

Н. К. Трубочкина

Моделирование 3D наносхемотехники

3-е издание, электронное



Москва
Лаборатория знаний
2020

УДК 681.3
ББК 32.844
Т77

Трубочкина Н. К.

Т77 Моделирование 3D наносхемотехники / Н. К. Трубочкина. — 3-е изд., электрон. — М. : Лаборатория знаний, 2020. — 526 с. — Систем. требования: Adobe Reader XI ; экран 10". — Загл. с титул. экрана. — Текст : электронный.

ISBN 978-5-00101-855-1

В книге представлены базовые понятия теории переходной схемотехники, необходимые для разработки новой элементной базы суперкомпьютеров различных типов. Теорию переходной схемотехники отличает новая компонентная концепция синтеза наноструктур, в которой минимальным компонентом для синтеза схем является не транзистор, а материал и переход (связь) между материалами. Приводятся данные экспериментального 2D и 3D моделирования физических и электрических процессов в кремниевых переходных наноструктурах с минимальным топологическим размером 10–20 нм и сравнительный анализ четырех типов схемотехник.

Книга может быть рекомендована научным работникам, аспирантам и инженерам, специализирующимся в области разработки элементной базы суперкомпьютеров и альтернативных вычислительных систем, а также бакалаврам и магистрам, обучающимся по специальностям «Нанотехнология и микросистемная техника», «Электроника и микроэлектроника», «Вычислительные системы, комплексы и сети».

УДК 681.3
ББК 32.844

Деривативное издание на основе печатного аналога: Моделирование 3D наносхемотехники / Н. К. Трубочкина. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. — 499 с. : ил., [24] с. цв. вкл. — ISBN 978-5-9963-0291-8.

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 978-5-00101-855-1

© Лаборатория знаний, 2015

Оглавление

Предисловие автора	3
Введение	6
Глава 1. Основные этапы развития элементной базы ЭВМ	9
1.1. Элементная база и поколения ЭВМ	9
1.2. Историческая справка создания вычислительных устройств	10
1.3. Перспективы и проблемы развития элементной базы ЭВМ . .	12
1.3.1. Трехмерные СБИС	12
1.3.2. Изобретение, изменившее отношение к транзисторной схемотехнике	13
1.4. Компоненты транзисторной схемотехники	14
1.4.1. Назначение компонентов транзисторной схемотехники	14
1.4.2. Пример описания технологии создания интегральной структуры с помощью специальных операторов	16
1.5. Представление интегральных структур транзисторов как схем переходной схемотехники	24
Глава 2. Обзор и анализ состояния элементной базы для наноиндустрии. Перспективы развития	27
2.1. Настоящее и будущее наноэлектроники	27
2.2. Поиск оптимального компонента	28
2.2.1. 3D транзистор	28
2.2.2. FinFET-транзистор	29
2.2.3. Пьезотранзистор	29
2.2.4. Полевой транзистор на основе графеновой наноленты .	30
2.2.5. Полевой транзистор на основе графена	31
2.2.6. Органический светоизлучающий полевой транзистор .	31
2.2.7. ДНК-транзистор	31
2.3. Поиск альтернативных макросхем	32
2.3.1. Создание наноструктуры с помощью ДНК.	33
2.3.2. Нейроны и кремниевая электроника	34
2.3.3. Самособирающийся чип	36
2.3.4. Биочипы	37
2.4. Поиск альтернативного компьютера.	39

