

А.И. Белоус, В.А. Емельянов, А.С. Турцевич

ОСНОВЫ СХЕМОТЕХНИКИ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ



ТЕХНОСФЕРА

**Предисловие
Ж.И. Алфёрова**



М И Р Э л е к т р о н и к и

А.И. Белоус
В.А. Емельянов
А.С. Турцевич

Оснoвы
схемотехники
микроэлектронных
устройств

ТЕХНОСФЕРА

Москва

2012

УДК 621.317
ББК 32.844.1
Б43

Б43 Белоус А.И., Емельянов В.А., Турцевич А.С.
Основы схемотехники микроэлектронных устройств
Москва:
Техносфера, 2012. – 472 с. ISBN 978-5-94836-307-3

В книге представлен анализ особенностей работы, методы проектирования и основы практического применения цифровых микросхем в составе современных микроэлектронных устройств, предложен большой набор эффективных схемотехнических решений базовых элементов для реализации требований, предъявляемых к микроэлектронным устройствам, приведено детальное описание принципов работы и правил применения современных базовых элементов в составе микроэлектронных устройств.

Издание ориентировано на широкий круг инженерно-технических работников, учёных, студентов и аспирантов, специализирующихся в области разработки, организации производства и эксплуатации радиоэлектронной бытовой, промышленной и специальной техники, информационно-коммуникационных, телекоммуникационных и навигационных применений, использующих современные микроэлектронные устройства.

УДК 621.317
ББК 32.844.1

© 2012, А.И. Белоус, В.А. Емельянов, А.С. Турцевич
© 2012, ЗАО «РИЦ «Техносфера»,
оригинал-макет, оформление.

ISBN 978-5-94836-307-3

Содержание

Предисловие Ж.И. Алфёрова	8
Предисловие	10
Введение	14
Глава 1. Физические основы работы полевых транзисторов	17
1.1. Физические основы работы субмикронных МОП-транзисторов	17
1.1.1. Типовая структура МОП-транзистора	17
1.1.2. Глубина области обеднения	24
1.1.3. Определение величины заряда в слое инверсии	25
1.1.4. Оценка толщины инверсионного слоя	27
1.2. Анализ работы МОП-транзистора с длинным каналом	28
1.2.1. Анализ влияния подложки на работу МОП-транзистора	28
1.2.2. Выражения для оценки значения допорогового тока	28
1.3. Анализ физических процессов, происходящих в субмикронном МОП-транзисторе	31
1.3.1. Анализ физических эффектов, влияющих на пороговое напряжение МОП-транзистора	32
1.3.2. Методы ограничения эффекта сквозного пробоя	37
1.3.3. Эффект возникновения тока утечки стока МОП-транзистора, обусловленный влиянием его затвора	38
Литература к главе 1	39
Глава 2. Методы минимизации энергопотребления микроэлектронных устройств	41
2.1. Основные тенденции изменения параметров энергопотребления микроэлектронных устройств	41
2.2. Пути уменьшения величины рассеиваемой мощности в КМОП БИС	45
2.3. Основные источники рассеиваемой мощности в КМОП БИС	56
2.4. Мощность рассеивания КМОП-инвертора в режиме сквозного тока	61
2.5. Динамическая мощность рассеяния КМОП-инвертора	63
2.6. Физические ограничения при проектировании маломощных КМОП БИС	70
2.7. Конструктивно-технологические ограничения при проектировании маломощных КМОП БИС	73
2.8. Схемотехнические ограничения при проектировании маломощных КМОП БИС	74
2.9. Системотехнические ограничения при проектировании микромощных КМОП БИС	76
Литература к главе 2	80
Глава 3. Общая характеристика цифровых БИС	83
3.1. Структурная организация цифровых БИС	83
3.1.1. Общая структура цифровых БИС	83

