



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 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

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 ИМЕС	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, AlGaIn/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

ГЛАВА 9

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МИКРОСХЕМ КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ НА ОСНОВЕ КНС И КНИ–СТРУКТУР

Современные технические требования, предъявляемые к аппаратуре космической и военной техники, определяют также и основные условия их эксплуатации при радиационных воздействиях. Наиболее поражающее действие на электронные приборы оказывает импульсное ионизирующее излучение (ИИИ), причем одними из наиболее уязвимых к ИИИ элементов современных электронных систем являются БИС ЗУ.

Изучение эффектов функциональных сбоев в запоминающих устройствах при воздействии импульсного ионизирующего излучения с предельными уровнями (до 10^{13} ед./с) имеет важное значение для создания новых и совершенствования существующих радиационно-стойких элементов и устройств военного, космического и другого специального назначения, повышения их функциональных и эксплуатационных характеристик, а также эффективности их применения [1, 2].

Разработка перспективных отечественных систем управления ракетно-космической техники требует создания номенклатуры новых цифровых, цифроаналоговых КМОП БИС, а также ряда БИС ЗУ с сочетанием высокой сбоеустойчивости и информационной емкости. К сожалению, на момент написания этой книги ни одна из ранее разработанных отечественных БИС ЗУ в полной мере данным требованиям не удовлетворяет. Так, предъявляемые заказчиками требования по «выживанию» БИС ЗУ в составе стратегических систем при предельных уровнях ИИИ в диапазоне 10^{12} – 10^{13} ед./с и сбоеустойчивости не менее 10^{11} ед./с, а в ряде случаев и до $(1-5) \cdot 10^{12}$ ед./с являются практически недостижимыми для БИС ЗУ, сформированных в объемных кремниевых и эпитаксиальных структурах [1, 2].

В то же время проведенное специалистами отечественной специализированной компанией ЭНПО «СПЭЛС» экспериментальное исследование СБИС ОЗУ 1 Мбит (НХ6228, выпускаемое фирмой Honeywell (США)), показало [3], что отработанный оптимизированный современный технологический процесс с использованием структур кремний-на-изоляторе (КНИ) и эффективные схемно-топологические решения действительно способны обеспечить сочетание высокой информационной емкости (1Мбит) и радиационной стойкости (уровень катастрофических отказов 10^{12} ед./с, уровень сбоеустойчивости 10^{11} ед./с, уровень дозовой стойкости – более 106 ед.). На основе КНИ структур фирма Honeywell освоила производство семейства радиационно-стойких КНИ КМОП БИС ЗУ. Этот факт указывает на обоснованность разработок отечественных БИС ЗУ на КНИ струк-

турах, которые обеспечивают существенное снижение ионизационных токов и подавление паразитных связей между элементами БИС при импульсном ионизирующем облучении. До настоящего времени практически единственной промышленно освоенной в России КНИ технологией для КМОП ЗУ является кремний-на-сапфире (КНС). За последние 10 лет созданы КМОП КНС БИС ЗУ (серия 1620), обеспечивающие уровни сбоеустойчивости ОЗУ $(1-5) \cdot 10^{10}$ ед./с для информационной емкости (4–8) Кбит и 10^{12} ед./с для информационной емкости (2–4) Кбит. Достигнутый уровень КНС ЗУ по соотношению информационная емкость – сбоеустойчивость обеспечивает потребности ранее разработанных бортовых систем управления сегодняшнего дня, но совершенно не достаточен для интеллектуальных сложнофункциональных систем нового поколения, находящихся в разработке.

Целью настоящей главы является представление читателю в сжатом виде результатов анализа открытой научно-технической информации и разработка на ее основе рекомендаций по повышению устойчивости проектируемых цифровых микросхем и схем памяти на КНИ подложках к воздействию ионизирующего излучения.

Для достижения этой цели материал главы содержит следующие разделы. В первом разделе показана актуальность использования КНИ структур для разработки и производства отечественных радиационно-стойких КМОП БИС ЗУ.

Второй раздел посвящен анализу радиационно-стойких МОП БИС, производимых в США на основе КНИ структур.

Третий раздел посвящен рассмотрению вопросов воздействия ионизирующего облучения на кремний и двуокись кремния.

В четвертом разделе рассмотрены основные физические явления в МОП КНИ транзисторах в условиях воздействия ионизирующей радиации.

В пятом разделе приведены результаты экспериментальных исследований влияния облучения гамма квантами с полной дозой до 106 рад на параметры МОП транзисторов, поликремниевых резисторов и пленочных конденсаторов.

Шестой раздел посвящен конструктивно-технологическим методам повышения стойкости КНИ МОП транзисторов к воздействию ионизирующего излучения.

В седьмом разделе рассмотрены вопросы радиационной стойкости КНС и КНИ КМОП БИС ОЗУ к воздействию импульсного ионизирующего излучения.

В разделе 8 представлены рекомендации по выбору оптимального конструкторско-технологического решения формирования ячейки ОЗУ в КНИ структурах, устойчивой к импульсам ионизирующего излучения большой мощности

9.1. Радиационно-стойкие КМОП БИС на основе КНИ структур

Технология КНИ стала привлекать к себе большое внимание с момента сообщения фирмой IBM в 1998 году об успешном освоении производства семейства микропроцессорных БИС с использованием КНИ структур. Некоторые производи-

тели полупроводниковых схем, такие как Motorola, последовали примеру IBM и также начали осваивать производство некоторых изделий на основе КНИ структур [4]. В то же время другие главные производители электронной техники из США, такие как Intel и AMD, попробовали использовать КНИ структуры вместо пластин объемного кремния в производстве микропроцессорных БИС, но в настоящее время приостановили эти работы. Большинство компаний разрабатывают КНИ продукты для маломощных и низковольтных применений, однако наибольшие преимущества достигаются при использовании КНИ технологии для производства изделий специального назначения для работы в условиях воздействия ионизирующего облучения и высокой температуры.

Радиационно-стойкие КНИ схемы изготавливаются, как правило, с использованием частично обедненных МОП транзисторов. Причиной этого является тот факт, что при воздействии ионизирующего облучения происходит образование зарядов в толстом слое изолирующего захороненного окисла (Buried Oxide – BOX). Это влияет на пороговое напряжение в полностью обедненных приборах, что очень нежелательно для радиационно-стойких применений. Благодаря последним разработкам стало возможным изготавливать радиационно-стойкие полностью обедненные приборы. Список компаний США, производящих радиационно-стойкие КНИ схемы, приведен в табл. 9.1 [5]. Лидирующие позиции занимает в этой сфере компания Honeywell.

Американское космическое агентство NASA поддерживает исследования в области технологии КНИ за способность КНИ БИС выдерживать радиацию, а также низкие и высокие температуры в космическом пространстве. Технология КНИ является главным кандидатом для применения в цифровых и смешанных сигнальных устройствах и схемах. Она включает малые размеры устройств (0,18–0,25 мкм) и малое рассеивание энергии, а потенциал для устойчивости к радиации представляет большой интерес для разработчиков систем специального назначения для космического применения. Отдельный интерес представляет возможность работы этих устройств при низких температурах (–100 °С) для применения на марсианской поверхности и при криогенных температурах для применения в инструментах и сенсорах. Полет к Меркурию потребует высокотемпературную электронику, а полет к одной из лун Юпитера Европе потребует от космического корабля возможность выдержать полную дозу в 100 Мрад. Целью разработок технологий КНИ для космических применений является полное технологическое моделирование и описание КНИ процесса в прямом сотрудничестве с MIT/Lincoln Labs, Honeywell, Allied Signal и National Security Agency (NSA) [5].

Таблица 9.1. Радиационно-стойкие и высокотемпературные схемы, производимые в США на основе КНИ структур

Компания	Частично/полностью обедненные МОП транзисторы	Основное применение
Synova	Частично обедненные	Радиационно-стойкие БИС
Honeywell	Частично обедненные	Высокотемпературные, радиационно-стойкие БИС
Peregrine	Полностью обедненные	Радиационно-стойкие БИС
Lincoln Lab	Полностью обедненные	Маломощные радиационно-стойкие БИС

Описание будет использовать упрощенный процесс, структуры для теста на надежность и существующие схемы с дизайном, подходящим для процесса изготовления и оценки надежности. Результат этих оценок предоставит необходимую информацию для инженеров-разработчиков и разработчиков схем, относящуюся к характеристикам и ограничениям этой технологии для радиационно-стойких применений. Дополнительная выгода также будет получена при создании технологического процесса изготовления БИС в КНИ структурах и получения информации по характеристикам надежности, желаемой промышленными партнерами, и это также чрезвычайно выгодно для будущих применений в NASA.

Фирма Synova разработала радиационно-стойкий (1 Мрад) 32-битный процессор, названный *Mongoose-V* [6]. *Mongoose-V* является радиационно-усиленным MIPS R3000 32-битным микропроцессором, который изготовлен по КМОП КНИ технологии. Отдельный чип представляет собой высокоинтегрированное устройство для многих процессорных применений в космическом корабле, таких как интегрированные в инструменты контроллеры. *Mongoose-V* включает в себя кэш-память на кристалле, периферийные функции на кристалле и полную аппаратную поддержку IEEE-754 плавающей запятой. Разработка *Mongoose-V* спонсировалась NASA Goddard Space Flight Center. *Mongoose-V* имеет устойчивость к полной поглощенной дозе в 1 Мрад и линейную передачу энергии (LET) больше $80 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2\cdot\text{мг}^{-1}$, что делает его виртуально свободным от эффектов единичных сбоев (SEU) и представляет особый интерес для космических применений.

В настоящее время Lincoln Laboratory завершила работы над полностью обедненным КНИ процессом для маломощных применений, где получены пороговые напряжения в 400 мВ и напряжения питания в 900 мВ. Минимальная длина затвора — 0,18 мкм и толщина кремниевой пленки — 50 нм. Исток и сток покрыты силицидом, и используется 3 слоя металла. Процесс характеризуется диэлектрической меза-изоляция. Боковые стенки островков кремния окислены, и используется имплантация ионов бора для борьбы с боковыми утечками после роста окисла (n-типа для p-канальных приборов, и p-типа для n-канальных транзисторов). Эта имплантация требует двух масок. Ключевым параметром для улучшения радиационной стойкости было уменьшение толщины окисла на боковых стенках с 25 до 8 нм. На рис. 9.1 представлены допороговые характеристики КНИ МОП транзисторов, изготовленных Lincoln Laboratory с различной толщиной окисла на боковых стенках кремниевых островков [7].

Хорошо видно, как уменьшение толщины окисла на боковых стенках с 25 до 8 нм привело к серьезному увеличению стойкости допороговой характеристики к воздействию облучения. Дальнейшие улучшения в процессе сделали возможным уменьшить пороговое напряжение для дозы в 1 Мрад (Si) до менее чем 140 мВ. Полностью обедненный КНИ КМОП процесс Lincoln Laboratory разработан в сотрудничестве с организациями, занимающимися радиационной стойкостью, такими как NASA Jet Propulsion Lab, Honeywell и Rockwell, а также компаниями, занимающимися маломощными высокоскоростными схемами, такими как Lucent, Boeing и DEC. Низкая мощность и высокоскоростные характеристики КНИ КМОП процесса были продемонстрированы при помощи схемы тестового компрессионного приемника, изображенного на рис. 9.2, где рабочие частоты в 0,55 и

1 ГГц были достигнуты при напряжениях питания 1,1 и 2 В, соответственно. Со всем недавно Lincoln Laboratory сообщила об изготовлении суб100 нм полностью обедненных МОП КНИ транзисторов [8].

Фирма Peregrine Semiconductor разработала и выпустила высокопроизводительную интегральную схему на базе запатентованного коммерческого Ultra Thin Silicon (UTSi®) КМОП/КНС техпроцесса [5]. Предлагая отличные преимущества в интеграции, скорости, энергопотреблении, линейности и стоимости, UTSi® процесс на основе КНС (кремний-на-сапфире) материала – очень перспективный техпроцесс для изделий беспроводных и спутниковых коммуникаций. Процесс UTSi® использует LOCOS изоляцию между приборами и последующую имплантацию бора в стенки n-МОП приборов.

Малое время жизни неосновных носителей заряда в КНС обеспечивает отличную устойчивость к SEU, а использование сапфирового материала под активным слоем кремния в комбинации с p^+ -легированными боковыми стенками n-канальных приборов обеспечивает хорошую устойчивость к полной дозе. Конструкция радиационно-стойкого МОП транзистора, разработанного фирмой Peregrine Semiconductor, представлена на рис. 9.3.

