МИР электроники

А.И. Белоус, В.А. Солодуха,
С.В. Шведов

Космическая электроника

В 2–х книгах
Книга 1

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2015

УДК 621.38
ББК 32.85
Б43

Б43 Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В.
Космическая электроника
В 2-х книгах
Книга 1
Москва: Техносфера, 2015. – 696 с. ISBN 978-5-94836-398-1

Книга посвящена анализу современного состояния, проблем и перспектив развития микроэлектронной элементной базы радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической техники (РКТ), космических аппаратов и систем двойного и военного применения. Впервые в отечественной научно-технической литературе сделана попытка рассмотреть в рамках одной книги всю сложную цепь взаимосвязанных этапов создания электронных блоков РКТ – от разработки требований к этим блокам и их элементно-компонентной базе (ЭКБ), до выбора технологического базиса ее реализации, методов проектирования микросхем и на их основе бортовых систем управления аппаратурой космического и специального назначения.

Издание адресовано инженерам-разработчикам радиоэлектронной аппаратуры, а также преподавателям, студентам, аспирантам, специализирующимся в области микроэлектроники и ее приложений.

УДК 621.38
ББК 32.85

© 2015, Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В.
© 2015, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление.
ISBN 978-5-94836-398-1

Содержание

Предисловие 10

Введение 13

Перечень условных обозначений 30

Глава 1. Современные космические аппараты 32
1.1. Основные направления развития космической промышленности 32
1.2. Классификация современных космических аппаратов 39
1.3. Конструкции и устройство космических аппаратов 42
1.4. Бортовые системы космических аппаратов 50
1.4.1. Классификация бортовых систем космических аппаратов 50
1.4.2. Особенности проектирования бортовых информационно-управляющих систем с использованием микросхем программируемой логики 57
1.5. Космические аппараты дистанционного зондирования Земли 61
1.5.1. Космические аппараты ДЗЗ Российской Федерации и Республики Беларусь 62
1.5.2. Космические аппараты ДЗЗ Украины 77
1.5.3. Космические аппараты ДЗЗ США 77
1.5.4. Космические аппараты ДЗЗ Франции 79
1.5.5. Космические аппараты ДЗЗ Японии 80
1.5.6. Космические аппараты ДЗЗ Индии 81
1.5.7. Космические аппараты ДЗЗ Китая 82
1.5.8. Космические аппараты ДЗЗ европейского космического агентства 83
1.5.9. Космические аппараты ДЗЗ других стран 86
1.6. Радиолокационные станции дистанционного зондирования Земли 88
1.7. Воздействие космической радиации на КА 100
1.8. Микрометеоритное воздействие на КА 102
1.9. Проблема космического мусора на орбите Земли 104
1.10. Применение микроэлектронных технологий для создания миниатюрных реактивных двигателей космического назначения 107
1.10.1. Проблемы микроминиатюризации космических аппаратов 107
1.10.2. Миниатюрные реактивные двигатели горизонтальной конструкции 111
1.10.3. Миниатюрные реактивные двигатели вертикальной конструкции 116
1.11. Космические аппараты военного и специального назначения 120
1.11.1. Система предупреждения о ракетном нападении 120
1.11.2. Наземный эшелон СПРН 123
1.11.3. Фазированные антенные решетки 126
1.11.4. Космический эшелон СПРН 130
1.11.5. Военно-разведывательные спутники 136
Литература к главе 1 147

Глава 2. Отказы и аварии ракетоносителей и космических аппаратов 150
2.1. Проблемы безопасности ракетно-космической техники 150
2.2. Анализ причин отказов ракет-носителей 156
2.3. Анализ отказов космических аппаратов 159
2.4. Анализ причин отказов изделий ракетно-космической техники 163
2.5. Анализ тенденций изменения рисков аварий ракет-носителей за период с 2000 по 2009 г. 166
2.6. Анализ тенденций изменения рисков отказов КА за период с 2000 по 2009 г. 172
2.7. Анализ причин аварий РН и КА за период с 2000 по 2009 г. 175
2.8. Анализ отказов компьютерных систем и программных средств 177
2.9. Анализ отказов бортовых систем на международной космической станции в 2000-е гг. 179
2.10. Методы обеспечения надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов длительного функционирования 180
Литература к главе 2 188