2.4.1. Квантовый компьютер	39
2.4.2. Молекулярный биокомпьютер	42
2.5. Проблемы научного поиска новой элементной базы.	42
2.6. Поиск оптимальной схмотехники для твердотельных СБИС.	43
2.6.1. Концептуально новая схмотехника вычислительных 3D наносистем: переходная схмотехника	43
Глава 3. Переходная 3D наносхмотехника — новая компонентная концепция и новое качество в создании трехмерных интегральных схем.	44
3.1. Закон Мура достигает своего предела	44
3.2. Основные понятия и определения	45
3.3. Принципиальная особенность новой концепции	47
3.4. Этапы разработки наноструктур переходных элементов	48
3.5. Пути дальнейшего развития переходной схмотехники	49
3.6. Интересные совпадения в переходной кремниевой и углеродной схмотехниках	49
Глава 4. Теоретические основы переходной схмотехники.	51
4.1. Математическая модель элемента переходной схмотехники.	51
4.2. Основы твердотельной переходной схмотехники.	54
4.3. Необходимость компьютерного физического моделирования интегральной структуры	56
4.4. Моделирование наноструктур ($N = 2$). Моделирование внутреннего и поверхностного p - n -переходов — основных компонентов твердотельной переходной схмотехники	56
4.4.1. 2D моделирование внутреннего p - n -перехода с минимальным топологическим размером 20 нм при электрическом воздействии на электроды	57
4.4.2. 3D моделирование внутреннего $p \rightarrow n$ -перехода с минимальным топологическим размером 20 нм с электрическим воздействием на электроды	64
4.4.3. 2D моделирование поверхностного p - n -перехода с минимальным топологическим размером 20 нм с электрическим воздействием на электроды	68
4.4.4. 3D моделирование поверхностного p - n -перехода с минимальным топологическим размером 20 нм и электрическим воздействием на электроды ($p \Rightarrow n$)	73
4.4.5. Анализ токовых характеристик внутреннего и поверхностного p - n -переходов	76
4.4.6. Технологическая доступность различных пространственных реализаций внутреннего и поверхностного p - n -переходов	77

4.4.7. Физические и математические модели для моделирования в Sentaurus Device (TCAD Synopsys 2008)	79
4.4.8. Сравнительный анализ наноструктур внутреннего и поверхностного p - n -переходов	81
Глава 5. Элементы переходной схемотехники	82
5.1. Синтез и моделирование наноструктуры биполярного транзистора размерностью $N = 3$	82
5.1.1. Уравнение синтеза абстрактной модели биполярного транзистора в переходной схемотехнике (этап 1) . . .	83
5.1.2. Генерация наноструктур биполярного транзистора ($N = 3$) как схем переходной наносхемотехники (этапы 2 и 3)	84
5.1.3. Моделирование ступенчатого биполярного транзистора с моделью структуры $n_1 \Rightarrow p_2 \Rightarrow n_3$ (этап 4).	86
5.2. Синтез и моделирование наноструктуры МОП-транзистора ($N = 4$).	97
5.2.1. Использование переходов полупроводник–окисел . .	97
5.2.2. Уравнение синтеза абстрактной модели МОП-транзистора в переходной схемотехнике (этап 1).	98
5.2.3. Генерация наноструктур МОП-транзистора ($N = 4$) как схем переходной наносхемотехники (этапы 2 и 3).	99
5.2.4. Моделирование МОП-транзистора с моделью структуры (этап 4)	101
Глава 6. Система простейших логических элементов	109
6.1. Классификация элементов ЭВМ	109
6.2. Система простейших логических потенциальных элементов	110
6.2.1. Инвертор. Логическая схема НЕ	110
6.2.2. Конъюнктор. Логическая схема И	111
6.2.3. Дизъюнктор. Логическая функция ИЛИ	112
6.2.4. Элемент Шеффера. Логическая функция И–НЕ . . .	112
6.2.5. Элемент Пирса. Логическая функция ИЛИ–НЕ . . .	113
6.3. Технические параметры логических элементов ЭВМ	114
6.3.1. Коэффициент объединения по входам	114
6.3.2. Нагрузочная способность.	115
6.3.3. Передаточная характеристика	115
6.3.4. Потребляемая мощность	115
6.3.5. Динамические параметры логического элемента . . .	117
6.4. Алгоритм создания переходного элемента	118

6.5. Пример проектирования интегральной схемы	118
6.6. Схемотехника интегральных инжекционных схем (И ² Л) — частный случай переходной схемотехники ($N = 4$)	120
6.6.1. Инжекционный инвертор. Алгоритм синтеза	120
6.6.2. Принцип функциональной интеграции	122
6.7. Правила генерации структурных формул интегральных структур по математической модели ФИЭ.	123
6.7.1. Пример. Генерация структур для моделей размерностью $N = 8$	125
6.8. Реализации переходных схем на базе инжекционного инвертора	129
6.8.1. Инжекционный инвертор с торцевым инжектором (схема НЕ)	129
6.8.2. НСТЛ: непосредственно связанная транзисторная логика (схема НЕ–Монтажное И).	131
6.8.3. Инжекционный клапан НСТЛ	133
6.9. Схемотехника инжекционных схем	134
6.9.1. Инжекционный инвертор	135
6.9.2. Реализация дизъюнкции. Инжекционная схема ИЛИ–НЕ/ИЛИ	135
6.9.3. Схемная реализация конъюнкции. Инжекционная схема И–НЕ/И	136
6.10. Алгоритм проектирования сложных схем в схемотехнике И ² Л.	138
6.11. Другие типы инжекционных схем	139