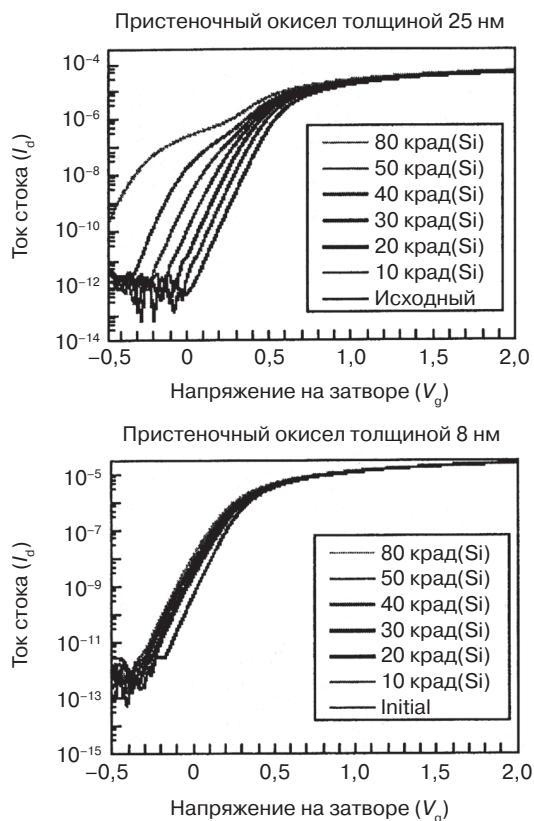


Рис. 9.1. Улучшение стойкости к дозе, вызванное уменьшением толщины окисла на боковых стенках

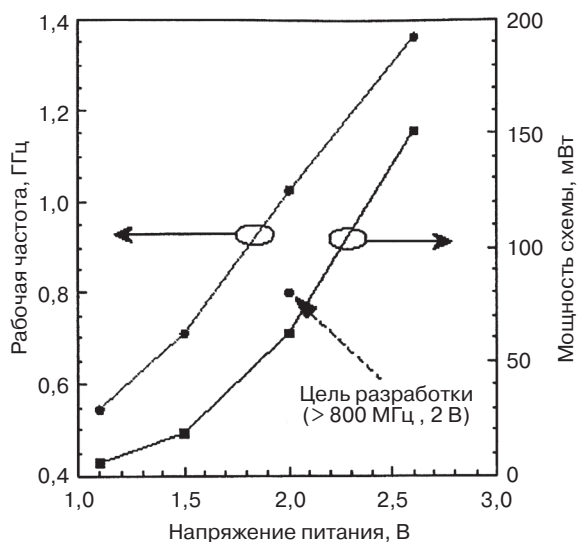


Рис. 9.2. Быстродействие и мощность схемы компрессионного приемника, изготовленного по технологии 0,25 мкм КНИ КМОП

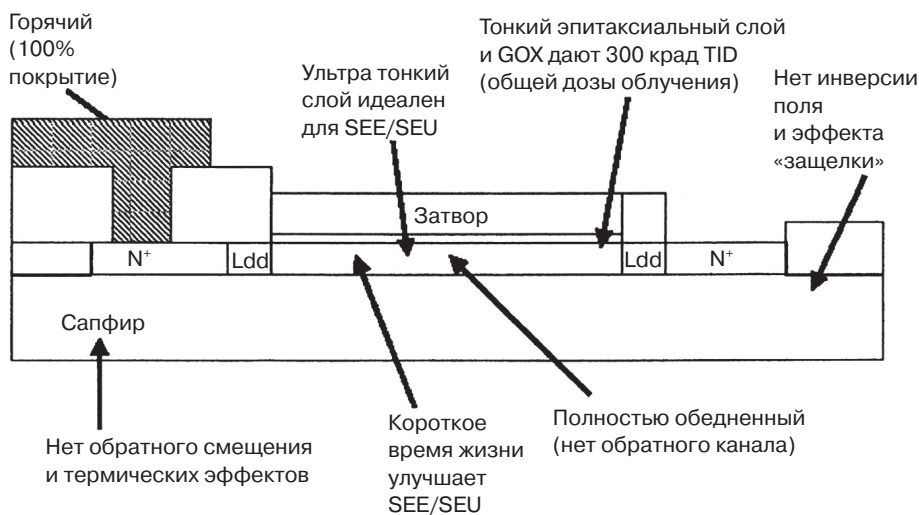


Рис. 9.3. Профиль UTSi® структуры с обозначением некоторых радиационных особенностей

UTSi® процесс был изначально разработан для производства радиочастотных схем мобильных и спутниковых коммуникаций. Интегральные схемы производства Peregrine в настоящий момент используются в мобильных продуктах Qualcomm, Samsung, Alcatel, NEC, Sony и т.д. В 1999 году Peregrine Semiconductor заявила на конференции Nuclear Space and Radiation Effects Conference (NSREC), что они начинают разработку и производство радиационно-стойких схем, включая FPGA, SRAM, EEPROM, DSP и АЦП. На рис. 9.4 и 9.5 приведены зависимости тока сто-

ка от напряжения на затворе n- и p-канальных 0,5 мкм UTSi® приборов. Сдвиг порога после облучения дозой в 100 крад(Si) составляет менее 50 мВ, и увеличение тока утечки (< 100 пА/мкм) после облучения почти незаметно [5].

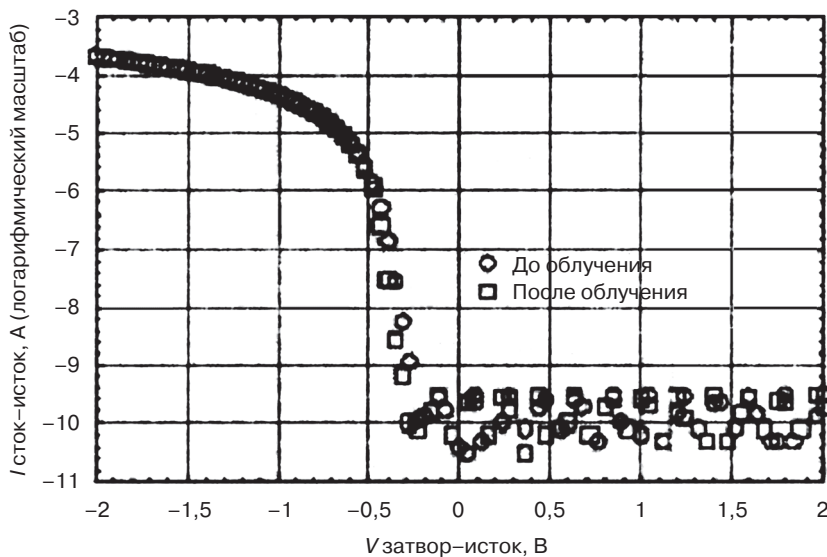


Рис. 9.4. Зависимость $\log(I_D(V_G))$ UTSi n-канального транзистора с $W/L = 3$ мкм/0,5 мкм до и после облучением в 100 крад(Si). $V_{зи} = 3$ В в процессе облучения

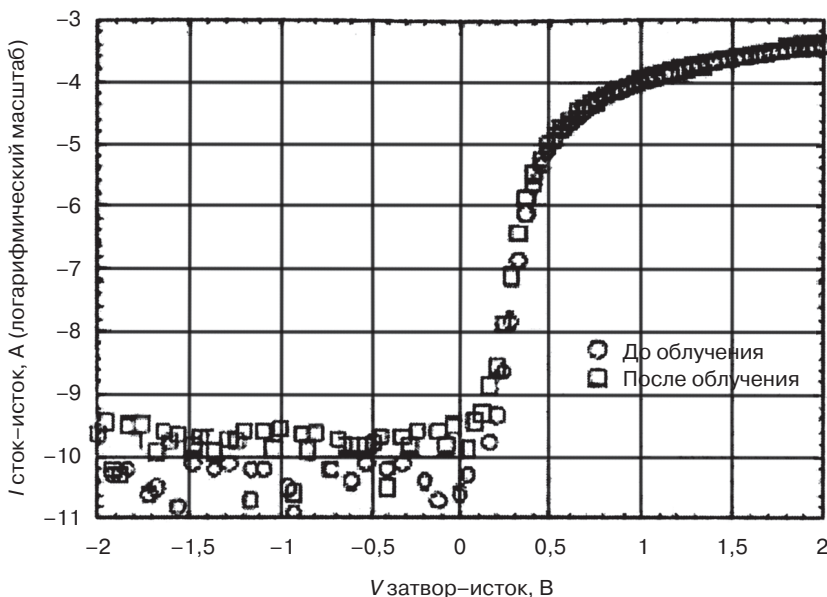


Рис. 9.5. Зависимость $\log(I_D(V_G))$ UTSi p-канального транзистора с $W/L = 3$ мкм/0,5 мкм до и после облучением в 100 крад(Si). $V_{зи} = -3$ В в процессе облучения

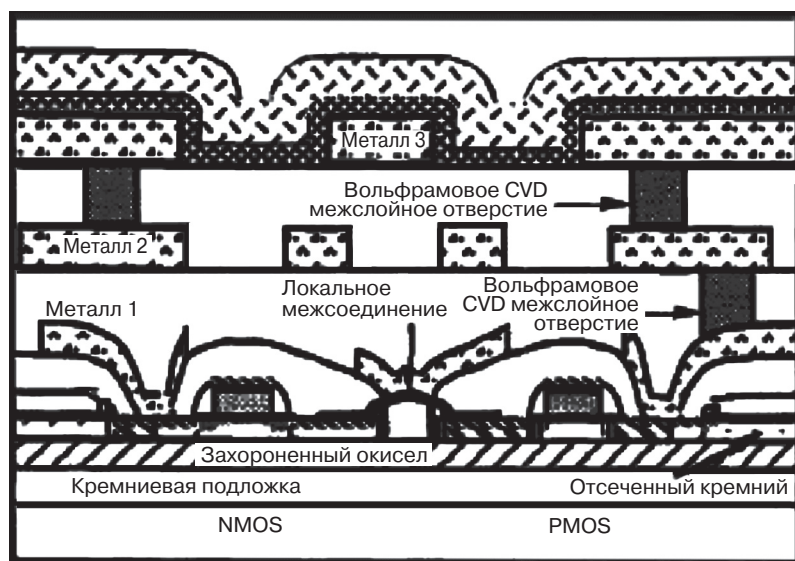


Рис. 9.6. Конструкция КНИ КМОП вентиля, изготовливаемого по технологии SOI RICMOS-IVTM CMOS

Наиболее значимые результаты в разработке и производстве радиационно-стойких БИС ОЗУ на основе КНИ структур получены фирмой Honeywell, которая разработала семейство КНИ БИС, включающих 256k ROM, 4 М SRAM и 16 М SRAM БИС [9, 10]. Основные характеристики некоторых КНИ БИС приведены в приложении А. Процесс производства КМОП КНИ БИС достаточно традиционен и использует частично обедненные КНИ полевые МОП транзисторы. Техпроцесс фирмы Honeywell для производства КМОП БИС 1М SRAM разработан специалистами центра Honeywell Solid State Electronics Center (Plymouth, MN 55441, США), и его некоторые особенности [11] состоят в следующем. Исходными подложками являются КНИ структуры, полученные по технологии SIMOX с имплантацией кислорода на энергии 190 кэВ. КНИ структуры были подвергнуты отжигу при температуре 1325 °С, что обеспечило получение захороненного окисла толщиной 370 нм и пленки кремния толщиной 190 нм. Для проведения по технологическому процессу отбираются КНИ пластины с плотностью поверхностных дефектов менее $0,2 \text{ см}^{-2}$, плотностью HF дефектов менее 1 см^{-2} и уровнем легирования пленки менее $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. На рис. 9.6 представлено сечение структуры КМОП вентиля, сформированного в КНИ структуре с использованием КМОП технологии с нормами проектирования 0,7 мкм. Этот процесс называется на фирме Honeywell SOI RICMOS-IVT CMOS процесс.

В процессе SOI RICMOS-IVT CMOS фирмы Honeywell карманы n-типа и p-типа проводимости создаются методом имплантации для получения частично обедненных областей под n^+ -типа поликремниевыми затворами n-канальных МОП транзисторов и встроенных каналов p-канальных МОП транзисторов. Внутри карманов для изоляции используются как окисел, так и p-n переходы. Между карманами используется окисная изоляция. В работах [8, 9], опубликованных в

открытой печати, сообщается, что для предотвращения токов утечки в паразитных элементах была разработана специальная конструкция ячейки памяти, которая обеспечивает стойкость до 2 Мрад по полной дозе в температурном диапазоне от -55 до 125 °С и устойчивость к импульсному излучению не менее 10^{12} рад/с. Эффективная длина каналов МОП транзисторов составляла $0,55$ мкм. Используются шелевая окисная изоляция и три уровня металлизации. Ячейка памяти имеет площадь $10,2 \times 8,4$ мкм² при использовании шага 2 мкм и размеров контактов 1 мкм. Области поликремния и контактов истока и стока покрыты силицидом титана. Размер кристалла SRAM 1M составляет $4,44 \times 4,47$ мм² [11].

Образцы n-канальных МОП транзисторов с шириной канала 10 мкм и длиной канала $0,7$ мкм были подвергнуты облучению гамма квантами. На рис. 9.7 представлены зависимости порогового напряжения верхнего затвора от полной дозы. Сдвиг порогового напряжения не превышает 100 мВ при дозе 1 Мрад.

На рис. 9.8 представлены зависимости порогового напряжения нижнего затвора от дозы облучения. Сдвиг порогового напряжения нижнего затвора не превышает 20 В при дозе 1 Мрад. После облучения до дозы 1 Мрад пороговое напряжения нижнего затвора более 10 В, что вполне достаточно для устойчивой работы МОП n-канальных транзисторов при напряжении питания 5 В. При исследованных n-канальных МОП транзисторах не установлено увеличения токов утечки после облучения с дозой 1 Мрад.

Исследования кольцевых генераторов показали, что время задержки переключения КМОП вентилях, состоящих из МОП транзисторов с длиной канала $0,7$ мкм и шириной канала 3 мкм, составляло 120 пс. В температурном диапазоне от -55 до 125 °С время переключения БИС 1M СОЗУ было от 17 нс до 25 нс. Данные по токам потребления в состоянии покоя БИС 1M СОЗУ представлены на рис. 9.9.