Глава 3. Микроэлектронная элементная база ракетно-космической техники 191
3.1. Классификация современных микропроцессоров 191
3.2. Процессоры для электронных систем управления иностранными космическими аппаратами 195
3.2.1. Бортовые процессоры иностранных космических аппаратов 195
3.2.2. Фирма Aitech Defense Systems 200
3.2.3. BAE Systems 202
3.2.4. Honeywell 203
3.2.5. Микропроцессоры с архитектурой SPARC 203
3.2.6. Микропроцессоры компании Atmel 204
3.2.7. Aeroflex 205
3.3. Отечественные микропроцессоры и микроконтроллеры 206
3.3.1. ОАО «Ангстрем» (г. Зеленоград) 207
3.3.2. ОАО «НИИМЭ и Микрон» (г. Зеленоград) 208
3.3.3. НИИСИ РАН (г. Москва) 212
3.3.4. ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова» (г. Нижний Новгород) 213
3.3.5. ЗАО «Светлана-Полупроводники» (г. Санкт-Петербург) 214
3.3.6. ОАО «НИИЭТ» (г. Воронеж) 215
3.3.7. ЗАО «ПКК Миландр» (г. Зеленоград) 218
3.3.8. ОАО НПЦ «ЭЛВИС» (г. Зеленоград) 220
3.3.9. ЗАО НТЦ «Модуль» (г. Москва) 223
3.3.10. ЗАО «МЦСТ» (г. Москва) 225
3.3.11. ОАО «НИИМА «Прогресс» (г. Москва) 228
3.3.12. ООО «Дизайн-центр КМ211» (г. Зеленоград) 229
3.3.13. ООО «НПП «Цифровые решения» (г. Москва) 231
3.3.14. ОАО «Мультиклет» (г. Екатеринбург) 232
3.3.15. НИИ МВС ЮФУ (г. Таганрог) 233
3.3.16. НПК «Технологический центр» и ОАО «Завод-ПРОТОН-МИЭТ» (г. Зеленоград) 234

3.3.17. ЧП «НТЛаб-системы» (г. Минск) 234
3.3.18. Научно-технический центр «ДЭЛС» (г. Минск) 235
3.4. Инструментальные средства разработки и отладки для МП и МК 235
3.5. Тенденции развития современных микроконтроллеров 239
3.5.1. Переход потребителей на 32-битные микроконтроллеры 239
3.5.2. Лицензионные архитектуры MIPS32 и Cortex-M 241
3.5.3. Особенности проектирования и организации производства микросхем для космического применения 242
3.6. Особенности использования фаблесс-модели при проектировании микроэлектронных изделий для космических применений 244
3.6.1. Предпосылки возникновения и развития фаблесс-модели бизнеса 244
3.6.2. Структура и особенности фаблесс-бизнеса 245
3.6.3. Особенности выбора заказчика по фаблесс-проекту 247
3.6.4. Технические предпосылки и условия реализации типового фаблесс-проекта. Программное обеспечение и библиотеки проектирования 248
3.6.5. Выбор технологического процесса изготовления изделия 249
3.6.6. Необходимость наличия собственной аналитической базы 249
3.6.7. Изготовление опытных образцов 250
3.6.8. Финансовая парадигма фаблесс-проекта 251
3.6.9. Общие рекомендации по организации работы в режиме фаблесс 252
3.7. Особенности выбора иностранной ЭКБ для проектирования отечественных КА 253
3.7.1. Основные предпосылки необходимости использования иностранной ЭКБ 253
3.7.2. Особенности этапа выбора номенклатуры ЭКБ иностранного производства 255
3.7.3. Особенности проведения сертификационных испытаний ЭКБ ИП 258
3.7.4. Особенности реализации этапа анализа отдельных перечней ЭКБ ИП 262
3.8. Особенности отечественной элементной базы для систем электроэнергетического обеспечения космических летательных аппаратов 266
3.9. Стойкость бортовой РЭА к воздействию ионизирующих излучений 270
3.10. Силовые полупроводниковые приборы для электронных систем КА 279
3.10.1. Основные принципы использования силовых приборов 279
3.10.2. Базовые технологии силовых приборов 281
3.10.3. Силовые MOSFET 283
3.10.4. Интеллектуальные МОП-транзисторы (SmartFET) 284
3.10.5. Интеллектуальные силовые ИС 289
3.10.6. Интеллектуальные ИС систем питания 292
Литература к главе 3 296

Глава 4. Особенности выбора и применения иностранной ЭКБ для проектирования отечественных космических аппаратов 298
4.1. Общие проблемы выбора ЭКБ для РЭА космического назначения 298
4.2. Ограничение экспорта в Россию электронных компонентов иностранного производства 300
4.2.1. Ограничение экспорта ЭКБ из США 301
4.2.2. Ограничение экспорта электронных компонентов из Европы и других стран 306
4.2.3. Международные организации контроля экспорта 307
4.3. Особенности применения индустриальных ЭКБ иностранного производства в ракетно-космической технике 308
4.4. Контрафактные микроэлектронные изделия и методы их выявления 318
4.4.1. Типы контрафактных компонентов 318
4.4.2. Эффективные методы выявления контрафактных изделий 320
4.4.3. Электрические испытания микроэлектронных изделий космического назначения 323
4.5. Особенности выбора и применения в отечественных космических аппаратах иностранных процессоров 330
4.5.1. Проблемы применения иностранных процессоров в отечественных КА 330
4.5.2. Варианты исполнения и квалификационные характеристики микропроцессоров UT 699 и GR 712 331
4.5.3. Архитектурные и аппаратные особенности микропроцессоров UT 699 и GR 712 семейства Leon 3FT 332
4.5.4. Особенности программирования микропроцессора Leon 3 334
4.6. Радиационно-стойкие преобразователи постоянного тока для космических и военных применений 337
4.7. Мировой опыт организации работ по созданию электронных компонентов для бортовой аппаратуры космических систем 344
4.8. Ускоренные испытания ЭКБ КН на надежность 352
4.9. Анализ результатов испытаний микросхем, закупленных в РФ в период с 2009 по 2011 г. 356
Литература к главе 4 366