3.1.2. Структура внутренних элементов цифровых БИС	84
3.1.3. Структура элементов согласования цифровых БИС	91
3.2. Система основных параметров и характеристик цифровых БИС	101
3.2.1. Функциональные параметры цифровых БИС	101
3.2.2. Электрические параметры цифровых БИС	101
3.2.3. Динамические параметры цифровых БИС	103
3.3. Схемотехническое исполнение цифровых БИС	105
3.3.1. Энергетические характеристики базовых ЛЭ цифровых БИС	105
3.3.2. Схемотехническое исполнение базовых ЛЭ цифровых БИС	115
3.3.3. Методика выбора элементной базы цифровых БИС	119
3.4. Влияние дестабилизирующих факторов на работоспособность цифровых БИС	120
3.4.1. Устойчивость цифровых БИС к электростатическому разряду	120
3.4.2. Устойчивость цифровых БИС к воздействию перегрузок	127
3.4.3. Зависимость электрических характеристик цифровых БИС от режимов эксплуатации	128
3.4.4. Устойчивость цифровых БИС к воздействию помех	130
3.5. Паразитные элементы и эффекты в цифровых БИС	143
3.5.1. Паразитные транзисторные элементы в кристаллах цифровых БИС	143
3.5.2. Эффект Миллера	148
3.5.3. Эффект «защелкивания»	150
3.5.4. Эффекты «горячих» носителей заряда	155
Литература к главе 3	156
Глава 4. Схемотехника цифровых БИС на комплементарных МОП-транзисторах	157
4.1. Базовые логические элементы цифровых КМОП БИС	157
4.1.1. Статические КМОП ЛЭ	157
4.1.2. Базовые ЛЭ динамической КМОП логики	177
4.2. Элементы памяти цифровых КМОП БИС	192
4.2.1. Элементы памяти, тактируемые уровнем синхросигнала	192
4.2.2. Элементы памяти, тактируемые фронтом синхросигнала	198
Литература к главе 4	201
Глава 5. Схемотехника цифровых БИС на биполярных транзисторах	203
5.1. Цифровые БИС на биполярных транзисторах с диодами Шоттки	203
5.1.1. Базовые логические элементы ТТЛШ цифровых БИС	203
5.1.2. Базовые ЛЭ Шоттки транзисторной логики	210
5.1.3. Базовые ЛЭ интегральной Шоттки логики	213
5.1.4. Базовые ЛЭ диодно-транзисторной логики с диодами Шоттки	217
5.2. Элементы памяти ТТЛШ БИС	217
5.2.1. Элементы памяти, тактируемые фронтом синхросигнала	218
5.2.2. Элементы памяти, тактируемые уровнем синхросигнала	226

5.3. Схемотехника входных элементов согласования ТТЛШ БИС	229
5.3.1. Входные ЭС ТТЛШ БИС со стандартными ТТЛ входными уровнями	229
5.3.2. Входные ЭС ТТЛШ БИС с повышенной нагрузочной способностью	234
5.3.3. Входные ЭС ТТЛШ БИС с парафазными выходами	235
5.3.4. Входные ЭС ТТЛШ БИС с памятью	237
5.3.5. Входные ЭС ТТЛШ БИС с повышенной помехоустойчивостью	240
5.3.6. Входные ЭС с преобразованием уровней сигналов	247
5.3.7. Схемы защиты цепей входных ЭС ТТЛШ БИС	252
5.4. Схемотехника выходных элементов согласования ТТЛШ БИС	255
5.4.1. Выходные ЭС ТТЛШ БИС со стандартными ТТЛ выходными уровнями	255
5.4.2. Выходные ЭС ТТЛШ БИС с памятью	264
5.4.3. Выходные ЭС ТТЛШ БИС с преобразованием уровней сигналов	266
5.4.3. Выходные ЭС ТТЛШ БИС с преобразованием уровней сигналов	269
5.4.4. Схемотехника цепей защиты выходных ЭС ТТЛШ БИС	269
5.5. Цифровые БИС на основе интегральной инжекционной логики	283
5.5.1. Разновидности базовых элементов И ² Л БИС	287
5.5.2. Элементы памяти И ² Л БИС	295
5.5.3. Схемотехника входных элементов согласования И ² Л БИС	302
5.5.4. Защита выводов И ² Л БИС от перенапряжения и статического электричества	318
5.6. Биполярный микропроцессорный комплект БИС серии К1815 для цифровой обработки сигналов	318
Литература к главе 5	320
Глава 6. Схемотехника цифровых БИС на комплементарных МОП и биполярных транзисторах	323
6.1. Базовые логические элементы БиКМОП БИС	324
6.2. Элементы памяти БиКМОП БИС	335
6.3. Схемотехника входных элементов согласования БиКМОП БИС	337
6.3.1. Входные ЭС БиКМОП БИС с преобразованием уровней сигналов	337
6.3.2. Входные ЭС БиКМОП БИС с повышенной нагрузочной способностью	343
6.3.3. Входные ЭС БиКМОП БИС с парафазными выходами	343
6.3.3. Входные ЭС БиКМОП БИС повышенной помехозащищенности	344
6.3.4. Входные ЭС БиКМОП БИС с памятью	345
6.3.5. Схемотехника цепей защиты входных ЭС БиКМОП БИС	345
6.4. Схемотехника выходных элементов согласования БиКМОП БИС	346