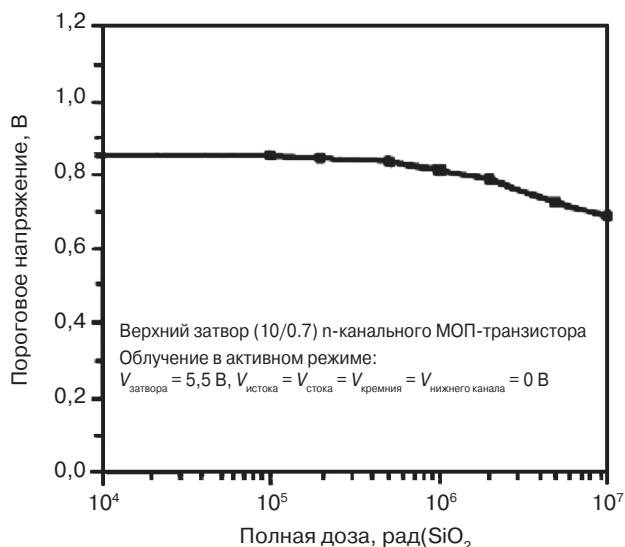


Рис. 9.7. Пороговое напряжение верхнего затвора n-канального МОП КНИ транзистора в зависимости от дозы облучения

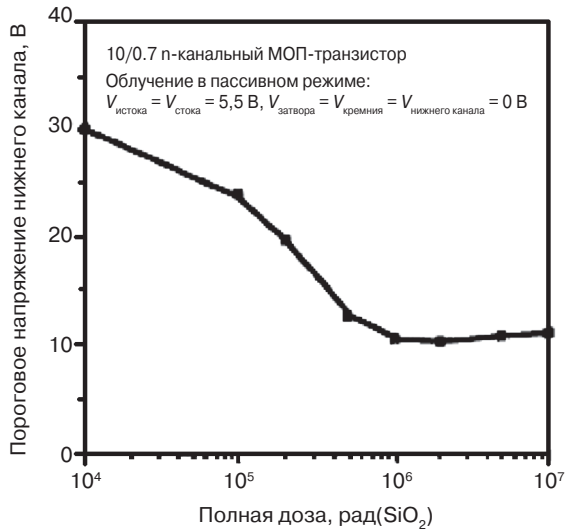


Рис. 9.8. Пороговое напряжение нижнего затвора p-канального МОП КНИ транзистора в зависимости от дозы облучения

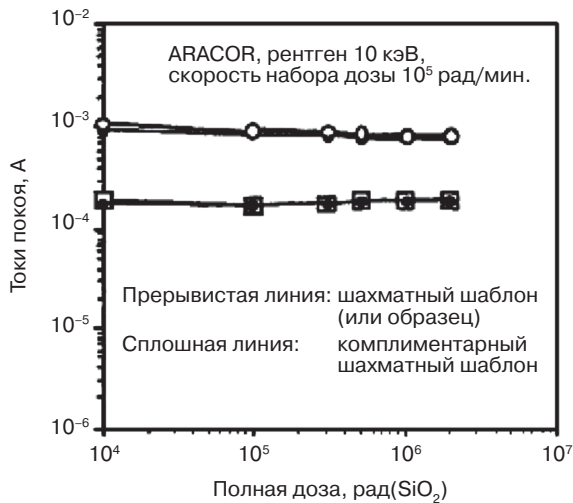


Рис. 9.9. Токи потребления в состоянии покоя КНИ БИС 1 М СОЗУ фирмы Honeywell

Honeywell и Motorola объявили о совместной разработке радиационно-стойкого Power PC микропроцессора для аэрокосмических применений [10].

В последние двадцать лет лидирующие позиции по производству радиационно-стойких БИС для военных и космических применений в США занимает фирма Honeywell. Семейство радиационно-стойких изделий этой фирмы в настоящее время включает КМОП БИС ЗУ, БИС ЗУ с магнитными ячейками памяти, а также заказные БИС (ASIC) [13, 14]. Для изготовления радиационно-

стойких БИС фирма Honeywell использует в настоящее время три базовых технологии с проектными нормами 0,7 мкм, 0,35 мкм и 0,15 мкм. Вместо объемных пластин кремния используются КНИ структуры, что обеспечивает устойчивость к полной дозе не менее 1 Мрад(Si), стойкость к импульсному излучению с мощностью дозы не менее 10^{12} рад(SiO_2)/с и устойчивость к единичным сбоям (SEU) не хуже 10^{-11} ошибок/бит/день. По сравнению с объемными пластинами кремния, КНИ структуры имеют примерно в 10 раз меньший объем активных областей кремния, в котором происходит накопление радиационных дефектов, и поэтому КНИ КМОП БИС в меньшей степени требуют использования специальных схемотехнических решений для удержания логического состояния ячейки памяти неизменным при облучении. Эта конструктивная особенность МОП транзисторов в КНИ структурах дополняется соединением кармана транзисторов с подложкой КНИ структур, что обеспечивает еще большую стойкость к воздействию ионизирующего излучения. Для достижения повышенной стойкости КМОП БИС в распоряжении проектировщика в библиотеке проектирования имеются специальные структурные блоки, которые обеспечивают задержку переключения ячеек памяти до полной рекомбинации зарядов, образовавшихся при облучении.

Три года назад [15] фирма Honeywell усовершенствовала радиационно-стойкий технологический процесс производства БИС с нормами проектирования 150 нм на базе КНИ структур. Эта технология разработана в результате совместного проекта центра Honeywell Solid State Electronics Center (SSEC) и фирмы Synopsys. Финансирование проекта осуществлялось Министерством Обороны США (U.S. Department of Defense) в рамках программы «Radiation Hardened Microelectronics Accelerated Technology Development» по контрактам «DTRA01-03-D-0018-0001» и «AFRL Agreement F33615-02-9-5325», направленным на разработку и производство радиационно-стойких субмикронных БИС, в частности, заказных БИС (ASIC). В результате выполнения этого совместного проекта удалось разработать технологию производства заказных радиационно-стойких БИС, содержащих более 15 млн вентиляей на кристалл и имеющих рабочую частоту 500 МГц. Такие параметры ранее достигались только в гражданских БИС. Успех в получении этих результатов оказался возможным благодаря использованию улучшенных методов проектирования, основанных на использовании таких платформ проектирования компании Synopsys, как Galaxy™ Design и Discovery™ Verification, которые были применены для субмикронного 150 нм процесса фирмы Honeywell. По сравнению с технологией на объемном кремнии разработанный технологический процесс с нормами проектирования 150 нм и с использованием КНИ структур обеспечивает кроме высокой радиационной стойкости также и такие серьезные технические и экономические преимущества, как уменьшение на 30% потребляемой мощности, увеличение на 20% рабочей частоты, увеличение на 15% плотности упаковки элементов и уменьшение на 4–6 дБ перекрестных помех.

Характеристики некоторых КНИ схем производства Honeywell и их устойчивость к полной дозе облучения, частоте одиночных сбоев (SEU) и к импульсному ионизирующему излучению (ИИИ) представлены в табл. 9.2.

Таблица 9.2. Некоторые радиационно-стойкие КМОП БИС фирмы Honeywell

Тип БИС ЗУ	256 К SRAM 1 М SRAM 5–20 М SRAM	4 М SRAM 16 М SRAM	4 М SRAM 16 М SRAM ASIC
Технология	RICMOS SOI-IV	RICMOS SOI-V	RICMOS SOI-VII
Длина канала топологическая, L_{top} (μm)	0,7	0,35	0,15
Длина канала эффективная, $L_{эф}$ (μm)	0,6	0,3	0,11
Напряжение питания, В	5,0/3,3	3,3/2,5	1,8
Площадь ячейки, мкм^2	86	33	7
Стойкость к полной дозе, МРад(Si)	1	1	1
Стойкость к единичным сбоям, SEU (ошибок/бит/день)	10^{-10}	10^{-10}	10^{-10}
Стойкость к импульсному излучению, Рад(Si)/сек	10^{12}	10^{12}	10^{12}
Динамическая мощность, мВт/МГц	25	18	5
Потребляемая мощность в состоянии покоя, мВт	10	15	11

9.2. Воздействие ионизирующего облучения на кремний и двуокись кремния

Закономерности действия облучения на твердые тела изложены в многочисленных монографиях и обзорах, например [16, 17], суть которых сводится к следующему. При прохождении частиц высоких энергий через твердые тела основными механизмами торможения являются упругие столкновения с ядрами (ядерные потери) и неупругие столкновения с электронами (ионизационные потери). Ядерный механизм доминирует при низких скоростях частиц (например, ионов). В этом случае передача энергии атомам мишени происходит благодаря упругим столкновениям – налетающая частица передает свою энергию ядрам (атомам) мишени в упругих столкновениях. Электронный механизм доминирует при высоких скоростях (энергиях) частиц и при облучении гамма-квантами. Торможение в данном случае определяется возбуждением и ионизацией электронов среды.

При достаточно высоком значении энергии налетающей частицы происходит смещение атома мишени из равновесного (узлового) положения, что приводит к возникновению междоузельного атома и вакансии (пары Френкеля). Образование дефектов продолжается, пока энергия окажется ниже пороговой энергии образования смещенного атома. В результате образуется определенное число дефектов Френкеля. Увеличение интенсивности облучающего потока ведет к более высоким плотностям создаваемых дефектов, т.е., эффективность образования пар Френкеля возрастает.

9.2.1. Радиационные эффекты в кремнии при облучении

9.2.1.1. Радиационные дефекты, их комплексы и кластеры

Образовавшиеся в результате облучения собственные точечные дефекты обладают высокими коэффициентами диффузии даже при комнатных температурах [18]. Причем приводимые в литературе значения коэффициентов диффузии вакансий

имеют большой разброс [19]. Такой разброс авторами объясняется тем, что в различных зарядовых состояниях вакансии обладают разными энергиями миграции. Следует отметить, что исключительная подвижность вакансий и междоузельных атомов, а также процессы образования дефектных ассоциаций между собой и с другими несовершенствами структуры создают большие трудности при изучении свойств этих дефектов.

Другим классом радиационных дефектов являются дефектные комплексы, которые возникают в результате взаимодействия точечных дефектов как друг с другом, так и с другими примесями (легирующими и неконтролируемыми). Основными электрически активными центрами, образующимися в Si после облучения ионами, являются комплексы вакансия–кислород (VO или А-центры) с энергией ионизации $E_c = 0,17$ эВ, дивакансии (V2), которые вводят в запрещенную зону уровни энергии $E_c = 0,23$ эВ, $E_c = 0,39$ эВ, $E_v = 0,21$ эВ, а также комплексы вакансия с элементами V-й группы, наиболее известный из которых – комплекс вакансия–фосфор (VP или Е-центр) с уровнем энергии $E_c = 0,44$ эВ [16]. При взаимодействии компонентов пар Френкеля с примесью возможно изменение положения примеси в решетке: вытеснение узловой примеси в междоузельное положение собственным междоузельным атомом (эффект Уоткинса) и растворение междоузельной примеси в радиационно-введенных вакансиях, аннигиляция вакансий и междоузельных атомов при последовательном захвате их на атом примеси (на центр аннигиляции). Большинство дефектов междоузельного и вакансионного типа отжигаются при температурах до 5000 °С [19].

Эффективность введения дефектных комплексов на начальной стадии накопления дефектов пропорциональна дозе облучения. При достаточно больших дозах облучения наступает насыщение концентрации тех или иных комплексов. Причинами этого эффекта могут быть следующие [16]:

- 1) истощение примеси, входящей в комплекс;
- 2) термическая диссоциация комплекса (при достаточно больших температурах);
- 3) акты аннигиляции вакансий и междоузельных атомов на примеси.

Уменьшение скоростей введения дефектов имеет место при увеличении интенсивности облучения за счет аннигиляции компонент пар Френкеля. При рассмотрении эволюции радиационных дефектов, образованных в каскаде смещений, необходимо учитывать следующие процессы [20–22]:

- 1) диффузию вакансий и междоузельных атомов;
- 2) объединение вакансий и междоузлий в комплексы;
- 3) рекомбинацию вакансий и междоузлий;
- 4) отжиг сложных дефектов, их диффузию и перестройку.

Процессы накопления в зоне смещений определяются в основном конкуренцией процессов 1–3.

В случае высоких энергий и массы бомбардирующих частиц возрастает (например, нейтроны или ионный высоких энергий) энергия, переданная выбитому из узла атому решетки. Атом отдачи в результате вторичных столкновений создает большое количество вакансий и междоузельных атомов. В результате совокупность точечных дефектов в малом локальном объеме образует протяженный дефект со специфическими свойствами (разупорядоченная область). Предполагается, что разупоря-

доченные области (РО) состоят из центральной зоны, обогащенной вакансиями, и окружающей ее оболочки, насыщенной междоузельными атомами [21, 22]. При перекрытии РО могут образоваться разупорядоченные и аморфные слои. Переход в аморфное состояние может осуществляться несколькими путями:

- 1) формирование аморфных областей непосредственно в отдельной РО;
- 2) взаимодействие (перекрытие) различных РО, приводящее к их перестройке, укрупнению и формированию аморфных областей;
- 3) стоком и накоплением дефектов одного вида (вакансий или междоузельных атомов) вблизи нарушенной имплантацией области в кристалле.

Необходимым условием аморфизации по любому из выбранных механизмов является пространственное разделение в этой области вакансий и междоузельных атомов. Кристаллизация аморфного слоя происходит при температурах 600–7000 °С.

При последующей термообработке облученного материала в результате объединения простых дефектов либо под воздействием механических напряжений, возникающих вокруг радиационных нарушений, часто образуются линейные дефекты – дислокации или дислокационные петли, стержнеобразные дефекты. Эти крупные линейные дефекты состоят из междоузельных атомов. Стержнеобразные дефекты отжигаются при $T = 800–9000$ °С, а дислокационные петли еще при более высоких температурах ($> 10\,000$ °С) [16, 17].