Глава 5. Методы минимизации энергопотребления микроэлектронных устройств 369
5.1. Основные тенденции изменения параметров энергопотребления микроэлектронных устройств 369
5.2. Пути уменьшения величины рассеиваемой мощности в КМОП БИС 373
5.3. Основные источники рассеиваемой мощности в КМОП БИС 384
5.4. Логическое проектирование КМОП БИС с пониженным энергопотреблением 389
5.4.1. Основы логического синтеза КМОП микросхем с пониженным энергопотреблением 389
5.4.2. Определение источников рассеиваемой мощности в КМОП микросхемах 391

5.4.3. Вероятностная оценка вариантов оптимизации по прогнозируемой переключательной активности узлов микросхемы 393
5.4.4. Выбор элементного базиса при проектировании КМОП СБИС с пониженным энергопотреблением 396
5.4.5. Логический синтез КМОП БИС в базисе библиотечных элементов 398
5.4.6. Оптимизация двухуровневых логических схем с учетом рассеивания мощности 399
5.4.7. Выбор базовых вентилей технологически независимой функциональной схемы 401
5.4.8. Оптимизация многоуровневых логических схем из многовходовых вентилей 402
5.4.9. Оптимизация многоуровневых логических схем из двухвходовых вентилей 404
5.4.10. Технологическое отображение 407
5.4.11. Оценка энергопотребления спроектированных КМОП БИС на логическом и схемотехническом уровнях 408
5.4.12. Технология проектирования КМОП БИС с пониженным энергопотреблением с использованием комплекса ЭЛС 410
5.4.13. Архитектура программного комплекса ЭЛС 412
5.4.14. Функциональные возможности программного комплекса ЭЛС 413
5.5. Особенности организации режима пониженного энергопотребления в современных интерфейсных БИС 417
5.5.1. Микросхемы приемопередатчиков интерфейса RS-485 417
5.5.2. Микросхемы приемопередатчиков интерфейса RS-232 423
5.5.3. Конструктивно-схемотехнические особенности проектирования интерфейсных ИМС КН с пониженным напряжением питания 440
5.5.4. Особенности проектирования электрических схем блоков передатчика интерфейсных БИС с пониженным напряжением питания 447
5.5.5. Термонезависимый источник опорного напряжения, равного ширине запрещенной зоны полупроводника 452
5.5.6. Варианты построения термонезависимых источников опорного напряжения 453
5.5.7. Анализ схемотехнических особенностей организации и применения триггеров Д-типа 456
5.5.8. Схемотехнические методы повышения помехоустойчивости цифровых КМОП БИС 462
5.5.9. Схемотехнические методы повышения устойчивости микросхем к эффекту горячих электронов 475
Литература к главе 5 480

Глава 6. Особенности технологического процесса изготовления и базовых конструкций субмикронных транзисторов и диодов Шоттки 485
6.1. О терминологии субмикронной микроэлектроники 485
6.2. Тенденции и перспективы развития современной технологии в микроэлектронике 487

6.2.1. Проблема масштабирования ... 492
6.2.2. Современная субмикронная технология – пример ее реализации при изготовлении микропроцессоров ... 493
6.3. Особенности субмикронных МОП-транзисторов ... 500
6.3.1. Конструкции МОП-транзисторов в СБИС ... 501
6.3.2. Методы улучшения характеристик МОП-транзисторов ... 504
6.3.3. МОП-транзисторы со структурой «кремний на изоляторе» ... 507
6.3.4. Транзисторы с двойным, тройным и цилиндрическим затвором ... 513
6.3.5. Другие типы транзисторных структур ... 518
6.3.6. Особенности транзисторов для аналоговых применений ... 520
6.4. Конструктивно-технологические особенности высокотемпературных диодов Шоттки ... 522
6.4.1. Физические основы функционирования диодов Шоттки ... 522
6.4.2. Конструктивно-технологические особенности формирования высокотемпературных диодов Шоттки ... 525
6.4.3. Методы обеспечения минимального обратного тока и минимального прямого напряжения ... 529
6.4.4. Методы обеспечения минимального прямого напряжения и максимального обратного напряжения ... 532
6.5. Конструктивно-технологические особенности формирования структур диодов Шоттки с повышенной устойчивостью к разрядам статического электричества ... 537
Литература к главе 6 ... 541

