

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

КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

В 2-х книгах

Книга 1



ТЕХНОСФЕРА



М И Р Э л е к т р о н и к и

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

**Космическая
электроника**

В 2-х книгах
Книга I

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 ракетносителей 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 промышленных 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 вентилях технологически независимой функциональной схемы	401
5.4.8. Оптимизация многоуровневых логических схем из многовходовых вентилях	402
5.4.9. Оптимизация многоуровневых логических схем из двухвходовых вентилях	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. Термнезависимый источник опорного напряжения, равного ширине запрещенной зоны полупроводника	452
5.5.6. Варианты построения термнезависимых 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 р-п-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