



Книги, публикуемые в серии «Мир радиозлектроники», содержат актуальную научную и технологическую информацию и, несомненно, будут полезны специалистам радиозлектронного комплекса при реализации государственной программы «Развитие электронной и радиозлектронной промышленности на 2013—2025 годы».

*Заместитель министра промышленности
и торговли Российской Федерации В.В. Шнак*



ТЕХНОСФЕРА
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ КНИГ «МИР РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

Шпак Василий Викторович, заместитель министра промышленности и торговли РФ – председатель редсовета, к.э.н.

Члены совета:

Авдонин Борис Николаевич, советник директора ФГУП «ГосНИИАС», д.э.н., профессор, заслуженный экономист РФ, г. Москва

Акопян Иосиф Григорьевич, АО «МНИИ «Агат», д.т.н., профессор, г. Москва

Анцев Георгий Владимирович, ген. директор – ген. конструктор АО «НПП «Радар ммс», к.т.н., г. Санкт-Петербург

Беккиев Азрет Юсупович, первый заместитель ген. директора холдинговой компании «Росэлектроника», д.т.н., профессор, г. Воронеж

Боев Сергей Федотович, генеральный директор ПАО МАК «Вымпел», лауреат Государственной премии, д.т.н., д.э.н., профессор, г. Москва

Борисов Юрий Иванович, генеральный директор Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос», д.т.н., г. Москва

Букашкин Сергей Анатольевич, АО «Концерн «Автоматика», д.т.н., профессор, г. Москва

Бушуев Николай Александрович, советник ген. директора АО «НПП «Алмаз», к.ф.-м.н., д.э.н., профессор, г. Саратов

Верба Владимир Степанович, ген. конструктор АО «Концерн «Вега», чл.-корр. РАН, г. Москва

Верник Петр Аркадьевич, директор АНО «Институт стратегий развития», г. Москва

Вилкова Надежда Николаевна, ген. директор ЗАО «МНИТИ», к.т.н., д.э.н., профессор, г. Москва

Гуляев Юрий Васильевич, научный руководитель ФГБУН ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, академик РАН, г. Москва

Зверев Андрей Владимирович, член правления ООО «СоюзМаш России», к.э.н., г. Москва

Козлов Геннадий Викторович, заместитель руководителя аппарата генерального директора-руководитель секретариата АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей», д.т.н., профессор, г. Москва

Красников Геннадий Яковлевич, ген. директор АО «НИИМЭ», академик РАН, г. Москва, г. Зеленоград

Критенко Михаил Иванович, руководитель проектов высшей категории радиоэлектронного комплекса госкорпорации «Ростех», к.т.н., г. Москва

Мальцев Петр Павлович, научный руководитель ИСВЧПЭ РАН, д.т.н., профессор, г. Москва

Попов Владимир Васильевич, президент ПАО «Светлана», к.т.н., г. Санкт-Петербург

Сигов Александр Сергеевич, академик РАН, президент МГТУ МИРЭА, г. Москва

Турилов Валерий Александрович, АО «КНИИТМУ», к.т.н., доцент, г. Калуга

Федоров Игорь Борисович, президент МГТУ им. Н.Э. Баумана, академик РАН, д.т.н., профессор, г. Москва

Хохлов Сергей Владимирович, ген. директор ФГУП «ГосНИИАС», г. Москва

Чаплыгин Юрий Александрович, президент Национального исследовательского университета «МИЭТ», чл.-корр. РАН, г. Москва, г. Зеленоград

Шахнович Илья Владимирович, главный конструктор ООО «НИИИТ», г. Москва

Шубарев Валерий Антонович, ОАО «Авангард», д.т.н., профессор, г. Санкт-Петербург

Якунин Александр Сергеевич, ген. директор АО «Воентелеком», к.т.н., г. Москва



МИР радиоэлектроники

Воздействие ионизирующего
излучения в электронике:
от схем памяти до
формирователей изображений

под ред. М. Багатин, С. Жерардена

Перевод с английского
под ред. А.А. Шашкова

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2022

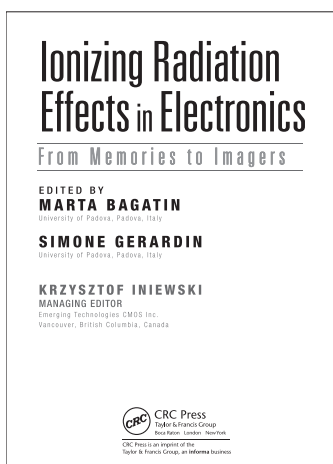


Издание осуществлено при поддержке
Филиала АО «ОРКК» – «НИИ КП»

УДК 621.382
ББК 32.844.1 + 32.85
В64

**В64 Воздействие ионизирующего излучения в электронике:
от схем памяти до формирователей изображений**
под ред. М. Багатин, С. Жерардена
Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2022. – 500 с. ISBN 978-5-94836-599-2

Цель этой книги – дать читателю широкое представление о влиянии ионизирующего излучения на современные полупроводниковые приборы и методах повышения их стойкости. В ней собраны труды экспертов высочайшего уровня в области радиационных эффектов, представляющих промышленность, научно-исследовательские лаборатории и научное сообщество. Благодаря наличию справочных материалов, тематических исследований и обновленных ссылок эта книга подходит как для новичков, желающих познакомиться с радиационными эффектами, так и для экспертов в области радиации, желающих открыть для себя что-то новое.



УДК 621.382
ББК 32.844.1 + 32.85

© 2016 by Taylor & Francis Group, LLC
CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business
Все права защищены. Авторизованный перевод английского издания CRC Press,
импринт Taylor & Francis Group.
© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», перевод на русский язык, оригинал-макет,
оформление, 2022

ISBN 978-5-94836-599-2
ISBN 978-1-4987-2260-5 (англ.)

Содержание

Предисловие редактора перевода	14
Предисловие	16
Редакторы	18
Глава 1. Введение в радиационные эффекты в электронике	21
1.1. Введение.....	21
1.2. Источники ионизирующего излучения.....	22
1.2.1. Космическое пространство.....	22
1.2.2. Наземная среда.....	24
1.2.3. Антропогенные источники ионизирующего излучения.....	26
1.3. Эффекты полной дозы ионизации.....	27
1.3.1. МОП-транзисторы (MOSFET).....	31
1.3.2. Биполярные приборы.....	35
1.4. Структурные повреждения (DD).....	37
1.4.1. Приборы с зарядовой связью (CCD).....	40
1.5. Одиночные радиационные эффекты.....	41
1.5.1. Одиночные сбои (SEU) в 3У SRAM.....	43
1.6. Заключение.....	47
Список литературы.....	47
Глава 2. Моделирование радиационных эффектов методом Монте-Карло	50
2.1. Введение.....	50
2.2. Краткая история методов Монте-Карло.....	51
2.3. Определение метода Монте-Карло.....	53
2.4. Достоинства методов Монте-Карло в задачах моделирования радиационных эффектов в полупроводниковых приборах.....	54
2.4.1. Одиночные радиационные эффекты (SEE).....	55
2.4.2. Эффекты полной ионизационной дозы.....	58
2.4.3. Дозовые эффекты смещения.....	58
2.5. Моделирование переноса излучения методом Монте-Карло.....	60
2.5.1. Метод Монте-Карло для описания переноса излучения и учета взаимодействий.....	60
2.5.2. Учет видов частиц и взаимодействий.....	61
2.5.3. Перенос электронов: ускоренное моделирование и пороговая энергия.....	62
2.5.4. Методы снижения дисперсии.....	66

2.5.5. Выводы по применению метода Монте-Карло в моделировании переноса излучения.....	67
2.6. Примеры инструментов метода Монте-Карло.....	68
2.6.1. MCNP.....	68
2.6.2. GEANT4.....	69
2.6.3. FLUKA.....	69
2.6.4. PHITS.....	70
2.7. Краткие выводы.....	70
Литература.....	71

Глава 3. Полное руководство по множественным сбоям в статическом ОЗУ, изготовленном по декананометровой КМОП-технологии.....

3.1. Введение.....	77
3.2. Экспериментальная установка.....	80
3.2.1. Значение тестового алгоритма для подсчета множественных сбоев.....	80
3.2.2. Испытательная установка.....	80
3.2.2.1. Источник альфа-частиц.....	80
3.2.2.2. Нейтронная установка.....	81
3.2.2.3. Установки тяжелых ионов.....	81
3.2.2.4. Протонная установка.....	81
3.2.3. Испытуемые устройства.....	82
3.3. Результаты экспериментов.....	84
3.3.1. MCU как функция источника излучения.....	85
3.3.2. Зависимость MCU от проектирования кармана: использование тройного кармана.....	85
3.3.3. MCU как функция угла наклона при экспериментах с тяжелыми ионами.....	87
3.3.4. MCU как функция проектных норм.....	88
3.3.5. MCU как функция дизайна: плотность контактов к карману.....	90
3.3.6. MCU как функция напряжения питания.....	91
3.3.7. MCU как функция температуры.....	92
3.3.8. MCU как функция архитектуры ячеек памяти.....	92
3.3.9. MCU как функция места проведения испытаний в LANSCE или в TRIUMF.....	94
3.3.10. MCU как функция подложки: объемный кремний по сравнению с кремнием на изоляторе.....	94
3.3.11. MCU как функция тестового паттерна.....	95
3.4. Трехмерное моделирование в TCAD возникновения MCU.....	96
3.4.1. Биполярный эффект в технологиях с тройным карманом.....	97

3.4.1.1. Структуры, в которых контакты к карманам расположены близко к СОЗУ.....	97
3.4.1.2. Структуры, в которых контакты к карманам расположены далеко от СОЗУ.....	101
3.4.2. Детализация чувствительных областей для современных технологий.....	102
3.4.2.1. Моделирование двух ячеек статического ОЗУ в строке.....	104
3.4.2.2. Моделирование двух ячеек статического ОЗУ в столбце.....	104
3.4.2.3. Выводы и схема чувствительных областей статического ОЗУ.....	105
3.5. Общие выводы: расположение по значимости параметров, влияющих на чувствительность к МСУ.....	106
3.5.1. Схема распределения областей, чувствительных к SEE.....	106
3.6. Приложение 1.....	107
Литература.....	109
Глава 4. Радиационные эффекты в запоминающих устройствах DRAM.....	112
4.1. Введение.....	112
4.2. Основы DRAM.....	114
4.2.1. Принцип работы.....	114
4.2.2. Типы DRAM.....	117
4.3. Радиационные эффекты.....	118
4.3.1. Одиночные радиационные эффекты (SEE).....	118
4.3.1.1. SEU.....	119
4.3.1.2. «Залипание» битов.....	122
4.3.1.3. SEFI и пакетные ошибки.....	124
4.3.1.4. Тиристорный эффект (SEL).....	127
4.3.1.5. Увеличение тока.....	128
4.3.2. Ионизационные дозовые эффекты.....	128
4.3.2.1. Время хранения данных.....	128
4.3.2.2. Ошибки в данных.....	130
4.3.2.3. Увеличение тока.....	131
4.3.2.4. Функциональный отказ.....	131
4.4. Заключение.....	132
Литература.....	132
Глава 5. Радиационные эффекты в схемах флеш-памяти.....	136
5.1. Введение.....	136
5.2. Технология плавающего затвора.....	137
5.3. Радиационные эффекты в ячейках с плавающим затвором.....	140
5.3.1. Дозовые эффекты в ячейках памяти.....	141
5.3.2. Одиночные эффекты в ячейках памяти.....	143

5.4. Радиационные эффекты в периферийных схемах.....	148
5.4.1. Дозовые эффекты в периферийных схемах.....	148
5.4.2. Одиночные эффекты в периферийных схемах.....	149
5.5. Выводы.....	151
Литература.....	151
Глава 6. Радиационные эффекты в микропроцессоре.....	157
6.1. Введение.....	157
6.1.1. Фундаментальные механизмы мягких сбоев и схемы.....	157
6.1.2. Краткое содержание главы и ее структура.....	161
6.2. Структура микропроцессора.....	162
6.2.1. Конвейерная обработка, спекулятивное и архитектурное состояние.....	163
6.2.2. Распределение тактовых импульсов и I/O.....	168
6.2.3. Схемы СнК.....	170
6.3. Общие радиационные эффекты в микропроцессорах.....	170
6.4. SEE в микропроцессорах.....	172
6.4.1. SEE в кеш-памяти.....	173
6.4.1.1. Повышение сбоеустойчивости кеш-памяти и ошибки, наблюдаемые в кремнии.....	178
6.4.1.2. Обнаружение и исправление ошибок.....	181
6.4.1.3. Пример SEE в кеш-памяти.....	181
6.4.2. Сбой регистра.....	182
6.4.2.1. Пример сбоя регистрового файла.....	183
6.4.3. SEE конвейера и исполнительного блока.....	184
6.4.3.1. Ошибки конвейера.....	185
6.4.3.2. Устранение ошибок конвейера в HERMES.....	187
6.4.4. Зависимость от частоты.....	188
6.4.5. Влияние температуры.....	190
6.5. Специальные вопросы.....	192
6.5.1. Проектирование тестовых воздействий при испытаниях на SEE.....	192
6.5.2. SEE обычно обнаруживаются в наиболее слабых элементах.....	193
6.5.3. Сети и связь на кристалле.....	195
6.5.4. MBU и зависимость от угла в микропроцессорах.....	196
6.5.5. Поведение микропроцессора RHBD.....	197
6.5.6. Комплексное испытание системы.....	199
6.5.7. Формирование реакции системы.....	200
6.6. Выводы.....	201
Литература.....	202