9.2.1.2. Особенности дефектообразования в кремнии и поликремнии, облученном импульсами гамма-квантов

Вероятность непосредственного взаимодействия гамма-квантов с ядрами атомов мала. Обычно возникновение радиационных дефектов при гамма-облучении связано с процессами, в которых образуются быстрые электроны: фотоэффектом, эффектом Комптона и рождением электронно-позитронных пар. В области энергий гамма-квантов менее 5 МэВ преобладает эффект Комптона. Например, при облучении гамма-квантами Co^{60} с энергией 1,25 МэВ комптоновское рассеяние образует электроны с энергией 0,59 МэВ. Далее расчет количества смещенных атомов сводится к расчету дефектов, введенных электронами. Поэтому действие облучения гамма-квантами близко к облучению электронами, и при энергии менее 5 МэВ облучение гамма-квантами создает в кремнии лишь точечные дефекты. Скорости формирования дефектов зависят не только от энергии гамма-квантов, но и от примесного состава кремния. Скорость введения дефектов (и удаления носителей) в кремнии с удельным сопротивлением 2–50 Ом·см, легированном фосфором, при облучении гамма-квантами Co^{60} составляет $\Delta n/\Delta\Phi \sim (7–14) \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ [23]. Увеличение уровня легирования кремния приводит к снижению скоростей введения дефектов благодаря их аннигиляции на атомах примеси.

Процессы аннигиляции компонентов пар Френкеля и образования вторичных дефектов зависят от количества одновременно введенных дефектов. Импульсное облучение по мере увеличения интенсивности импульса приводит к возрастанию доли аннигилирующих первичных дефектов и снижению скоростей формирования вторичных дефектных комплексов. Причинами данных изменений являются увеличение концентраций компонентов пар Френкеля и нагрев полупроводника за счет поглощенной энергии.

Переход от кремния к поликристаллическому кремнию благодаря наличию границ между зернами приводит к следующим особенностям процесса накопления дефектов:

- (1) геттерирование дефектов на границах изменяет скорости введения дефектов и, соответственно, скорости удаления свободных носителей заряда;
- (2) механические напряжения вблизи границ также являются фактором, изменяющим скорости удаления свободных носителей.

9.2.2. Свойства границы раздела Si/SiO₂

9.2.2.1. Общие сведения о строении SiO₂

Структурной основой всех кристаллических и аморфных модификаций SiO₂ является кремний-кислородный тетраэдр SiO₄. Длина связи в различных модификациях окисла меняется от 0,160 до 0,163 нм, а тетраэдрический угол —O—Si—O— остается практически постоянным ~ 109° [24]. Последнее обстоятельство свидетельствует о сохранении ближнего порядка при переходе от кристаллических к аморфным модификациям окисла. Аморфные пленки, выращиваемые термическим окислением, в основном стехиометричны по составу, за исключением приграничных с полупроводником областей. Средний угол между кремний-кислородными тетраэдрами составляет в таких пленках 147 ± 17°. Считается, что в аморфных окисных пленках возникают кольцеобразные структуры, ориентированные параллельно поверхности кремния [10]. Они играют важную роль в миграции примесных атомов.

Основными и надежно идентифицированными точечными дефектами в диоксиде кремния являются кислородные вакансии, так называемые E'₁-центры [26]. E'₁-центры возникают в окислах при прогревах в высоком вакууме [27], облучении высокоэнергетичными частицами (нейтроны, электроны, ионы, γ-лучи) [28, 29]. Концентрация E'₁-центров, как правило, существенно возрастает при приближении к границе с кремнием, что связывается с меньшей радиационной стойкостью стехиометрически нарушенного слоя SiO_x. Еще одним достаточно хорошо изученным центром системы Si/SiO₂ являются p_b-центры [30]. Существует две разновидности центра [31, 32]: p_{bo}-центры, которые принадлежат атомам кремния, связанным с тремя соседними атомами кремния (₃Si≡Si*), и p_{b1}-центры, в которых трехкоординированные атомы кремния связаны с двумя соседними атомами кислорода (₂OSi≡Si*). На характер распределения неспаренного электрона p_b-центра оказывает сильное влияние окружение центра. Отсюда сильная зависимость параметров p_b-центров от условий обработки поверхности, режимов отжига и т.д.

Существенное влияние на структуру, оптические и электрические свойства пленок окисла оказывают примесные дефекты. Они возникают практически на всех стадиях создания МОП структур, начиная с окисления кремния и кончая нанесением металлического электрода. Прежде всего, остановимся на роли молекул воды. Они присутствуют на поверхности кремния, в окислительной атмосфере в случае влажного окисления. Считается, что молекулы воды диффундируя через окисел, взаимодействуют с сеткой кремний-кислородных тетраэдров. В результате про-

исходит разрыв перенапряженных силоксановых связей и образование гидроксильных групп. При взаимодействии молекул воды с кислородными вакансиями возможно образование гидроксильных и гидридных групп. Гидридные группы приводят к значительному искажению структуры диоксида кремния вследствие изменения углов и длины связей в кремний-кислородных тетраэдрах [33]. Электрофизические исследования говорят о важной роли этих группировок в захвате зарядов, протекающих через окисел. Встроенный заряд в окислах, выращенных влажным и сухим окислением, резко отличается.

Не менее важную роль в окисле играет водород. Хофштейн [19] одним из первых предположил, что протоны играют основную роль в формировании положительного подвижного заряда в оксиде, ответственного за нестабильность характеристик МДП структур. Исследования электрофизических характеристик МОП транзисторов позволили авторам [35] определить подвижность протонов в структуре Si/SiO₂. Она составила $10^{-10} - 2 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ в зависимости от относительной влажности окисла. Предэкспоненциальный множитель и энергия активации диффузии протонов в окисле составляют $5,6 \cdot 10^{-4} \text{ см}^4 \text{ с}^{-1}$ и 0,75 эВ [36].

Следующую группу примесных дефектов, играющих важную роль в определении свойств оксида, составляют ионы щелочных металлов, и в первую очередь ионы натрия. Часть ионов натрия образует ионные соединения с немостиковым кислородом $\equiv \text{Si}-\text{O}^- - \text{Na}^+$ [37], эта часть ионов неподвижна. Константа и энергия активации ионов натрия ($12,5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^4 \text{ с}^{-1}$ и 0,87 эВ) не сильно отличаются от соответствующих величин для протонов [36]. Подвижность ионов натрия в электрическом поле описывается выражением $4,6 \exp(0,63/kT) \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$, что соответствует величинам $10^{-11} - 10^{-8} \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ при напряженности поля $2 \cdot 10^5 \text{ В/см}$ и температурах 300–460 К. С ростом ионного радиуса подвижность ионов падает в ряду Na⁺, K⁺, Cs⁺ и т.д. [36]. Таким образом, ионы натрия, как и протоны, ответственны за дрейфовую нестабильность МОП приборов.

9.2.2.2. Электронная структура SiO₂

Многообразие кристаллических и аморфных модификаций диоксида кремния дает основу для различия конкретных параметров формируемых окислов. Так, ширина запрещенной зоны окисла для непрямых переходов лежит в интервале 6,9–9,8 эВ [36]. Теоретические оценки показывают, что дефектные состояния и, в частности, изменение углов — O—Si—O — приводят к появлению хвостов у потолка валентной зоны и дна зоны проводимости оксида и к изменению положения потолка валентной зоны [38, 39]. Протяженность этих хвостов несет информацию о степени разупорядочения окисной пленки. Для окисной пленки, полученной окислением во влажном кислороде, протяженность хвостов состояний от дна зоны проводимости и у потолка валентной зоны составляет соответственно 0,5 и 0,2 эВ [40, 41]. Протяженность хвостов существенно меняется в процессе гидратации окисла, легирования и воздействия излучения [25]. Для высокоомного кремния высота барьеров между кремнием и окисной пленкой для движения носителей составляет 4,5 и 5,4 эВ для зоны проводимости и валентной зоны, соответственно [36].

9.2.2.3. Строение и состав Si/SiO₂ границы

Используются два возможных подхода к описанию границы раздела Si/SiO₂:

- 1) резкая граница, включающая в себя не более монослоя переходного слоя;
- 2) плавный переход от кремния через SiO_x слой, содержащий кислородные вакансии к стехиометрически ненарушенному слою SiO₂.

Были предприняты попытки теоретически сопрячь структуру кремния с его собственным оксидом [42–44]. Пантелидес и Лонг [42] рассматривали контактирующий оксид в рамках модели случайной пространственной структуры (СПС) с легко варьруемыми углами между тетраэдрами. Херман [43] сочленил поверхности (100) кремния и (100) β-кристобаллита, отношение постоянных решетки, у которых примерно равно $\sqrt{2}$. Херман с помощью увеличения углов Si–O–Si на 45° получил идеализированную границу раздела, на которой половина атомов находится в координации 4, а половина – в координации 2 с двумя разорванными связями. Похожая модель предложена в [44]. Японские исследователи [43] в рамках модели резкой границы и приближении СПС оценили деформации, возникающие при сопряжении кристаллического кремния с его аморфным оксидом. Оказалось, что деформации убывают в ряду кристаллографических плоскостей (100), (110), (111).

Таким образом, даже теоретически трудно представить себе упорядоченную границу твердых фаз с различными параметрами структуры. Такое сочленение должно привести к появлению дислокаций несоответствия и существенной деформации валентных углов и длины связей. Возникающие при окислении флуктуации диффузионных потоков реагирующих веществ, присутствие в них паров воды и других примесей будут способствовать структурно и химически неоднородной граничной фазе. Исследования поперечного разреза Si/SiO₂ структуры с помощью микроскопии и/или спектроскопической эллисометрии четко указывают на существование переходной фазы толщиной до нескольких нанометров [44]. Увеличение скорости окисления кремния приводит к возрастанию толщины переходного слоя [45], присутствию кластеров кремния в переходном слое [46] и/или высокой концентрации ступенек на поверхности кремния [47].

Огромное количество работ посвящено исследованию химического состава переходной области. Изучение профиля граничной фазы с помощью электронной Оже-спектроскопии указывает на присутствие в ней избыточной концентрации атомов кремния [47]. Однозначным выводом многочисленных исследований является нарушение по кислороду стехиометрии переходного слоя, т.е. SiO_x, где $x < 2$. Измеряя химические сдвиги ΔE пиков Si_{2p} с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии высокого разрешения [48] для разной толщины окислов, было получено, что в пределах 3 нм существует случайная сетка связей из 4-, 6-, 7-, 8-членных колец из тетраэдров. Таким образом, в переходном слое присутствуют комплексы Si₂O₃, SiO, Si₂O, определяющие недостаток кислорода в этой фазе. Переходной слой – наиболее дефектная область Si/SiO₂ структуры, в котором присутствует большое количество вакансий и оборванных связей.

При охлаждении окисленных пластин после окисления на их поверхности возникают значительные механические напряжения (сжатие в оксиде и растяже-

ние в кремнии). Считается, что основной причиной этих напряжений является разница в коэффициентах термического расширения кремния и его оксида. Внутренние деформации на межфазной Si/SiO₂ границе доходят до 1–2 ГПа [49]. При толщине окисла более 500 нм напряжения в кремнии и на границе пропорциональны толщине и действительно определяются только разностью коэффициентов термического расширения кремния и его оксида [50]. Для более тонких пленок величина деформации целиком определяется напряжениями в решетке самого кремния, зависящими от режимов окисления и охлаждения. Наличие деформаций в структуре Si/SiO₂, по данным [51], приводит к образованию микроскопических полостей, которые при охлаждении могут превращаться в макроскопические поры.

Классификация локализованных электронных состояний. Локализованные электронные состояния на Si/SiO₂ границы принято делить на четыре группы [36].

1. Медленные состояния диэлектрика. Они обладают аномально малыми сечениями захвата носителей $\sim 10^{-27}$ – 10^{-31} см². Характерное время релаксации заряда в таких состояниях — 10^3 – 10^4 с. Обмен носителями с кремнием осуществляется по надбарьерному механизму.
2. Медленные состояния границы раздела (МСГ). Они особенно характерны для реальных границ раздела. МСГ локализованы в пределах 1 нм от полупроводника в переходном SiO_x слое. Обмен носителями с полупроводником протекает по туннельному механизму. Сечения захвата для этих состояний 10^{-24} – 10^{-26} см², что соответствует времени релаксации заряда 10^{-1} – 10^{-2} с.
3. Быстрые состояния. Они локализованы в приповерхностной области самого кремния и обмениваются зарядами с его разрешенными зонами за время 10^{-4} – 10^{-8} с. Сечения захвата для этих состояний 10^{-13} – 10^{-19} см². Быстрые состояния аналогично примесям бывают донорные и акцепторные.
4. Рекомбинационные центры. Это быстрые состояния с незначительно отличающимися сечениями захвата электронов и дырок. Локализованы в кремнии.

Остановимся более подробно на быстрых поверхностных состояниях Si/SiO₂ границы. В настоящее время накоплен обширный экспериментальный материал по изучению спектров быстрых состояний, полученный с использованием методики эффекта поля, поверхностной фотоЭДС, емкостных методик. Вся совокупность полученных данных однозначно свидетельствует о квазинепрерывном спектре быстрых состояний. Плотность быстрых состояний существенно зависит от параметров материала, его обработки и режимов создания Si/SiO₂ границы. Но при всех обработках кремния квазинепрерывный характер спектра состояний сохраняется. Отсутствие структуры в спектрах быстрых состояний часто объясняют высокой плотностью уровней дефектов. Доминирующая роль квазинепрерывного спектра быстрых состояний, конечно, не исключает существования дискретных уровней в запрещенной зоне. Такие уровни возникают при радиационных воздействиях на Si/SiO₂ границу.

Основным и далеко не решенным является вопрос о природе быстрых ловушек. В качестве потенциальных центров быстрого захвата обычно рассматривают оборванные связи (p_{bo} и p_b -центры), вакансии, дивакансии и более сложные де-

фектные образования, а также примесные атомы. Детальные исследования p_{bo} и p_b -центров на Si/SiO₂ границе в зависимости от исходного кремния, режимов окисления и последующих отжигов [51] демонстрируют прямую корреляцию между концентрацией p_b -центров и плотностью быстрых состояний. Из совместных исследований CV характеристик МОП структур и атомного рельефа границы раздела авторы [52, 53] установили интересные корреляции между концентрацией ступенек на границе раздела Si/SiO₂. Авторы [54] считают, что наиболее вероятной основой быстрых состояний являются угловые атомы ступенек, т.е. p_b -центры. А в работе [55] показано, что плотность состояний на атомарно гладкой поверхности (111) кремния, на которой был нанесен окисел, снижается до значений плотности поверхностных состояний на границе с (100) Si.