Глава 7. Особенности воздействия радиации на субмикронные интегральные микросхемы ... 549
7.1. Физические механизмы воздействия радиации на субмикронные КМОП интегральные микросхемы ... 550
7.2. Воздействие радиации на аналоговые биполярные интегральные микросхемы ... 563
7.3. Основные методы обеспечения радиационной стойкости интегральных микросхем ... 567
7.4. Радиационная стойкость современных и перспективных ИМС ... 568
7.5. Рекомендуемый набор тестовых элементов для экспериментальных исследований влияния радиационных воздействий на характеристики кремниевых микросхем ... 572
7.6. Оборудование и методики облучения тестовых структур и исследуемых образцов микросхем ... 575
7.7. Методика измерения электрических параметров тестовых структур после радиационной обработки ... 578
7.8. Экспериментальные результаты воздействия электронного облучения на параметры эпитаксиальных кремниевых p-n-структур ... 581
7.9. Экспериментальные результаты исследования воздействия проникающей радиации на параметры биполярных транзисторных структур ... 588

7.10. Экспериментальные исследования влияния ионизирующих излучений на параметры биполярных аналоговых интегральных микросхем ... 593
7.11. Экспериментальные результаты исследований воздействия ионизирующих излучений на параметры транзисторных МОП-структур и интегральных микросхем на их основе ... 601
7.11.1. Исследование влияния гамма-излучения на параметры транзисторных МОП-структур ... 601
7.11.2. Экспериментальные исследования воздействия гамма-излучения на параметры МОП-конденсаторов и транзисторных МОП-структур – элементов субмикронных КМОП ИМС ... 609
7.11.3. Особенности воздействия гамма-излучения на параметры МОП-ячеек памяти ЭСППЗУ ... 612
7.11.4. Экспериментальные исследования воздействия проникающего излучения на параметры логических КМОП ИМС ... 615
7.11.5. Влияние ионизирующего излучения на параметры КМОП БИС памяти ... 620
7.11.6. Экспериментальные исследования влияния радиационного воздействия на параметры транзисторных МОП/КНИ-структур и КМОП БИС ОЗУ на их основе ... 627
7.11.7. Экспериментальное исследование воздействия проникающего излучения на параметры БиКМОП БИС ... 635
7.12. Особенности применения имитационных методов исследования радиационных эффектов в БиКМОП микросхемах ... 642
Литература к главе 7 ... 653

Глава 8. Методы прогнозирования и повышения радиационной стойкости биполярных и КМОП интегральных микросхем ... 665
8.1. Методы прогнозирования радиационной стойкости КМОП ИМС ... 665
8.1.1. Расчетно-экспериментальные методы прогнозирования радиационной стойкости МОП-приборов ... 665
8.1.2. Метод прогнозирования (отбора) КМОП ИМС по радиационной стойкости ... 671
8.2. Расчетно-экспериментальные методы прогнозирования радиационной стойкости биполярных и БиКМОП приборов ... 674
8.3. Расчетно-экспериментальный метод прогнозирования радиационной стойкости МОП запоминающих элементов ЭСППЗУ ... 676
8.4. Методы повышения устойчивости ИМС к воздействию проникающей радиации ... 677
8.4.1. Конструктивно-технологические методы повышения радиационной стойкости КМОП и БиКМОП микросхем ... 677
8.4.2. Стандартные конструктивно-схемотехнические методы повышения радиационной стойкости ИМС ... 680
8.4.3. Новые конструктивно-схемотехнические методы повышения радиационной стойкости КМОП БИС ... 688
Литература к главе 8 ... 693

Предисловие

Первоначальное по замыслу авторов назначение этой книги – ознакомить разработчиков бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов (КА) и систем двойного и специального назначения с современными подходами к проектированию и применению микроэлектронной элементной базы этой аппаратуры. Однако в процессе написания книги, сбора и обработки имеющейся обширной информации, бесед с чиновниками и специалистами отечественной и зарубежной космической и микроэлектронной отраслей промышленности первоначальный замысел авторов был существенно изменен. Полученные в результате анализа обширные дополнительные материалы заставили отказаться от исходного формата книги, и кроме изложения собственно особенностей и проблем проектирования современных микроэлектронных устройств для приборов космического и специального назначения здесь представлен значительно более расширенный материал.