6.4.1. Выходные ЭС БиКМОП БИС с формированием КМОП выходных уровней	346
6.4.2. Выходные ЭС БиКМОП БИС с формированием TTL выходных уровней	347
6.4.3. Выходные ЭС БиКМОП БИС с формированием ЭСЛ выходных уровней	350
6.4.4. Выходные ЭС БиКМОП БИС с памятью	353
6.4.5. Схемотехника цепей защиты выходных ЭС БиКМОП БИС	353
6.5. СБИС однокристалльного процессора телевизионных сигналов	353
Литература к главе 6	357
Глава 7. Принципы организации интерфейса в системах обработки информации	359
7.1. Введение	359
7.1.1. Параметры и методы организации интерфейсных шин	361
7.1.2. Типы системных шин	365
7.2. Основные принципы применения и параметры линий связи	367
7.2.1. Электрические параметры линий связи	368
7.2.2. Режимы работы линий связи	374
7.2.3. Помехи в электрически длинных линиях связи	378
7.2.4. Основы метода Бержерона расчета отражений на концах линии связи	383
7.3. Коды для передачи информации по линиям связи	385
7.3.1. Методы физического кодирования	387
7.3.2. Коды исправления одиночных и пакетных ошибок	392
7.3.3. Эффективное кодирование передаваемых сообщений	394
Литература к главе 7	400
Глава 8. Интерфейсные БИС	401
8.1. Классификация БИС	401
8.1.1. Классификация интерфейсных БИС	401
8.1.2. Классификация схемотехнических элементов БИС	402
8.1.3. Система основных параметров цифровых БИС	405
8.1.4. Основные параметры интерфейсных микросхем	410
8.2. Организация линий связи	414
8.2.1. Организация линий связи с помощью свитой пары	414
8.2.2. Обеспечение электрического согласования интерфейсных микросхем	415
8.3. Исполнение цифровых БИС	417
8.3.1. Конструктивно-схемотехническое исполнение цифровых БИС	417
8.3.2. Элементная база интерфейсных схем	418
8.3.3. Применение интерфейсных схем с отключаемым выходом	419
8.4. Типовые интерфейсные ИС	421
8.4.1. Шинные формирователи (шинные драйверы)	421
8.4.2. Порты ввода-вывода	422

8.4.3. Программируемый интерфейс (адаптер)	423
8.4.4. ИС для организации последовательных каналов	424
8.4.5. Интерфейсные БИС серии K583	425
8.5. Особенности организации линий связи на основе интерфейсных микросхем	430
8.5.1. Интерфейс «токовая петля»	432
8.5.2. Инфракрасный интерфейс	433
8.6. Особенности организации режима пониженного энергопотребления в современных интерфейсных микросхемах с последовательной передачей данных	434
8.6.1. Микросхемы приемопередатчиков интерфейса RS-485	434
8.6.2. Микросхемы приемопередатчиков интерфейса RS-232	440
8.7. Конструктивно-схемотехнические особенности проектирования интерфейсных микросхем с пониженным напряжением питания	452
8.8. Особенности организации блоков умножения напряжения в интерфейсных микросхемах	457
8.9. Проектирование электрической схемы передатчика для интерфейсных микросхем с пониженным напряжением питания	462
Литература к главе 8	469
Заключение	470

Предисловие Ж.И. Алфёрова

Современные информационные и интеллектуальные управляющие системы должны удовлетворять ряду простых, но основополагающих требований: быть компактными — чтобы уместиться на столе офиса, в портфеле или кармане пользователя; быть быстрыми — чтобы большие объемы информации можно было бы передавать за короткий промежуток времени, и при этом быть надежными, энергоэффективными и дешевыми.