На неупорядоченной Si/SiO₂ границе благодаря высокой концентрации флуктуационных полей энергетический спектр быстрых состояний приобретает кооперативные свойства, при этом индивидуальные свойства тех или иных дефектов структуры в значительной мере нивелируются. Овсюк и Ржанов [54] одними из первых высказали мысль, что квазинепрерывный характер спектра быстрых состояний связан с нарушениями симметрии атомного потенциала в приповерхностной области кристалла. Сильное влияние адсорбированных атомов и молекул на спектр быстрых состояний объясняется тем, что атомы и молекулы закрепляются вблизи наиболее сильных флуктуаций потенциала и тем самым сглаживают эти флуктуации. Большинство исследователей согласны с чисто флуктуационной природой мелких быстрых состояний вблизи разрешенных зон кремния, для создания которых достаточно флуктуации одиночных зарядов [55]. Гораздо более дискуссионным является вопрос о природе глубоких состояний. В этом случае необходимо появление флуктуаций с большой амплитудой, для создания которых необходимы кластеры заряженных центров, что само по себе маловероятно.

Поскольку плотность состояний играет важную роль в функционировании элементов интегральных схем, было предпринято большое количество поисков, направленных на снижение плотности состояний на Si/SiO₂ границе. Нейтрализация быстрых состояний путем адсорбции атомов водорода широко используется в настоящее время в технологии [56, 57]. Это достигается, в частности, насыщением оборванных связей. Согласно данным [58], они могут приводить к нейтрализации в приповерхностной области кремния таких активных акцепторов, как B, Al, Ga, In. Благодаря высокой проницаемости SiO₂ по отношению к атомарному водороду он может проникать к Si/SiO₂ границе и пассивировать дислокации в приграничной области кремния [59].

Однако эффекты пассивации имеют место только при относительно низких температурах (до 500 °С). Более высокие температуры отжига в атмосфере водорода вызывают дополнительную генерацию состояний на границе и увеличение положительного заряда в окисле [60, 61]. Генерация состояний на Si/SiO₂ границе также имеет место при выдержке под напряжением или облучении МОП структур [62]. Количество генерируемых центров на (100) Si/SiO₂ границе ниже [63]. Часто непосредственное взаимодействие водорода с дефектами границы приводит к образованию дополнительных состояний [64].

9.2.3. Воздействие ионизирующего облучения на диэлектрические слои

9.3.3.1. Введение объемного заряда в диэлектрик

Одним из основных процессов, происходящих в диэлектрическом слое при облучении, является накопление объемного заряда. Введение заряда приводит к сдвигу вольт-фарадных характеристик по напряжению. Генерация носителей заряда и их захват в окисле МОП структур изучались многими исследователями в течение нескольких десятилетий [63–68]. Были разработаны математические модели, которые описывают разные механизмы накопления заряда [64, 65]. Для случая SiO_2 заряд, вводимый при облучении, является чаще всего положительным, а для слоев Si_3N_4 – отрицательным. Величина накопленного заряда зависит от следующих факторов:

- (1) технология получения диэлектрических слоев;
- (2) вид, интенсивность и доза облучения;
- (3) напряжение на диэлектрике во время облучения или величина и знак встроенного электрического поля.

В целом считается, что накопление заряда при облучении происходит за счет захвата носителей, создаваемых облучением за счет ионизации, на ловушки, уже существующие в диэлектрическом слое. При этом генерация носителей происходит равномерно во всем слое. Гамма облучение с энергиями порядка 2 МэВ является ионизирующим, т.е. способным генерировать носители и не способно смещать атомы диэлектрического слоя и разрывать регулярные связи. Однако в случае присутствия в диэлектрике напряженных связей с существенно более низкой энергией (например, дефекты пассивированные водородом) облучение может их разрывать и приводить к росту концентрации дефектов в диэлектрике [23]. Присутствие в окисле атомов переходных металлов увеличивает количество напряженных связей. Наличие в окисле гидроксильных групп OH^- уменьшает наведенный радиацией заряд, так как наличие радикалов уменьшает число деформированных связей введением немостиковых групп OH , которые связываются с $\text{O}\equiv\text{Si}$, заменяя деформированные связи. При облучении происходят разрыв $\text{Si}-\text{OH}-$ и $\text{Si}-\text{O}-\text{H}$ связей и формирование локализованных $\text{OH}-$ или $\text{Si}-\text{O}-$ связей, обуславливающих донорный уровень $E_v + 0,48$ эВ, на который будет захватываться отрицательный заряд. Появление ионов кислорода со свободной связью или атомов кислорода, связанных с примесью, также приводит к введению донорных уровней.

В случае присутствия при облучении внешнего или встроенного электрического поля происходит разделение носителей, генерируемых облучением и накоплением их вблизи границ диэлектрика в соответствии со знаком поля. В случае SiO_2 электроны дрейфуют к положительному электроду и, как правило, удаляются из диэлектрика. Таким образом, заряд, накопленный в диэлектрике, компенсирует приложенное или встроенное электрическое поле.

Доля носителей, аннигилирующих после генерации электронно-дырочных пар, зависит от интенсивности облучения и величины встроенного поля. Увеличение интенсивности облучения усиливает аннигиляцию.

По мере набора дозы облучения величина заряда в диэлектрике выходит на насыщение. Величина насыщения для качественного термического окисла с низ-

кой концентрацией напряженных связей составляет примерно $(1-2) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, и это значение достигается при дозе электронов или гамма квантов $\sim 10^5$ рад.

Пространственное распределение накопленного заряда зависит от технологии получения диэлектрика. Для термического окисла основная часть ловушек локализована вблизи границ диэлектрического слоя на расстоянии 50–70 нм.

В результате были разработаны способы увеличения радиационной стойкости микросхем на основе МОП транзисторов, такие как использование тонких окислов и составных диэлектриков ($\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$) [66].

9.2.3.2. Образование быстрых поверхностных состояний

Экспериментально установлено, что при облучении на границе раздела кремний диэлектрик создаются новые поверхностные состояния. Образование быстрых поверхностных состояний объясняются искажения вольт-фарадных характеристик (появление плато или пика на переходной области высокочастотной характеристики). Быстрые поверхностные состояния образуются за счет обрыва Si–O–Si связей, в результате образуются ненасыщенные связи трехвалентного кремния и немостикового кислорода. Введение поверхностных состояний связано с формированием P_b дефектов, которые по данным разных авторов дают уровни на расстоянии 0,30–0,40 эВ от разрешенных зон или вблизи середины запрещенной зоны. Наличие водорода в окисле подавляет введение поверхностных состояний при облучении.

9.2.3.3. Влияние радиации на проводимость диэлектрических слоев

В случае, если энергия частицы или фотона больше высоты потенциального барьера на границе диэлектрика с полупроводником или электродом, фототок может возникнуть вследствие инжекции носителей заряда из одного из электродов. Если энергия ионизирующего излучения больше ширины запрещенной зоны диэлектрика, фототок возникает вследствие генерации электронно-дырочных пар внутри диэлектрика. В последнем случае величина фототока не зависит от полярности приложенного напряжения. Насыщение фототока при увеличении напряжения говорит о том, что все генерируемые носители доходят до электродов. Величина фототока определяется переносом носителей через диэлектрик. При относительно высоком напряжении на структуре облучение может приводить к пробое диэлектрика. В зависимости от вида облучения и типа диэлектрика проводимость диэлектрика может как увеличиваться, так и уменьшаться, что обычно соответствует введению разных по знаку зарядов. Поэтому при облучении структур с двухслойными диэлектриками, в которых при облучении накапливается заряд противоположных знаков, можно ожидать минимальных изменений вольт-амперных или C-V характеристик.

9.2.3.4. Отжиг облученных диэлектрических слоев

Восстановление радиационных повреждений наиболее интенсивно идет при температурах отжига 150–300 °С, и при повышении T до 400 °С, как правило, происходит полное восстановление электрических характеристик структур. Восстанов-

ление свойств при более низких температурах связывают с туннельной эмиссией, а при более высоких — с возбуждением электронов из зоны проводимости кремния на положительно заряженные центры в окисле. Термический отжиг при таких же температурах позволяет устранить лишь часть быстрых поверхностных состояний, тогда как остальная часть, вызванная с разрывом связей, отжигается при существенно более высоких температурах.

9.2.3.5. Иерархия времен радиационно-индуцированных процессов в структурах с диэлектриком

Вопросы оценки времен радиационно-индуцированных процессов в структурах с диэлектриком наиболее глубоко рассмотрены в работе [69], в которой были приведены следующие значения:

- 10^{-15} – 10^{-13} с — время термолизации горячих носителей;
- 10^{-13} – 10^{-11} с — время пролета электронов через слой SiO_2 толщиной 100 нм ($\mu_e \sim 20 \text{ см}^2/\text{Вс}$);
- 10^{-11} – 10^{-8} с — время генерационно-рекомбинационного равновесия;
- 10^{-6} – 10^{-3} с — время пролета дырок через слой SiO_2 толщиной 100 нм ($\mu_h \sim 10^{-7} \text{ см}^2/\text{Вс}$), установление стационарного распределения дырок;
- 10 – 10^4 с — время захвата дырок на локализованные состояния, образование объемного заряда;
- 10^1 – 10^4 с — время установления рекомбинационного равновесия между свободными электронами в зоне проводимости и захваченными дырками;
- 10^4 – 10^7 с — время выброса захваченных дырок с локализованных состояний.

9.2.3.6. Пути повышения стабильности структур с диэлектрическими слоями

Анализ физических процессов, протекающих в диэлектрических слоях двуокиси кремния на кремнии, позволил рекомендовать следующие методы повышения их стабильности при облучении слоями [70]:

- 1) использование слоев SiO_2 , полученных по сверхсухой технологии, в которых отсутствуют локализованные состояния для захвата носителей;
- 2) использование слоев SiO_2 , пассивированных тонкими слоями нитрида;
- 3) использование слоев нитрида и оксинитрида с высокими сечениями рекомбинации неравновесных носителей;
- 4) использование сверхтонких слоев диэлектрика, обеспечивающих стекание радиационного заряда;
- 5) использование двух- и трехслойных диэлектриков, причем с подложкой должен контактировать оптимизированный слой SiO_2 .

9.2.4. Радиационные процессы в скрытом диэлектрике структур кремний-на-изоляторе

Развитие технологии КНИ в значительной мере обусловлено тем существенным прогрессом, который достигается при переходе на КНИ с точки зрения радиационной стойкости электронных приборов. Известно, что при облучении приборов

и интегральных схем проблемы начинаются уже при дозах 10^3 – 10^4 рад [71, 72], когда наблюдается рост генерационных токов, уменьшение времени релаксации неравновесных носителей и др., приводящие к уменьшению обнаружительной способности МОП-фотоприемников и уменьшению эффективности переноса приборов с зарядовой связью. При дозах 10^4 – 10^5 рад имеет место рост объемного заряда в толстых пассивирующих окислах, что вызывает появление паразитных связей между ячейками интегральных схем. И только при дозах 10^5 и более рад сказывается накопление заряда в подзатворном диэлектрике. Расположение элементов схем на отдельных островках в структурах КНИ приводит к резкому уменьшению площадей p-n переходов и полной изоляции отдельных транзисторов друг от друга. Результат – проблемы при облучении приборов на КНИ возникают только начиная с доз 10^5 рад. Но теперь заряд при облучении будет вводиться не только в подзатворном окисле, но и в первую очередь в скрытом диэлектрике структур КНИ. Это делает особо актуальным исследование и оптимизацию радиационных свойств структур КНИ, которые определяются активными центрами на гетерогранице и ловушками в скрытом диэлектрике. Параметры скрытого диэлектрика во многом определяют радиационную стойкость приборов, изготовленных в структурах КНИ, так как накопление положительного заряда в окисле приводит к формированию n-канала в отсеченном слое кремния, возрастанию тока утечки и сдвигу порогового напряжения в p-p-n транзисторах.

В структурах КНИ благодаря малой толщине рабочего слоя кремния и отсечению его диэлектриком от радиационных дефектов, генерируемых в подложке, наиболее важными с точки зрения изменения свойств КНИ при облучении являются введение заряда в скрытый диэлектрик и генерация состояний на границе с окислом [67]. Заряд в скрытом диэлектрике и состояния на границе отсеченный слой кремния/диэлектрик являются основными параметрами пластин КНИ, непосредственно влияющими на работу приборов, создаваемых в отсеченном слое кремния.

Наиболее подробно влияние радиации на КНИ исследовано для структур SIMOX, создаваемых имплантацией кислорода [68]. Так, в частности, при облучении SIMOX наблюдаются следующие особенности, зависящие от технологии их создания:

- 1) в структурах, имеющих более совершенный скрытый диэлектрик (т.е. подвергнутых более длительному отжигу или отжигу при более высокой температуре), накапливается меньший заряд;
- 2) в окисле формируются как дырочные, так и электронные ловушки, и соответственно, накапливаются и положительный, и отрицательный заряды, приводя к частичной взаимной компенсации [69];
- 3) плотность поверхностных состояний в случае SIMOX структур, созданных многократной имплантацией кислорода, практически не меняется при облучении, тогда как в SIMOX, созданных однократной имплантацией, имеет место генерация дополнительных состояний [70, 71].

