

№ 2173

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

Кафедра полупроводниковой электроники и физики полупроводников

К.И. Таперо

С.И. Диденко

Основы радиационной стойкости изделий электронной техники

Радиационные эффекты
в изделиях электронной техники

Учебное пособие

Рекомендовано учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 210100 «Электроника и нанoeлектроника»



Москва 2013

УДК 621.38
Т18

Рецензент
канд. физ.-мат. наук, доц. *В.А. Ильин*

Таперо, К.И.

Т18 Основы радиационной стойкости изделий электронной техники : радиационные эффекты в изделиях электронной техники : учеб. пособие / К.И. Таперо, С.И. Диденко. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2013. – 349 с.

ISBN 978-5-87623-661-6

Учебное пособие посвящено вопросам деградации полупроводниковых приборов и интегральных схем вследствие дефектов, образующихся при воздействии космической радиации. Рассмотрены следующие вопросы: радиационные условия в космосе; влияние радиационно-индуцированных структурных повреждений на свойства полупроводников; деградация кремниевых приборов и микросхем вследствие радиационных эффектов при воздействии ионизирующих излучений космического пространства; влияние радиационно-индуцированных структурных повреждений на деградацию изделий оптоэлектроники; особенности испытаний изделий электронной техники и радиоэлектронной аппаратуры на стойкость к воздействию ионизирующих излучений космического пространства.

Предназначено для бакалавров и магистров, обучающихся по направлению 210100 «Электроника и микроэлектроника», а также студентов, обучающихся по специальности «Микроэлектроника и твердотельная электроника». Будет полезно специалистам, работающим в области конструирования изделий полупроводниковой электроники и технологии их изготовления, а также обеспечения надежности и радиационной стойкости комплектующих элементов и аппаратуры.

УДК 621.38

ISBN 978-5-87623-661-6

© К.И. Таперо,
С.И. Диденко, 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

Условные обозначения.....	8
Введение	10
1. Краткое описание радиационных условий в окружающем пространстве	15
1.1. Радиационные условия в космическом пространстве	15
1.1.1. Радиационные пояса Земли	17
1.1.2. Солнечные космические лучи	21
1.1.3. Галактические космические лучи.....	22
1.1.4. Межпланетное пространство	23
1.2. Ионизирующие излучения ядерного взрыва	24
1.3. Ионизирующие излучения атомных электростанций.....	26
2. Основы физики взаимодействия ионизирующих излучений с полупроводниками.....	28
2.1. Образование структурных повреждений в полупроводниках (эффекты смещения)	28
2.1.1. Смещение атомов при воздействии нейтронов	31
2.1.2. Смещение атомов при воздействии высокоэнергетических заряженных частиц.....	32
2.1.3. Потери энергии на образование смещений	37
2.1.4. Термостабильные радиационные центры в полупроводниках	40
2.1.5. Образование кластеров дефектов	43
2.2. Ионизация при радиационном облучении полупроводников и диэлектриков	46
2.2.1. Ионизация при облучении нейтронами	46
2.2.2. Ионизация при облучении заряженными частицами	47
2.2.3. Ионизация при воздействии фотонного излучения	51
2.2.4. Эффект усиления дозы	54
2.3. Ядерные превращения при воздействии ионизирующих излучений	56
2.4. Изменение характеристик полупроводников при радиационном облучении	57
2.4.1. Изменение времени жизни неосновных носителей заряда.....	57
2.4.2. Снижение концентрации носителей заряда.....	61
2.4.3. Снижение подвижности носителей заряда	63

3. Деградация полупроводниковых приборов и микросхем вследствие радиационно-индуцированных структурных повреждений	65
3.1. Деградация характеристик диодных структур на основе $p-n$ -перехода.....	66
3.2. Деградация характеристик диодов Шоттки на основе карбида кремния	71
3.3. Деградация характеристик диодов Шоттки на основе соединений $A^{III}B^V$	75
3.4. Деградация биполярных транзисторов.....	78
3.5. Деградация характеристик полевых транзисторов с управляющим $p-n$ -переходом	82
3.6. Деградация высокоскоростных полевых транзисторов на основе полупроводниковых соединений	86
3.6.1. Деградация характеристик полевых транзисторов с барьером Шоттки.....	86
3.6.2. Деградация высокоскоростных транзисторов с двумерным электронным газом.....	89
3.7. Влияние эффектов смещений на деградацию МОП-структур.....	90
3.8. Деградация кремниевых интегральных схем вследствие дефектов смещения	95
4. Влияние радиационно-индуцированных структурных повреждений на деградацию изделий оптоэлектроники.....	99
4.1. Светодиоды	100
4.1.1. Основные свойства светодиодов.....	100
4.1.2. Различные конструктивно-технологические варианты светодиодов	103
4.1.3. Деградация амфотерно легированных СД при радиационном облучении	105
4.1.4. Деградация диффузионных СД при радиационном облучении.....	108
4.1.5. Деградация СД на двойном гетеропереходе при радиационном облучении.....	109
4.1.6. Особенности радиационных испытаний СД.....	111
4.2. Лазерные диоды	113
4.2.1. Основные свойства полупроводниковых лазеров	113
4.2.2. Деградация лазерных диодов при радиационном облучении.....	119
4.2.3. Особенности радиационных испытаний полупроводниковых лазеров	124