Глава 7. Переходная схемотехника.

Синтез математических моделей	141
7.1. Операция объединения для синтеза моделей ФИЭ.	141
7.2. Пример проектирования схемы размерностью $N = 4$ в переходной (интегральной) схемотехнике	145
7.3. Синтез интегральных структур схем НЕ размерностью $N = 4$	147
7.4. Анализ ФИЭ с математической моделью G4.2 на примере интегральной структуры G4.2.2 и ее сравнение с инжекционным инвертором G.4.1.2	148
7.5. Правила описания интегральных структур	149
7.6. Моделирование переходных наноструктур НЕ ($N = 4$). Моделирование наноструктуры вертикального инжекционного инвертора	157
7.6.1. Уравнение синтеза абстрактной модели вертикального И ² Л-инвертора в переходной схемотехнике (этап 1).	158

7.6.2. Генерация вертикальной наноструктуры И ² Л-инвертора ($N = 4$) как схемы переходной схемотехники	158
7.6.3. 2D моделирование вертикального переходного инвертора.	159
7.6.4. Результаты 2D моделирования вертикальной наноструктуры И ² Л-инвертора	161
7.6.5. 3D моделирование наноструктуры вертикального инжекционного инвертора	165
7.7. Другие инверторы переходной схемотехники.	168
7.7.1. Синтез инверторов ($N = 5$)	168
7.7.2. Синтез комплементарных биполярных инверторов ($N = 6$).	168

Глава 8. Реализация функции И–НЕ в транзисторной и переходной схемотехниках	171
8.1. Реализация функции И–НЕ в транзисторной схемотехнике в базисе диодно-транзисторной логики	171
8.2. Оптимизация элемента ДТЛ. Преобразование схемы ДТЛ в ТТЛ с простым инвертором	174
8.3. Транзисторно-транзисторная логика с простым инвертором	176
8.4. Модификации ТТЛ с простым инвертором	180
8.5. ТТЛ со сложным инвертором	184
8.6. Модификации схем ТТЛ со сложным инвертором	188
8.6.1. ТТЛ с диодом в базовой цепи нагрузочного транзистора	188
8.6.2. ТТЛ с ключом в базовой цепи выходного транзистора	189
8.6.3. ТТЛ с использованием пары Дарлингтона	190
8.6.4. Повышение быстродействия схемы ТТЛ со сложным инвертором.	191
8.7. Реализация функции И–ИЛИ–НЕ в схемотехническом базисе ТТЛ.	196
8.8. Схема ТТЛ с тремя состояниями	197
8.9. Реализация схемы И–НЕ в переходной схемотехнике. . . .	199
8.9.1. Синтез КТТЛ с простым инвертором ($N = 8$)	200
8.9.2. Уравнение синтеза схемы И–НЕ в переходной схемотехнике	200
8.9.3. Синтез интегральных структур КТТЛ	204
8.10. Алгоритмы проектирования СВИС в базисе ТТЛ	207
8.10.1. Алгоритм проектирования сложных схем в базисе ТТЛ И–НЕ	207
8.10.2. Алгоритм проектирования сложных схем в базисе ТТЛ И–ИЛИ–НЕ	208

