

Г.И. Зебрев

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КРЕМНИЕВОЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Учебное пособие

5-е издание, электронное



Москва
Лаборатория знаний
2025

УДК 121.382(075)+620.3(075)
ББК 32.85я73
3-47

Серия основана в 2006 г.

Зебрев Г. И.

3-47 Физические основы кремниевой наноэлектроники : учебное пособие для вузов / Г. И. Зебрев. — 5-е изд., электрон. — М. : Лаборатория знаний, 2025. — 243 с. — (Нанотехнологии). — Систем. требования: Adobe Reader XI ; экран 10". — Загл. с титул. экрана. — Текст : электронный.

ISBN 978-5-93208-869-2

Книга посвящена описанию основных физических принципов, структур и методов моделирования, а также тенденций развития современной и перспективной кремниевой наноэлектроники с технологическими нормами менее 100 нм.

Для преподавателей и студентов, специализирующихся по направлениям микро- и наноэлектроники, электроники, электронных измерительных систем. Может быть использована в учебном процессе при подготовке учебных курсов «Физические основы наноэлектроники», «Наноэлектронные технологии», «Физика микроэлектронных структур».

**УДК 121.382(075)+620.3(075)
ББК 32.85я73**

Деривативное издание на основе печатного аналога: Физические основы кремниевой наноэлектроники : учебное пособие для вузов / Г. И. Зебрев. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. — 240 с. : ил. — (Нанотехнологии). — ISBN 978-5-9963-0181-2.

В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации

ISBN 978-5-93208-869-2

© Лаборатория знаний, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Базисные физические уравнения.	5
1.1. Предмет нанoeлектроники	5
1.2. Пространственные масштабы нанoeлектроники	6
1.3. Общая структура нанoeлектронных приборов.	8
1.4. Энергии и потенциалы	9
1.5. Что такое электрохимический потенциал?	11
1.6. Элементарная кинетика	13
1.7. Диффузионно-дрейфовый ток	14
1.8. Уравнение Больцмана	15
1.9. Уравнение непрерывности	16
1.10. Уравнение баланса импульсов и диффузионно-дрейфовое приближение	17
1.11. Электрон как волна и длина когерентности.	18
1.12. Математическое описание волн.	19
1.13. Уравнение Шредингера и волновая функция.	20
1.14. Стационарное уравнение Шредингера	21
1.15. Электрон в бесконечно глубокой потенциальной яме	23
1.16. Плотность дискретного и непрерывного спектра двумерной системы.	25
1.17. Энергетическая плотность состояний.	26
1.18. Подбарьерное туннелирование	28
Глава 2. Особенности приборов КМОП-технологии	30
2.1. Цифровая техника и логические вентили	30
2.2. Интегральные схемы и планарная технология	31
2.3. МОП-транзистор и КМОП-технология	33
2.4. Закон Мура.	34
2.5. Технологическая (проектная) норма.	36
2.6. Тактовая частота	38
2.7. Основные проблемы миниатюризации.	39
2.8. Анализ проблемы тепловыделения	40
2.9. Проблема отвода тепла.	42
2.10. Проблема диссипации тепла и обратимости вычисления .	43
2.11. Адиабатическая логика.	44
2.12. Оценка максимального быстродействия.	45