4.3. Фотоприемники	125
4.3.1. Фотодиоды на основе $p-n$ - и $p-i-n$ -переходов.....	127
4.3.2. Фототранзисторы.....	129
4.3.3. Деградация фотодиодов при радиационном облучении.....	130
4.3.4. Деградация лавинных фотодиодов при радиационном облучении	132
4.3.5. Деградация фототранзисторов при радиационном облучении	133
4.4. Оптопары	134
4.4.1. Основные свойства оптопар	134
4.4.2. Деградация оптопар при радиационном облучении.....	138
4.5. Солнечные батареи	144
4.5.1. Основные свойства солнечных батарей.....	144
4.5.2. Деградация солнечных батарей при радиационном облучении	147
4.6. Приборы с зарядовой связью	152
5. Дозовые ионизационные эффекты в структуре Si/SiO ₂ и их влияние на характеристики кремниевых приборов и микросхем	156
5.1. Особенности строения структуры Si/SiO ₂	156
5.1.1. Особенности строения SiO ₂	156
5.1.2. Особенности строения границы раздела Si/SiO ₂	162
5.1.3. Влияние водорода и водородсодержащих соединений на свойства структуры Si/SiO ₂	165
5.2. Методы исследований заряда в оксиде и плотности поверхностных состояний.....	168
5.2.1. Метод ВФХ.....	169
5.2.2. Метод подпороговых ВАХ.....	171
5.2.3. Методы, основанные на измерении надпороговой ВАХ транзисторов	175
5.2.4. Метод накачки заряда.....	176
5.3. Физические процессы в МОП-структурах при радиационном облучении.....	177
5.3.1. Особенности радиационно-индуцированного накопления заряда в диэлектриках МОП-структур.....	179
5.3.2. Особенности радиационно-индуцированного встраивания поверхностных состояний в МОП-структурах	185
5.3.3. Граничные ловушки.....	196
5.3.4. Изменение характеристик МОП-транзисторов и КМОП-логических элементов при радиационном облучении.....	199

5.3.5. Влияние конструктивно-технологических характеристик на радиационную стойкость изделий МОП- и КМОП-технологии..	202
5.3.6. Радиационные эффекты в МОП-структурах с ультратонкими оксидами	204
5.3.7. Некоторые особенности дозовых радиационных эффектов в МДП-структурах с альтернативными диэлектриками	207
5.3.8. Влияние полевых оксидов на радиационную стойкость ИС	211
5.3.9. Особенности проявления дозовых радиационных эффектов в микросхемах, изготовленных по КНИ-технологии.....	215
5.4. Зависящие от времени радиационные эффекты в изделиях на основе МОП-структур.....	225
5.4.1. Нейтрализация радиационно-индуцированного заряда в оксиде.....	226
5.4.2. Влияние интенсивности и температуры облучения на накопление поверхностных состояний на границе раздела Si/SiO ₂	233
5.4.3. Деградация изделий, изготовленных по МОП- и КМОП-технологии, в зависимости от интенсивности облучения	238
5.5. Особенности дозовых испытаний полупроводниковых приборов и микросхем на основе МОП- и КМОП-структур.....	244
5.5.1. Корреляция между отдельными транзисторами и микросхемами	244
5.5.2. Выбор электрического режима при испытаниях	247
5.5.3. Влияние на радиационную стойкость высокотемпературной наработки перед облучением (эффект PETS)	253
5.5.4. Выбор источников ионизирующих излучений при проведении радиационных испытаний МОП и КМОП ИС.....	257
6. Дозовые ионизационные эффекты в изделиях биполярной технологии	260
6.1. Общее описание ионизационных дозовых эффектов в изделиях биполярной технологии.....	260
6.2. Особенности ионизационных дозовых эффектов в биполярных приборах и микросхемах при воздействии низкоинтенсивного ионизирующего излучения (эффект ELDRS)	266
6.3. Возможные физические механизмы, приводящие к повышенной деградации биполярных изделий при низкоинтенсивном радиационном облучении	278
6.3.1. Модель пространственного заряда	279