Из КНИ структур, полученных с использованием технологии сращивания пластин кремния, в литературе имеются в основном данные по влиянию облучения на BESOI [72], в которых уменьшение толщины одной из сращенных плас-

тин кремния осуществляется путем травления. Поведение BESOI структур при облучении схоже с поведением МОП структур с термически выращенным окислом. В скрытом окисле BESOI накапливается, как правило, положительный заряд. В BESOI проявляется водород, вводимый за счет гидрофилизации поверхности при процедуре сращивания. Он считается ответственным за изменение электрофизических характеристик скрытого окисла [73, 74].

Данные по влиянию облучения на КНИ, полученные с использованием технологии сращивания пластин кремния с последующим отслаиванием тонкой пленки от одной из них за счет имплантации водорода (метод Smart-Cut), в литературе практически отсутствуют.

Процессы генерации носителей заряда и их захват в окисле исследовались в скрытом диэлектрике структур кремний-на-изоляторе, полученных при помощи технологии SIMOX и Smart-Cut [75–81]. В скрытом диэлектрике структур КНИ после выдержки под напряжением наблюдалось (аналогично как и в МОП) накопление как положительного, так и отрицательного заряда, который оставался неизменным по прошествии времени и отжигается при температурах 200–400 °С [81]. Ловушкам в окислах, которые перезаряжаются во время инжекции носителей заряда, посвящено большое количество работ [79, 82]. В качестве примера для структур SIMOX можно перечислить следующие электронные ловушки: парамагнитные E'-центры, связанные с избыточным кремнием в оксидной матрице; сечение захвата $\sigma = 10^{-14}$ см²; ловушки, возникшие в результате загрязнения во время имплантации кислорода, $\sigma = 10^{-16}$ см²; ловушки, связанные с водой (обычно присутствующие в термических окислах), $\sigma = 10^{-17}$ см² [82]. Именно с наличием ловушек и связывают накопление заряда в скрытом диэлектрике.

Из полученных результатов видно, что в сравнении с теми же термическими окислами, что использовались для изготовления КНИ структур, произошла некоторая деградация свойств окислов в процессе изготовления КНИ, приводящая к более высоким величинам вводимого при облучении заряда. Свойства окислов после процедуры сращивания изменяются — происходит генерация поверхностных состояний и захват заряда в окисле во время инжекции электронов или дырок в слой SiO₂. Предположительно это вызвано встраиванием водорода в структуру термического окисла [76]: водород взаимодействует с O₃Si–SiO₃ связью и образует O₃Si–H, эта группа диссоциирует при облучении на O₃Si– (E'-центр) и H, последний благодаря высокой подвижности диффундирует с образованием H₂, в результате чего вероятность рекомбинации невелика. Авторами работы [77] показано, что при сращивании гидрофилизированных поверхностей концентрация водородных связей составляет ~ 10¹⁵ см⁻². При использовании метода водородного расслоения концентрация водорода, присутствующего в структуре КНИ в процессе изготовления, более чем на порядок выше, чем в BESOI [63]. Поэтому, обогащение окисла водородом во время сращивания и последующего отжига предполагается ответственным за деградацию термического окисла в структурах КНИ. Более высокая концентрация ловушек, генерируемых на границе с подложкой, которая отмечалась выше, может быть связана с более высокой концентрацией напряженных связей в переходном слое SiO_x по сравнению с границей сращивания, где переходной слой отсутствует [79].

9.2.5. Сравнение радиационных свойств КНИ структур, полученных разными способами

На рис. 9.10. и 9.11 приведены для сравнения данные по накоплению заряда в структурах UNIBOND, как наиболее близких с точки зрения технологии их изготовления и, соответственно, их свойств к структурам КНИ, разработанным в ИФП СО РАН (Dele-Cut), а также для SIMOX. Для пластин UNIBOND и SIMOX данные по накоплению заряда были получены из измерений на приборных структурах [80–85]. Из имеющихся данных для российских КНИ, на рис. 9.10 приведены кривые с максимальным зарядом, введенным облучением на границе между отсеченным слоем кремния и окислом (структура p-Si/SiO₂/n-Si) с минимальным зарядом (n-Si/SiO₂/p-Si), и промежуточный вариант (n-Si/SiO₂/n-Si). Видно, что структуры КНИ, создаваемые по технологии, разработанной в ИФП СО РАН (Dele-Cut), обладают более высокой радиационной стойкостью по сравнению с UNIBOND. Причем использование структур КНИ с p⁺(p)-подложкой должно приводить к созданию наиболее стойких приборов.

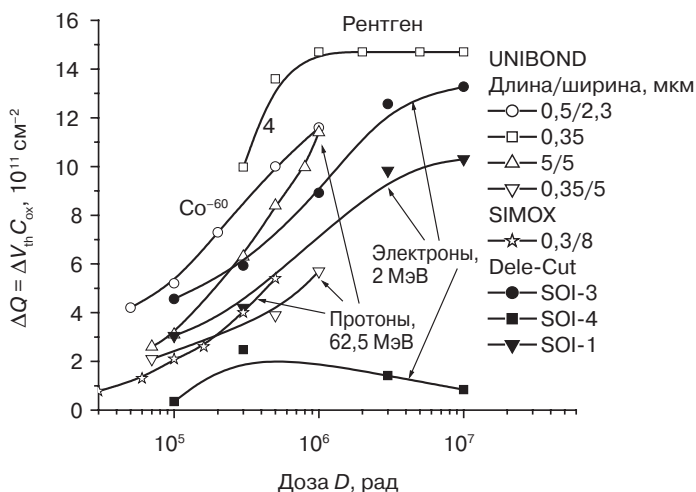


Рис. 9.10. Накопление заряда в приборных структурах, созданных на КНИ UNIBOND, SIMOX и Dele-Cut

В структурах SIMOX при приложении электрического поля накапливается положительный заряд, в структурах UNIBOND и положительный и отрицательный, частично компенсируя друг друга. В российских КНИ заряд в поле не возрастает. Этот момент является основным для радиационной стойкости материала. Отсутствие эффекта накопления положительного заряда в окисле обусловлено тем, что ловушки, присутствующие в исходном термическом окисле, были полностью пассивированы водородом в процессе изготовления КНИ структур. В частности, атом кремния с ненасыщенной связью, действующий как ловушка для дырок при повышенной температуре, взаимодействует с водородом, $\equiv\text{Si} + \text{H} \rightarrow \text{SiH}$, в результате чего ловушка исчезает.

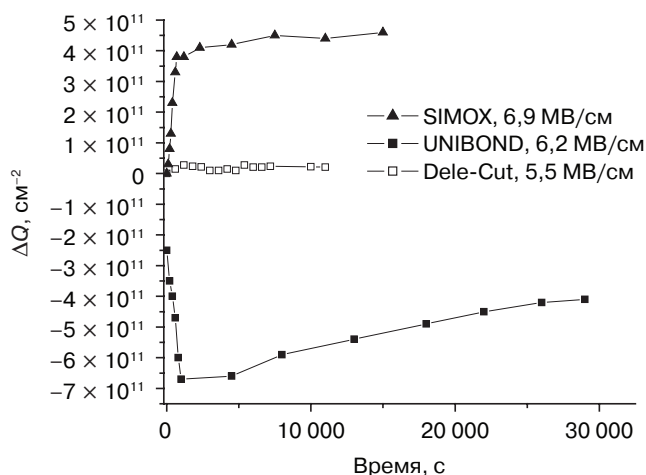


Рис. 9.11. Накопление заряда в разных структурах КНИ при инъекции электронов. Величина напряженности электрического поля приведена на вставке рисунка. Данные для SIMOX и UNIBOND взяты из [84]

В структурах UNIBOND, несмотря на близкий технологический процесс создания, имеет место облучение будущего скрытого диэлектрика водородом. В результате этого свойства окислов в структурах UNIBOND и КНИ, создаваемые по технологии, разработанной в ИФП СО РАН, существенно различаются. В случае российских КНИ отсутствие ловушек в исходных структурах существенно меняет кинетику накопления заряда в окисле в процессе его облучения. Так, если в исходном термическом окисле кривая накопления заряда выходит на насыщение уже при 10^5 рад, то в скрытом диэлектрике КНИ структур насыщение наблюдается при $3 \cdot 10^6$ рад. Более медленная кинетика накопления заряда обусловлена тем, что сначала необходимо восстановить ловушки для дырок в окисле, разорвав связи Si–H и только затем происходит захват дырки на ловушки. Как следует из рис. 9.11, кинетика накопления заряда в UNIBOND КНИ представляет собой промежуточный случай между обычным термическим окислом и скрытым диэлектриком КНИ, созданных в ИФП СО РАН.

9.3. Физические явления в МОП/КНИ транзисторах в условиях воздействия ИИ

Полевые МОП/КНИ транзисторы имеют ряд специфических свойств, которые позволяют им работать в жестких внешних условиях, где большинство устройств на объемном кремнии, как правило, работают неудовлетворительно. Эти свойства МОП/КНИ транзисторов обусловлены малым объемом кремния, в котором транзисторы сделаны, малой площадью областей переходов исток–карман и сток–карман и наличием обратного затвора (подложки). В настоящем разделе рассмотрено поведение полевых МОП/КНИ транзисторов, подвергнутых воздействию ионизирующего излучения.

9.3.1. Ионизирующее излучение

Один из главных специализированных рынков, где КНИ схемы и устройства широко используются, — космический и военный рынок. Здесь КНИ приборы показывают высокую устойчивость против эффектов нестационарного облучения. Эффект облучения в электронных устройствах зависит от типа облучения (нейтроны, тяжелые частицы, электромагнитное излучение и т.д.), которому устройство подвержено. В отличие от биполярных устройств, МОП приборы относительно нечувствительны к нейтронному излучению (нейтроны ответственны за уменьшение времени жизни носителей, вызывают смещение атомов в пределах кристаллической решетки). Так как работа МОП прибора основана на основных носителях, то уменьшение времени жизни не затрагивает его электронные свойства. МОП структуры, однако, чувствительны к единичным сбоям (single-event upset — SEU), к эффекту единичной защелки (single-event latchup — SEL), к эффекту единичного выгорания (single-event burnout — SEB), к эффектам импульсного облучения и полной поглощенной дозы. Эффекты, создаваемые в большинстве кремниевых МОП приборов воздействием излучения, хорошо описаны в литературе [86, 87]. В табл. 9.3 приведены основные эффекты, производимые различными типами ионизирующего излучения в полупроводниковых устройствах [88, 89]. В следующих подразделах будет дано сравнение устойчивости КНИ приборов и МОП устройств на объемном кремнии к эффектам единичных сбоев, импульсного воздействия и полной поглощенной дозы.

Таблица 9.3. Типы ионизирующих излучений и их воздействие на полупроводниковые приборы

Частица	Физический эффект	Электрический результат	Окружающая среда
Фотон	Образование заряда в окисле	Смещение порогового напряжения	Космос, радиация
	Фототок (большие дозы)	Включение устройства	Ядерная бомба
	Образование поверхностных состояний	Ухудшение подвижности и снижение подпорогового напряжения	Космос, радиация
Тяжелый ион	Образование электронно-дырочных пар	Единичные сбои	Космос
Нейтрон	Смещение атома	Ухудшение β_F	Радиация
	Отскок атома	Единичные сбои	Авиаэлектроника
Протон	Отскок атома	Единичные сбои	Космос
	Ядерное взаимодействие	Единичные сбои	Солнечные вспышки
	Образование заряда в окисле	Смещение порогового напряжения	Радиационные пояса Земли
	Смещение атома	Ухудшение β_F	
Электрон	Создание заряда окиси	Смещение порогового напряжения	Космос
	Смещение атома	Ухудшение β_F	Радиационные пояса Земли

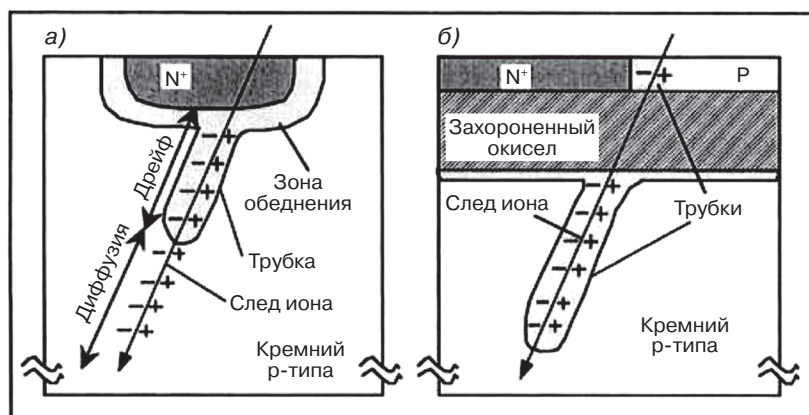


Рис. 9.12. Удар иона: обычный p-n переход в объемном кремнии (а); p-n переход в КНИ структуре (б)

9.3.1.1. Единичные сбои

Единичные сбои (single-event upset – SEU) вызываются проникновением сильнодействующей частицы, типа альфа-частицы или тяжелого иона (космический луч) внутрь устройства. Действительно, когда такая частица проникает в обратно-смещенный p-n переход и его обедненный слой и толщу кремния под ним, возникает плазменный след по пути следования частицы, где генерируются электронно-дырочные пары [90]. Присутствие этого следа, как показано на рис. 9.12, временно разрушает обедненный слой и искажает его около следа. Искажение обедненного слоя называют «трубкой».

