

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|-----------|
| Предисловие | 6 |
| Глава 1. Схемотехническое моделирование | 9 |
| 1.1. Задачи схемотехнического моделирования | 10 |
| 1.2. SPICE-подобные программы моделирования | 16 |
| 1.3. Интерфейс к пользовательским моделям | 19 |
| 1.4. Аппаратные ускорители и многопроцессорные системы | 21 |
| 1.4.1. Прямой метод (22). 1.4.2. Методы релаксации формы сигнала (26). 1.4.3. Специализированные аппаратные ускорители (29). 1.4.4. Быстрое макетирование (30). | |
| 1.5. Выводы | 33 |
| Глава 2. Физические процессы в МОП-транзисторах | 34 |
| 2.1. Особенности субмикронных МОП-транзисторов | 34 |
| 2.1.1. Конструкции МОП-транзисторов для СБИС (35). 2.1.2. Методы улучшения характеристик (38). 2.1.3. МОП-транзисторы со структурой КНИ (42). 2.1.4. Транзисторы с двойным и околовывающим затвором (47). 2.1.5. Транзисторы на углеродных нанотрубках и нанопроводах (49). 2.1.6. Другие типы транзисторных структур (50). 2.1.7. Особенности транзисторов для аналоговых применений (52). | |
| 2.2. Новые физические эффекты. | 54 |
| 2.3. Основные принципы формирования уравнений компактных моделей | 66 |
| 2.4. Подход к моделированию на основе порогового напряжения | 68 |
| 2.4.1. Ток стока (69). 2.4.2. Пороговое напряжение (75). | |
| 2.5. Моделирование на основе поверхностного потенциала | 79 |
| 2.5.1. Поверхностный потенциал (79). 2.5.2. Плотность заряда (82). 2.5.3. Ток стока (83). 2.5.4. Режим насыщения (86). | |
| 2.6. Моделирование на основе заряда инверсионного слоя | 87 |
| 2.6.1. Заряд инверсионного слоя (87). 2.6.2. Режим сильной инверсии (88). 2.6.3. Режим слабой инверсии (90). 2.6.4. Обзор режимов работы транзистора (91). 2.6.5. Ток стока (92). | |
| 2.7. Сглаживающие функции | 94 |
| 2.8. Модели подвижности | 96 |
| 2.8.1. Кулоновское рассеяние (96). 2.8.2. Рассеяние на фонах (97). 2.8.3. Рассеяние на шероховатости поверхности (97). 2.8.4. Эффективная подвижность (97). 2.8.5. Насыщение подвижности (98). | |
| 2.9. Моделирование тепловых процессов | 98 |
| 2.10. Моделирование паразитных элементов. | 99 |
| 2.10.1. Емкости и заряды (99). 2.10.2. Неквазистатический эффект (103). 2.10.3. Последовательные сопротивления (104). 2.10.4. Ток утечки затвора (105). 2.10.5. Ток утечки истока и стока (107). 2.10.6. Динамика транзисторов с high-k диэлектриком (107). 2.10.7. Сопротивление подложки (108). 2.10.8. Моделирование шума (108). | |
| 2.11. Выводы | 110 |

| | |
|---|-----|
| Глава 3. Методологические вопросы моделирования | 112 |
| 3.1. Требования к компактным моделям. | 112 |
| 3.2. Точность модели | 120 |
| 3.3. Достоверность моделирования | 128 |
| 3.4. Причины низкой достоверности | 140 |
| 3.4.1. Фундаментальные (неустраняемые) причины (140). | |
| 3.4.2. Опережающее развитие технологии (142). | |
| 3.4.3. Ошибки при разработке модели и программировании (144). | |
| 3.4.4. Ошибки, незамеченные при верификации модели (145). | |
| 3.4.5. Ошибки при организации вычислений (146). | |
| 3.4.6. Причины организационного характера (147). | |
| 3.4.7. Квалификация и ошибки пользователей (148). | |
| 3.4.8. Выводы (149). | |
| 3.5. Тестирование, верификация и валидация | 150 |
| 3.5.1. Требования к стандартным моделям (150). | |
| 3.5.2. Качественные тесты (153). | |
| 3.5.3. Количественные тесты (159). | |
| 3.5.4. Автоматизация тестирования моделей (160). | |
| 3.6. Диапазон применимости | 161 |
| 3.7. Место компактных моделей в САПР СБИС | 161 |
| 3.8. Стандартизация моделей | 164 |
| 3.9. Автоматическая генерация моделей. | 166 |
| 3.10. Выводы | 167 |
| Глава 4. Четыре поколения компактных моделей | 169 |
| 4.1. Типы компактных моделей | 169 |
| 4.2. Модели первых поколений | 174 |
| 4.2.1. Модели Level1, Level2, Level3 (174). | |
| 4.2.2. Модели BSIM и HSpice Level28 (178). | |
| 4.3. Модели третьего поколения. | 180 |
| 4.3.1. BSIM3 (181). | |
| 4.3.2. EKV2 (185). | |
| 4.4. Модели глубоко субмикронных и нанометровых транзисторов. | 186 |
| 4.4.1. Обобщенная структура моделей (187). | |
| 4.4.2. Модель PSP (188). | |
| 4.4.3. EKV3 (196). | |
| 4.4.4. BSIM4, BSIM5 (196). | |
| 4.4.5. HiSIM (203). | |
| 4.4.6. Другие аналитические компактные модели (208). | |
| 4.5. Альтернативные подходы к моделированию | 210 |
| 4.5.1. Упрощенные модели (210). | |
| 4.5.2. Табличные модели (211). | |
| 4.5.3. Полунатурные модели (220). | |
| 4.6. Параметры компактных моделей. | 221 |
| 4.7. Экстракция и идентификация параметров | 225 |
| 4.7.1. Методы оптимизации для экстракции параметров (233). | |
| 4.7.2. Особенности экстракции параметров для статистического моделирования (236). | |
| 4.7.3. Проектирование тестовых кристаллов (238). | |
| 4.7.4. Методика измерений (240). | |
| 4.7.5. ET-тесты (243). | |
| 4.8. Выводы | 245 |
| Глава 5. Статистическое моделирование | 246 |
| 5.1. Математическое описание разброса параметров | 250 |
| 5.2. Параметры моделей для статистического моделирования | 254 |