6.3.2. Бимолекулярные модели.....	282
6.3.3. Модель бинарной скорости реакции.....	287
6.3.4. Выводы по рассмотренным механизмам эффекта ELDRS	287
7. Методы испытаний изделий электронной техники и радиоэлектронной аппаратуры на стойкость к воздействию ионизирующих излучений космического пространства в части дозовых эффектов	289
7.1. Испытания аппаратуры и комплектующих элементов с учетом структурной составляющей поглощенной дозы	292
7.1.1. Методы испытаний радиоэлектронной аппаратуры и ее элементов на ускорителях электронов и протонов.....	293
7.1.2. Метод испытаний аппаратуры и элементов на установках гамма- и нейтронного излучения	297
7.2. Методы прогнозирования и оценки стойкости изделий МОП- и КМОП-технологии к воздействию низкоинтенсивного ионизирующего излучения	299
7.2.1. Американский стандарт MIL-STD 883 (Test Method 1019)....	299
7.2.2. Европейский стандарт ESA/SCC Detail Specification No. 22900.....	302
7.2.3. Руководящий документ РД В 319.03.37–2000	306
7.2.4. Отраслевой стандарт ОСТ 134-1034–2003.....	308
7.3. Методы прогнозирования и оценки стойкости изделий биполярной технологии к воздействию низкоинтенсивного ионизирующего излучения	310
8. Одиночные события при воздействии отдельных заряженных частиц космического пространства	315
8.1. Основные виды и классификация одиночных событий	315
8.2. Краткое описание основных видов одиночных событий	317
8.3. Основные параметры чувствительности полупроводниковых приборов и микросхем к одиночным событиям.....	327
8.4. Общее описание процесса возникновения одиночных событий	332
8.5. Экспериментальные методы исследования чувствительности изделий полупроводниковой электроники к одиночным событиям при воздействии тяжелых заряженных частиц и протонов.....	336
8.5.1. Эксперименты на ускорителях протонов.....	337
8.5.2. Эксперименты на ускорителях ионов.....	339
8.5.3. Эксперименты с изотопными источниками	342
8.5.4. Эксперименты с использованием ионных микропучков.....	344
8.5.5. Эксперименты с использованием имитаторов.....	344
Заключение.....	345
Библиографический список	346

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

АЦП	– аналого-цифровой преобразователь
АЭС	– атомная электростанция
БИС	– большая интегральная схема
ВАХ	– вольт-амперная характеристика
ВФХ	– вольт-фарадная характеристика
ВЧ	– высокочастотный
ГКЛ	– галактические космические лучи
ИИ	– ионизирующее излучение
ИК	– инфракрасный
ИРПЗ	– искусственные радиационные пояса Земли
ИС	– интегральная схема (микросхема)
КА	– космический аппарат
КМОП	– комплементарная структура металл – оксид – полупроводник
КНИ	– кремний на изоляторе
КП	– космическое пространство
ЛПЭ	– линейные потери энергии
МОП	– металл–оксид–полупроводник
ННЗ	– неосновные носители заряда
ОЗУ	– оперативное запоминающее устройство
ОЗЧ	– отдельные заряженные частицы
ОПЗ	– область пространственного заряда
ОС	– одиночное событие
ПЗС	– прибор с зарядовой связью
ПЗУ	– постоянное запоминающее устройство
ПП	– полупроводниковый прибор
ПС	– поверхностные состояния
ПТ	– полевой транзистор
ПТБШ	– полевой транзистор с затвором в виде барьера Шоттки
РПЗ	– радиационные пояса Земли
РЭА	– радиоэлектронная аппаратура
СБИС	– сверхбольшая интегральная схема
СВЧ	– сверхвысокочастотный
СД	– светоизлучающий диод
СЖР	– сверхжесткое рентгеновское излучение
СКЛ	– солнечные космические лучи
СОЗУ	– статическое оперативное запоминающее устройство
ТЗЧ	– тяжелые заряженные частицы
УФ	– ультрафиолетовый
ЦАП	– цифро-аналоговый преобразователь
ЭМИ	– электромагнитный импульс