Весь этот материал автором пришлось оформить в виде «двухтомника», где кроме глав, посвященных непосредственно проблемам проектирования современных микроэлектронных устройств космического и специального (военного) назначения, появились главы, посвященные другим «космическим» проблемам – как устроены современные космические аппараты (КА), какова роль радиоэлектронного бортового оборудования в достижении цели проекта, для которого разрабатывался этот КА, какова статистика аварий и отказов этих аппаратов, почему эти аварии и отказы в значительной степени связаны с качеством и функциональными возможностями используемых в их бортовых РЭА микросхем, почему в РФ активно применяются контрафактные микросхемы и как с ними бороться, каковы физические механизмы воздействия на РЭА КН ионизирующих излучений космического пространства и потоков сверхскоростных высокоэнергетических микрочастиц (космическая пыль) и какими методами и технологическими решениями можно если не исключить, то хотя бы уменьшить их влияние на надежность функционирования РЭА космического и специального назначения – и многое другое.

Необходимость такого существенного увеличения объема книги было во многом обусловлена информацией, почерпнутой авторами из фундаментального труда Железнякова А.Б. «Тайны ракетных катастроф. Плата за прорыв в космос» / М.: Эксмо: Яуза, 2011. – 544 с., где фактически в сжатом виде детально изложена вся история как отечественной, так и мировой космонавтики.

Изложенные в этой работе факты, описания всех основных этапов грандиозной эпопеи выхода человечества за пределы нашей Земли, показали всю сложность этой чрезвычайно важной для человечества задачи, а также «высветили» роль так называемой ЭКБ – элементно-компонентной базы в процессе покорения космоса.

Конечно, автор этой работы (Железняков А.Б.) не предполагал, что всю массу достоверно изложенных им триумфальных и трагических событий процесса освоения космического пространства будут читать специалисты по электронике и рассматривать события под своим углом зрения, с учетом своего опыта и знаний в сфере микроэлектроники.

МИР электроники

А.И. Белоус, В.А. Солодуха,
С.В. Шведов

Космическая электроника

В 2–х книгах
Книга 2

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2015

УДК 621.38
ББК 32.85
Б43

Б43 Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В.
Космическая электроника
В 2-х книгах
Книга 2
Москва: Техносфера, 2015. – 488 с. ISBN 978-5-94836-398-1

Книга посвящена анализу современного состояния, проблем и перспектив развития микроэлектронной элементной базы радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической техники (РКТ), космических аппаратов и систем двойного и военного применения. Впервые в отечественной научно-технической литературе сделана попытка рассмотреть в рамках одной книги всю сложную цепь взаимосвязанных этапов создания электронных блоков РКТ – от разработки требований к этим блокам и их элементно-компонентной базе (ЭКБ), до выбора технологического базиса ее реализации, методов проектирования микросхем и на их основе бортовых систем управления аппаратурой космического и специального назначения.

Издание адресовано инженерам-разработчикам радиоэлектронной аппаратуры, а также преподавателям, студентам, аспирантам, специализирующимся в области микроэлектроники и ее приложений.

УДК 621.38
ББК 32.85

© 2015, Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В.
© 2015, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление.
ISBN 978-5-94836-398-1

Содержание

Глава 9. Проектирование микросхем космического применения на основе КНС и КНИ-структур 707
9.1. Радиационно-стойкие КМОП БИС на основе КНИ структур 708
9.2. Воздействие ионизирующего облучения на кремний и двуокись кремния 718
9.2.1. Радиационные эффекты в кремнии при облучении 718
9.2.1.1. Радиационные дефекты, их комплексы и кластеры 718
9.2.1.2. Особенности дефектообразования в кремнии и поликремнии, облученном импульсами гамма-квантов 720
9.2.2. Свойства границы раздела Si/SiO_2 721
9.2.2.1. Общие сведения о строении SiO_2 721
9.2.2.2. Электронная структура SiO_2 722
9.2.2.3. Строение и состав Si/SiO_2 границы 723
9.2.3. Воздействие ионизирующего облучения на диэлектрические слои 726
9.3.3.1. Введение объемного заряда в диэлектрик 726
9.2.3.2. Образование быстрых поверхностных состояний 727
9.2.3.3. Влияние радиации на проводимость диэлектрических слоев 727
9.2.3.4. Отжиг облученных диэлектрических слоев 727
9.2.3.5. Иерархия времен радиационно-индуцированных процессов в структурах с диэлектриком 728
9.2.3.6. Пути повышения стабильности структур с диэлектрическими слоями 728
9.2.4. Радиационные процессы в скрытом диэлектрике структур кремний-на-изоляторе 728
9.2.5. Сравнение радиационных свойств КНИ структур, полученных разными способами 731
9.3. Физические явления в МОП/КНИ транзисторах в условиях воздействия ИИ 732
9.3.1. Ионизирующее излучение 733
9.3.1.1. Единичные сбои 734
9.3.1.2. Единичная защелка 737
9.3.1.3. Единичное выгорание 737
9.3.1.4. Единичный пробой затвора 738
9.3.1.5. Единичное восстановление (однотранзисторная защелка) 738
9.3.2. Эффекты полной дозы 738
9.3.3. Эффекты импульсного облучения 742
9.4. Результаты экспериментальных исследований образцов элементной базы КМОП БИСна КНИ-структурах 744
9.4.1. Состав тестовых элементов 744
9.4.2. Методика проведения эксперимента 747

