

Г.И. Зебрев

# ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КРЕМНИЕВОЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Учебное пособие

4-е издание, электронное



Москва  
Лаборатория знаний  
2020

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. — 4-е изд., электрон. — М. : Лаборатория знаний, 2020. — 243 с. — (Нанотехнологии). — Систем. требования: Adobe Reader XI ; экран 10". — Загл. с титул. экрана. — Текст : электронный.

ISBN 978-5-00101-830-8

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 978-5-00101-830-8

© Лаборатория знаний, 2015

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |    |
|---|----|
| <b>Предисловие</b> .....  | 3  |
| <b>Глава 1. Базисные физические уравнения.</b> .....                        | 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 |
| <b>Глава 2. Особенности приборов КМОП-технологии</b> .....                  | 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. | <b>Структуры металл—окисел—полупроводник . . . . .</b>  | <b>54</b> |
| 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. | <b>Вольт-амперные характеристики МОПТ . . . . .</b>   | <b>85</b> |
| 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. | <b>Физические процессы в каналах МОПТ</b> . . . . .  | 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.    | Индукированное 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. | <b>Эффекты сильных электрических полей.</b>  | 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. | <b>Диффузионно-дрейфовая модель тока в МОПТ.</b>   | 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. | <b>Транзисторы технологии «кремний-на-изоляторе».</b>  | 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.  | <b>Моделирование транзисторов КНИ-технологий.</b> .....                                     | 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. | <b>Токи утечки в нанoeлектронных структурах</b> .....                                       | 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 |