2.13.	Проблемы миниатюризации межсоединений	46
2.14.	Принципы скейлинга	49
2.15.	Компромиссы миниатюризации.	51
2.16.	Ограничения скейлинга	52
Глава 3.	Структуры металл—окисел—полупроводник	54
3.1.	Контактная разность потенциалов в МОП-структуре.	54
3.2.	Электростатика плоских слоев заряда	56
3.3.	Электростатика МОП-структуры с однородно-легированной подложкой	58
3.4.	Падение потенциалов в неоднородно-легированном полупроводнике	60
3.5.	Учет напряжения, приложенного к затвору	61
3.6.	Характерные затворные напряжения	63
3.7.	Пороговое напряжение	64
3.8.	Полный заряд в полупроводнике при заданном поверхностном потенциале	66
3.9.	Плотность электронов в канале как функция поверхностного потенциала	68
3.10.	Тепловая толщина инверсионного слоя (канала).	69
3.11.	Зависимость эффективного прижимающего поля от затворного напряжения в надпороговом режиме	70
3.12.	Контроль порогового напряжения за счет легирования подложки	70
3.13.	Регулирование порогового напряжения за счет работы выхода материала затвора	72
3.14.	Профили легирования.	72
3.15.	Спадающий профиль — HIGH-LOW	73
3.16.	Нарастающий профиль. LOW-HIGH, ретроградное легирование	74
3.17.	Легирование дельта-слоем	75
3.18.	Заряженные ловушки вблизи и на границе раздела	77
3.19.	Емкость инверсионного слоя	78
3.20.	Полная емкость МОП-структуры	79
3.21.	Учет влияния падения напряжения в затворе и инверсионном слое	82
3.22.	Температурная зависимость порогового напряжения.	83
Глава 4.	Вольт-амперные характеристики МОПТ	85
4.1.	Затворное напряжение как функция поверхностного потенциала в подпороговой области.	85
4.2.	Плотность носителей в канале как функция затворного напряжения в форме интерполяции (модель BSIM3).	86

4.3.	Подпороговый размах напряжения	87
4.4.	Статические подпороговые токи утечки.	89
4.5.	Влияние обратного смещения на подложке.	89
4.6.	Пороговое напряжение при обратном смещении на подложке.	91
4.7.	Зависимость порогового напряжения от обратного смещения на подложке	92
4.8.	Важность эффекта подложки в реальных схемах	93
4.9.	Напряжение между стоком и истоком	93
4.10.	Приближение плавного канала	94
4.11.	Плотность электронов вдоль канала при $V_{DS} > 0$	95
4.12.	Простейшая модель ВАХ МОПТ	96
4.13.	Насыщение скорости носителей в канале	98
4.14.	Механизмы насыщения тока канала	101
4.15.	Формула для ВАХ МОП-транзистора с учетом насыщения дрейфовой скорости (модель BSIM3-4)	102
4.16.	Ток насыщения МОПТ	103
Глава 5.	Физические процессы в каналах МОПТ	105
5.1.	Механизмы рассеяния носителей в канале	105
5.2.	Универсальная подвижность в надпороговом режиме	106
5.3.	Зависимость подвижности от прижимающего поля и температуры	108
5.4.	Повышение подвижности с использованием технологии напряженного кремния	110
5.5.	Зависимость подвижности эффекта поля от спектра поверхностных состояний	112
5.6.	Короткоканальные эффекты в МОП-транзисторах и электростатическое качество.	114
5.7.	Геометрические эффекты порогового напряжения	115
5.8.	Эффект спада порогового напряжения для коротких каналов	116
5.9.	Эффекты узкого канала и общая характеристика геометрических эффектов порога.	117
5.10.	Индукцированное стоком понижение барьера (DIBL)	119
5.11.	Паразитные токовые эффекты короткого канала.	120
5.12.	Оптимизация структуры истоков и стоков.	121
5.13.	Моделирование выходного сопротивления МОПТ	122
5.14.	Эффект модуляции длины канала	124
5.15.	Паразитные сопротивления стока и истока	125
5.16.	Паразитные емкости стока и истока	127