8.11. Физическое моделирование наноструктуры переходного элемента И–НЕ ($N = 8$) со структурной формулой на рисунке 8.44, б	209
8.11.1. Результаты компьютерного моделирования переходного элемента И–НЕ ($N = 8$)	210
8.11.2. Физическое моделирование наноструктуры переходного элемента И–НЕ ($N = 8$) со структурной формулой на рисунке 8.51	217
8.11.3. Физическое моделирование наноструктуры переходного элемента И–НЕ ($N = 8$) со структурной формулой на рисунке 8.56, б	221
Глава 9. Реализация функции ИЛИ–НЕ в транзисторной и переходной схемотехниках	228
9.1. Реализация функции ИЛИ–НЕ в переходной схемотехнике	228
9.1.1. Синтез моделей ФИЭ класса НСТЛ	228
9.2. Токовый ключ — первая модификация ЭСЛ	229
9.2.1. Работа токового ключа	230
9.2.2. Достоинства и недостатки токового ключа	231
9.3. Схема МЭСЛ (вторая модификация ЭСЛ) реализации функционально полного логического вентиля на базе токового ключа	231
9.4. Схема ЭСЛ (третья модификация)	232
9.4.1. Зависимость логических нуля и единицы от разбросов напряжения питания	233
9.5. ЭСЛ с отрицательным напряжением питания (четвертая модификация ЭСЛ)	233
9.5.1. Схема источника опорного напряжения для ЭСЛ	234
9.6. Схема ЭСЛ с одним источником питания (пятая модификация).	235
9.6.1. Пример использования Монтажного ИЛИ для реализации сложных логических функций	236
9.7. Алгоритмы проектирования сложных схем в базисе ЭСЛ	236
9.7.1. Алгоритм проектирования сложных схем в базисе ЭСЛ ИЛИ–НЕ	236
9.7.2. Алгоритм проектирования сложных схем в базисе ЭСЛ ИЛИ–НЕ–М _{или}	237
9.8. ЭСЛ в переходной схемотехнике	238
9.9. Математические модели ЭСЛ в переходной схемотехнике	238
9.10. Генерация моделей наноструктур ИЛИ–НЕ в классе МЭСЛ	239
9.11. Физическое моделирование наноструктуры переходного элемента ИЛИ–НЕ (НСТЛ)	243

9.11.1. Уравнение синтеза	243
9.11.2. Генерация наноструктуры	243
9.11.3. Компьютерное моделирование наноструктуры ИЛИ–НЕ	244
Глава 10. Транзисторная и переходная МОП-схемотехники . . .	248
10.1. МОП-транзисторы	248
10.2. МОП-инверторы	249
10.2.1. МОП-инвертор с двумя источниками питания. Вариант 1	249
10.2.2. МОП-инвертор с одним источником питания. Вариант 2	251
10.2.3. МОП-инвертор с одним источником питания. Вариант 3	251
10.3. Представление МОП-инвертора в переходной схемотехнике	252
10.3.1. Уравнение синтеза математической модели МОП-инвертора в переходной схемотехнике	252
10.3.2. Генерация полупроводниковых структур МОП-инвертора	253
10.3.3. Физическое моделирование наноструктуры МОП-инвертора — схемы переходной схемотехники	253
10.4. МОП-схема И–НЕ. Транзисторная схемотехника	258
10.5. Математическая модель и структурные формулы МОП-схемы И–НЕ в переходной схемотехнике	259
10.6. МОП-схема ИЛИ–НЕ. Транзисторная схемотехника . . .	261
10.7. Математическая модель МОП-схемы ИЛИ–НЕ в переходной схемотехнике	262
10.8. Принципы синтеза МОП-схем из транзисторов	264
10.9. Проектирование логических МОП-схем любой сложности на МОП-транзисторах	264
10.9.1. Алгоритм проектирования	264
10.10. Достоинства и недостатки МОП-схем	266
Глава 11. Транзисторная и переходная КМОП-схемотехники . . .	267
11.1. КМОП-инвертор в транзисторной схемотехнике	267
11.1.1. Интегральная структура КМОП-инвертора в эпитаксиально-планарной технологии	268
11.2. Математическая модель КМОП-схемы НЕ в переходной схемотехнике	269
11.3. Компьютерное моделирование наноструктуры КМОП-инвертора со структурной формулой на рисунке 11.5	270