Глава 7. Проектирование защелок и триггеров, устойчивых к мягким сбоям	207
7.1. Введение.....	207
7.1.1. Защелки и триггеры с низкой сбоеустойчивостью.....	208
7.1.1.1. Схемы защелок и временные параметры.....	208
7.1.1.2. Схемы триггеров и синхронизация.....	209
7.1.2. Механизмы сбоев.....	211
7.1.2.1. Одиночные сбои и «иголки».....	211
7.1.2.2. Сбор заряда несколькими узлами.....	212
7.1.3. Повышение сбоеустойчивости с помощью технологического процесса.....	214
7.2. Конструктивные методы исключения мягких ошибок в защелках и триггерах.....	215
7.2.1. Резервирование схемы.....	215
7.2.1.1. Методы дублирования.....	216
7.2.1.2. Двойная ячейка со взаимной блокировкой.....	217
7.2.2. Временное резервирование.....	218
7.2.3. Комбинированные методы.....	219
7.2.3.1. DF-DICE.....	220
7.2.3.2. Временное резервирование триггера типа DICE.....	221
7.2.3.3. Триггер с бистабильной схемой с перекрестными связями и дублированием.....	222
7.2.3.4. Фильтрующие элементы в обратной связи защелки.....	224
7.2.3.5. Взаимосвязь топологии и схемотехники.....	226
7.2.4. Схемы элементов задержки.....	229
7.2.4.1. Получение задержек с инверсией.....	229
7.2.4.2. Элемент задержки с малым потреблением тока.....	230
7.2.4.3. Резервированный элемент задержки с малым напряжением на затворе.....	231
7.2.5. Классификация и сравнение.....	231
7.3. Методы уровня проектирования для анализа отказоустойчивости.....	233
7.3.1. Моделирование на уровне схем.....	233
7.3.1.1. Моделирование сбоев.....	233
7.3.2. Устранение накопления заряда несколькими узлами (MNCC).....	236
7.3.2.1. Пространственное разнесение узлов для обеспечения устойчивости к MNCC.....	237
7.3.2.2. Сбои в нескольких узлах и пространственное разделение.....	239
7.3.2.3. Систематический анализ сбоев.....	241
7.3.2.4. Упорядочивание группы узлов.....	246
7.3.2.5. Оценка снижения сечения MNCC.....	251
7.4. Выводы.....	252

Литература.....	253
Глава 8. Обеспечение надежности троированных схем ПЛИС на основе статического ОЗУ.....	256
8.1. Введение.....	256
8.2. Обзор данных по SEU и MCU для ПЛИС.....	258
8.3. Защита схем ПЛИС тройным модульным резервированием.....	264
8.3.1. Проблемы проектирования схем.....	265
8.3.2. Проблемы проектных ограничений компонентов.....	266
8.3.3. Применение схем и архитектурные проблемы.....	267
8.4. Ошибки пересечения доменов (DCE).....	268
8.4.1. Метод и установка для испытаний.....	269
8.4.2. Результаты испытаний с помощью внесения ошибок и на ускорителе.....	273
8.4.3. Обсуждение результатов.....	275
8.4.4. Вероятность DCE.....	279
8.5. Обнаружение SBU, MCU и проблемы проектирования.....	281
8.5.1. Сопутствующая работа.....	283
8.5.2. Обзор STARC.....	285
8.5.3. Учебная задача: пространство решений проблем надежности при ограничениях площади.....	288
8.6. Выводы.....	290
Литература.....	291
Глава 9. Методы борьбы с одиночными эффектами для аналоговых и цифроаналоговых схем.....	295
9.1. Введение.....	295
9.2. Снижение накопленного заряда.....	297
9.2.1. Проектирование подложки.....	297
9.2.2. Устранение сбоев на уровне топологии.....	299
9.2.2.1. Разделение узлов и топология с перемешиванием.....	302
9.2.2.2. Дифференциальное проектирование.....	303
9.3. Снижение критического заряда.....	307
9.3.1. Резервирование.....	308
9.3.2. Усреднение (аналоговое резервирование).....	309
9.3.3. Резистивная развязка.....	310
9.3.4. Резистивно-емкостная (RC) фильтрация.....	310
9.3.5. Изменение полосы пропускания, коэффициента усиления, быстродействия и рабочего тока.....	313
9.3.6. Уменьшение окна уязвимости.....	317
9.3.7. Снижение числа высокоимпедансных узлов.....	319

9.3.8. Повышение сбоеустойчивости с помощью растекания заряда.....	320
9.3.9. Повышение сбоеустойчивости с помощью расщепления узла.....	323
9.4. Краткие выводы.....	328
Литература.....	329
Глава 10. Монолитные КМОП-сенсоры с гибридной пикселеподобной стационарной выходной электроникой обработки сигналов: исследования ионизационных дозовых эффектов и объемных повреждений.....	336
10.1. Введение.....	336
10.2. Монолитные КМОП-сенсоры для отслеживания заряженных частиц.....	338
10.3. DNW MAPS, изготовленные по КМОП-технологии с топологической нормой проектирования 130 нм, использующей тройной карман.....	339
10.3.1. Описание объектов исследования и последовательности облучения.....	340
10.3.2. Ионизационные дозовые эффекты.....	342
10.3.2.1. Зарядовая чувствительность и форма отклика.....	342
10.3.2.2. Эквивалентный шумовой заряд.....	348
10.4. MAPS, изготовленные по КМОП-технологии с топологической нормой проектирования 180 нм, использующей четверной карман.....	352
10.4.1. Описание объектов исследования и последовательности облучения.....	353
10.4.2. Ионизационные дозовые эффекты.....	354
10.4.2.1. Зарядовая чувствительность.....	355
10.4.2.2. Эквивалентный шумовой заряд.....	359
10.5. Объемные повреждения в гибридных пикселеподобных MAPS.....	360
10.6. Выводы.....	366
Благодарности.....	366
Литература.....	367
Глава 11. Радиационные эффекты в формирователях изображения на основе КМОП-активных пиксельных сенсоров.....	370
11.1. Введение.....	370
11.1.1. Контекст.....	370
11.1.2. APS, CIS и монолитные активные пиксельные сенсоры.....	371
11.1.3. Основные сведения о радиационных эффектах.....	372
11.2. Введение в CIS.....	373
11.2.1. Обзор технологий CIS.....	373
11.2.2. Выбранные для анализа радиационных эффектов важные концепции CIS.....	379

11.2.2.1. Полная емкость потенциальной ямы и напряжение захвата	379
11.2.2.2. Источники темнового тока	381
11.2.2.3. Случайные телеграфные шумовые сигналы: DC-RTS и SF-RTS	385
11.3. Одиночные радиационные эффекты	387
11.4. Интегральные радиационные эффекты в периферийных схемах	389
11.5. Влияние интегральных радиационных эффектов на работоспособность пикселей	390
11.5.1. Ионизационные дозовые эффекты	390
11.5.1.1. Обзор основных эффектов и механизмов деградации	390
11.5.1.2. Специфические эффекты, свойственные структурам с прикрепленным фотодиодом	397
11.5.1.3. Повышение радиационной стойкости пикселей CIS	400
11.5.2. Эффекты структурных повреждений	402
11.5.2.1. Обзор	402
11.5.2.2. Темновой ток, неоднородность темнового тока и RTS	404
11.6. Заключение	407
Литература	408

Глава 12. Радиационные эффекты естественного происхождения в приборах

с зарядовой связью	421
12.1. Введение	421
12.2. Одиночные радиационные эффекты в ПЗС	422
12.2.1. Радиационные эффекты в ПЗС	423
12.2.2. Детекторы излучений, основанные на ПЗС	425
12.3. Естественные радиационные эффекты в ПЗС: тематическое исследование	428
12.3.1. Описание эксперимента	429
12.3.2. Экспериментальные результаты	430
12.3.3. Результаты моделирования	435
12.3.4. Подтверждение модели на высотах, характерных для авионики	441
12.4. Заключение	444
Благодарности	444
Литература	445

Глава 13. Радиационные эффекты в оптоволокне и оптоволоконных сенсорах

13.1. Введение	449
13.2. Основные радиационные эффекты в оптоволокне	451
13.2.1. Радиационно индуцированные точечные дефекты и структурные изменения	451
13.2.2. Радиационно наведенные потери	453

13.2.3. Радиационно наведенная эмиссия.....	455
13.2.4. Уплотнение и радиационно индуцированные изменения показателя преломления.....	455
13.3. Внутренние и внешние параметры, влияющие на радиационный отклик оптоволокна.....	456
13.3.1. Параметры, связанные с оптоволокном.....	456
13.3.2. Внешние параметры.....	458
13.4. Основные применения и задачи.....	460
13.4.1. Для оптоволокна.....	460
13.4.1.1. Исследования для международного термоядерного экспериментального реактора (ITER).....	461
13.4.1.2. Исследования для мегаджоулевого лазера.....	461
13.4.1.3. Исследования для Большого адронного коллайдера (LHC).....	462
13.4.1.4. Оптоволокно, легированное редкоземельными элементами, и усилители для космического применения.....	462
13.4.2. Для волоконно-оптических сенсоров.....	463
13.4.2.1. Оптоволоконные брэгговские решетки (FBG).....	463
13.4.2.2. Оптоволокно как система дозиметрии.....	464
13.4.2.3. Распределенные сенсоры.....	465
13.5. Многоуровневое моделирование от самого начала до системного уровня: последние успехи.....	467
13.6. Выводы.....	470
Литература.....	471

Предисловие редактора перевода

Воздействие ионизирующей радиации на полупроводниковые структуры приводит к их деградации, что во многом определяет сроки службы электронной аппаратуры, работающей в экстремальных условиях эксплуатации. Для космической радиоэлектронной аппаратуры вопрос обеспечения ее радиационной стойкости является ключевым при достижении длительных сроков активного существования. Исследования радиационных эффектов в материалах и компонентах выполняются в нашей стране и за рубежом с начала освоения микроэлектронных приборов, однако ввиду постоянно развивающихся технологий производства, увеличения сложности радиоэлектронных структур и устройств, появления электроники на новых физических принципах, задачи изучения влияния радиации на характеристики их работоспособности по-прежнему остаются актуальными.

Книга представляет собой сборник тематических обзоров и статей ведущих зарубежных специалистов в области радиационной физики обширной номенклатуры функциональных классов изделий электроники и может быть интересна широкому кругу читателей, поскольку содержит информацию как о базовых механизмах радиационных эффектов и основных методах моделирования воздействия ионизирующих излучений на вещество, так и о результатах большого объема расчетных и экспериментальных исследований различных технологий проектирования и производства электронных компонентов. Основное внимание уделено описанию влияния ионизирующих излучений различной природы на цифровые интегральные схемы, такие как различные виды запоминающих устройств и микропроцессоры, а также изделия оптоэлектроники. Информация о методах проектирования сбое- и отказоустойчивых цифровых, аналоговых, аналого-цифровых микросхем может быть применена специалистами электронной промышленности при выполнении работ по импортозамещению радиационно-стойкой электронной компонентной базы. Последние 4 главы посвящены описанию исследований радиационных эффектов в современных оптоэлектронных приборах и структурах, таких как КМОП-сенсоры, фотоприемные устройства, приборы с зарядовой связью, оптоволоконные приборы.

Для удобства читателей в данном издании приведен перечень англоязычных сокращений и аббревиатур с их переводом на русский язык. Для более углубленного изучения отдельных проблемных вопросов, рассмотренных в книге, рекомендуется воспользоваться источниками из списков библиографии, приведенными в конце каждой главы, многие из которых доступны в сети Интернет. Желаю плодотворной работы с книгой!

При возникновении неразрешенных вопросов в области обеспечения стойкости и проведения испытаний изделий электронной компонентной базы и радиоэлектронной аппаратуры к воздействию различных видов ионизирующих излучений специалисты филиала АО «Объединенная ракетно-космическая корпорация» — «Научно-исследовательский институт космического приборостроения» будут рады оказать помощь и провести необходимые консультации.

*Руководитель филиала
АО «Объединенная ракетно-космическая корпорация» —
«Научно-исследовательский институт
космического приборостроения»
Шашков Алексей Алексеевич*

Предисловие¹

Существует невидимый враг, который непрерывно угрожает работе электроники — ионизирующее излучение (ИИ). От уровня моря и до космического пространства — оно буквально повсюду. На уровне моря и тем более на высотах полета авиации атмосферные нейтроны, возникающие при взаимодействии космических лучей с атмосферой, непрерывно облучают электронные устройства. Альфа-частицы, излучаемые радиоактивными веществами в составе материалов микросхем, также представляют серьезную угрозу для наземного оборудования. В космическом пространстве спутники и другие космические аппараты (КА) под действием естественных радиационных поясов Земли, солнечной активности и галактических космических лучей (ГКЛ) могут подвергаться негативному воздействию высокоэнергетических частиц, таких как протоны, электроны и других более тяжелых частиц. И, наконец, искусственная радиация, вызванная антропогенными факторами такими как атомные электростанции или эксперименты в области физики высоких энергий может оказывать экстремальные уровни воздействия на оборудование.

В зависимости от типа и характеристик падающего излучения и облучаемого устройства могут возникать разные эффекты, как необратимые «жесткие», так и обратимые «мягкие». Одиночные радиационные эффекты (ОРЭ) — это стохастические (случайные) события, возникающие вследствие попадания одиночной частицы в устройство. Если частицей будет выделено достаточное количество энергии в чувствительный объем устройства, то могут возникнуть различного рода отклонения в его работе — от повреждения информации, хранящейся в ячейке памяти, до катастрофического выгорания мощного МОП-транзистора.