Трубка расширяет обедненную зону по пути следования частицы так, что электроны, созданные в трубке, дрейфуют к переходу. Дырки двигаются к заземленной подложке, создавая ток подложки. Собранные электроны вызывают увеличение в переходном процессе тока, что может нарушить логическое состояние узла. Продолжительность собирания электронов узлом составляет порядка доли наносекунды. Дрейфовый ток, созданный в этом процессе, называют быстрой (мгновенной) компонентой тока. Длина следа в кремнии обычно составляет порядка десяти микрометров. Впоследствии свободные электроны, появившиеся по следу частицы под трубкой могут диффундировать в обедненную область, где они создают второй ток (диффузионный ток), названный медленной компонентой тока. Этот ток является меньшим по величине по сравнению с быстрым током, но он действует намного дольше (до сотен наносекунд или микросекунд) [91]. Многократные сбои состояния памяти (MBU) иногда наблюдаются в результате проникновения тяжелого иона в интегральную схему [92, 93]. В устройстве КНИ проникающая частица также ионизирует кремний по своему следу. Однако из-за наличия захороненного внутреннего слоя изолятора между активной кремниевой пленкой и подложкой заряды, созданные в подложке, не могут быть собраны переходами устройств КНИ. Собранные могут быть только те электроны, которые сгенерированы в пределах тонкой кремниевой пленки, толщина которой обычно 80–150 нм в радиационно-стойких устройствах. Отношение длин следов, вдоль

которых собираются электроны, дает приближение первого порядка преимуществ КНИ по отношению к остальным приборам на объемном кремнии в единицах SEU устойчивости (например: $10 \text{ мкм}/100 \text{ нм} = 100$ в случае устройств КНИ с пленкой кремния толщиной 100 нм).

Энергия, переданная частицей по следу, выражается в единицах линейной передачи энергии (LET). Это определено следующим отношением:

$$LET = \frac{1}{m_v} \frac{dW}{dx}, \quad (9.1)$$

где x – линейное расстояние вдоль следа частицы, dW – энергия, потерянная частицей и поглощенная кремнием, m_v – объемная масса (плотность) кремния. LET обычно выражается в $\text{МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$.

Число электронов или дырок, созданных при единичном сбое, задается:

$$\frac{dN}{dx} = \frac{dP}{dx} = \frac{m_v}{w} LET, \quad (9.2)$$

где w – энергия, необходимая для создания пары электрон-дырка [94].

Например, ион углерода с энергией 1 ГэВ ($LET \cong 0,24 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$) производит $1,5 \cdot 10^4$ электронно-дырочных пар на толщине 1 мкм в кремнии. В обычном кремниевом устройстве он производит $1,5 \cdot 10^5$ электронно-дырочных пар ($\cong 0,3 \text{ пКл}$) на 10 мкм следа. Если электроны мигрируют к узлу в пределах отрезка времени $10\text{--}100$ пикосекунд, создается единичный SEU выброс тока $1\text{--}10 \text{ мА}$. Из-за уменьшенной длины следа, вдоль которого генерируются электроны в КНИ, SEU выброс тока будет значительно меньшим в устройстве КНИ, чем в обычном устройстве. Облучение обычных и КНИ диодов $0,15 \text{ мкм}$ толщины 11 МэВ ионами фтора систематически показывает накопление заряда в устройствах КНИ в $10\text{--}20$ раз меньшего, чем в их объемных аналогах [10]. Величина воздействия SEU на схему измерена в поперечном сечении нарушения (единицы: $\text{см}^2/\text{бит}$). Поперечное сечение области нарушения показывает область, чувствительную к SEU, на бит. Например, в чипе памяти он показывает область переходов в пределах отдельной ячейки памяти, которая может быть испорчена SEU механизмом. Чем меньше это поперечное сечение, тем меньше устройство чувствительно к облучению частицами. Легкие частицы типа протонов, электронов и нейтронов имеют LET, которая обычно слишком низка, чтобы ионизировать кремний. LET ниже $1 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2\text{мг}^{-1}$ генерирует заряд, который является слишком маленьким, чтобы существенно воздействовать на устройство (приблизительно $0,01 \text{ пКл}/\text{мкм}$). Но эти частицы вызывают отдачу (отскок) атома кремния через механизм прямого удара или вызывают ядерные реакции, которые производят ядерные фрагменты высоких энергий. Эти атомы отдачи или фрагменты ядра могут, в свою очередь, действовать как тяжелые ионы и вызывать SEU. Таким образом, частицы типа протонов обычно вызывают единичные сбои не через прямую ионизацию (их LET слишком низка), а скорее через ядерные реакции, заканчивающиеся отдачами, которые ведут к косвенно произведенному сбою [96]. Поперечные сечения единичных сбоев нескольких обычных и КНИ схем представлены на рис. 9.13.

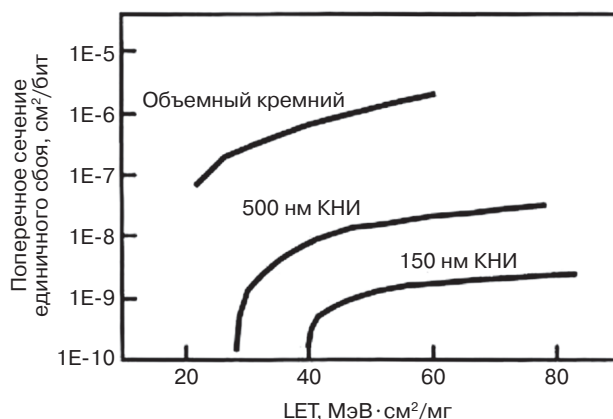


Рис. 9.13. Поперечные сечение единичных сбоя SEU для обычных БИС на объемном кремнии и КНИ схем

Можно видеть, что 150 нм устройства КНИ приблизительно в 10 раз менее чувствительны, чем более толстые (500 нм) устройства, которые являются, в свою очередь, приблизительно в 100 раз более стойкими, чем обычные устройства КМОП на объемном кремнии. SEU требуют минимальной величины LET, чтобы произойти, названной порогом LET. Этот порог зависит и от расположения схемы, и от технологии, используемой для производства устройства. Например, пороговый LET для 500 нм и 150 нм устройств на рис. 9.13 — приблизительно 30 и 40 МэВ·см²/мг, соответственно [97, 98].

Возникновение трека в подложке под внутренним окислом структуры КНИ может также влиять на характеристики устройств. Действительно, если смещение обратного затвора (back-gate) является таким, что подложка под внутренним окислом обеднена, то электроны, образовавшиеся вдоль трека, будут двигаться вверх к внутреннему окисному интерфейсу. Эти электроны немедленно вызывают положительный зеркальный заряд в верхнем кремниевом слое. В результате электроны инжектируются в устройство внешней схемой, чтобы восстановить равновесие, и происходит возникновение переходного тока. Этот эффект не наблюдается, если поверхность подложки под внутренним окислом инвертирована или находится в состоянии обогащения [99].

Фототок (или ионоток), созданный воздействием частицы в МОП КНИ, может быть усилен паразитным боковым (латеральным) биполярным транзистором, присутствующим в приборе. Действительно, дырочный ток I_B , созданный в пределах тела МОП КНИ транзистора, действует как ток базы для паразитного бокового (латерального) n-p-n биполярного транзистора (случай n-канального устройства). В ответ на импульс тока базы, вызванный частицей, возникает ток коллектора $I_C = \beta_F I_B$. Этот ток добавляется к импульсу тока, вызванному SEU-индуцированными электронами, собранными стоком так, что импульс тока стока фактически становится равным $(1 + \beta_F) I_{SEU}$, где I_{SEU} — электронный ток, первоначально вызванный частицей (в n-канальном устройстве). Поэтому присутствие любого биполярного транзистора, даже с низким коэффициентом усиления ($\beta_F < 1$),

увеличивает переходный поток, вызванный SEU [100]. Эта проблема увеличивается в транзисторах с коротким каналом, где β_F велико. В этом случае биполярное усиление может быть достаточно большим, чтобы делать транзисторы КНИ более чувствительными к SEU, чем обычные устройства [101]. Решения этой проблемы – использование гальванической связи внутри области кармана, через которую часть тока базы может шунтироваться, и/или уменьшение времени жизни неосновных носителей в кремниевой пленке с помощью методов снижения времени жизни [102]. Хотя гальванические связи в области карманов уменьшают паразитный биполярный эффект, они не могут полностью устранить его. Способность гальванической связи карманов подавить биполярный эффект сильно зависит от местоположения путей связи карманов относительно удара иона. Чем дальше ион ударяет от путей связи карманов, тем больше усиление паразитного биполярного транзистора, и поэтому гальваническая связь кармана менее эффективна [103]. Схемно-технологические способы подавления единичных сбоев включают увеличение RC константы времени различных узлов схемы, но эта техника имеет недостаток, связанный с уменьшением быстродействия транзисторов [104]. Полностью обедненные транзисторы являются более стойкими к SEU, чем частично обедненные транзисторы, потому что биполярное усиление является намного меньшим в полностью обедненных транзисторах [105].

9.3.1.2. Единичная защелка

Единичная защелка (single event latchup – SEL) может быть вызвана ударом тяжелого иона в обычную КМОП интегральную схему, где существует паразитная n-p-n-p структура. SEL вызван избыточным током в базе паразитного n-p-n или p-n-p транзистора после удара тяжелого иона. Из-за регенеративного цикла обратной связи, который существует между этими двумя транзисторами, защелка может произойти в пределах наносекунд и причинить разрушительное выгорание в пределах сотен микросекунд. Пороговое (сдерживающее) напряжение для единичной защелки находится обычно на уровне 1 В. Таким образом, пока напряжение электропитания не снято, низкоомная структура проводимости от электропитания к земле будет сохраняться [106, 107]. SEL может вызвать постоянное повреждение (тяжелая ошибка) в интегральной схеме. В устройствах КМОП КНИ нет никакой структуры p-n-p-n, которая может защелкнуться. Поэтому, SEL не существует в схемах КНИ.

9.3.1.3. Единичное выгорание

Единичное выгорание (single-event burnout – SEB) может произойти в мощном биполярном или мощном МОП устройстве. Мощное МОП устройство содержат паразитную биполярную транзисторную структуру [108]. Если тяжелый ион ударяет в биполярный транзистор, сгенерированный заряд заставит ток течь в базу и поднимет потенциал перехода эмиттер–база. Если текущий ток достаточно высок, он может сместить переход эмиттер–база в прямом направлении, и биполярный транзистор включится. После того как паразитный биполярный транзистор включен, вторичный пробой биполярного транзистора может произойти. Этот

пробой может быть вызван лавинным током [109–111]. В зависимости от плотности тока ток, вызванный в паразитном транзисторе тяжелым ионом, или спадает без деградации устройства, или регенеративно увеличивается до (в отсутствие ограничивающих ток элементов) разрушения устройства. Показано, что протоны также вызывают SEB [112]. Нет никакого основного различия между обычными и толстыми КНИ мощными устройствами с точки зрения SEB.

9.3.1.4. Единичный пробой затвора

Единичный пробой затвора (SEGR) может произойти, если тяжелый ион проходит через диэлектрик затвора [113–115]. Это происходит только в высоких электрических полях типа тех, которые присутствуют в течение операции записи или очистки в энергонезависимой EEPROM ячейке или в мощном МОП транзисторе. Это вызвано объединением приложенного электрического поля и энергии, переданной частицей. Поскольку ион проходит через подзатворный окисел, то он формирует высокопроводящую плазменную дорожку между кремнием и затвором. Если энергия достаточно высока, это может вызвать локальный разогрев диэлектрика и потенциально состояние быстрого нагрева. Если это происходит, диэлектрик может локально плавиться или испаряться. Наиболее вероятно, что нет никакого основного различия между обычными и толстыми мощными КНИ устройствами с точки зрения SEGR.

9.3.1.5. Единичное восстановление (однотранзисторная защелка)

Единичное восстановление (Single Event SnapBack – SES) может произойти в частично обедненных транзисторах КНИ и быть увеличена биполярным эффектом. Во включенном n-канальном транзисторе энергия, переданная частицей, может создать достаточно свободных дырок, чтобы увеличить ток прямого смещения перехода исток–карман, и достаточно электронов, чтобы увеличить ток стока. Эти условия увеличивают механизмы воздействия ионизации, которые могут привести к внезапному улучшению проводимости (называемому однотранзисторной защелкой – single transistor latchup). Этот эффект был предсказан для полностью обедненных устройств [116–122], но в них еще не наблюдался.

9.3.2. Эффекты полной дозы

Эффекты полной дозы вызваны совокупным воздействием ионизирующего излучения (рентгеновские или гамма лучи) на диэлектрики типа двуокиси кремния. Единица дозы в системе СГС – рад(Si) или рад(SiO₂), которая определяется попаданием 100 эрг излучаемой энергии в грамм кремния (Si) или двуокиси кремния (SiO₂), соответственно. 1 рад(SiO₂) = 0,56 рад(Si). В международной системе СИ единица дозы называется «грей» (Гр). Один грей определен как поглощение 1 Дж излучаемой энергии килограммом вещества. Эквивалентность между этими двумя единицами является прямой: 1 Гр = 100 рад. Число сгенерированных пар электрон–дырка связано с энергией dW , поглощенной единичным объемом dv материала:

$$\frac{dN}{dv} = \frac{dP}{dv} = \frac{1}{w} \frac{dW}{dv}, \quad (9.3)$$

где w — эффективная энергия, необходимая, чтобы сгенерировать пару электрон-дырка в SiO_2 ($w = 17$ эВ).

Отношения между дозой, D , и числом сгенерированных пар определяется [118]:

$$\frac{dN}{dv} = \frac{dP}{dv} = \frac{m_v}{w} D. \quad (9.4)$$

Вообще считается, что 1 рад(Si) генерирует $4 \cdot 10^{13}$ пары электрон-дырка в 1 см^3 в кремнии и $7,6 \cdot 10^{12}$ пары в 1 см^3 в SiO_2 . Чтобы получить представление относительно величины уровней излучения, которым устройства могут быть подвержены, можно упомянуть следующие числа: медицинское или зубное рентгеновское излучение соответствует менее чем 0,1 рад(Si). Человек становится больным, будучи подвергнутым 100 рад(Si) и моментально впадает в кому, если подвергается облучению в 10 крад(Si). В течение времени действия спутники, находящиеся на орбите Земли, получают полные дозы, располагающиеся между 10 крад(Si) и 1 Мрад(Si) в зависимости от параметров орбиты. Межпланетные космические корабли и некоторая электроника в ядерных реакторах могут быть подвергнуты дозам свыше 10 Мрад(Si) [35]. Некоторые КНИ БИС были испытаны дозами до 500 Мрад(Si) [120, 121].