Глава 6.	Эффекты сильных электрических полей.	129
6.1.	Квазидвумерная модель распределения сильных электрических полей в районе стока	129
6.2.	Моделирование максимальных электрических полей в канале МОПТ	131
6.3.	Горячие носители	131
6.4.	Методы борьбы с горячими носителями	133
6.5.	Разогрев носителей и «удачливые» электроны	134
6.6.	Моделирование ударной ионизации в канале	135
6.7.	Влияние тока подложки на работу МОПТ	138
6.8.	Влияние горячих носителей на срок службы МОПТ	139
6.9.	Методика прогнозирования срока службы транзистора в зависимости от воздействия горячих носителей	141
Глава 7.	Диффузионно-дрейфовая модель тока в МОПТ.	143
7.1.	Исходные положения для построения модели.	143
7.2.	Электрохимический потенциал в канале МОПТ.	143
7.3.	Полная плотность тока в канале МОПТ.	146
7.4.	Отношение диффузионной и дрейфовой компонент тока как управляющий параметр	146
7.5.	Уравнение непрерывности	148
7.6.	Интегральное граничное условие	148
7.7.	Распределение электрического и химического потенциалов вдоль канала	149
7.8.	Общее выражение для тока в диффузионно-дрейфовой модели.	150
7.9.	Вольт-амперная характеристика в надпороговой области	151
7.10.	Подпороговый режим	154
7.11.	Время пролета электрона через канал	156
7.12.	Транспортное уравнение Больцмана в канале	157
Глава 8.	Транзисторы технологии «кремний-на-изоляторе».	159
8.1.	Преимущества КНИ МОПТ	160
8.2.	Различные конфигурации КНИ МОПТ	161
8.3.	Частично обедненные КНИ МОПТ	163
8.4.	Кинк-эффект в частично обедненных КНИ МОПТ	165
8.5.	Паразитный биполярный эффект	166
8.6.	Полностью обедненные КНИ МОПТ	167
8.7.	Эффекты саморазогрева	168
8.8.	Влияние обратного напряжения на подложке на пороговое напряжение.	168
8.9.	Ультратонкие КНИ МОПТ	169

8.10.	Сравнение полностью и частично обедненных КНИ МОПТ	170
8.11.	Технологии многозатворных МОПТ	172
Глава 9.	Моделирование транзисторов КНИ-технологий.	174
9.1.	Электростатика полностью обедненного КНИ МОПТ	174
9.2.	Пороговое напряжение полностью обедненного КНИ МОПТ	176
9.3.	Включение МОПТ с нижним затвором	177
9.4.	Влияние смещения на подложке на пороговое напряжение основного канала.	178
9.5.	Вырожденный канал	178
9.6.	Уравнение непрерывности для плотности тока в канале ..	181
9.7.	Решение уравнения непрерывности в канале	181
9.8.	Распределение плотности электронов вдоль канала	183
9.9.	Вольт-амперная характеристика КНИ МОПТ	184
9.10.	Надпороговый режим работы полностью обедненного КНИ МОПТ	184
9.11.	Моделирование подпороговой характеристики полностью обедненного КНИ МОПТ	186
Глава 10.	Токи утечки в нанoeлектронных структурах	188
10.1.	Структура энергопотребления в схемах КМОП-технологии	188
10.2.	Токи утечки как ограничитель развития технологии	190
10.3.	Классификация токов утечки современных МОПТ	191
10.4.	Прямое туннелирование через подзатворный окисел.	192
10.5.	Механизм Фаулера—Нордгейма.	194
10.6.	Токи утечки через p – n -переход стока	195
10.7.	Токи утечки стока, индуцированные затвором (GIDL).	196
10.8.	Использование high-K-диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью	198
10.9.	Проблемы использования high-K-диэлектриков	199
10.10.	Временной диэлектрический пробой подзатворного окисла (TDDDB).	201
10.11.	Модели временного диэлектрического пробоя подзатворного окисла	203
10.12.	Подпороговые токи утечки	204
10.13.	Разброс пороговых напряжений транзисторов на одном чипе.	205
10.14.	Статистическое распределение подпороговых токов за счет разброса пороговых напряжений	207

Глава 11. Мезоскопические эффекты в нанозлектронных структурах	210
11.1. Диффузный и баллистический перенос носителей в полупроводниках	210
11.2. Вольт-амперная характеристика баллистического транзистора	211
11.3. Транспорт носителей в узких каналах и квантование проводимости.	214
11.4. Квантовый точечный контакт	216
11.5. Две формулы для сопротивления	218
11.6. Роль контактов.	219
11.7. Последовательные сопротивления и их аддитивность	223
Литература	225
Приложения	233