Перспективы развития силовых приборов на основе кремния	94
§ 6.1. Основные вопросы технологии изготовления мощных СПП	94
§ 6.2. Фундаментальные ограничения параметров СПП в стационарном режиме	98
§ 6.3. Фундаментальные ограничения предельных параметров СПП в импульсном режиме	100
Глава 7. Новые типы твердотельных силовых приборов и схем коммутации	111
§ 7.1. Тиристор с обратной проводимостью (ТОП)	112
§ 7.2. Интегральная схема диод—тиристор	113
§ 7.3. Комбинированно-выключаемый тиристор (КВТ)	114
§ 7.4. Тиристор с электростатическим управлением (ТЭУ)	117
§ 7.5. Сверхтоковые режимы работы тиристора	118
§ 7.6. Силовые транзисторы	121
Глава 8. Приборы с электронной бомбардировкой полупроводниковой мишени (ПЭБП)	123
§ 8.1. Принцип действия (ПЭБП)	123
§ 8.2. Основные достоинства и недостатки ПЭБП	126
§ 8.3. Свойства полупроводниковых материалов, применяемых в ПЭБП	128
§ 8.4. Современное состояние и перспективы развития ПЭБП	129
Глава 9. Силовые полупроводниковые и гибридные оптоэлектронные приборы	132
§ 9.1. Силовые полупроводниковые оптоэлектронные приборы	132
§ 9.2. Принцип действия и переходные характеристики полупроводникового переключателя, коммутируемого импульсом неодимового лазера	132

§ 9.3. Теория диодного силового гибридного оптоэлектронного переключателя	138
§ 9.4. Теория тиристорного силового гибридного оптоэлектронного переключателя	139
Глава 10. Силовые полупроводниковые приборы с СВЧ плазмой	144
§ 10.1. Управление мощными полупроводниковыми переключателями с помощью СВЧ излучения	146
§ 10.2. Полупроводниковые обострители субнаносекундного диапазона	154
Глава 11. Силовая солнечная энергетика	159
§ 11.1. Принцип действия и конструкция фотопреобразователей	159
§ 11.2. Гелиоконцентраторы	162
§ 11.3. Практическое применение фотопреобразователей	164
Глава 12. Применение силовых приборов при криогенных температурах	165
§ 12.1. Параметры СПП в области температур 80÷120 °К	165
§ 12.2. Параметры СПП в области температур ниже температуры кипения жидкого азота	167

Часть III

СИЛОВЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ НА НОВЫХ МАТЕРИАЛАХ — ДАЛЬНЕЙШАЯ ПЕРСПЕКТИВА РАЗВИТИЯ СИЛОВОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Глава 13. Широкозонные полупроводники — перспективные материалы для силовой полупроводниковой электроники	169
§ 13.1. Характерные температуры СПП	169
§ 13.2. Критическая напряженность поля лавинного пробоя и напряжение пробоя $p-n$ -перехода	172
§ 13.3. Плотность прямого тока	174
§ 13.4. Диод на неосновных носителях	175
§ 13.5. Диод на основных носителях	176
§ 13.6. Другие типы силовых приборов	177
Глава 14. Силовые приборы на основе GaAs и гетероструктур $Al_xGa_{1-x}As$	178
§ 14.1. Основные свойства GaAs и AlAs	178
§ 14.2. Способы получения гомо- и гетероструктур	180
§ 14.3. Построение энергетической диаграммы резкого гетероперехода	181
§ 14.4. Односторонняя инжекция и эффект суперинжекции	183
§ 14.5. Механизмы протекания тока в гетероструктурах	184
§ 14.6. Варизонные полупроводники	185
§ 14.7. Электронно-фотонный механизм переноса заряда неравновесных носителей	186
§ 14.8. Арсенидогаллиевые мощные полупроводниковые диоды	187
§ 14.9. Тиристоры на основе гетероструктур	190

Глава 15. Карбид кремния как материал для силовой полупроводниковой электроники	196
§ 15.1. Кристаллическая структура. Политипизм	197
§ 15.2. Естественная сверхрешетка в карбиде кремния	201
§ 15.3. Основные физические свойства карбида кремния	203
§ 15.4. Радиационные дефекты	203
§ 15.5. Получение монокристаллического карбида кремния	205
§ 15.6. Получение эпитаксиальных слоев карбида кремния	205
§ 15.7. Получение <i>p-n</i> -переходов на карбиде кремния	208
§ 15.8. Приборные структуры и их характеристики	212
Л и т е р а т у р а	215