11.4.	Компьютерное моделирование вертикальной наноструктуры КМОП-инвертора со структурной формулой на рисунке 11.8, а	272
11.5.	КМОП-вентиль И–НЕ в транзисторной схемотехнике	279
11.6.	Математическая модель КМОП-схемы И–НЕ в переходной схемотехнике	280
11.7.	КМОП-вентиль ИЛИ–НЕ в транзисторной схемотехнике.	281
11.8.	Математическая модель КМОП-схемы ИЛИ–НЕ в переходной схемотехнике	282
11.9.	Общее в КМОП-схемах НЕ, И–НЕ, ИЛИ–НЕ	284
11.10.	Принципы синтеза КМОП-схем разной сложности	284
11.11.	Проектирование КМОП-схем любой сложности	284
11.11.1.	Алгоритм проектирования	284
11.12.	Достоинства и недостатки КМОП-схем	285
Глава 12.	Транзисторная и переходная БиМОП-схемотехники	286
12.1.	БиМОП-инвертор	286
12.1.1.	Уравнение синтеза математической модели	286
12.1.2.	Генерация полупроводниковых структур БиМОП-инвертора	287
12.1.3.	Компьютерное моделирование переходной наноструктуры БиМОП-инвертора размерностью $N = 6$	287
12.2.	БиМОП-схема И–НЕ.	293
12.2.1.	Транзисторные варианты — БиМОП ТТЛ	293
12.2.2.	Синтез переходных моделей БиМОП-схем И–НЕ	294
12.3.	БиМОП-схема ИЛИ–НЕ.	295
12.3.1.	Транзисторный вариант БиМОП НСТЛ	295
12.3.2.	Синтез переходной модели БиМОП-схемы ИЛИ–НЕ.	295
Глава 13.	Методика проектирования СБИС в переходной схемотехнике	297
13.1.	Этапы проектирования устройств	298
13.1.1.	Постановка задачи	298
13.1.2.	Определение схемотехнического базиса и типа проектирования	299
13.2.	Проектирование устройств в переходной схемотехнике.	300
13.2.1.	Сравнительный анализ транзисторной и переходной схемотехник	300
13.3.	Проектирование сложных комбинационных схем в переходной схемотехнике.	302

Глава 14. Триггерные схемы	305
14.1. Структурная схема триггера	305
14.2. Классификации триггеров	306
14.3. Комбинированные триггеры	306
14.4. Асинхронные триггеры	307
14.4.1. Бистабильная ячейка, или асинхронный <i>RS</i> -триггер	307
14.4.2. Модификации <i>RS</i> -триггера	311
14.4.3. Универсальный <i>JK</i> -триггер	314
14.4.4. <i>T</i> -триггер	315
14.4.5. <i>D</i> -триггер	315
14.4.6. <i>DV</i> -триггер	316
14.5. Методы проектирования триггеров	317
14.5.1. Проектирование триггеров на основе <i>RS</i> -триггера	317
14.5.2. Метод преобразования характеристических уравнений	319
14.5.3. Метод сравнения характеристических уравнений	320
14.5.4. Метод проектирования триггеров по характеристическим уравнениям	322
14.6. Синхронные триггеры	326
14.7. Проектирование триггеров на МОП-транзисторах и КМОП-парах транзисторов	328
14.8. Проектирование комбинированных триггеров	328
14.9. Многотактные триггеры	330
14.9.1. Двухтактные триггеры	330
14.10. Триггеры в переходной схемотехнике	333
14.10.1. Модели бистабильных ячеек в переходной биполярной схемотехнике	333
14.11. Компьютерное моделирование наноструктуры <i>RS</i> -триггера со структурной формулой, приведенной на рисунке 14.37, а	335
14.11.1. <i>D</i> -триггер в переходной схемотехнике	346
Глава 15. Последовательностные цифровые функциональные устройства ЭВМ.	348
15.1. Общая структурная схема последовательностного устройства	348
15.2. Пример проектирования последовательностной схемы.	349
Глава 16. Регистры	353
16.1. Классификация регистров	353
16.1.1. Регистр с параллельными приемом и выдачей информации	354
16.1.2. Регистр с параллельным приемом и последовательной выдачей информации	354