Основой всех этих систем, как известно, являются полупроводниковые микроэлектронные и оптоэлектронные устройства, которые изготавливаются по самым современным «высоким» субмикронным технологиям, в том числе и на основе многослойных полупроводниковых гетероструктур.

Однако, если первое требование — компактность систем — в основном обеспечивается возможностями технологии изготовления используемых в их составе микроэлектронных устройств, то такие параметры, как производительность, энергопотребление, надежность и устойчивость к воздействию различных дестабилизирующих факторов (температуры, излучений, статического электричества и др.), и даже цена изделия в основном определяются схемотехническими решениями, принятыми разработчиками этих микро- и оптоэлектронных устройств на этапе схемотехнического проектирования изделия (микросхемы, оптоэлектронные приборы).

За рубежом — в США, Японии, Китае, Германии и других индустриально развитых странах — этой проблеме уделяется большое внимание, ежегодно издаются десятки книг, публикуются сотни научных статей, проводятся десятки научных симпозиумов и конференций в России и Белоруссии, ведущих микроэлектронных странах на территории бывшего СССР, имеются десятки крупных и сотни небольших микроэлектронных дизайн-центров, в крупнейших ВУЗах ведется подготовка специалистов, аспирантов и магистрантов по таким современным специальностям, как «Электроника и микроэлектроника», «Проектирование и технология электронных средств», «Электронное приборостроение», «Автоматика и управление» и др.

К сожалению, в настоящее время, несмотря на большой объем существующей периодической, научной и научно-технической литературы по вопросам проектирования микросхем и методам их применения в составе современных микроэлектронных изделий, подобное издание, систематизирующее лучшие отечественные и зарубежные технические решения в области микроэлектронной схемотехники, отсутствует на отечественном книжном рынке, а имеющиеся переводные издания написаны десятки лет назад и не отражают в своем большинстве современное состояние проблемы. В представленной книге предлагается большой набор апробированных схемотехнических решений базовых элементов для реализации требований, предъявляемых к современным сложнофункциональным и надежным микроэлектронным устройствам и системам.

Несомненным достоинством книги является факт, что авторам удалось с привлечением минимума математических выкладок на большом количестве детально разбираемых примеров, в том числе и реализованных самими авторами, изложить

важнейшие этапы схемотехнического проектирования современных цифровых микросхем и устройств на их основе. Изложение теоретического материала сопровождается конкретными схемотехническими решениями базовых элементов, которые могут непосредственно использоваться читателями в их практической деятельности.

Книга написана простым и понятным языком и, несомненно, найдет признание как у специалистов по разработке и применению современных микроэлектронных устройств, так и у многочисленной аудитории студентов, магистрантов и преподавателей технических ВУЗов, поскольку издания по представленному профилю являются достаточно редкими и весьма востребованными как в отечественной печати, так и за рубежом.

Большой иллюстративный материал существенно облегчает усвоение материала и может служить практическим пособием при решении читателями конкретных частных задач.

Предисловие

Предлагаемая вниманию читателя книга ориентирована на широкий круг инженерно-технических работников, ученых, студентов и аспирантов, специализирующихся в области разработки, организации производства и эксплуатации радиоэлектронной бытовой, промышленной и специальной техники, информационно-коммуникационных, телекоммуникационных и навигационных применений, использующих современные микроэлектронные устройства.

Эта книга устраняет ряд очевидных для специалистов пробелов в большом объеме существующей научной и научно-технической литературы по вопросам анализа особенностей работы, методам проектирования и основам практического применения цифровых микросхем в составе современных микроэлектронных устройств и предлагает большой набор эффективных схемотехнических решений базовых элементов для реализации требований, предъявляемых к таким сложно-функциональным, высокопроизводительным и надежным микроэлектронным устройствам.

Как известно, процесс создания любой цифровой микросхемы состоит из двух основных взаимосвязанных этапов: логического проектирования, в ходе которого определяется логическая организация (архитектура), система команд, структура устройств управления и обработки данных, включая временную диаграмму работы, и схемотехнического проектирования, включающего в себя совокупность задач выбора технологического базиса, преобразования логических схем в электрические схемы на транзисторном уровне, выбора схемотехнических решений базовых элементов, способов синхронизации, цепей питания, устройств защиты от внешних и внутренних помех, зарядов статического электричества и т.д.