Главный эффект, вызванный полной дозой в устройствах МОП, — генерация зарядов в окислах и генерация поверхностных состояний на границе раздела Si/SiO₂. Если скорость поглощения энергии высока, достаточное количество пар электрон-дырка может быть создано в кремнии, что приведет к фототокам. Этот случай, где dD/dt высок, будет кратко рассмотрен в следующем подразделе. Ионизирующее электромагнитное излучение типа рентгеновских и гамма лучей (излучаемых, например, источником ⁶⁰Co) создает пары электрон-дырка в диоксиде кремния. Электроны довольно подвижны в SiO₂ даже при комнатной температуре и могут быстро двигаться из оксида к положительно смещенному электроду затвора в случае подзатворного диэлектрика или к подложке или пленке кремния в случае изолирующего оксида КНИ структур. Дырки, с другой стороны, остаются заключенными в пределах окиси и вносят вклад в создание положительного заряда Q_{ox} . Заряд в окисле Q_{ox} пропорционален толщине оксида t_{ox} , и результирующий сдвиг порогового напряжения, таким образом, пропорционален t_{ox}^2 , так как $\Delta V_{th} = -\frac{Q_{ox} t_{ox}}{\epsilon_{ox}}$, соотношение между смещением порогового напряжения и дозой может быть записано так:

$$\Delta V_{th} = -\alpha \frac{qm_v}{w\epsilon_{ox}} t_{ox}^2 D, \quad (9.5)$$

где w — эффективная энергия, необходимая для создания пары в окиси (17 эВ); m_v — объемная масса (плотность) окиси и где параметр α вводится из расчета, что только часть зарядов будет заключена пределах окиси.

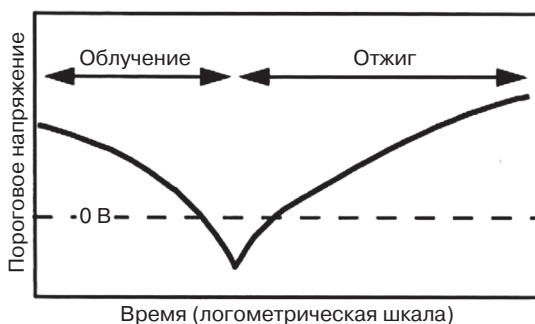


Рис. 9.14. Эффект отдачи в n-канальном МОП транзисторе, подвергшемся воздействию дозы излучения. Нормализация наблюдается после прекращения облучения

Коэффициент α технологически зависимый параметр. Типичные значения $\alpha = 0,15$ для нормальных оксидов и $0,05$ или меньше для специальных стойких оксидов. Физика облучения устройств, к сожалению, намного более сложна, чем то, что приведено в нескольких уравнениях выше. Доза облучения также создает поверхностные состояния на границе Si–SiO₂. В противоположность окисным зарядам, которые являются всегда положительными (которые уменьшают пороговое напряжение в n-канальных устройствах), поверхностные состояния задерживают электроны в n-канальном устройстве, которые увеличивает пороговое напряжение. Другой тип ловушек, названный граничными ловушками, расположенный в окиси очень близко к кремниевой/окисной поверхности, может задержать электроны также [122]. Некоторые окисные заряды отжигаются со временем и даже вносят вклад в создание дополнительных поверхностных ловушек. Это создает эффект, который называют эффектом отдачи, и он показан на рис. 9.14 [123, 124].

Эффект отдачи, конечно, является температурно-зависимым. Эффект отдачи может также быть замечен, если доза облучения увеличивается без прерывания выше данного значения (обычно приблизительно 1 Мрад(Si)). В этом случае генерация окисных зарядов насыщается, в то время как создание поверхностных состояний — нет. В результате отдача наблюдается в n-канальных устройствах, когда доза увеличена [125]. Величина дозы, которой облучается устройство, также важна. При низких дозах окисные заряды имеют время, чтобы мигрировать на поверхность кремний/окись и преобразоваться в поверхностные состояния. В результате эффект отдачи может наблюдаться при более низких дозах. Это создает различие в реакции на облучение между устройствами, используемыми в поле (например, в космическом корабле, низкие дозы), и в условиях лаборатории (более высокие дозы).

Вызванные дозой эффекты сильно зависят от прямого и обратного смещения затвора (front- and back-gate) транзистора. В худшем случае условия соответствуют положительному смещению затвора (которое толкает дырки в окись к границе Si–SiO₂). В p-канальных транзисторах генерация положительных зарядов и поверхностных состояний вызывает увеличение абсолютной величины порогового напряжения, т.е. оно становится более отрицательным.

МОП КНИ транзисторы с многими границами Si–SiO₂ (подзатворный окисел, изолирующий окисел и полевой окисел) являются весьма чувствительными к воздействию полной дозы, если не используются специальные методы повышения их стойкости. В то время как методы повышения стойкости подзатворного оксида КНИ подобны тем, которые применяются в обычных устройствах (например: низко-температурный окисный рост), методы для предотвращения задней и краевой утечки является специфическими для КНИ. Классическое решение для избегания формирования инверсного слоя у основания кремниевой пленки в n-канальных устройствах состоит в том, чтобы увеличить пороговое напряжение нижнего транзистора посредством внедрения примеси бора. В некоторых случаях может использоваться обратозатворное смещение, чтобы скомпенсировать индуцированную излучением генерацию положительных зарядов во внутренний окисел. Создание максимума легирования бором на обратной поверхности подразумевает использование частично обедненных устройств. Действительно, полностью обедненные устройства обычно слишком тонки, чтобы позволить такое внедрение. Кроме того, присутствие зарядов во внутреннем окисле вызывает смещение прямого порогового напряжения и ухудшает работу устройств, если передняя и задняя поверхности электрически соединены, как в полностью обедненных устройствах. Сообщается, что частично обедненные КНИ схемы, сделанные на кремниевой пленке толщиной 150 нм, способны выдерживать дозы до 300 Мрад(Si) [126].

Управление токами краевой утечки в n-канальных устройствах также представляет проблему, так как паразитные краевые транзисторы могут быть весьма чувствительны к облучению из-за относительно толстых полевых оксидов. В частности, LOCOS или окисленная меза-изоляция в контакте с гранями кремниевых активных областей чувствительны к облучению. Пример индуцированного излучением тока краевой утечки представлен на рис. 9.15 [127]. Проблемы краевой утечки могут быть устранены посредством оптимизации легирования боковых стенок и полевых окисных процессов роста [128], или с помощью бескраевого устройства, или транзисторов, где p⁺ диффузия прерывает дорожки краевой утечки между n⁺ истоком и диффузией стока. Обычно нет никакой проблемы краевой утечки в r-канальных устройствах.

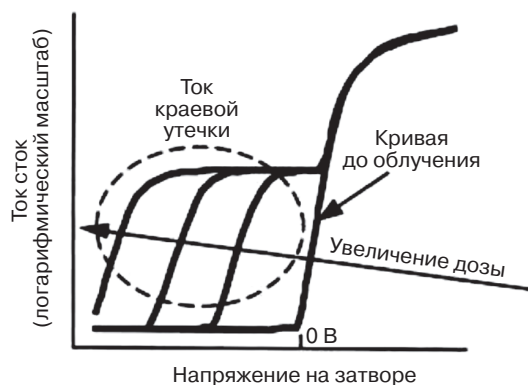


Рис. 9.15. Ток краевой утечки, вызванный облучением

Положительные заряды, сгенерированные высокими уровнями облучения (> 500 крад(SiO_2)) в скрытом окисле полностью обедненных n-канальных МОП КНИ транзисторов, могут инвертировать поверхность нижнего канала, вызывая рост тока утечки, даже если приложено отрицательное напряжение верхнего затвора. Этот ток утечки может быть усилен воздействием ионизации в переходе стока, что ведет к защелке полной дозы [129, 130].

9.3.3. Эффекты импульсного облучения

Эффекты мощности дозы (импульсное облучение) имеют место, когда большая доза электромагнитной энергии (рентгеновские и гамма лучи) поглощается за короткий временной интервал при событиях типа ядерных взрывов. Эффекты мощности дозы упоминаются также часто как эффекты гамма-импульсов. Единица величины дозы — рад(Si) c^{-1} , с одним рад(Si) генерируется приблизительно $4 \cdot 10^{13}$ пар в 1 см^3 в кремнии. Если величина дозы высока, существенное число электронно-дырочных пар может быть сгенерировано в кремнии. Разделение этих пар в пределах зон обеднения устройства вызывает рост фототока. Задержанная диффузионная компонента тока также наблюдается. Продолжительность задержанной компоненты зависит от скорости рекомбинации фотосгенерированных носителей и от других явлений типа генерации носителей воздействием ионизации около обратносмещенного перехода стока. Пример быстрых и задержанных компонент тока показан на рис. 9.16 [131].

Сгенерированный фототок выражается формулой:

$$I_{ph} = q \cdot V_{depl} \cdot g \cdot D'(t), \quad (9.6)$$

где q — заряд электрона; V_{depl} — объем зоны обеднения, где происходит накопление заряда (также называется чувствительным объемом); g — константа генерации носителей в кремнии, которая равна $4,2 \cdot 10^{13}$ электронно-дырочных пар на см^{-3} рад(Si) c^{-1} [132].

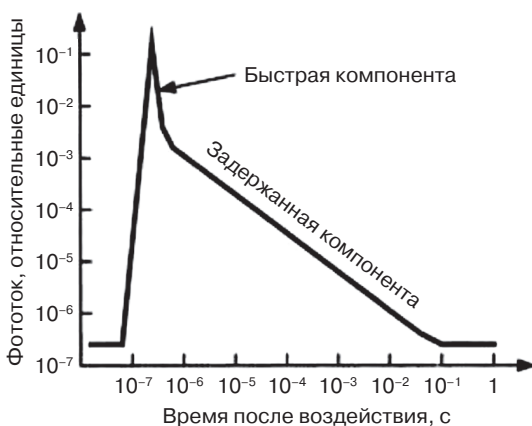


Рис. 9.16. Быстрая и задержанная компоненты тока во времени после импульсного облучения

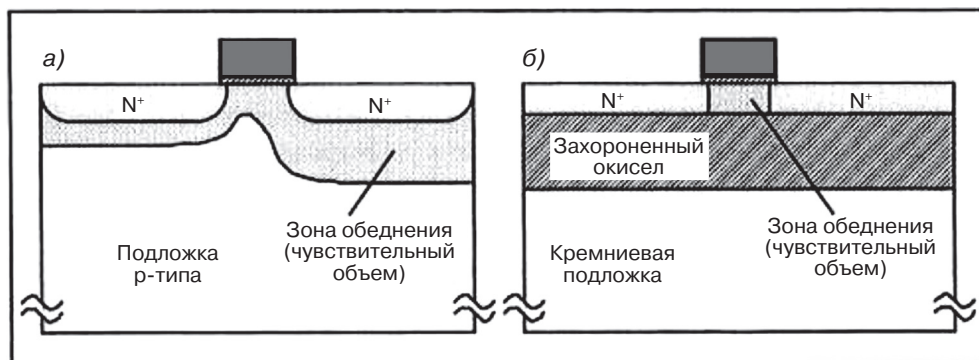


Рис. 9.17. Размер зоны обеднения в обычном МОП (а) и МОП КНИ (б) транзисторе

В самых худших случаях все транзисторы заливаются свободными носителями и становятся настолько проводящими, что шина напряжения питания является фактически соединенной с землей и напряжение питания сильно падает. Главное различие между обычными устройствами и устройствами КНИ выражается в намного меньшем чувствительном объеме V_{depl} , найденном в устройствах КНИ, как показано на рис. 9.17. В результате индуцированный дозой фототок значительно меньше в транзисторах КНИ, чем в обычных устройствах.

Как в случае единичного сбоя (SEU), фототок, сгенерированный в МОП КНИ, может быть усилен паразитным боковым биполярным транзистором, присутствующим в устройстве. Действительно, дырочный ток, произведенный в пределах тела МОП КНИ транзистора действует как ток базы для паразитного бокового NPN биполярного транзистора, (случай n-канального устройства). В ответ на импульс тока базы I_B , вызванный частицей, вырабатывается ток коллектора $I_C = \beta_F I_B$, и уравнение (9.6) приобретает вид:

$$I_{ph} = q \cdot V_{depl} \cdot g \cdot (I + \beta_F) D'(t) \quad (9.7)$$

Ток биполярного усиления добавляется к фототоку, вызванному случаем гамма импульса. Поэтому присутствие любого биполярного действия транзистора даже с низким усилением ($\beta_F < 1$) добавляется к переходному току, произведенному гамма импульсом. Этот эффект, конечно, более явен в устройствах с коротким каналом, где β_F является большим. Предложенные решения этой проблемы – использование контакта к телу кармана, через который часть базового фототока может шунтироваться, и введение примесей, уменьшающих время жизни внутри активной области КНИ МОП транзисторов. Как в случае SEU, нужно указать, что сопротивление связей тела не равно нулю и что в результате экстракция дополнительных носителей через связь тела является несовершенной [133, 134]. Полностью обедненные МОП транзисторы являются более стойкими к эффектам импульсного облучения, чем частично обедненные транзисторы, потому что биполярное усиление является намного меньшим в полностью обедненных транзисторах [135].