В других же случаях это постепенное накопление дефектов, вызванных несколькими частицами вследствие длительного воздействия ИИ, что, в свою очередь, приводит к дрейфу параметров электронных компонентов (например сдвигу порогового напряжения или росту потребляемой мощности). Такого рода эффекты могут привести к повреждению диэлектрического слоя (суммарная накопленная (полная) доза ионизации [TID — total ionizing dose])

¹ Книга представляет собой сборник из 13 глав, написанных разными авторами. Редакционный перевод глав книги выполнен следующими специалистами: А. С. Конюхов (предисловие, главы 1, 4), П. А. Чубунов (предисловие, главы 1, 4), Г. И. Зебрев (главы 2, 5), М. С. Горбунов (главы 3, 6–9), К. И. Таперо (главы 10–13). Поскольку исходный материал имеет разобленную от автора к автору стилистику изложения, текст глав книги, включая терминологию, аббревиатуры, сокращения и смысловое содержание, представлен в редакции первоисточника. В некоторых случаях для обеспечения более доступного восприятия материала книги отечественными читателями редакторы-переводчики дают пояснения в виде сносок по тексту.

или объемных полупроводниковых материалов (структурные повреждения [DD — displacement damage]). Также могут наблюдаться эффекты так называемого отжига, которые снижают или иногда увеличивают темпы деградации устройства.

Как правило, стойкость электронных компонентов к ИИ космического пространства (КП) проверяется посредством ускоренных наземных испытаний, которые позволяют инженерам за несколько часов смоделировать условия воздействия ИИ, эквивалентного нескольким годам в естественных условиях. Данные испытания проводятся при помощи источников радиоактивного излучения или ускорителей частиц.

Знание механизмов, лежащих в основе воздействия ИИ на электронные компоненты, имеет первостепенное значение для разработки соответствующих методик обеспечения радиационной стойкости (RNA). Наземные испытания могут лишь частично воспроизвести весь спектр и характеристики ИИ КП, особенно что касается мощности дозы и энергии частиц. Кроме того, постоянно растущая стоимость испытаний изделий электронной техники на стойкость к ИИ КП ввиду увеличения сложности и разнообразия передовых технологий требует глубокого понимания базовых механизмов данного процесса для максимально эффективного использования испытательного времени.

Цель этой книги — дать читателю широкое представление о влиянии ИИ на современные полупроводниковые приборы и методах повышения их стойкости. В ней собраны труды экспертов высочайшего уровня в области радиационных эффектов, представляющих промышленность, научно-исследовательские лаборатории и научное сообщество. Благодаря наличию справочных материалов, тематических исследований и обновленных ссылок эта книга подходит как для новичков, желающих поближе познакомиться с радиационными эффектами, так и для экспертов в области радиации, которые хотят открыть для себя что-то новое.

Книга построена следующим образом: в первых двух главах дается общее представление о радиационных эффектах, и базовых механизмах, лежащих в их основе, а также рассказывается о методе Монте-Карло для моделирования переноса ИИ и воздействия излучения на электронику. Затем идет серия глав, посвященных новейшим цифровым приборам коммерческого назначения, включая энергозависимую, энергонезависимую память (SRAM, DRAM и флеш-память) и микропроцессоры. В следующих главах рассматриваются конструктивные решения по повышению стойкости цифровых схем, ПЛИС и комбинированных аналоговых схем, включая тематическое исследование считывающей электроники пиксельных сенсоров, применяемых для исследований в области физики высоких энергий. И, наконец, последние три

главы посвящены радиационным эффектам в приборах формирования изображений (датчиках CMOS [КМОП]) и CCD [ПЗС]) и волоконно-оптических приборах.

MATLAB® является зарегистрированной торговой маркой компании MathWorks. Для получения дополнительной информации по продукту, пожалуйста, обращайтесь по адресу:

Компания MathWorks
3 Apple Hill Drive
Natick, MA 01760-2098 США
Tel: 508-647-7000
Fax: 508-647-7001
E-mail: info@mathworks.com Web: www.mathworks.com

Редакторы

Марта Багатин (*Marta Bagatin*) получила степень Laurea (бакалавра) с отличием в области электронной техники в 2006 году и докторскую степень по информатике и информационным технологиям в 2010 году в университете Падуи, Италия. В настоящее время она ведет свою научно-исследовательскую деятельность на кафедре информационных технологий университета Падуи. Ее научные интересы направлены на изучение влияния радиации на надежность электронных устройств, и главным образом на энергонезависимые полупроводниковые запоминающие устройства. Марта является автором и соавтором около 40 статей в специализированных научных журналах по радиационным эффектам и их влиянию на надежность оборудования, около 50 материалов, подготовленных для международных конференций, а также автором двух глав в книге. Она регулярно принимает участие в работе комитетов международных конференций по радиационным эффектам, таких как конференция по ядерным и космическим радиационным эффектам (NSREC) и конференция по радиационным эффектам в компонентах и системах (RADECS), а также является рецензентом в многочисленных научных журналах.

Симоне Жерарден (*Simone Gerardin*) получил степень Laurea (бакалавра) с отличием в области электронной техники в 2003 году и докторскую степень по электронике и телекоммуникационным технологиям в 2007 году в университете Падуи, Италия. В настоящее время он является доцентом того же университета. Его исследования направлены на изучение обратимых и необратимых сбоев в современных приборах на основе CMOS-технологии, индуцируемых ионизирующим излучением, а также на их взаимосвязь со старением устройства и электростатическими разрядами (ЭСР). Симоне является автором и соавтором около 60 статей, опубликованных в научных журналах, более 60 докладов для конференций, трех глав книги, а также автором двух обучающих курсов, подготовленных в рамках международных конференций по радиационным эффектам. В настоящее время он является помощником редактора журнала IEEE Transactions on Nuclear Science и рецензентом ряда научных журналов, а также членом руководящей группы по радиационным эффектам.

Ответственный редактор **Криштоф (Крис) Иньевски** (*Krzysztof [Kris] Iniewski*) возглавляет R&D-подразделение (подразделение, занимающееся инновационными разработками и развитием) в Redlen Technologies — молодой компании в Ванкувере, Канада. Революционный процесс производства современных полупроводниковых материалов компании Redlen открывает доступ к методам радиационной визуализации нового поколения — полностью цифровым и более точным. Крис также является президентом компании CMOS Emerging Technologies Research Inc. (<http://www.cmosetr.com>), охватывающей в своей

деятельности такие высокотехнологичные сферы, как средства коммуникаций, микропроцессорные системы, оптоэлектроника и сенсоры. На протяжении своей карьеры доктор Иньевски занимал различные преподавательские и руководящие должности в университете Торонто, университете Альберты, университете им. Саймона Фрейзера (SFU) и в компании PMC-Sierra Inc. Он подготовил более 100 научных статей для международных журналов и научных конференций. Является обладателем международных патентов, выданных в Соединенных Штатах, Франции, Германии и Японии. Часто выступает с докладами и консультирует множество компаний на международном уровне. Он написал и отредактировал несколько книг для таких издательств, как CRC Press, Cambridge University Press, IEEE Press, John Wiley & Sons, McGraw-Hill, Artech House и Springer Science + Business Media. Крис считает своей личной целью с помощью инновационных инженерных решений внести вклад в рациональное и экологически-ориентированное развитие общества, а также здоровый образ жизни. В свободное от работы время Крис ходит в походы, увлекается парусным спортом, катается на лыжах или велосипеде, наслаждаясь красотами Британской Колумбии. С ним можно связаться по электронной почте: kris.iniewski@gmail.com.

ГЛАВА I

ВВЕДЕНИЕ В РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

Симоне Жирарден и Марта Багатин

1.1. Введение

Ионизирующее излучение (ИИ) может представлять серьезную угрозу для корректной работы электроники как в условиях Земли (из-за атмосферных нейтронов и радиоактивных веществ в составе материалов микросхем), так и в значительно большей степени в космическом пространстве в следствие воздействие захваченных частиц, частиц, испускаемых Солнцем, и галактических космических лучей (ГКЛ). Другой важной причиной для тщательного изучения радиационных эффектов в электронных компонентах является антропогенная (искусственная) радиация, создаваемая биомедицинским оборудованием, атомными электростанциями и экспериментами в области физики высоких энергий.

Основопологающий принцип воздействия ИИ заключается в выделении энергии в облучаемом материале. В результате такого воздействия радиация может вызвать множество различных эффектов: повреждение битов памяти, сбои в цифровых и аналоговых схемах, рост потребляемой мощности, снижение производительности, а в наихудших случаях — полную потерю работоспособности.

Анализ радиационных эффектов необходим при проектировании электронных систем, предназначенных для работы в спутниках и космических аппаратах, но он также обязателен и при разработке высоконадежных наземных систем, таких как банковские серверы, биомедицинское оборудование, авионика, автокомпоненты.

В данной главе нами будут рассмотрены наиболее актуальные радиационные условия и проанализированы три основные категории радиационных эффектов: суммарно накопленная доза ионизации (TID — total ionizing dose), дефекты смещения (DD — displacement damage), а также одиночные радиационные

эффекты (ОПЭ или SEE — single event effects). Первые две представляют собой постепенный дрейф (изменение) параметров приборов вследствие деградации диэлектрических и полупроводниковых материалов из-за непрерывного воздействия различных ионизирующих частиц. Данные эффекты в основном встречаются в КП или из-за воздействия искусственных источников радиации. Одиночные эффекты (SEE), наоборот, возникают из-за стохастического (случайного) взаимодействия одиночной высокоэнергетической частицы с чувствительной областью электронного прибора. Данный тип эффектов может возникать как в КП, так и на Земле.

1.2. Источники ионизирующего излучения

Электронные приборы часто должны функционировать в условиях мощного ионизирующего излучения. Чтобы обеспечить стабильную работу компонентов, необходимо точно знать характерные особенности той среды, в которой им предстоит функционировать. Мы начнем этот раздел с иллюстрации космической среды, одной из самых суровых с точки зрения радиации. После этого рассмотрим ионизирующее излучение земного происхождения, для которого характерны нейтроны и альфа-частицы. И в конце обсудим антропогенные источники радиации, такие как атомные электростанции и эксперименты в области физики высоких энергий.

1.2.1. Космическое пространство

Как видно на рис. 1.1, существует три основных источника ионизирующего излучения в космическом пространстве [1]:

- 1) галактические космические лучи (ГКЛ),
- 2) солнечные космические лучи (СКЛ) — частицы, генерируемые Солнцем во время солнечных событий,
- 3) частицы, захваченные магнитосферой планет.

Известно, что ГКЛ формируются за пределами нашей Солнечной системы, но их источник и механизм ускорения до сих пор до конца не изучены. В основном они состоят из протонов, но также содержат и все остальные элементы, и их энергия может достигать очень высоких значений, вплоть до 10^{11} ГэВ, что говорит об их высокой проникающей способности и фактическом отсутствии способов экранирования с использованием разумного количества материала. Плотность потока ГКЛ составляет порядка нескольких частиц на квадратный сантиметр в секунду.

Ко второй категории ИИ КП относятся частицы СКЛ. В состав СКЛ входят все встречающиеся в природе элементы от протонов до урана. Плотность их

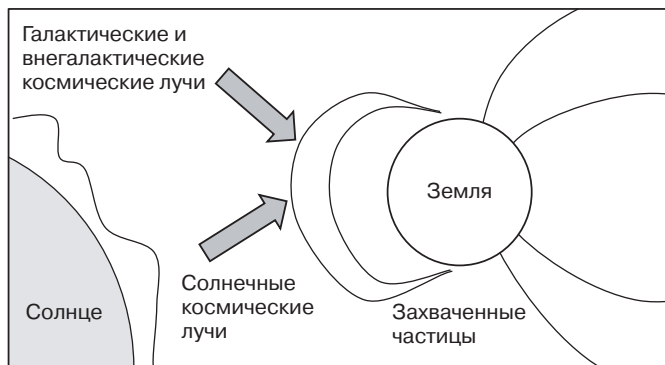


Рис. 1.1. Схематическое изображение трех основных источников радиации в космосе: ГКЛ, СКЛ, частицы, захваченные магнитосферой Земли

потока зависит от солнечного цикла и может достигать значений более 10^5 частиц/см²/с с энергией >10 МэВ/нуклон. Солнечная активность носит циклический характер, при котором семь лет высокой активности чередуются с четырьмя годами низкой активности. Ключевым проявлением данного цикла является изменение числа солнечных пятен. В период нисходящей фазы пика солнечной активности солнечные события наблюдаются чаще. К ним относятся корональные выбросы массы и солнечные вспышки. Первые — это извержения плазмы, возникающие из-за ударной волны с последующим выбросом частиц. Солнечные вспышки, наоборот, возникают, когда усиление коронального магнитного поля вызывает внезапный всплеск энергии. В дополнение к солнечным событиям происходит непрерывная прогрессирующая потеря массы Солнцем, при которой протоны и электроны приобретают энергию, достаточную для преодоления его гравитации. Эти частицы имеют собственное магнитное поле, которое может взаимодействовать с магнитным полем планет. Что интересно, солнечный цикл также модулирует поток галактических космических лучей: чем выше солнечная активность, тем ниже поток космических лучей за счет экранирующего эффекта солнечных частиц. Кроме того, Солнце взаимодействует с магнитосферой планет и, в частности, с магнитосферой Земли. Давайте теперь подробнее остановимся на Земле.

Магнитное поле Земли имеет две составляющие: внутреннюю и внешнюю, образованную солнечным ветром и способно захватывать заряженные частицы. Эти частицы, попав в магнитное поле Земли, движутся по спирали вокруг силовых линий от одного полюса к другому. Кроме того, они движутся в продольном направлении, но с меньшей скоростью. Направление движения при этом зависит от их заряда. Захваченные магнитным полем Земли частицы формируют два отдельных пояса: внешний, состоящий по большей части из электронов, и внутренний пояс, состоящий из электронов и протонов. Потоки электронов

с энергией выше 1 МэВ могут достигать значений 10^6 частиц/см²/с; для протонов эти значения доходят до 10^5 частиц/см²/с.