Если методология и пути решения задач этапа логического проектирования достаточно широко рассмотрены в многочисленных зарубежных и отечественных изданиях, то с этапом схемотехнического проектирования, к сожалению, дело обстоит иначе.

Так, в литературе детально рассмотрены методы построения различных функциональных узлов комбинационного (дешифраторы, мультиплексоры, демультимплексоры, сумматоры, умножители и др.) и последовательного типа — автоматы с памятью (триггерные устройства, регистры, счетчики и др.), рассмотрены различные методики и средства их автоматизированного проектирования.

При этом эти узлы и блоки представляются на уровне «квадратиков», описываемых на языке булевой алгебры («И», «НЕ», «И-НЕ», «ИЛИ-НЕ» и т.п.) или в виде условно-графических обозначений (D-триггер, R-S-триггер, DV-триггер и т.п.).

Эта процедура является обязательным и неотъемлемым начальным этапом сквозного процесса проектирования любого микроэлектронного устройства. Однако как разработчик, так и пользователь микроэлектронного устройства должны понимать, что находится «внутри» этих блоков и узлов. Разработчику это необходимо, чтобы путем выбора соответствующих элементов (транзисторов) и их связей обеспечить требуемые значения электрических и динамических параметров проектируемого устройства. Специалисту по эксплуатации этого микроэлектронного устройства необходимо знать «начинку» этих блоков, чтобы понимать

особенности функционирования конкретного микроэлектронного устройства в различных режимах его эксплуатации.

Ведь даже структура такого простейшего «кирпичика» — устройства внутренней памяти микросхемы, D-триггера, может быть реализована десятками различных схмотехнических вариантов соединений между собой составляющих его транзисторов. А современный студент должен ясно понимать, как из этого синтезированного блока (набора «квадратиков») «получается» топология соответствующего участка полупроводникового кристалла микросхемы, где размещение транзисторов на поверхности кристалла за счет организации соответствующих связей и межсоединений этих транзисторов между собой и с другими блоками позволяет реализовать заданный алгоритм функционирования блока (узла).

В предлагаемой книге и решается такая задача — для основных базовых блоков современных микроэлектронных устройств приводятся многочисленные примеры их схмотехнической реализации на уровне транзисторов и их взаимосвязей. Показано, например, что тот же простейший D-триггер в зависимости от его схмотехнической реализации будет обеспечивать различные численные значения быстродействия, нагрузочной способности, помехоустойчивости, мощности потребления и т.д.

Дополнительной особенностью книги является детальное описание различного рода устройств (элементов) согласования — входных и выходных, которые обеспечивают электрическое и временное согласование при работе микросхемы в проектируемом устройстве, а также приведенные методы и схмотехнические решения всегда актуальной проблемы снижения энергопотребления современных микросхем.

Побудительным мотивом авторов к написанию данной книги явилось желание помочь широкому кругу студентов, преподавателей, инженеров, специализирующихся в области проектирования и эксплуатации различных микроэлектронных устройств, понять физические механизмы протекания процессов, происходящих внутри этих «кирпичиков», из которых строятся современные микросхемы. Ведь именно схмотехнические решения базовых элементов микросхем определяют численные значения электрических, статических и динамических характеристик, потребляемой мощности, быстродействия, помехоустойчивости, площади кристалла микросхемы. В этой связи необходимо отметить ряд основных «классических» изданий по данной тематике, написанных много лет назад, но которые до сих пор можно увидеть на рабочих местах инженеров по электронике.

Наиболее близкое и широко известное издание, монография «Искусство схмотехники» — классический учебник по цифровой и аналоговой схмотехнике, была написана американскими учеными-практиками Paul Harowitz из Harvard University и Winfield Hill из Rowland Institute for Science, Cambridge, Massachusetts, первое английское издание (Cambridge University Press) вышло в 1980 г. тиражом 50 тыс. экз. и сразу же стало библиографической редкостью, последнее (10-е) издание вышло в 2009 г.

Этот ажиотаж вокруг книги американских специалистов и ее популярность среди широкого круга читателей объясняются, с одной стороны, широтой охвата предметной области — основ конструирования радиоэлектронных схем, обшир-

ной справочной информацией по элементной базе («кирпичикам», из которых состояли радиоэлектронные устройства) на момент написания книги, а с другой стороны, тем, что, в отличие от классических учебников с избытком математических выкладок и физических формул, авторы простым языком, на большом количестве практических примеров, изложили все основные (на то время) аспекты конструирования радиоэлектронных устройств, на уровне, доступном для понимания даже слабоподготовленным читателям.