9.4.3. Экспериментальные результаты 749
9.4.3.1. Резисторы 749
9.4.3.2. Диоды 752
9.4.3.3. Конденсаторы 753
9.4.3.4. Транзисторы 757
Литература к главе 9 768

Глава 10. Анализ общих проблем проектирования сверхбыстродействующих микроэлектронных изделий и систем на их основе 775
10.1. Проблемы масштабирования субмикронных микросхем 775
10.2. Тенденции и проблемы проектирования кремниевых интегральных микросхем с проектными нормами глубокого субмикрона 778
10.2.1. Тенденции масштабирования и проблемы проектирования кремниевых субмикронных ИМС 778
10.2.2. Проблема потребления мощности в субмикронных ИМС 783
10.2.3. Управление распределением рассеиваемой мощности по площади кристалла на этапе проектирования 788
10.3. Токи утечки и статическое потребление мощности в структуре кремниевого МОП-транзистора 790
10.3.1. Потребление мощности в субмикронных КМОП-схемах 791
10.3.2. Анализ токов, протекающих в субмикронном кремниевом МОП-транзисторе 794
10.3.3. Физические причины возникновения токов утечки в субмикронных кремниевых транзисторах 797
10.3.3.1. Подпороговый ток утечки ISUB субмикронного МОП-транзистора 798
10.3.3.2. Туннельный ток затвора IGATE 799
10.3.3.3. Ток выключения IOFF 800
10.3.4. Анализ величины статического потребления мощности МОП-транзистора 801
10.3.5. Особенности проектирования субмикронных аналоговых ИМС с учетом статического потребления мощности 803
10.3.6. Особенности проектирования субмикронных аналого-цифровых ИМС с учетом статического потребления мощности 804
10.4. Динамическое потребление мощности в типовой структуре субмикронного МОП-транзистора 807
10.4.1. Субмикронные цифровые ИМС с заданной величиной задержки 808
10.4.2. Задержки распространения сигнала на межсоединениях 809
10.4.3. Методы снижения уровня потребляемой мощности при переключении 809
10.4.4. Анализ и расчет динамической мощности, обусловленной токами утечки 811
10.4.5. Анализ динамического энергопотребления кремниевых микросхем 815

10.4.5.1. Проблемы корпусирования субмикронных ИМС 815
10.4.5.2. Проблемы обеспечения надежности передачи сигналов внутри кристаллов субмикронных микросхем 817
10.4.5.3. Использование библиотек для оптимизации проектируемых ИМС 817
10.4.5.4. Использование двух внутренних питающих напряжений 818
10.5. Влияние температуры и разброса технологических параметров на характеристики кремниевых субмикронных ИМС 819
10.5.1. Зависимость токов утечки от температуры 819
10.5.1.1. Температурная зависимость токов ION и IOFF 819
10.5.1.2. Температурная зависимость подпорогового тока ISUB 821
10.5.1.3. Температурная зависимость тока перехода IJUNC 822
10.5.1.4. Температурная зависимость тока IGIDL 823
10.5.1.5. Температурная зависимость туннельного тока затвора IGATE 824
10.5.2. Разброс параметров технологического процесса и токи утечки 825
10.5.2.1. Отклонения технологических и топологических параметров: причины и классификация 825
10.5.2.2. Влияние разброса технологических параметров на токи утечки 828
10.6. Особенности проектирования топологии аналоговых ИМС с проектными нормами глубокого субмикрона 832
10.6.1. Влияние уменьшения напряжения питания 832
10.6.2. Масштабирование и задержка распространения сигнала на межсоединениях 834
10.7. Общие выводы и рекомендации 836
Литература к главе 10 839

Глава 11. Микросистемы в корпусе и на пластине 841
11.1. Электронные модули класса «система в корпусе» для военной и космической микроэлектроники 841
11.2. Особенности проектирования «система в корпусе» 850
11.3. Учет особенностей технологии глубокого субмикрона при проектировании СБИС для СВК 854
11.4. Влияние СВК на эволюцию концепций построения спутниковых систем 859
11.5. Особенности выбора и применения квалифицированных полупроводниковых кристаллов (KGD) для СВК 864
Литература к главе 11 869

Глава 12. Проблемы получения материалов для защиты интегральных микросхем от высокоскоростных потоков микрочастиц и пути их решения 871
12.1. Особенности взаимодействия высокоскоростных потоков микрочастиц с преградой и их влияние на структуру и свойства 871