Характерной особенностью радиационных поясов Земли является Южно-Атлантическая аномалия (ЮАА), в области которой радиационные пояса располагаются ближе всего к Земле. ЮАА обусловлена тем, что ось магнитного поля образует угол 11° относительно оси север — юг, при этом ее центр расположен не в центре Земли, а на расстоянии примерно 500 км от него, из-за чего происходит провал магнитного поля в районе Южной Атлантики. ЮАА — это область, где чаще всего случаются ошибки и сбои в работе спутников, функционирующих на низких орбитах.

Из-за сложности окружающей среды, а также большой зависимости от солнечного цикла и орбиты трудно оценить количество ионизирующих частиц, поражающих систему в космосе. Кроме того, доза радиации, получаемая конкретным электронным прибором, также зависит от его расположения внутри КА или спутника из-за экранирующего эффекта окружающих материалов. В космосе очень важно не перегружать электронные системы с точки зрения запаса прочности и надежности из-за дороговизны запуска дополнительных килограммов и дефицита электроэнергии на борту. Для разработчиков стали доступны инновационные средства моделирования, позволяющие прогнозировать накопление дозы и разрабатывать системы с соответствующим запасом.

1.2.2. Наземная среда

Атмосферные нейтроны и альфа-частицы, выделяемые радиоактивными компонентами материалов микросхем, являются двумя основными источниками обратимых сбоев в электронных устройствах на уровне земли [2, 3].

Несмотря на то что нейтроны имеют нулевой заряд, они могут косвенно ионизировать материал, поскольку способны инициировать ядерные реакции, образуя тем самым заряженные вторичные частицы, которые, в свою очередь, могут выделять заряд в чувствительном объеме электронного устройства. Если выделенный заряд будет накапливаться в чувствительных узлах, то в работе устройств могут наблюдаться сбои. Атмосферные нейтроны образуются вследствие взаимодействия космических лучей с внешними слоями атмосферы и являются одними из наиболее распространенных ионизирующих (косвенно) частиц на уровне моря (рис. 1.2; [4]). Космические лучи подразделяются на первичные (главным образом протоны и ядра гелия), исходящие из КП за пределами нашей Солнечной системы, и вторичные, образованные за счет взаимодействия первичных космических лучей с атмосферой. По мере того как космические лучи проходят через слои атмосферы, они взаимодействуют с атомами азота и кислорода, генерируя тем самым каскад вторичных частиц. В процессе этого взаимодействия образуется множество разных частиц (протоны,

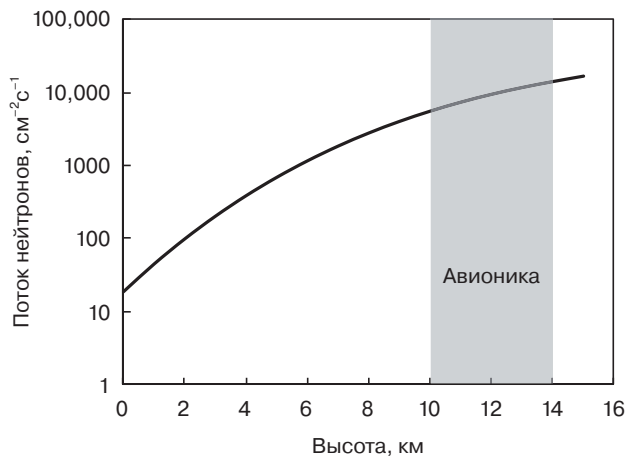


Рис. 1.2. Поток нейтронов в наземном пространстве как функция высоты. (Данные из: <http://seutest.com/cgi-bin/FluxCalculator.cgi>)

пионы, мюоны, нейтроны) и электромагнитная составляющая. Эти частицы, в свою очередь, обладают достаточной энергией, чтобы создать новые каскады частиц. В процессе проникновения космических лучей в атмосферу Земли количество частиц сначала увеличивается, а потом уменьшается по мере того, как экранирующее действие атмосферы начинает преобладать над ростом числа частиц. Как видно на рис. 1.2, поток атмосферных нейтронов растет с увеличением высоты, достигая своего пика на уровне 15 км, именно поэтому авиационная радиоэлектронная аппаратура наиболее подвержена негативному воздействию нейтронов.

Зависимость потока нейтронов от энергии (E) показывает зависимость $1/E$. С точки зрения радиационных эффектов существует две основные категории энергии нейтронов, которые представляют интерес:

- тепловые нейтроны (энергия около 25 мэВ), для которых характерно большое сечение взаимодействия с изотопом бора ^{10}B , часто встречающегося в интерметаллических слоях интегральных схем или в качестве примеси;
- нейтроны с энергией более 10 МэВ, способные инициировать ядерные реакции с материалами микросхем, такими как кремний и кислород, что приводит к образованию заряженных вторичных частиц.

Кроме того, в зависимости от высоты поток нейтронов определяется и другими факторами, такими как солнечная активность, широта и атмосферное давление. В качестве эталонного принято значение потока нейтронов над Нью-Йорком, которое составляет $14 \text{ н/см}^2/\text{час}$ для нейтронов с энергией выше 10 МэВ. Для расчета потока нейтронов в других районах существуют соответствующие таблицы.

Альфа-частицы, выделяющиеся при распаде радиоактивных элементов материалов интегральных схем (ИС), являются вторым источником радиационно-индуцированных эффектов в электронике, функционирующей в земных условиях. Большинство обратимых сбоев, возникающих на уровне моря, связаны с распадом таких альфа-активных элементов, как ^{238}U , ^{234}U , ^{232}Th , ^{190}Pt , ^{144}Nd , ^{152}Gd , ^{148}Sm , ^{187}Re , ^{186}Os , и ^{174}Hf . Эти элементы могут применяться при производстве ИС преднамеренно, но также могут попадать туда в виде нежелательных примесей. Несмотря на то что такие альфа-частицы обладают слабой ионизирующей способностью, обратимые сбои, индуцируемые этими частицами, выходят на передний план относительно тех, что индуцируются атмосферными нейтронами. Это объясняется снижением критического заряда, необходимого для проявления эффекта, из-за уменьшения проектных норм с каждым новым поколением ИС. Стандартное значение альфа-излучения в ИС составляет порядка 10^{-3} альфа-частиц/см²/ч.

Стоит отметить, что непрерывное сокращение топологических размеров распаивает двери для новых угроз, таких как, например, мюоны. Фактически еще несколько поколений назад мюоны считались абсолютно безвредными для электроники, но сегодня размер комплементарных металл — оксид — полупроводниковых (КМОП) элементов сократился настолько, что даже мюоны могут провоцировать сбои в их работе при определенных условиях [5].

1.2.3. Антропогенные источники ионизирующего излучения

Некоторые антропогенные источники радиации создают очень неблагоприятные условия с точки зрения ионизирующего излучения [6]. Например, ожидается, что после плановой модернизации Большого адронного коллайдера (БАК) в ЦЕРНе (CERN), Швейцария, — крупнейшего эксперимента по физике высоких энергий, доза будет превышать 100 Мрад (Si) (для сравнения: для большинства космических миссий Национального управления по авиации и исследованию космического пространства (НАСА) доза составляет менее 100 крад (Si)). Как следствие, для таких условий требуется специальная электроника, способная выдерживать высокие уровни радиации. Для этих целей применяются специализированные библиотеки радиационно стойких компонентов, топология которых тщательно продумана, с целью исключить проблемы, характерные для обычного проектирования.

Ионизирующее излучение также является характерной проблемой для атомных электростанций и будущих термоядерных установок, находящихся в стадии разработки. Например, в термоядерном реакторе, таком как ITER (ИТЭР), электронные системы управления и диагностики плазмы размещаются вблизи камеры и биозащитного экрана, где выше всего вероятность поражения интенсивными потоками нейтронов (в процессе реакции дейтерий + тритий

выделяются нейтроны с энергией 14 МэВ), рентгеновским и гамма-излучением и т.д. Если говорить о цифрах, то в условиях ИТЭР ожидаются дозы порядка 50 рад (Si) за один рабочий час [7].

1.3. Эффекты полной дозы ионизации

Полная доза ионизации (TID — total ionizing dose) — это количество энергии, накопленное материалом в процессе ионизации. TID измеряется в радах, 1 рад соответствует энергии падающего излучения 100 эрг, поглощенной веществом массой 1 грамм. Поскольку степень поглощения зависит от материала, доза облучения обычно указывается вместе с материалом мишени. Наиболее распространенными единицами измерения являются рад и грэй (Гр). 1 Гр соответствует поглощению 1 Дж энергии одним килограммом материала мишени 1 рад равен 100 Гр. Разделяют два основных вида TID-эффекта [8, 9]:

- накопление дефектов в изолирующих слоях,
- нарастание (положительного) захваченного заряда в изолирующих слоях.

По причине TID-эффектов полевые МОП-транзисторы (MOSFET) подвержены таким явлениям, как сдвиг порогового напряжения, снижение проводимости и появление токов утечки. Масштабирование технологии приводит к тому, что подзатворный оксид становится все тоньше и тоньше, что, в свою очередь, ведет к снижению количества радиационно-индуцированного захвата заряда и поверхностных состояний. В результате после внедрения технологии ультратонкого подзатворного окисла проблемы с дозовыми эффектами в низковольтных МОП-транзисторах в основном связаны с толстой боковой изоляцией и оксидными спейсерами. TID-эффекты в МОП-транзисторах зависят от времени и не зависят от мощности дозы.

В биполярных устройствах захват заряда и дефекты могут привести к снижению коэффициента усиления и появлению токов утечки. Особенным явлением, возникающим в биполярных устройствах, является повышенная чувствительность к низкой мощности дозы (ELDRS — enhanced low dose rate sensitivity): как следует из названия, уровень деградации выше при низких дозах, чем при высоких.

Основные механизмы захвата заряда и образования поверхностных состояний в оксидных слоях представлены на рис. 1.3. На нем изображена энергетическая зонная диаграмма МОП-конденсатора на подложке p-типа при положительном напряжении смещения. Радиация провоцирует появление дефектов в изолирующих слоях через косвенные процессы, то есть она не разрушает связи напрямую, а высвобождает положительно заряженные частицы (дырки и ионы водорода), которые, в свою очередь, и определяют реакцию приборов на облучение.

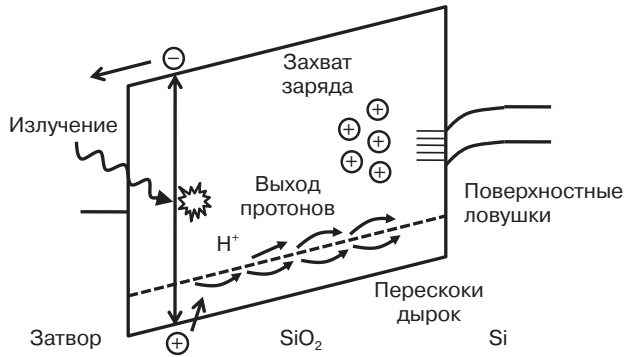


Рис. 1.3. Энергетическая зонная диаграмма МОП-системы на подложке p-типа при положительном напряжении смещения. (На основе работы O. Flament, J. Baggio, S. Bazzoli, S. Girard, J. Raimbourg, J. E. Sauvestre, J. L. Leray, *Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications* (Достижения в области ядерного приборостроения, в методах измерений и их использовании) [ANIMMA], 2009, с. 1)

При попадании излучения на диэлектрический слой образуются высокоэнергетические электронно-дырочные пары. Всего через несколько пикосекунд созданные носители заряда термализуются, теряя значительную часть своей энергии. Электроны, благодаря своей подвижности, быстро перемещаются в сторону анода за счет приложенного потенциала или за счет контактной разности потенциалов, оставляя более тяжелые и более медленные дырки двигаться внутри окисла в противоположном направлении. Но прежде чем они это сделают, большая часть электронно-дырочных пар успеют рекомбинировать. Число рекомбинаций определяется выходом заряда, который, в свою очередь, зависит от электрического поля, а также от типа и энергии падающего излучения.

Сохранившиеся дырки могут быть захвачены существующими глубокими ловушками в процессе миграции к катоду под действием приложенного поля. Перенос дырок происходит путем прыжков через локализованные состояния. Поскольку они обладают положительным зарядом, дырки увлекаются в сторону Si/SiO₂ или к поверхности раздела затвор/SiO₂ в зависимости от знака электрического поля. Положительно заряженные дырки вносят локальное искажение в электрическое поле, что приводит к замедлению их переноса, из-за чего процесс начинает носить дисперсионный характер (то есть происходит через множество десятков раз). Этот тип процесса называется «поляронные прыжки» или «поляронные перескоки» и сильно зависит от температуры и внешнего поля. Полярон — это сочетание дырки и сопровождающей ее деформации электрического поля. Если в процессе переноса дырки оказываются у поверхности раздела Si/SiO₂, то они могут быть захвачены в местах дефектов, плотность которых, как правило, выше вблизи поверхности раздела. Микроскопическая природа этих дефектов была подробно изучена. Электронный спиновый

резонанс (также называемый электронным парамагнитным резонансом (ЭПР)) позволил выявить в двуокиси кремния наличие E' -центров — трехвалентного кремния, связанного с кислородной вакансией, который, как считается, отвечает за захват дырок в SiO_2 . Эти вакансии объясняются диффузией кислорода в окисле и несоответствием параметров кристаллической решетки у поверхности. Количество захваченного заряда зависит от числа дырок, переживших рекомбинацию, от количества вакансий O и от эффективного сечения захвата ловушек, которое, в свою очередь, зависит от электрического поля. В связи с этим количество захваченного заряда также сильно зависит от качества окисла. Так, для стойких окислов радиационно-индуцированный захват заряда на несколько порядков ниже, чем для нестойких. Стойкость окисла сильно зависит от условий обработки: например, высокотемпературный отжиг может увеличить количество кислородных вакансий. Увеличение количества водорода в процессе обработки также уменьшает стойкость окисла, о чем подробно говорится ниже.