За свою необычайную для такого ряда изданий популярность среди студентов и инженеров по электронике книга получила в 90-х годах прошлого века вполне заслуженное неофициальное звание – «библия электроники».

Очевидно, что за прошедшие с момента написания этой книги более 30(!) лет элементная база микросхем, радиоэлектронных устройств и систем, подчиняясь известному закону Мура, изменилась принципиально. Те самые «кирпичики», блестяще описанные в этой «библии электроники», давно уже вошли в состав более крупных «строительных блоков» (IP-блоки или «Intellectual properties»), из которых собираются современные ИМС, БИС и СБИС, появились и новые элементы, которые раньше просто нельзя было реализовать технологически, появились базовые элементы, работающие на совершенно новых физических принципах и механизмах.

Основное достоинство предлагаемой авторами книги и заключается в детальном описании принципов работы и правил применения этих современных базовых элементов в составе микроэлектронных устройств. Например, элементов, реализованных по современной биполярно-полевой технологии (БиКМОП или BiCMOS) на момент выхода последнего англоязычного издания, просто не было, то же самое можно сказать и о микромошной КМОП элементной базе.

До сих пор в учебных курсах многих ВУЗов также используется книга: Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: справочное руководство. Пер. с нем. Halbleiter – Schaltungstechnik/ Под ред. А.Г. Алексенко. – М.: Мир, 1982.

В Германии эта книга выдержала более десяти изданий. В 2005 г. появилось 11-е по счету дополненное и переработанное издание этого справочного руководства.

Впервые в СССР эту книгу, написанную авторами в 1970 г., издали тиражом 80 тыс. экземпляров (а это было уже пятое доработанное немецкое издание), и многочисленные отечественные переиздания подтвердили интерес научных сотрудников, студентов и инженеров-практиков к схемотехнике радиоэлектронных устройств, хотя в этой книге рассматриваются всего лишь структуры простейших полупроводниковых элементов, которые сегодня практически не используются в микроэлектронных устройствах (за исключением элементов силовой электроники, детально исследованных в этой книге).

Тем не менее, очередные русскоязычные версии этого справочного руководства до сих пор периодически выпускаются издательствами, в том числе российскими и пользуются спросом у специалистов и студентов, поскольку в продаже отсутствуют более современные издания.

На книжных рынках США, Англии и Европы присутствует и ряд других книг, посвященных схемотехнике современных микроэлектронных устройств, однако,



большинство из них рассматривают только отдельные составные части комплексных проблем проектирования и описания частных технологий (методы снижения рассматриваемой мощности, повышения производительности, способы моделирования, защиты от паразитных эффектов и т.д.) применительно к конкретным технологическим базисам – КМОП, биполярным, БИКМОП, КНИ (SOI) и др.

В основу книги положены материалы лекционных курсов, много лет читаемых авторами в ВУЗах и академических институтах для студентов, аспирантов, магистрантов и преподавателей следующих специальностей: 5507002 «Электроника и микроэлектроника»; 551102 «Проектирование и технология электронных средств»; 5515002 «Приборостроение»; 5528002 «Информатика и вычислительная техника»; 2000003 «Электронная техника, радиотехника и связь»; 2100003 «Автоматика и управление» и др. Использованы материалы лекций и семинаров для иностранных студентов и специалистов, проведенных авторами в Северо-Восточном институте микроэлектроники (Китай), Ханойском техническом университете (Вьетнам), Институте космических исследований и Исследовательском Центре Имарата (Индия).

Кроме того, использованы результаты собственных исследований, опубликованных ранее в монографиях, патентах и статьях; результаты своей практической деятельности в области проектирования и применения микроэлектронных устройств – в качестве главных конструкторов руководили разработкой и организацией производства более ста типов микросхем, а также материалы из отечественных и зарубежных источников.

При работе над материалами глав 2, 3, 4, 8 существенную помощь авторам оказали Силин А.В., Трасковский В.А., техническое оформление рукописи выполнено Гордиенко С.В.

Авторы благодарят академика РАН Красникова Г.Я., д.т.н., профессора Коноплева Б.Г. за полезные предложения по уточнению содержания и структуры построения материала, сделанные в процессе рецензирования данной работы.