12.2. Ускорители для разгона микрочастиц до заданных скоростей 874
12.2.1. Пушечные ускорители частиц 874
12.2.2. Взрывные ускорители частиц 876
12.3. Анализ радиопоглощающих материалов для защиты от электромагнитного излучения 877
12.4. Влияние границ раздела в многослойных защитных материалах на проникающую способность микрочастиц 880
12.5. Многослойные материалы для защиты интегральных микросхем от воздействия высокоскоростных потоков микрочастиц и электромагнитного излучения 881
12.6. Поглощение и отражение электромагнитного излучения многослойными материалами 883
Литература к главе 12 886

Глава 13. Методики и оборудование для исследования процессов взаимодействия высокоскоростных потоков микрочастиц с материалами 897
13.1. Выбор материалов для исследований 897
13.2. Методика и оборудование для ускорения микрочастиц 900
13.3. Методика измерений электромагнитного излучения, возникающего при взаимодействии микрочастиц с преградой 903
13.3.1. Применение эффекта Холла в исследовании магнитодинамических процессов 903
13.4. Методика измерения и принцип расчета э.д.с. магнитного поля 904
13.5. Методика регистрации ионизирующего излучения 909
13.6. Методика исследования структуры и свойств материалов после воздействия на них высокоскоростного потока микрочастиц 909
13.6.1. Металлографический анализ 909
13.6.2. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ 910
13.6.3. Метод просвечивающей электронной микроскопии и методика приготовления тонких фольг 910
13.6.4. Рентгеноструктурный анализ в исследовании деформационных процессов 912
13.6.5. Методика измерений электрофизических параметров ИМС и испытаний многослойных материалов 912
Литература к главе 13 913

Глава 14. Влияние воздействия высокоскоростных потоков микрочастиц 916
14.1. Влияние воздействия высокоскоростных потоков микрочастиц на механические и электрофизические свойства многослойных материалов 916
14.2. Анализ процессов магнитодинамического взаимодействия высокоскоростных потоков микрочастиц с металлической преградой 923
14.2.1. Исследование электромагнитного излучения 923

14.2.2. Исследование ионизирующего излучения, возникающего при соударении высокоскоростных потоков микрочастиц с металлической преградой ... 927
14.3. Моделирование процессов соударения высокоскоростных потоков пылевых микрочастиц с космическими аппаратами ... 930
14.4. Влияние эффекта сверхглубокого проникновения на надежность электронных устройств космических аппаратов ... 940
Литература к главе 14 ... 950

Глава 15. Изменение структуры и свойств одно- и многослойных материалов при воздействии высокоскоростным потоком микрочастиц ... 952
15.1. Исследование воздействия высокоскоростного потока микрочастиц на структуру однослойных материалов ... 952
15.1.1. Влияние воздействия высокоскоростного потока микрочастиц на структурные изменения в металлах ... 953
15.1.2. Влияние воздействия высокоскоростного потока микрочастиц на структурные изменения в полимерных материалах ... 958
15.2. Изменение вольт-амперных характеристик «незащищенных» интегральных микросхем серийного производства при воздействии высокоскоростным потоком микрочастиц ... 960
15.3. Влияние высокоскоростных потоков микрочастиц на изменение вольт-амперных характеристик интегральных микросхем в корпусе из многослойного материала ... 962
Литература к главе 15 ... 965

Глава 16. Особенности технологии изготовления многослойных защитных материалов для корпусов интегральных микросхем ... 966
16.1. Требования, предъявляемые к многослойному материалу корпуса микросхемы ... 966
16.2. Получение многослойных материалов для корпусов интегральных микросхем космического назначения ... 968
16.3. Формирование макро- и микроструктуры многослойных материалов ... 970
16.4. Последовательность реализации технологического процесса получения многослойных материалов ... 973
16.5. Свойства многослойных материалов ... 979
16.5.1. Исследование механических и электрофизических свойств полученных многослойных материалов ... 979
16.5.2. Исследование экранирующих свойств многослойных материалов корпусов ... 983
Литература к главе 16 ... 987

Глава 17. Методы отбраковки кремниевых микросхем со скрытыми дефектами в процессе серийного производства ... 992
17.1. Постановка задачи для случая параметрического контроля интегральных микросхем при номинальных режимах функционирования ... 992

17.2. Методика определения коэффициентов чувствительности выходных параметров биполярных интегральных микросхем 994
17.3. Выявление микросхем со скрытыми дефектами на основе анализа границ области функционирования 998
17.4. Оценка численных значений показателей безотказности по результатам экспериментальных исследований интегральных микросхем 1004
17.5. Исследование механизмов влияния скрытых дефектов на численные значения основных статических параметров биполярных ИМС 1007
17.6. Анализ модели математической обработки результатов форсированных испытаний КМОП-микросхем 1009
17.7. Основные методы выявления и отбраковки потенциально ненадежных схем в условиях серийного производства 1013
17.7.1. Способ определения потенциально нестабильных изделий с использованием электростатического разряда 1013
17.7.2. Модернизированный метод реализации процедуры термотренировки микроэлектронных изделий 1015
17.7.3. Способ выявления интегральных микросхем с повышенной надежностью на основе параметра критического напряжения питания 1017
17.7.4. Метод отбраковки потенциально ненадежных микросхем по динамическому току потребления 1018
17.7.5. Метод понижения питающего напряжения 1021
Литература к главе 17 1025