| | |
|---|-----|
| 5.2.1. Экстракция параметров по электрическим тестам (255). | |
| 5.2.2. Типовые значения разброса параметров (258). | |
| 5.2.3. Применение программ ПТ-моделирования (258). | |
| 5.3. Метод главных компонент (РСА). | 260 |
| 5.4. Геометрические зависимости разброса параметров | 271 |
| 5.4.1. Локальный разброс. Закон Пеллгрома (271). | |
| 5.4.2. Глобальный разброс (274). | |
| 5.4.3. Пространственная корреляция параметров (276). | |
| 5.4.4. Совместный учет глобального и локального разброса (279). | |
| 5.5. Методы статистического моделирования ИС. | 280 |
| 5.5.1. Метод наилучшего случая (280). | |
| 5.5.2. Метод Монте-Карло (282). | |
| 5.5.3. Градиентный анализ (283). | |
| 5.5.4. Метод поверхности отклика. Планирование эксперимента (284). | |
| 5.5.5. Применение метода главных компонент в случае пространственной корреляции параметров (292). | |
| 5.5.6. Метод прямых выборок (293). | |
| 5.5.7. Методы статистического моделирования цепей большой размерности (294). | |
| 5.5.8. Алгоритм статистического моделирования (297). | |
| 5.6. Выводы | 298 |
| Глава 6. Принципы полунатурного моделирования | 299 |
| 6.1. Основные идеи | 299 |
| 6.1.1. Проблемы применения реального транзистора вместо математической модели (299). | |
| 6.1.2. Цели полунатурного моделирования (300). | |
| 6.1.3. Область применения (301). | |
| 6.1.4. Недостатки и достоинства (301). | |
| 6.1.5. Структура полунатурной модели (302). | |
| 6.1.6. Набор реальных транзисторов для полунатурной модели (304). | |
| 6.2. Моделирование паразитных элементов в полунатурной модели | 304 |
| 6.2.1. Емкости, заряды и последовательные сопротивления (304). | |
| 6.2.2. Неквазистатический эффект (305). | |
| 6.2.3. Ток утечки затвора, истока и стока (305). | |
| 6.3. Регулировка параметров полунатурной модели | 305 |
| 6.3.1. Регулировка длины и ширины канала методом интерполяции (306). | |
| 6.3.2. Регулировки с использованием ET-тестов (311). | |
| 6.3.3. Алгоритм идентификации параметров (317). | |
| 6.3.4. Верификация методов регулировки параметров (318). | |
| 6.3.5. Настройка модели по вольтамперным характеристикам (324). | |
| 6.3.6. Другие методы перестройки параметров (326). | |
| 6.4. Информационная емкость и погрешность модели. | 327 |
| 6.4.1. Информационная емкость модели (327). | |
| 6.4.2. Погрешность и быстродействие модели (329). | |
| 6.5. Математические методы и алгоритмы | 339 |
| 6.5.1. Постановка задачи (341). | |
| 6.5.2. Сшивающие многополюсники (346). | |
| 6.5.3. Топологические преобразования (350). | |
| 6.5.4. Синтез сшивающих многополюсников (354). | |
| 6.5.5. Особенности реализации метода РФС (367). | |
| 6.5.6. Интеграция в САПР (368). | |
| 6.6. Выводы | 370 |
| Список литературы | 372 |
| Предметный указатель | 402 |