Введение

На современном этапе развития микроэлектронных интегральных устройств проблема выбора оптимальных схемотехнических решений базовых элементов микросхем (ИМС) обусловлена тем очевидным фактом, что известные ранее и ставшие уже стандартными для разработчиков микросхем предыдущих поколений схемотехнические решения базовых элементов микросхем малой и средней степени интеграции оказались неэффективными для реализации новых требований, предъявляемых к сложнофункциональным, высокопроизводительным и надежным большим интегральным схемам (БИС). Перед разработчиком всегда встает и ряд практических вопросов — какие технические средства адекватны поставленной задаче, на что следует обратить особое внимание при проектировании отдельных узлов микросхемы, как лучше организовать, синхронизировать совместную работу в составе ИМС комбинационных схем, триггеров и базовых логических элементов, как защитить ИМС от перенапряжений, статического электричества, как обеспечить надежное электрическое и временное согласование работы базовых элементов (триггеров, регистров, сумматоров) в составе ИМС и различных ИМС между собой (особенно в случае различного конструктивно-технологического базиса их реализации) и т.п. Очевидно, что для ответа на эти вопросы понимание работы базовых элементов, узлов и блоков ИМС только на логическом уровне «черного ящика», чему посвящено абсолютное большинство монографий, справочников и учебных пособий является необходимым, но далеко не достаточным условием проектирования современных микросхем. А решение проблем повышения быстродействия, помехоустойчивости, надежности, устойчивости к различного рода дестабилизирующим факторам (температура, радиация, разряды статического электричества), уменьшения энергопотребления микросхем и устройств на их основе в принципе невозможно без ясного понимания принципов и особенностей работы базовых элементов («кирпичиков», из которых строятся современные микросхемы), представленных на уровне электрических схем этих элементов, блоков и узлов. Обширнейшая литература по современной электронике, информатике и цифровой схемотехнике не дает ответа на эти и подобные вопросы, и цель данной книги состоит в том, чтобы по возможности восполнить этот пробел. Основное внимание сосредоточено на описании наиболее эффективных и опробованных на практике в составе реальных изделий вариантах схемотехнических решений базовых элементов цифровых ИМС. Большой иллюстрированный материал схемотехнических решений элементов БИС существенно облегчает усвоение изложенного материала и служит практическим пособием по выбору схемотехнических решений, адекватных решаемой разработчиком задаче.

Материал книги разбит на 8 глав. В первой главе изложены в достаточно сжатом виде, с минимально необходимым количеством формул и математических выражений, физические основы работы полевых транзисторов.

Изучение материалов этой главы необходимо для более глубокого понимания рассмотренного в последующих главах материала. Проведен анализ работы МОП-транзисторов с «длинным» каналом, оценено влияние подложки на характеристики транзистора и выведены выражения для оценки численных значений допо-

рогового тока. При анализе физических процессов, происходящих в субмикронном МОП-транзисторе, исследовано влияние физических эффектов на величину порогового напряжения и на величину сквозного тока.

Вторая глава посвящена вопросам проектирования микромощных КМОП БИС. Здесь рассмотрены основные способы управления энергопотреблением микроэлектронных устройств, приведена классификация и дано описание основных методов минимизации энергопотребления, используемых при проектировании КМОП БИС. Приведен маршрут проектирования таких микросхем, дан сравнительный анализ возможностей управления мощностью потребления на различных уровнях представления (транзистор – вентиль – архитектура – алгоритм – система). Приведен ряд конкретных схемотехнических решений микромощных КМОП элементов.

Приведена классификация и детально рассмотрены источники и основные физические механизмы рассеяния мощности в субмикронных КМОП-структурах, приведены выражения для расчета значений суммарной, статической и динамической составляющих мощности рассеяния. Здесь же рассмотрен ряд ограничений (физических, конструктивно-технологических, схемотехнических и др.), которые необходимо учитывать при проектировании субмикронных микросхем.

Третья глава посвящена рассмотрению общих характеристик цифровых БИС. Приведена классификация и описание основных элементов, из которых состоят современные цифровые микросхемы (базовые логические элементы, входные и выходные элементы согласования, преобразователи уровней и т.п.), перечислены системы функциональных, электрических и динамических параметров БИС, приведены основные энергетические характеристики базовых логических элементов.