В процессе поляронных перескоков или по мере захвата дырок вблизи поверхности раздела Si/SiO_2 могут высвобождаться ионы водорода (протоны) (перескок — медленный и локализованный по своей природе процесс, поэтому вероятность таких химических эффектов увеличивается). Ионы водорода, оказавшиеся у поверхности раздела, могут генерировать поверхностные ловушки. Протоны фактически способны реагировать с водородно-пассивированными оборванными (свободными) связями на границе раздела, в результате чего оборванная связь действует как поверхностная ловушка. Поверхностные ловушки могут быстро обмениваться носителями заряда с каналом и могут быть либо заполненными, либо пустыми в зависимости от положения уровня Ферми. Поверхностные состояния амфотерны: они могут быть либо донорами (положительные, когда пустые; нейтральные, когда заряжены), либо акцепторами (нейтральные, когда пустые; отрицательные, когда заряжены) в зависимости от их положения относительно середины запрещенной зоны. Ловушки ниже середины запрещенной зоны преимущественно относятся к первому типу, ловушки выше середины запрещенной зоны относятся ко второму типу. Процесс формирования поверхностных ловушек происходит значительно медленнее, чем нарастание захваченного заряда, но при этом обладает аналогичной зависимостью от электрического поля. Для созданных на поверхности раздела ловушек могут потребоваться тысячи секунд с момента воздействия ионизирующего излучения до момента насыщения.

Подобное сходство зависимости поля от нарастания заряда в окисных ловушках и зависимости поля от формирования поверхностных ловушек говорит о том, что оба эти механизма связаны с переносом и захватом дырок вблизи границы раздела Si/SiO_2 . Что касается микроскопической природы этих дефектов,

то измерения, выполненные с помощью ЭПР, показали, что под воздействием радиации образуются Pb-центры — трехвалентный центр на поверхности раздела Si/SiO₂, связанный с тремя атомами Si со свободной орбиталью, перпендикулярной к этой поверхности раздела.

Отжиг заряда в окисных ловушках начинается незамедлительно и происходит под действием туннельных или термических процессов. Действительно, захваченный заряд может быть нейтрализован электронами, термически возбужденными из валентной зоны, и в этом случае вероятность этих процессов напрямую связана с температурой и энергетической глубиной ловушек, при этом чем выше температура и меньше глубина ловушек, тем быстрее происходит отжиг. С другой стороны, захваченный заряд может быть нейтрализован электронами, туннелирующими через оксидный барьер; в этом втором случае процесс зависит от расстояния туннелирования и пространственного положения энергии ловушки, при этом чем тоньше потенциальные барьеры (т.е. ловушки расположены ближе к границе раздела), тем быстрее происходит отжиг. Безусловно, основную роль в определении формы барьера и направления движения носителей заряда играет приложенное смещение.

Напротив, при комнатной температуре отжига поверхностных ловушек не происходит. Для восстановления нарушенных связей требуется более высокая температура. Поэтому в условиях, для которых характерна низкая мощность дозы излучения (например в космосе), поверхностные ловушки могут играть ключевую роль.

Механизмы нарастания захваченного заряда, формирования поверхностных состояний и отжига не носят мгновенный характер, а имеют строгую временную зависимость. Эта зависимость может стать причиной кажущихся дозовых эффектов (например, излучение может оказывать различное воздействие в зависимости от мощности дозы радиационного воздействия). При высокой мощности дозы и кратковременном воздействии отжиг заряда в окисных ловушках минимален, одновременно с этим ряд поверхностных ловушек не успевают достичь своего насыщения: в результате влияние захваченного заряда преобладает над поверхностными состояниями. И, наоборот, при низкой мощности дозы и длительном воздействии преобладают поверхностные ловушки. Тем не менее ключевым моментом является то, что если у захваченного заряда будет столько же времени для отжига, сколько у поверхностных ловушек для насыщения, то эффекты не будут зависеть от мощности дозы. Благодаря этому испытания МОП-транзисторов на стойкость к ИИ могут проводиться при высокой мощности дозы излучения, что позволяет значительно сократить продолжительность испытаний. При этом если после облучения следует отжиг при умеренной температуре, то реакция устройства на облучение будет сопоставима с реакцией, характерной для среды с низкой мощностью дозы. В настоящее время подобные методы ускоренных испытаний

разрабатываются также и для биполярных приборов, где, как мы увидим, ситуация значительно осложняется истинными дозовыми эффектами.

1.3.1. МОП-транзисторы (MOSFET)

Захват положительного заряда и генерация поверхностных состояний могут существенно повлиять на функционирование МОП-транзистора [10, 11]. Это продемонстрировано на рис. 1.4, где характеристика I_d-V_{gs} для n-канального МОП-транзистора с толстым подзатворным окислом изображена до и после воздействия полной дозы ионизации.

Как видно из графиков, влияние захвата положительного заряда в подзатворном окисле заключается в уменьшении порогового напряжения (т.е. резкого сдвига кривой I_d-V_{gs} в сторону более низких значений V_{gs}). С другой стороны, формирование поверхностных состояний снижает как пороговое напряжение (изменяя подпороговый размах напряжения), так и подвижность носителей заряда (путем добавления кулоновских центров рассеяния). Подобное поведение, показанное на рис. 1.4, характерно для устройств с толстым подзатворным окислом (>10 нм), таких как мощные МОП-транзисторы, в которых всего несколько крад (Si) могут спровоцировать серьезные изменения. Транзисторы с ультратонким подзатворным окислом реагируют на TID иначе, о чем подробно рассказывается ниже.

Положительный захваченный заряд и поверхностные состояния оказывают аддитивное (совокупное) воздействие на p-канальные МОП-транзисторы (рис. 1.4), т.к. оба этих фактора стремятся сдвинуть характеристику I_d-V_{gs} в сторону более высоких значений V_{gs} . В то же время в n-канальных МОП-транзисторах эти эффекты стремятся нейтрализовать друг друга. Это является причиной rebound-эффекта: из-за разных временных констант нарастания заряда и формирования поверхностных состояний пороговое напряжение под

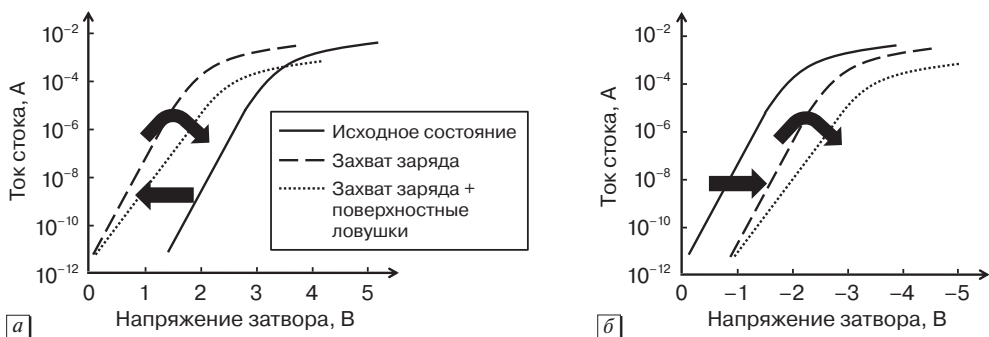


Рис. 1.4. Влияние захвата заряда и формирования поверхностных состояний на I_d-V_{gs} характеристику n-канальных (а) и p-канальных (б) МОП-транзисторов

воздействием ИИ сначала увеличивается, а затем уменьшается. Высвобождение и нейтрализация захваченного положительного заряда способствуют тому, что поверхностные ловушки играют более важную роль в средах с низкой мощностью дозы излучения (например в космосе), чем в средах с высокой мощностью дозы.

Фликер-шум, также известный как низкочастотный шум или НЧ-шум (LFN), также зависит от воздействия TID. НЧ-шум возникает в результате захвата и освобождения заряда из ловушек в центре дефектов, локализованных в подзатворном окисле, количество которых может увеличиваться под воздействием ИИ, что приводит к колебаниям плотности и подвижности носителей заряда.

Технологический прогресс, в частности уменьшение толщины подзатворного окисла, положительно сказывается на решении проблем, связанных с полной дозой ионизации в низковольтной КМОП-электронике. По мере уменьшения толщины окисла последовательно снижается количество эффектов и захвата заряда, а также тяжесть их последствий. Следующая формула применима при низких дозах и относительно толстых окислах и выражает зависимость сдвига порогового напряжения от толщины окисла:

$$\Delta V_T = -\frac{Q_{ox}}{C_{ox}} \propto t_{ox}^2.$$

Захваченный заряд Q_{ox} пропорционален квадрату толщины окисла t_{ox} . Тенденция к снижению захвата заряда наиболее ярко проявляется для ультратонких подзатворных окислов ($t_{ox} < 10$ нм), т. к. в этом случае электроны могут более легко туннелировать из канала или затвора в окисел и нейтрализовывать захваченные дырки. Толщина кремниевых подзатворных оксидов в самых современных низковольтных МОП-транзисторах составляет всего 1–2 нм, поэтому ни нарастание заряда в оксидной ловушке, ни возникновение ловушек на поверхности раздела не представляют угрозы даже при высоких значениях полной дозы ионизации.

К сожалению, у уменьшения толщины подзатворного окисла есть свои недостатки. Радиационно-индуцированный ток утечки (RILC — radiation-induced leakage current) представляет собой рост утечки через подзатворный оксид после воздействия частиц с низкой ионизирующей способностью (гамма-излучение, электроны, рентгеновские лучи). RILC линейно зависит от полученной суммарной дозы и от приложенного смещения (следовательно, электрического поля в подзатворном оксиде) в процессе облучения. Это явление объясняется неупругим туннелированием с помощью ловушек через изолирующий слой затвора. RILC не представляет угрозы в логических схемах, где он может вызвать лишь рост потребляемой мощности, но может критически отразиться на флеш-памяти, принцип работы которой основан на хранении заряда на электрически

изолированном электроде (плавающем затворе). Для флеш-устройств потеря заряда из-за радиационно-индуцированного тока утечки (RILC) может привести к ухудшению характеристик хранения данных в ячейке памяти.

В современных низковольтных МОП-транзисторах проявление TID-эффектов связано с LOCOS-структурой боковой изоляции (LOCAl Oxidation of Silicon — локальное окисления кремния) в устройствах, выполненных по более старой технологии, а также изоляцией типа STI (Shallow Trench Isolation — изоляция мелкими канавками) в устройствах последнего поколения. Помимо того что эти изолирующие слои достаточно толстые (100–1000 нм), а следовательно, склонны к захвату заряда, они, как правило, получены методом осаждения (а не термически выращены, как и в случае с подзатворными оксидами). Другими словами, качество этих оксидов ниже, чем подзатворных, что означает, что они более подвержены TID-эффектам.

Эффект захвата положительного заряда в STI после воздействия полной дозы ионизирующего излучения в современном низковольтном транзисторе изображен на рис. 1.5. Ток стока МОП-транзистора можно рассматривать как суперпозицию тока основного МОП-транзистора и двух паразитных МОП-транзисторов с общим затвором и каналом с основным транзистором, роль

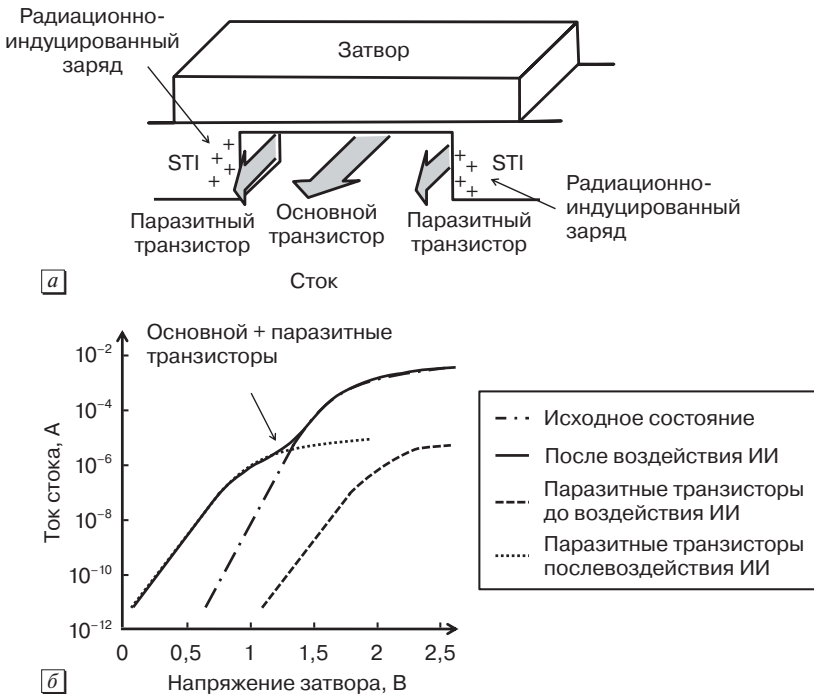


Рис. 1.5. Схематическое изображение паразитных транзисторов, образованных STI-изоляцией (а), и эффекты их возникновения, индуцированные воздействием полной дозы ионизации (TID) (б)

подзатворного оксида в которых играет боковая изоляция (рис. 1.5а). При нормальном рабочем напряжении эти паразитные транзисторы находятся в неактивном состоянии, однако из-за наличия захваченного положительного заряда в боковой изоляции их пороговое напряжение может снизиться и они могут начать проводить ток параллельно основному транзистору (рис. 1.5б). Эти эффекты проявляются только в *p*-канальных МОП-транзисторах (из-за наличия радиационно-индуцированных пороговых сдвигов) и наиболее проявляются, когда на STI-изоляцию действует сильное электрическое поле.