16.1.3. Регистр с последовательным приемом и параллельной выдачей информации	355
16.1.4. Регистр с последовательными приемом и выдачей информации	355
16.1.5. Универсальный регистр	356
16.2. Регистры хранения	356
16.2.1. Регистр хранения на <i>RS</i> -триггерах	356
16.2.2. Регистр хранения на <i>D</i> -триггере	357
16.2.3. <i>RS</i> -триггер с парафазным приемом и выдачей информации	358
16.2.4. Реализация на регистрах логических операций	359
16.2.5. Примеры использования поразрядных логических операций на регистрах	361
16.3. Регистры сдвига	363
16.3.1. Реализация регистра сдвига на <i>RS</i> -триггерах	364
16.3.2. Реверсивный регистр	366
16.4. Пример проектирования схемы памяти в переходной схемотехнике	367
Глава 17. Счетчики	369
17.1. Последовательные счетчики	369
17.2. Параллельные счетчики	371
17.3. Вычитающий счетчик	376
17.4. Счетчик с ненормальным порядком счета (частный случай генератора чисел)	376
17.5. Реверсивный счетчик с основанием 10	377
17.6. Последовательно-параллельные счетчики	379
Глава 18. Генераторы чисел.	380
18.1. Пример проектирования устройства управления	380
Глава 19. Комбинационные схемы устройств	383
19.1. Дешифраторы	383
19.2. Шифраторы	386
19.3. Мультиплексоры	388
19.4. Демультимплексоры	391
19.5. Арифметико-логические устройства	391
19.6. Схемы сравнения — двоичные компараторы	393
Глава 20. Схемотехника матриц.	397
Матричное проектирование	397
20.1. Классификация полупроводниковых запоминающих устройств	397
20.2. Запоминающие устройства с произвольной выборкой	398
20.2.1. Биполярный запоминающий элемент ЗУПВ	399
20.2.2. МОП-запоминающий элемент ЗУПВ	400
20.3. ПЗУ	400

20.3.1. Строковое ПЗУ	400
20.3.2. ПЗУ с выборкой одного разряда	401
20.3.3. Программируемые биполярные ПЗУ	402
20.3.4. Масочно-программируемые ПЗУ	403
20.3.5. Стираемые ПЗУ	405
20.4. Применение ПЗУ. Примеры	406
20.4.1. Сумматор на ПЗУ	406
20.4.2. Счетчик на ПЗУ	407
20.4.3. Генератор чисел на ПЗУ	408
20.4.4. Хранение в ПЗУ графических образов и текстовых символов	409
20.4.5. Хранение в ПЗУ оцифрованного сигнала	409
20.5. Программируемые логические матрицы	410
20.5.1. Основной вентиль биполярной ПЛМ	410
20.5.2. Построение ПЛМ	412
20.5.3. Использование ПЛМ без триггеров в сложных устройствах	413
20.5.4. Реализация на одной ПЛМ нескольких устройств	413
20.5.5. ПЛМ с триггерами	414
Глава 21. Автоматизация этапов проектирования СБИС в переходной схемотехнике	416
21.1. Синтез математических моделей элементов и устройств переходной схемотехники. Алгоритмы	416
21.2. Генерация наноструктур элементов и устройств переходной схемотехники	428
21.3. 2D и 3D моделирование переходных наноструктур	429
21.3.1. Особенности моделирования элементов переходной схемотехники.	430
21.3.2. Дополнительное программное обеспечение	431
Глава 22. Система математических моделей и наноструктур логических элементов и элементов памяти переходной схемотехники различной размерности для полупроводниковой нанoeлектроники	433
Глава 23. Сравнительный анализ транзисторной и переходной полупроводниковых схемотехник	443
23.1. Преимущества переходной 3D схемотехники	445
23.2. Проблемы переходной полупроводниковой 3D схемотехники	447
Глава 24. Наноструктуры и их модели. Четыре типа переходной схемотехники	448
24.1. Модели наноструктур переходной полупроводниковой схемотехники (первый тип)	449
24.2. Модели наноструктур биосхемотехники (второй тип)	450

24.2.1. Базовые элементы	450
24.2.2. Сочетание аминокислот — синтез схем биосхемотехники	454
24.3. Сравнение моделей наноструктур первого и второго типов переходной схемотехники	454
24.4. Модели наноструктур неживых углеродных переходных систем (третий тип)	461
24.5. Модели неживых неуглеродных переходных систем (четвертый тип)	463
24.6. Единство и различия моделей наноструктур четырех типов переходной схемотехники	464
Заключение	473
Литература	475