

Содержание

Предисловие редактора перевода	14
Предисловие	16
Редакторы	19
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 ЗУ 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	79
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	81
3.3. Результаты экспериментов	84
3.3.1. MCU как функция источника излучения	84
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	89
3.3.6. MCU как функция напряжения питания	90
3.3.7. MCU как функция температуры	91
3.3.8. MCU как функция архитектуры ячеек памяти	92
3.3.9. MCU как функция места проведения испытаний в LANSCE или в TRIUMF	93
3.3.10. MCU как функция подложки: объемный кремний по сравнению с кремнием на изоляторе	94
3.3.11. MCU как функция тестового паттерна	94
3.4. Трехмерное моделирование в TCAD возникновения MCU	95
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	98

3.4.2. Детализация чувствительных областей для современных технологий.....	101
3.4.2.1. Моделирование двух ячеек статического ОЗУ в строке.....	102
3.4.2.2. Моделирование двух ячеек статического ОЗУ в столбце.....	104
3.4.2.3. Выводы и схема чувствительных областей статического ОЗУ.....	104
3.5. Общие выводы: расположение по значимости параметров, влияющих на чувствительность к MCU.....	105
3.5.1. Схема распределения областей, чувствительных к SEE.....	106
3.6. Приложение 1.....	106
Литература.....	108
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.....	127
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. Сбои 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 сбой 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. Сбой 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	378
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.....	401
11.5.2.1. Обзор.....	401
11.5.2.2. Темновой ток, неоднородность темнового тока и RTS.....	403
11.6. Заключение.....	407
Литература.....	408
Глава 12. Радиационные эффекты естественного происхождения в приборах с зарядовой связью.....	420
12.1. Введение.....	420
12.2. Одиночные радиационные эффекты в ПЗС.....	421
12.2.1. Радиационные эффекты в ПЗС.....	422
12.2.2. Детекторы излучений, основанные на ПЗС.....	424
12.3. Естественные радиационные эффекты в ПЗС: тематическое исследование.....	427
12.3.1. Описание эксперимента.....	428
12.3.2. Экспериментальные результаты.....	429
12.3.3. Результаты моделирования.....	434
12.3.4. Подтверждение модели на высотах, характерных для авионики.....	440
12.4. Заключение.....	443
Благодарности.....	443
Литература.....	444
Глава 13. Радиационные эффекты в оптоволоке и оптоволоконных сенсорах.....	448
13.1. Введение.....	448
13.2. Основные радиационные эффекты в оптоволоке.....	450
13.2.1. Радиационно индуцированные точечные дефекты и структурные изменения.....	450
13.2.2. Радиационно наведенные потери.....	452
13.2.3. Радиационно наведенная эмиссия.....	454
13.2.4. Уплотнение и радиационно индуцированные изменения показателя преломления.....	454
13.3. Внутренние и внешние параметры, влияющие на радиационный отклик оптоволока.....	455

13.3.1. Параметры, связанные с оптоволокном.....	455
13.3.2. Внешние параметры.....	457
13.4. Основные применения и задачи.....	459
13.4.1. Для оптоволокна.....	459
13.4.1.1. Исследования для международного термоядерного экспериментального реактора (ITER).....	460
13.4.1.2. Исследования для мегаджоулевого лазера.....	460
13.4.1.3. Исследования для Большого адронного коллайдера (LHC).....	461
13.4.1.4. Оптоволокно, легированное редкоземельными элементами, и усилители для космического применения.....	461
13.4.2. Для волоконно-оптических сенсоров.....	462
13.4.2.1. Оптоволоконные брэгговские решетки (FBG).....	462
13.4.2.2. Оптоволокно как система дозиметрии.....	463
13.4.2.3. Распределенные сенсоры.....	464
13.5. Многоуровневое моделирование от самого начала до системного уровня: последние успехи.....	466
13.6. Выводы.....	469
Литература.....	470
Предметный указатель.....	481