В дополнение к утечке внутри прибора может также возникнуть утечка между соседними приборами. Канал протекания тока может быть сформирован между соседними транзисторами, когда захват заряда в изоляции вызывает инверсию лежащей ниже области. Это может привести к резкому увеличению энергопотребления схемы в статическом режиме.

За последнее десятилетие был предложен ряд инноваций для преодоления ограничений, описанных законом Мура. В *p*-канальных МОП-транзисторах в отношении подзатворного оксида стали применять нитрирование для предотвращения проникновения атомов бора из поликремниевого затвора. Интересен тот факт, что после нитрирования окислы демонстрируют повышенную радиационную стойкость по сравнению со стандартными окислами. Это обусловлено барьерным эффектом, создаваемым слоем азота, который препятствует проникновению водорода, что, в свою очередь, благотворно сказывается на снижении образования поверхностных ловушек.

Ограничения, связанные с тем, что стандартные подзатворные оксиды SiO_2 невозможно сделать намного тоньше 2 нм из-за чрезмерной утечки, удалось преодолеть благодаря использованию материалов с высокой диэлектрической проницаемостью (*high-k*), как, например, оксид гафния, который был внедрен в коммерческое производство начиная с 45-нм техпроцесса. Это положительно сказалось на решении проблемы нежелательных токов утечки с управляющего электрода благодаря использованию более толстых слоев, которые из-за своей высокой диэлектрической проницаемости не оказывают отрицательного влияния на управление каналом. Как уже упоминалось, чем толще оксид, тем серьезнее последствия TID-эффектов. В конденсаторах на основе оксида гафния (HfO_2) во время облучения толстых окислов рентгеновскими лучами наблюдался значительный радиационно-индуцированный захват заряда. Тем не менее захват заряда в более тонких современных окислах, подходящих для внедрения в передовые технологии, представляется менее критичным.

Технология «кремний на изоляторе» (КНИ) с недавних пор стала применяться в массовом производстве, в то время как всего несколько лет назад ее использовали исключительно в узкоспециализированных отраслях, как, например, рынок радиационно стойких изделий. Преимущества данной технологии

с точки зрения радиационной стойкости в части одиночных эффектов нивелируются недостатками, связанными с чувствительностью к TID. Фактически захват положительного заряда и генерация поверхностных состояний в толстом скрытом окисле (BOX — buried oxide) приводят к образованию токов утечки в частично обедненных устройствах и изменению характеристик переднего затвора в полностью обедненных МОП-транзисторах из-за формирования связей между передним и задним каналом.

1.3.2. Биполярные приборы

Полная доза также влияет на биполярные плоскостные транзисторы (BJT — bipolar junction transistor). Снижение коэффициента усиления по току совместно с утечкой типа коллектор — эмиттер и устройство — устройство являются наиболее критичными эффектами [12, 13].

Деградация этих параметров в основном связана с радиационно-индуцированной деградацией пассивирующих и изоляционных окислов, особенно когда они расположены вблизи критических областей устройства. Сила этих эффектов напрямую зависит от типа биполярного транзистора (вертикальный, латеральный, подложечный и т.д.): вертикальные p-n-p-транзисторы менее чувствительны к TID-эффектам, чем другие, в то время как латеральные являются одними из наиболее чувствительных.

На рис. 1.6 изображена деградация коэффициента усиления по току биполярного прибора под воздействием полной дозы ионизации. Для данного напряжения база — эмиттер ток базы растет с накоплением дозы, тогда как ток коллектора остается практически неизменным, чем объясняется снижение коэффициента усиления с ростом TID. Давайте подробно рассмотрим базовый ток в n-p-n-транзисторе, который можно представить как сумму трех составляющих:

- 1) обратная инжекция дырок из базы в эмиттер,
- 2) рекомбинация дырок в обедненной области перехода эмиттер — база,
- 3) рекомбинация дырок в нейтральной базе.

В необлученном приборе наибольшее влияние оказывает составляющая номер 1. Под воздействием TID влияние второй составляющей начинает расти и в конечном счете начинает доминировать за счет роста скорости поверхностной рекомбинации и увеличения ширины обедненной области эмиттер — база на поверхности.

Причиной роста скорости рекомбинации является формирование поверхностных ловушек на поверхности обедненной области перехода база — эмиттер. Ловушки, расположенные в центре запрещенной зоны, являются очень эффективными центрами рекомбинаций, способными обмениваться носителями заряда между валентной зоной и зоной проводимости. Кроме того, в биполярных

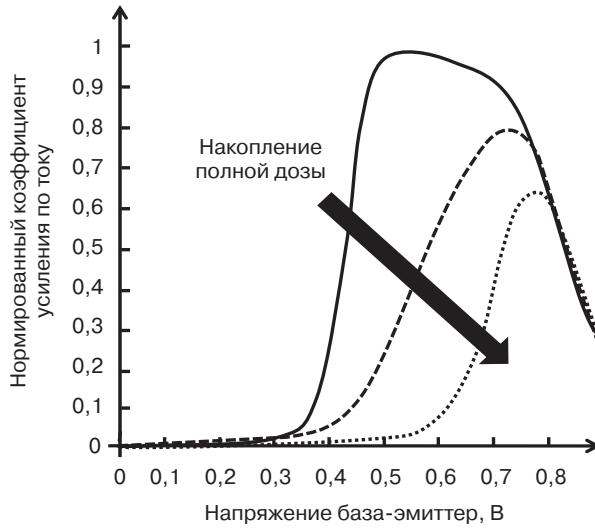


Рис. 1.6. Дegrадация коэффициента усиления по току биполярного транзистора под воздействием полной дозы ионизации

приборах p-n-p-типа суммарный положительный заряд, захваченный в окислах после полной дозы облучения, ведет к росту обедненной области базы с дальнейшим увеличением рекомбинаций. И, наоборот, в латеральных p-n-p-структурах положительный заряд, захваченный в пассивирующем окисле, снижает рекомбинации в базе (в то время как формирование поверхностных ловушек увеличивает скорость поверхностной рекомбинации). Вертикальные p-n-p-структуры более устойчивы с точки зрения радиационного воздействия, так как положительный захваченный заряд способствует накоплению базы n-типа и слабому обеднению сильнолегированного эмиттера p-типа, что ведет к уменьшению размера обедненной области эмиттер — база, уменьшая тем самым рекомбинацию.

Эффект низкой интенсивности (ELDRS) — аномальное явление, которое наблюдается во многих биполярных приборах и состоит в том, что при низкой мощности дозы излучения деградация сильнее, чем при высокой мощности дозы. Это значит, что в отличие от технологии МОП эффекты полной дозы в биполярных приборах напрямую зависят от мощности дозы. ELDRS существенно затрудняет интерпретацию результатов радиационных испытаний и их экстраполяцию на условия эксплуатации. Для космического пространства характерна низкая мощность дозы излучения (как правило, интенсивности находятся в пределах мрад(SiO_2)/с), в то время как лабораторные испытания проводятся при высоких интенсивностях (для экономии времени, как правило, более 10 рад(SiO_2)/с). В результате существует риск недооценить деградацию в условиях космического пространства. Это проиллюстрировано на рис. 1.7, где зависимость деградации нормированного коэффициента усиления по току

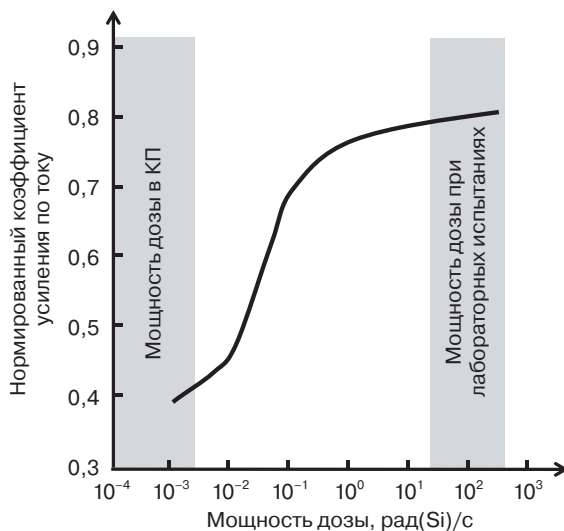


Рис. 1.7. Зависимость деградации коэффициента усиления по току в биполярных приборах от мощности дозы под воздействием TID вследствие ELDRS. (На основе работы H. L. Hughes and J. M. Benedetto, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 50. No. 3, p. 500, June 2003)

биполярного прибора представлена как функция мощности дозы. Как видно на графике, деградация при мощностях дозы, характерных для космического пространства, в два раза превышает деградацию, наблюдаемую при ускоренных лабораторных испытаниях.

В литературе предлагаются несколько моделей касательно физического происхождения эффекта ELDRS. Согласно модели пространственного заряда пониженная деградация при высокой мощности дозы обусловлена большим количеством генерируемого положительного заряда, который выступает в качестве барьера для дырок и водорода, мигрирующих к границе раздела. Другая модель объясняет эффект ELDRS конкуренцией между захватом и рекомбинацией радиационно-индуцированных носителей заряда из-за электронных ловушек: при низкой мощности дозы количество свободных носителей заряда в валентной зоне и зоне проводимости небольшое, следовательно, преобладает захват; при высокой мощности дозы плотность свободных носителей заряда выше, следовательно, рекомбинация выходит на передний план.

1.4. Структурные повреждения (DD)

Структурные повреждения (DD — Displacement damage) связаны со смещением атомов кристаллической решетки материала мишени падающими частицами за счет кулоновских взаимодействий и ядерных реакций с ядрами материала.

DD могут наблюдаться при воздействии высокоэнергетических нейтронов, протонов, тяжелых заряженных частиц, электронов и фотонов (косвенно).

Из-за смещения создаются вакансии в кристаллической решетке и междоузельные дефекты в промежуточном пространстве между узлами решетки. Совокупность вакансии и междоузельного дефекта называется дефектом по Френкелю. Отжиг после образования дефекта по Френкелю ведет к рекомбинации (т.е. пара исчезает) или (значительно реже) к созданию более стабильных дефектов. Способность высокоэнергетической частицы создавать структурные повреждения характеризуется коэффициентом неионизирующих потерь энергии (NIEL — nonionizing energy loss). NIEL дает количественное представление о потере энергии падающей частицы на единицу длины через неионизирующие процессы.

В результате DD возможны различные варианты расположения дефектов в зависимости от характеристик падающего излучения (энергии и т.п.): либо точечные изолированные дефекты (образованные, например, электронами в 1 МэВ), либо кластеры — группы дефектов, расположенные близко друг к другу (например генерируемые нейтронами с энергией 1 МэВ). Так, в случае с нейтронами и протонами основное повреждение связано со смещением первого атома (так называемого первично выбитого атома — ПВА). Если энергия ПВА выше определенного порога, то ПВА способен сместить вторично выбитые атомы (ВВА), которые, в свою очередь, генерируют новые дефекты, образуя кластеры. На рис. 1.8 показан рост групп дефектов в зависимости от энергии протонов (нижняя ось) и энергии ПВА (верхняя ось).

Дефекты кристаллической решетки нестабильны во времени. Вакансии перемещаются по решетке до тех пор, пока не стабилизируются либо вследствие

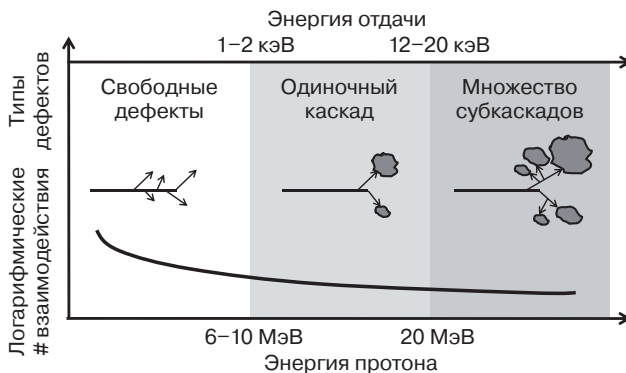


Рис. 1.8. Типы дефектов и количество взаимодействий, обусловленных неионизирующими процессами, в зависимости от энергии падающего протона или, что эквивалентно, энергии отдачи вторично выбитого атома. (На основе работы R. L. Pease, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 50. No. 3, p. 539, June 2003)

рекомбинации вскоре после появления (это происходит с вероятностью более 90 %), либо вследствие преобразования в другие виды дефектов. К наиболее стабильным дефектам относятся дивакансии (сформированные двумя расположенными рядом вакансиями) или комплексы примесь — дефект (вакансия и примесь, близко расположенные друг к другу). Возможны как кратковременный отжиг, который длится не более часа после облучения, так и длительный, который продолжается на протяжении нескольких лет. Оба этих процесса, как правило, ускоряются при повышенной температуре и наличии высокой плотности свободных носителей заряда. В большинстве случаев наблюдается прямой отжиг, но также возможен и обратный отжиг (усиление деградации).

Номинально идентичные приборы, облученные разными частицами, могут проявлять разные особенности, например отсутствие зависимости от типа примесей и концентрации кислорода в образцах, облученных нейтронами деления, или строгая зависимость в образцах, облученных электронами.