Глава 18. Дизайн-киты (PDK) – структура и особенности их применения при проектировании изделий с субмикронными проектными нормами 1027
18.1. Маршрут процесса разработки PDK, структура стандартного PDK 1027
18.2. Термины и определения, используемые при описании компонентов PDK 1029
18.3. Стандартизация PDK 1032
18.4. Маршрут проектирования смешанных аналого-цифровых микросхем 1035
18.5. Обобщенная информационная модель проектирования смешанных аналого-цифровых ИМС 1038
18.6. Определение состава базовой библиотеки проектирования и перечня стандартных элементов 1040
18.7. Особенности разработки цифровых библиотек для проектирования заказных ИМС с субмикронными проектными нормами 1042
18.8. Конструктивно-схемотехнические особенности проектирования базовых элементов библиотеки субмикронных микросхем 1050
18.8.1. Схемы сдвига уровня напряжений 1050
18.8.2. Схемы управления питанием 1052
18.8.3. Библиотечные элементы изоляции субмикронных микросхем 1053
18.8.4. Постоянно включенные буферы 1055
18.9. Типовые информационные файлы PDK библиотеки проектирования 1058

18.10. Стандартные модели источников тока (CCS) PDK 1060
18.11. Способы и примеры адаптации стандартных инструментов проектирования ИМС к разработкам микросхем с проектными нормами 90, 65, 45 нм 1062
18.11.1. Учебный (образовательный) дизайн-кит компании Synopsys: возможности, применение, перспективы 1062
18.11.2. Краткий обзор EDK компании Synopsys 1063
18.11.3. Стандартная библиотека цифровых элементов фирмы Synopsys 1066
18.11.4. Стандартная библиотека элементов ввода-вывода 1069
18.11.5. Стандартный набор модулей памяти PDK 1069
18.11.6. Цепь фазовой синхронизации (PLL) 1070
18.11.7. География применения и перспективы EDK 1070
18.12. Состав учебных дизайн-китов, предоставляемых Центром микроэлектроники IMEC 1071
Литература к главе 18 1074

Глава 19. СВЧ-электроника для космических и военных приложений 1076
19.1. Основы СВЧ-электроники 1076
19.2. Строение и свойства арсенида галлия 1082
19.3. Сравнительные характеристики свойств GaAs и Si 1083
19.4. Микроэлектронные приборы на основе GaAs 1085
19.4.1. Диоды на основе GaAs 1085
19.4.2. Полевые транзисторы 1088
19.5. Биполярные транзисторы с гетеропереходами 1092
19.6. Оптоэлектронные приборы на GaAs 1093
19.7. Новые приборы на GaAs 1094
19.8. Состояние и перспективы развития монолитных интегральных схем СВЧ 1095
19.8.1. Основные сферы применения монолитных интегральных схем СВЧ 1095
19.8.2. Основные материалы для изготовления МИС СВЧ 1097
19.8.3. Активные элементы МИС и их надежность 1098
19.8.4. Перспективные конструктивно-технологические решения МИС СВЧ 1103
19.9. Основные сферы и особенности применения GaAs СВЧ МИС 1109
19.10. Основные технические параметры зарубежных GaN-микросхем приемо-передающих модулей АФАР 1117
19.11. Краткий сравнительный обзор состояния мирового рынка СВЧ МИС на основе SiGe, GaN, AlGaN/GaN 1123
19.12. Использование технологии CaAs-монолитных схем СВЧ в зарубежной космической и военной технике 1131
19.12.1. Программа MIMIC и ее роль в развитии технологии МИС СВЧ 1131
19.12.2. Системы вооружения на основе СВЧ-МИС 1133
Литература к главе 19 1138

Глава 20. Вместо заключения 1141
20.1. К мифу о недееспособности отечественных разработчиков 1141
20.2. Особенности китайского пути развития микроэлектроники 1149
20.3. Особенности выбора изготовителей иностранной радиационно-стойкой ЭКБ 1159
20.4. Вариант создания специализированного микроэлектронного кластера для космических и оборонных приложений 1162
20.5. Кластерные микроэлектронные комплексы с использованием систем бесшаблонной литографии 1167
20.5.1. Теоретические предпосылки создания кластерных систем 1168
20.5.2. Возможность организации мелкосерийных производств высоконадежной элементной базы в России 1171
20.5.3. Многолучевая электронная литография 1175
20.5.4. Специализированные кластерные технологические линии для разработок и мелкосерийного производства СБИС уровня от 32 нм 1179
20.5.5. Совместные российско-белорусские программы 1180
Литература к главе 20 1182