Здесь же рассмотрены основные паразитные элементы и паразитные эффекты (эффект Миллера, эффект «защелкивания», эффекты «горячих» носителей заряда и др.)

Приведена классификация и детально рассмотрены принципы работы типовых и оригинальных схем базовых логических элементов (статические, динамические и квазистатические), и элементов внутренней памяти БИС (тактируемых как уровнем, так и фронтом синхросигнала).

Рассмотрены механизмы влияния на работоспособность БИС основных дестабилизирующих факторов (электростатических разрядов, электрических помех, электрических перегрузок) и приведены схемотехнические и конструктивно-технологические решения, позволяющие исключить или уменьшить их влияние.

В четвертой главе рассмотрены вопросы схемотехники цифровых БИС на комплементарных МОП-транзисторах. Приведена классификация и детально рассмотрены принципы работы стандартных и оригинальных схем базовых логических элементов (статические, динамические и квазистатические), и элементов внутренней памяти БИС (тактируемых как уровнем, так и фронтом синхросигнала).

Рассмотрены механизмы влияния на работоспособность БИС основных дестабилизирующих факторов (электростатических разрядов, электрических помех, электрических перегрузок) и приведены схемотехнические и конструктивно-технологические решения, позволяющие исключить или уменьшить их влияние.

В пятой главе рассмотрены вопросы схемотехники цифровых БИС на биполярных транзисторах, элементах классической Шоттки транзисторной логики

(STL), интегральной Шоттки-логики (ISL), диодно-транзисторной логики с диодами Шоттки, инжекционной логики (I^2L). Рассмотрены все особенности элементов согласования этих БИС (со стандартными ТТЛ-уровнями, с повышенной нагрузочной способностью, со встроенной памятью, с гистерезисом, с парафазными выходами, с повышенной помехоустойчивостью). Отдельный параграф главы посвящен схемотехническим решениям, направленным на обеспечение защиты входных и выходных цепей от разрядов статического электричества.

Шестая глава посвящена вопросам схемотехники цифровых БИС на комбинентарных МОП и биполярных транзисторах (БиКМОП).

Рассмотрены типовые схемотехнические решения базовых логических элементов, элементов памяти, входных и выходных элементов согласования с преобразованием уровней сигналов, с встроенной памятью, с повышенной помехоустойчивостью и повышенной нагрузочной способностью.

Приведены и проанализированы схемотехнические решения выходных элементов БиКМОП БИС с формированием различных выходных уровней (ЭСЛ, ТТЛ, КМОП), с встроенной памятью и схемами защиты выходных цепей БИС.

В седьмой главе рассмотрены принципы организации интерфейса в системах передачи и обработки информации. Для проектирования современных микроэлектронных устройств необходимо знать, как правильно организовать процессы обмена данными между различными БИС в составе устройств, какие интерфейсы необходимо использовать для обеспечения надежной работы устройств. Поэтому здесь рассмотрены наиболее часто используемые методы организации, параметры и типы интерфейсных шин, основные параметры, режимы работы линий связи, типы помех в этих линиях и методы борьбы с ними. Рассмотрены также различные коды, используемые для передачи помехозащищенной информации, методы физического кодирования, коды исправления одиночных и пакетных ошибок, а также конкретные рекомендации по эффективному кодированию передаваемых сообщений.

Восьмая глава посвящена изучению интерфейсных БИС — их архитектуры и схемотехнических особенностей. Рассмотрена классификация типов интерфейсных БИС и их базовых схемотехнических решений, приведена система основных параметров и их типовых значений. Детально рассмотрены особенности организации линий связи с помощью свитой пары для обеспечения электрического согласования интерфейсных микросхем с передающими и принимающими электронными блоками.

Рассмотрены типовые архитектуры и схемотехнические решения наиболее распространенных интерфейсных микросхем — шинных формирователей (драйверы, порты ввода-вывода, адаптеры, программируемые интерфейсы), микросхем для организации последовательных каналов передачи данных, а также интерфейс типа «токовая петля» и инфракрасный интерфейс.

На конкретных примерах наиболее массовых микросхем приемо-передатчиков интерфейса с последовательной передачей данных стандартов RS-232 и RS-485 рассмотрены схемотехнические методы организации режима пониженного энергопотребления.