Различия между двумя выборками облученных образцов объясняются образованием кластеров дефектов в одном случае и изолированных точечных дефектов — в другом. Считается, что кластеры более эффективны по сравнению с точечными дефектами с точки зрения снижения рекомбинационного времени жизни для заданного общего числа дефектов. Действительно, кластеры усиливают рекомбинацию, создавая потенциальную яму, в которой рекомбинируют неосновные носители. Кроме того, формирование дивакансий с большей долей вероятности происходит с кластерами из-за непосредственной близости дефектов и преобладает над примесными дефектами. Что касается точечных дефектов, то усиления рекомбинации в данном случае не наблюдается, а дивакансии и примесные дефекты в равной степени играют важную роль.

Несмотря на то что кластерные модели оказались весьма удачными, они не до конца согласуются с результатами, полученными на основе концепции NIEL. NIEL используется для корреляции повреждений, полученных разными частицами. Он представляет собой сумму упругих (кулоновских и атомных) и неупругих взаимодействий, которые отвечают за образование начальных дефектов по Френкелю и фотонов. Его можно рассчитать аналитическим методом на основе базовых принципов, используя сечения и кинематику. За многие годы расчеты были усовершенствованы, и, несмотря на некоторые недостатки, данный подход является перспективным, т. к. позволяет сократить количество испытаний путем экстраполяции результатов, полученных для одной частицы определенной энергии на разные условия. Основная идея заключается в том, что число электрически активных стабильных дефектов, которые приводят к деградации параметров, масштабируется с количеством энергии, выделенной через неионизационные потери энергии. Некоторые экспериментальные данные подтверждают данную теорию. На основе полученных результатов можно

сделать много выводов. Поскольку NIEL и повреждения пропорциональны, мы можем сделать вывод, что количество генерируемых дефектов, переживших рекомбинацию, не зависит от энергии ПВА. Кроме того, следует исходить из того, что радиационно-индуцированные дефекты одинаково влияют на параметры устройства и имеют одинаковые характеристики (с точки зрения энергетических уровней) независимо от начальной энергии ПВА и пространственного распределения (изолированных дефектов относительно кластеров). Несмотря на то что данные соображения не предполагают обязательного использования кластерных моделей для анализа экспериментальных данных, бывают случаи, когда между NIEL и дефектом нет прямой зависимости (например при энергиях частиц, близких к минимальным, но достаточных для того, чтобы сместить атомы из решетки), поэтому необходимо продолжить разработку комплексного подхода к анализу структурных повреждений.

Структурные повреждения ведут к деградации всех устройств, которые зависят от объемных свойств полупроводников, как, например, биполярные транзисторы и солнечные элементы. В качестве примера мы рассмотрим эффекты структурных повреждений в приборах с зарядовой связью (CCD — charge-coupled devices).

1.4.1. Приборы с зарядовой связью (CCD)

Структурные повреждения создают два основных эффекта в CCD [15]: радиационно-индуцированный темновой ток, приводящий, в частности, к появлению горячих пикселей и деградации эффективности переноса заряда (СТЕ — charge transfer efficiency). Темновой ток (или ток утечки) объясняется появлением радиационно-индуцированных дефектов в объеме кремния внутри обедненной области вследствие DD, что ведет к росту энергетических уровней вблизи запрещенной зоны и тепловой генерации носителей зарядов.

Генерация темнового тока в CCD протекает следующим образом. Первая энергетическая частица при попадании в матрицу индуцирует структурные повреждения и темновой ток в одном пикселе. По мере того как все больше частиц проникает в матрицу, повреждается все больше пикселей. На момент, когда флюенс частиц достигает достаточно высокого уровня, в каждый пиксель попадет уже более одной частицы. В этом случае в CCD наблюдается рост темнового тока во всех пикселях. После этого происходит распределение темновых токов по этим пикселям с помощью хвоста, который включает в себя множественные события или события, которые создают темновые токи намного выше среднего значения. Пиксели в хвосте обычно называют горячими пикселями или импульсами темнового тока.

Вторым основным эффектом DD в CCD является деградация эффективности переноса заряда (СТЕ). Это приводит к потере сигнального заряда во время

процессов переноса. Для выражения снижения СТЕ в литературе обычно используется понятие неэффективности переноса заряда (СТІ — charge transfer inefficiency) ($СТІ = 1 - СТЕ$). Радиационно-индуцированная СТІ в облучаемой ССD линейно возрастает с падающим флюенсом частиц и пропорциональна накопленной дозе структурных повреждений. Механизм, лежащий в основе данного явления, заключается во внесении падающим излучением временных центров захвата в запрещенную энергетическую зону. Эти центры способны захватывать заряд, расположенный в скрытом канале, что приводит к уменьшению отношения сигнал/шум. СТЕ деградация в облучаемых ССD-приборах зависит от многих параметров, таких как тактовая частота, уровень фонового заряда, уровень основного заряда, температура облучения, температура измерения.

1.5. Одиночные радиационные эффекты

Одиночные радиационные эффекты (SEE — single event effects) вызваны прохождением одиночной высокоэнергетической ионизирующей частицы (тяжелая заряженная частица — ТЗЧ) через чувствительные области микроэлектронных приборов. В зависимости от последствий, которые несет SEE, его можно классифицировать как обратимый или «мягкий» (когда нет необратимых повреждений, а лишь потеря информации, например, в регистре памяти) или как катастрофический или «жесткий» (когда возникают необратимые физические повреждения, например пробой подзатворного диэлектрика). Некоторые другие SEE, как, например, одиночное событие радиационного защелкивания, также называемое тиристорным эффектом (SEL — single event latch-up) могут как оказывать, так и не оказывать разрушительного воздействия в зависимости от того, как быстро будет прекращена подача электропитания с момента возникновения события.

В отличие от обсуждаемых нами в предыдущих разделах TID и DD, которые носят кумулятивный (накопительный) характер и накапливаются с течением времени, SEE могут возникать в микроэлектронных приборах стохастически (случайно) в любой момент времени. SEE относятся к эффектам с коротким временным откликом (<наносекунд), и только незначительная часть устройства, соответствующая месту попадания частицы, подвергается воздействию (~несколько десятков нанометров).

Ниже следует перечень и краткое описание основных видов SEE [16, 17].

- *Обратимые («мягкие») сбои (неразрушающие)*

Одиночный сбой (SEU — single-event upset) — повреждение одного бита памяти одиночной ионизирующей частицей. Также известен как мягкий

сбой. Корректное логическое значение, как правило, может быть восстановлено простой перезаписью бита.

Многократный сбой (MBU — multiple bit upset) — повреждение двух или более соседних битов из-за прохождения одиночной частицы.

Переходная ионизационная реакция (SET — Single-event transient) — переходный ток/напряжение, индуцированные ионизирующей частицей в комбинационной или аналоговой части схемы. Радиационно-индуцированный переходный процесс может распространяться и фиксироваться в элементе памяти, что приводит к мягким сбоям.

Функциональное прерывание (SEFI — Single event functional interrupt) — нарушения в работе управляющего конечного автомата микросхемы, приводящие к функциональным прерываниям. В зависимости от типа прерывания SEFI можно устранить путем повтора операции, сбросом в исходное состояние или выключением и повторным включением устройства.

- *Необратимые («жесткие») отказы (разрушающие)*

Пробой подзатворного диэлектрика (SEGR — Single event gate rupture) — необратимый пробой подзатворного оксида, чаще всего возникающий в мощных МОП-транзисторах.

Вторичный пробой (SEB — Single event burnout) — выгорание силового прибора вследствие активации паразитных биполярных структур, возникающее, например, в IGBT- и мощных МОП-транзисторах.

- *Эффекты, которые могут быть как разрушающими, так и нет*

Тиристорный эффект (SEL — Single event latch-up): радиационно-индуцированная активация паразитных биполярных структур, присущих КМОП-структурам, которая приводит к резкому увеличению тока питания.

Возникновение паразитного n-p-n-транзистора в n-канале (эффект вторичного пробоя) (SES — Single event snapback): механизм положительной обратной связи, поддерживаемый ударной ионизацией, протекающий в приборах на основе КНИ-технологии (кремний на изоляторе).

Самой важной количественной характеристикой для SEE является частота возникновения (т.е. сколько событий происходит за час/день/год) при определенных условиях. Для характеристики SEE без привязки к конкретным условиям используется понятие сечения (σ), определяемое как количество наблюдаемых событий, поделенное на флюенс частиц, падающих на устройство. Сечение представляет собой функцию линейной передачи энергии (ЛПЭ) падающей частицы, которая количественно характеризует потери энергии на единицу длины (т.е. способность частицы ионизировать материал, через который она проходит). ЛПЭ, как правило, нормируется по плотности материала мишени и измеряется в $\text{МэВ}\cdot\text{мг}^{-1}\cdot\text{см}^2$; σ увеличивается с ростом ЛПЭ и, как правило,

подчиняется кумулятивному распределению вероятности Вейбулла. Кривая зависимости σ от ЛПЭ характеризуется двумя основными параметрами — пороговым ЛПЭ (т.е. минимальным значением ЛПЭ, способным генерировать одиночные эффекты) и ЛПЭ насыщения (ЛПЭ, при котором сечение насыщается). Пороговое ЛПЭ обычно связано с понятием критического заряда, то есть минимальным объемом накопленного заряда в определенном узле схемы, необходимого для возникновения события.

SEE могут быть сгенерированы не только посредством прямой ионизации (например ТЗЧ), но и через косвенную ионизацию. Нейтроны и протоны, например, могут генерировать вторичные частицы через ядерные взаимодействия, а уже эти частицы в свою очередь, — инициировать нежелательные эффекты. В изделиях, изготовленных на основе последних технологий, наблюдается тенденция к снижению ЛПЭ частиц, способных генерировать SEE, также недавно был зафиксирован SEU от прямой ионизации протоном. Ячейки и регистры статической памяти с произвольным доступом (SRAM — static random access memory) в цифровых схемах являются наиболее чувствительными элементами памяти к SEU- и MBU-эффектам. Ячейки динамической памяти с произвольным доступом (DRAM — Dynamic random access memory) довольно устойчивы к сбоям благодаря благоприятному влиянию эффекта масштабирования, за счет которого уменьшилась площадь ячейки, с сохранением емкости при соответствующем уровне. Ячейки с плавающим затвором в свое время считались невосприимчивыми к SEE, но с недавних пор стали чувствительными в результате агрессивного масштабирования. SET представляют проблему в схемах, работающих на гигагерцевых частотах, где высокая скорость тактовых сигналов существенно увеличивает вероятность защелкивания радиационно-индуцированных переходных процессов. SEFI встречаются во всех схемах (ПЛИС — программируемых логических интегральных схемах, микроконтроллерах, флеш), кроме самых простых.

Ниже в качестве примера будут приведены эффекты SEU в SRAM.

1.5.1. Одиночные сбои (SEU) в 3У SRAM

В данном разделе мы рассмотрим один из самых распространенных видов одиночных эффектов в ячейке запоминающего устройства (ЗУ) типа SRAM — SEU [16–19]. SRAM строго подчиняются закону Мура и были взяты за основу для изучения технологии на предмет чувствительности к мягким сбоям.

Как правило, чтобы спровоцировать сбой, заряд, сгенерированный ионизирующей частицей, должен накопиться в чувствительной области схемы. Обратносмещенные p-n-переходы относятся к числу наиболее эффективных областей с точки зрения накопления заряда благодаря большой обедненной области и высокому электрическому полю. На рис. 1.9 схематически изображен сбой в ячейке SRAM. Ионизирующая частица попадает в один из обратносмещенных стоковых

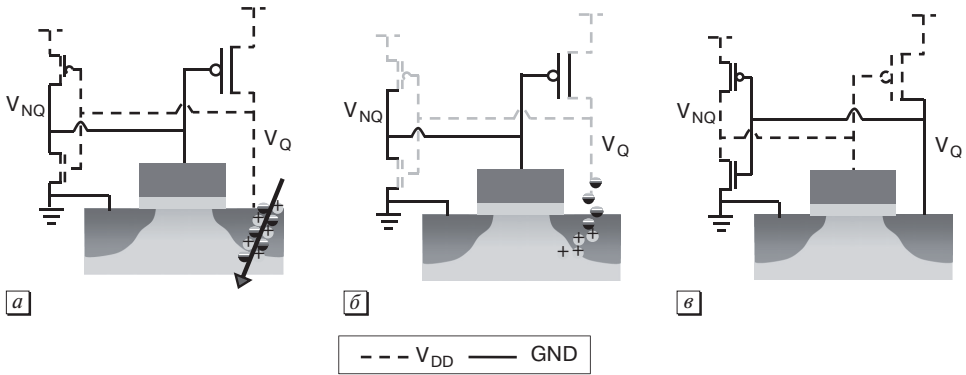


Рис. 1.9. SEU в ячейке памяти SRAM: а) ТЗЧ попадает в сток закрытого N-канального МОП-транзистора, б) накопление заряда и падение напряжения на V_Q , в) срабатывание механизма обратной связи и появление SEU

переходов, например в сток закрытого N-канального МОП-транзистора в паре перекрестно-связанных инверторов в ячейке (см. рис. 1.9). В результате генерируются электронно-дырочные пары, которые накапливаются в обедненной области стокового перехода. Это приводит к появлению переходного тока, протекающего через пораженный частицей p-n-переход, в то время как восстанавливающий транзистор (открытая P-канальная МОП-структура в том же инверторе) подает ток, пытаясь сбалансировать ток, индуцированный попаданием частицы. Однако, т. к. восстанавливающая P-канальная МОП-структура имеет ограничения по поддержанию тока и конечную проводимость канала, напряжение на пораженном частицей узле падает. Если напряжение опускается ниже порога переключения и при этом падение длится достаточно долго, то обратная связь заставляет ячейку изменить свое начальное логическое состояние, создавая SEU (инверсию битов).

На появление SEU влияют многие факторы: перенос излучения через задние слои до обратно-смещенного перехода, выделение и накопление заряда. Помимо этого, первостепенное значение имеет отклик схемы.

