

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

# **КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**

*В 2-х книгах*

*Книга 2*



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 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 978-5-94836-402-5**

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 978-5-94836-402-5**

## Содержание

<b>Глава 9. Проектирование микросхем космического применения на основе КНС и КНИ-структур</b> .....	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 <sub>2</sub> .....	721
9.2.2.1. Общие сведения о строении SiO <sub>2</sub> .....	721
9.2.2.2. Электронная структура SiO <sub>2</sub> .....	722
9.2.2.3. Строение и состав Si/SiO <sub>2</sub> границы .....	723
9.2.3. Воздействие ионизирующего облучения на диэлектрические слои .....	726
9.2.3.1. 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 БИС на 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

<b>Глава 10.</b> 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 $I_{SUB}$ субмикронного МОП-транзистора .....	798
10.3.3.2. Туннельный ток затвора $I_{GATE}$ .....	799
10.3.3.3. Ток выключения $I_{OFF}$ .....	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
<b>Глава 11. Микросистемы в корпусе и на пластине .....</b>	<b>841</b>
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
<b>Глава 12. Проблемы получения материалов для защиты интегральных микросхем от высокоскоростных потоков микрочастиц и пути их решения .....</b>	<b>871</b>
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
<b>Глава 13. Методики и оборудование для исследования процессов взаимодействия высокоскоростных потоков микрочастиц с материалами .....</b>	<b>897</b>
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
<b>Глава 14. Влияние воздействия высокоскоростных потоков микрочастиц .....</b>	<b>916</b>
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
<b>Глава 15.</b> 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
<b>Глава 16.</b> 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
<b>Глава 17.</b> 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

<b>Глава 18. Дизайн-киты (PDK) – структура и особенности их применения при проектировании изделий с субмикронными проектными нормами .....</b>	<b>1027</b>
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 .....	1079
18.12. Состав учебных дизайн-китов, предоставляемых Центром микроэлектроники ИМЕС .....	1071
Литература к главе 18 .....	1074
<b>Глава 19. СВЧ-электроника для космических и военных приложений .....</b>	<b>1076</b>
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, AlGaIn/GaN .....	1123
19.12. Использование технологии GaAs-монолитных схем СВЧ в зарубежной космической и военной технике .....	1131
19.12.1. Программа МММС и ее роль в развитии технологии МИС СВЧ .....	1131
19.12.2. Системы вооружения на основе СВЧ-МИС .....	1133
Литература к главе 19 .....	1138

<b>Глава 20. Вместо заключения</b> .....	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