Выделение заряда главным образом определяется ЛПЭ ионизирующей частицы (очевидно, что чем больше ЛПЭ, тем больше величина выделенного заряда). На количество накопленного заряда влияет также угол падения ионов: чем больше угол по отношению к нормальному падению, тем больше собранный заряд. Эффективная ЛПЭ падающей частицы обратно пропорциональна косинусу угла падения. Однако это справедливо только для достаточно тонких чувствительных объемов.

Давайте подробнее обсудим сбор заряда. На рис. 1.10 схематически изображены изменения во времени в процессе генерации и сбора заряда в обратном смещенном p-n-переходе. Сразу после попадания частицы создается трек

электронно-дырочных пар, проходящий через обедненную область (рис. 1.10а). Электрическое поле разделяет пары e-h и приводит к появлению дрейфового тока. Поскольку трек имеет высокую проводимость, он создает искажение в контактной разности потенциалов, продлевая силовые линии вглубь подложки (рис. 1.10б). Из-за формы силовых линий данное явление называется эффектом «воронки». За счет этого явления увеличивается область, где из-за дрейфа может собираться заряд, и тем самым повышается чувствительность к SEU. Однако эффект воронки играет значительную роль в сборе заряда только в переходах с фиксированным смещением, оказывая при этом меньшее влияние в схемах, где смещение перехода может меняться (например ячейках SRAM). Наконец, когда первая фаза, в которой преобладает дрейф носителей в обедненной области, завершается, диффузия носителей вокруг перехода по-прежнему поддерживает ток (хотя и меньшей величины) через пораженный узел. Фактически заряд, находящийся от области дрейфа ближе, чем диффузионная длина, может быть собран переходом (рис. 1.10в). Иными словами, после того как заряд генерируется падающей частицей, дрейф и воронка определяют форму переходного тока на начальном этапе, а более медленный процесс диффузии доминирует в реакции на поздних этапах.

Механизм сбора заряда может быть даже более сложным для глубоко масштабированных схем. Эффект проникновения альфа-частиц в область между стоком и истоком (ALPEN — alpha-particle source-drain penetration) может происходить из-за скользящего падения альфа-частиц в область стока и истока транзистора. Это может вызвать помехи в потенциале канала и привести к включению выключенного устройства.

С уменьшением размера транзисторов паразитные биполярные эффекты могут усиливать сбор заряда. Это происходит, когда электронно-дырочные пары образуются внутри кармана ионизирующей частицей и потенциал самого кармана изменяется. Например, если N-канальный МОП-транзистор расположен в P-кармане внутри N-подложки, генерируемые носители заряда могут

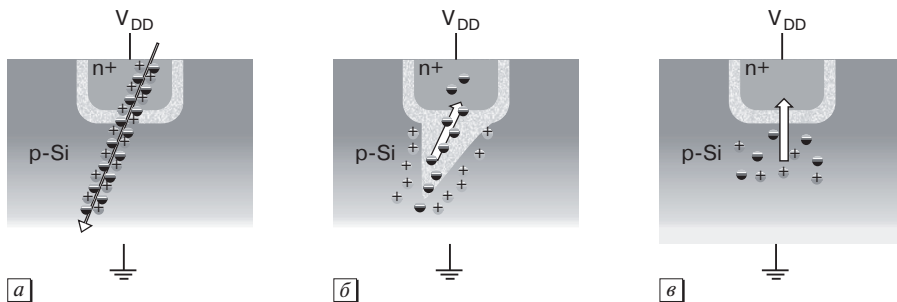


Рис. 1.10. Схематическое изображение этапов процесса генерации (а) и сбора (дрейф (б) и диффузия (в)) заряда после попадания иона в обратносмещенный p-n-переход

собираются как на переходе сток/карман, так и на переходе карман/подложка. Переход исток/карман становится прямосмещенным благодаря диффундирующим дыркам, которые повышают потенциал P-кармана. Биполярное усиление происходит в паразитной биполярной структуре (исток является эмиттером, карман — базой, сток — коллектором), увеличивая переходный ток в стоке и вероятность возникновения SEU.

Заключительным элементом является отклик схемы. Чем быстрее время срабатывания обратной связи в ячейке, тем короче длительность импульсов паразитного напряжения, способного инвертировать ячейку. Чем слабее восстанавливающий P-канальный МОП-транзистор, тем больше амплитуда напряжения импульса, вызванного попаданием частицы. Другими словами, более медленная ячейка и восстанавливающая P-канальная МОП-структура с высокой проводимостью снижают устойчивость к SEU.

MBU-эффекты, то есть повреждение нескольких битов памяти одной частицей, представляют серьезную проблему, которую необходимо учитывать при разработке схем коррекции ошибок и при масштабировании технологии (что и без того является сложной задачей). По мере того как физические размеры транзисторов уменьшаются до нескольких нанометров, размер облака электронно-дырочных пар, созданного падающими ионами, становится сравнимым с размерами самого прибора или даже больше него. В результате многочисленные узлы одновременно вовлекаются в процесс сбора заряда, при этом перераспределение заряда происходит между соседними узлами. Масштабирование привело к значительному увеличению многократных сбоев. На рис. 1.11 представлена частота мягких сбоев на бит (SER — soft error rate) и вероятность MBU как функция от размера элемента схемы для SRAM, облученных атмосферными нейтронами.

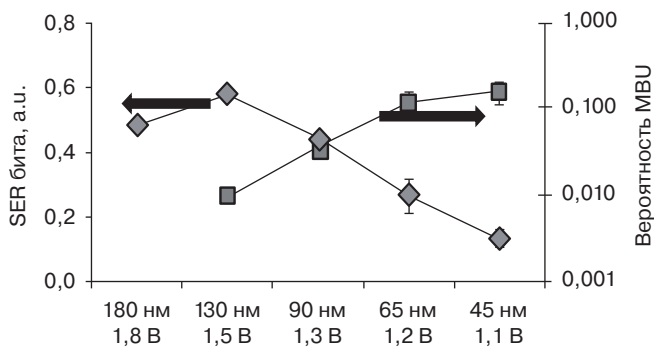


Рис. 1.11. SER бита и вероятность сбоев во множестве ячеек SRAM при попадании атмосферных нейтронов. (На основе работ N. Seifert, B. Gill, K. Foley, and P. Relangi, Proceedings of the IEEE International Reliability Physics Symposium [IRPS], 2008, p.181)

Как видно из графика, для данного производителя SER снижается при уменьшении топологического размера (несмотря на то что SER для всей системы остается более или менее постоянной из-за увеличивающегося количества элементов памяти в микросхеме), в то время как вероятность MBU монотонно возрастает (и это правило, справедливо для всех производителей).

Характерное сечение для ячеек SRAM при облучении нейтронами составляет $\sim 10^{-14}$ см², что для города Нью-Йорка (NYC) соответствует частоте случайных ошибок $\sim 10^{-13}$ ошибка/бит/час и $> 3 \cdot 10^{-11}$ ошибка/бит/час для высот функционирования коммерческих летательных аппаратов. В космосе частота ошибок варьируется в значительной степени в зависимости от конкретного ЗУ, орбиты и солнечного цикла.

1.6. Заключение

Атмосферные нейтроны и альфа-частицы, выделяемые радиоактивными веществами, ставят под угрозу работу микросхем, функционирующих на уровне моря. Бортовая радиоэлектронная аппаратура спутников и космических аппаратов вынуждена функционировать в условиях сильного ионизирующего излучения, источником которого служат радиационные пояса Земли, солнечная активность и галактические космические лучи.

Радиационные эффекты в электронике подразделяются на «мягкие» — обратимые сбои, при которых происходит потеря информации, но отсутствуют необратимые повреждения, и на параметрические сдвиги и катастрофические отказы. Их можно подразделить на следующие категории: эффекты накопления полной дозы ионизации, структурные повреждения и одиночные радиационные эффекты. Первые два класса относятся к кумулятивным и в основном встречаются в неблагоприятных условиях внешних воздействующих факторов естественного происхождения, например в космосе или при воздействии искусственной радиации; SEE также могут встречаться на уровне моря. При разработке критически важных проектов необходимо в обязательном порядке учитывать радиационные эффекты для обеспечения требуемых уровней надежности.

Список литературы

1. J. L. Barth, C. S. Dyer, and E. G. Stassinopoulos, Space, Atmospheric, and Terrestrial Radiation Environments, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 50. No. 3, p. 466, June 2003.
2. R. C. Baumann, Radiation-Induced Soft Errors in Advanced Semiconductor Technologies, IEEE Trans. Dev. Mat. Rel. Vol. 5, No. 3, p. 305, Sept. 2005.

3. JEDEC standard JESD-89A, available online at <http://www.jedec.org/download/search=JESD89A.pdf>.
4. <http://seutest.com/cgi-bin/FluxCalculator.cgi>.
5. B. D. Sierawski, B. Bhuvu, R. Reed, K. Ishida, N. Tam, A. Hillier, B. Narasimham, M. Trinczek, E. Blackmore, W. Shi-Jie, and R. Wong, Bias Dependence of Muon-Induced Single Event Upsets in 28 nm Static Random Access Memories, IEEE International Reliability Physics Symposium 2014, pp. 2B.2.1–2B.2.5.
6. O. Flament, J. Baggio, S. Bazzoli, S. Girard, J. Raimbourg, J. E. Sauvestre, and J. L. Leray, Challenges for Embedded Electronics in Systems Used in Future Facilities Dedicated to International Physics Programs, Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications (ANIMMA), 2009, p. 1.
7. M. Bagatin, A. Coniglio, M. D'Arienzo, A. De Lorenzi, S. Gerardin, A. Paccagnella, R. Pasqualotto, S. Peruzzo, and S. Sandri, Radiation Environment in the ITER Neutral Beam Injector Prototype, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 59. No. 4, p. 1099, June 2012.
8. T. R. Oldham and F. B. McLean, Total Ionizing Dose Effects in MOS Oxides and Devices, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 50, No. 3, p. 483, June 2003.
9. J. R. Schwank, M. R. Shaneyfelt, D. M. Fleetwood, J. A. Felix, P. E. Dodd, P. Paillet, and V. Ferlet-Cavrois, Radiation Effects in MOS Oxides, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 55. No. 4, p. 1833, Aug. 2008.
10. H. L. Hughes and J. M. Benedetto, Radiation Effects and Hardening of MOS Technology: Devices and Circuits, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 50. No. 3, p. 500, June 2003.
11. P. E. Dodd, M. R. Shaneyfelt, J. R. Schwank, and J. A. Felix, Current and Future Challenges in Radiation Effects on CMOS Electronics, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 57. No. 4, p. 1747, Aug. 2010.
12. R. L. Pease, Total Ionizing Dose Effects in Bipolar Devices and Circuits, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 50. No. 3, p. 539, June 2003.
13. R. D. Schrimpf, Gain Degradation and Enhanced Low-Dose-Rate Sensitivity in Bipolar Junction Transistors, Int. J. High Speed Electron. Syst. Vol. 14, p. 503, 2004.
14. J. R. Srour, C. J. Marshall, and P. W. Marshall, Review of Displacement Damage Effects in Silicon Devices, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 50. No. 3, p. 653 June 2003.
15. J. C. Pickel, A. H. Kalma, G. R. Hopkinson, and C. J. Marshall, Radiation Effects on Photonic Imagers—A Historical Perspective, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 50. No. 3, p. 671, June 2003.
16. P. E. Dodd and L. W. Massengill, Basic Mechanisms and Modeling of Single-Event Upset in Digital Microelectronics, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 50, pp. 583–602, 2003.

17. D. Munteanu and J.-L. Aufran, Modeling and Simulation of Single-Event Effects in Digital Devices and ICs, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* Vol. 55. No. 4, Aug. 2008.
18. K. P. Rodbell, D. F. Heidel, H. H. K. Tang, M. S. Gordon, P. Oldiges, and C. E. Murray, Low-Energy Proton-Induced Single-Event-Upsets in 65 nm Node, Silicon-on-Insulator, Latches and Memory Cells, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* Vol. 54. No. 6, p. 2474, 2007.
19. N. Seifert, B. Gill, K. Foley and P. Relangi, Multi-Cell Upset Probabilities of 45 nm High-k + Metal Gate SRAM Devices in Terrestrial and Space Environments, *Proceedings of the IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS)*, 2008, p. 181.

ГЛАВА 2

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

Мелани Райн

2.1. Введение

Разработка методов Монте-Карло для моделирования радиационного переноса изначально началась в Лос-Аламосе сразу после окончания Второй мировой войны в рамках Манхэттенского проекта [1]. Появление этих методов тесно связано с первыми цифровыми компьютерами, без которых они, скорее всего, оставались бы чистой теорией без всякого применения. С тех пор методы Монте-Карло систематически используются для моделирования воздействия радиации на полупроводниковые приборы. В частности, эти методы идеально подходят для моделирования одиночных радиационных эффектов, обнаруженных во второй половине 1970-х годов [2].

Помимо объяснения теоретических основ этих вычислительных методов целью этой главы является установление границ применимости моделирования Монте-Карло для конкретных видов радиационных воздействий на полупроводниковые устройства. С помощью анализа того, как работает этот метод, мы установим границы его применимости при исследовании радиационных воздействий на электронику, а также определим, какие именно воздействия наилучшим образом описываются с помощью моделирования Монте-Карло.

Краткая историческая справка укажет на истоки метода Монте-Карло. Мы приведем описание этого метода, прежде чем определить, чего можно достигнуть с помощью этого метода для анализа воздействия радиации на электронику и какие ограничения следует при этом учитывать. И, наконец, будут представлены некоторые примеры моделирования методом Монте-Карло переноса излучения и его воздействия на электронные устройства.