ЭПР	– электронный парамагнитный резонанс
ЯВ	– ядерный взрыв
ASEE	– аналоговое одиночное событие (Analog Single Event Effect)
BUSFET	– полевой транзистор с телом, расположенным под истоком (Body-Under-Source Field Effect Transistor)
CTI	– неэффективность передачи заряда (Charge Transfer Inefficiency)
CTR	– коэффициент передачи заряда (Charge Transfer Ratio)
ELDRS	– повышенная чувствительность к низкоинтенсивному облучению (Enhanced Low Dose Rate Sensitivity)
EOT	– эквивалентная толщина оксида (Equivalent Oxide Thickness)
HEMT	– высокоскоростной транзистор с двумерным электронным газом (High Electron Mobility Transistor)
LOCA	– авария с потерей теплоносителя (Loss-Of-Coolant Accident)
LOCOS	– изоляция с помощью локального окисления кремния (Local Oxidation of Silicon)
MBU	– множественные сбои нескольких соседних ячеек памяти, вызванные попаданием одной высокоэнергетической частицы (Multiple Bit Upset)
NIEL	– неионизационные потери энергии (Non-Ionizing Energy Loss)
PETS	– эффект предварительной высокотемпературной наработки (Preirradiation Elevated Temperature Stress)
RILC	– радиационно-индуцированный ток утечки (Radiation-Induced Leakage Current)
RNO	– переокисленный азотированный оксид (Reoxidized Nitrided Oxide)
SEB	– одиночный эффект выгорания в мощных МОП-транзисторах (Single Event Burnout)
SEDR	– одиночный эффект пробоя диэлектрика (Single Event Dielectric Rupture)
SEFI	– одиночный эффект функционального прерывания (Single Event Functional Interrupt)
SEGR	– одиночный эффект пробоя подзатворного диэлектрика в МОП-структурах (Single Event Gate Rupture)
SEHE	– одиночный микродозовый эффект (Single Event Hard Error)
SEL	– одиночные события радиационного защелкивания (Single Event Latchup)
SES	– одиночный эффект вторичного пробоя (Single Event Snappback) в <i>n</i> -канальных МОП-транзисторах
SET	– переходная ионизационная реакция, вызванная попаданием высокоэнергетической частицы в чувствительную область ИС (Single Event Transient)
SEU	– одиночные сбои (Single Event Upset)
SILC	– ток утечки, вызванный электрическим полем (Stress-Induced Leakage Current)
STI	– изоляция с помощью поверхностных мелких канавок (Shallow-Trench Isolation)
TDE	– зависящий от времени эффект (Time-Dependent Effect)
TDRE	– истинный эффект мощности дозы (True Dose Rate Effect)
VCSEL	– полупроводниковый лазер с вертикальным резонатором (Vertical-Cavity Semiconductor Laser)

ВВЕДЕНИЕ

В современном высокотехнологичном мире ионизирующие излучения (ИИ) довольно часто сопутствуют научной, технической и военной деятельности человека. В первую очередь это касается разработки, хранения и возможного применения ядерного оружия, эксплуатации космической техники и атомных реакторов, проведения научных исследований с применением ускорителей заряженных частиц и изотопных источников, медицины. Во многих случаях эти излучения целенаправленно (ядерное оружие), случайно (аварии на ядерных объектах) или вынужденно (эксплуатация космических аппаратов) воздействуют на системы управления и радиоэлектронную аппаратуру (РЭА) различного назначения, основой которых являются изделия полупроводниковой электроники. Таким образом, вопросы влияния ионизирующих излучений на полупроводниковые приборы (ПП) и микросхемы является важной народнохозяйственной задачей, и в этой области ведутся масштабные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы.

Основой успешного решения научно-технических задач в данной области является понимание физических основ процессов, протекающих при воздействии ионизирующих излучений на материалы электронной техники, а также знание характеристик ионизирующих излучений космического пространства, ядерного взрыва и атомных электростанций.

Космическая радиация в настоящее время является одним из важнейших эксплуатационных факторов, влияющих на работоспособность РЭА космического применения, а также комплектующих ее ПП и интегральных схем (ИС). Это во многом определяет актуальность тематики радиационных эффектов в материалах электронной техники, радиационно-индуцированной деградации ПП и ИС и определения показателей надежности и радиационной стойкости РЭА в условиях воздействия ИИ космического пространства (КП).

Проникающая радиация имеет две формы: электромагнитное излучение (гамма- и рентгеновское излучение) и излучение частиц (электроны, ионы, нейтроны). При прохождении через полупроводниковый материал быстрые частицы или фотоны теряют свою энергию вследствие ряда процессов. Степень реализации того или иного процесса зависит как от природы и энергии частицы (или фотона), так и от ряда свойств облучаемого материала. Кроме того, на характер энерговыделения при прохождении через облучаемый материал могут влиять внешние условия во время облучения (например, тем-

пература). В общем случае при воздействии ИИ на твердое тело могут иметь место следующие первичные эффекты:

- ионизация атомов (разрыв валентных связей – обратимый процесс);
- смещение атомов из узлов решетки (образование простейших дефектов типа пар Френкеля);
- возбуждение атомов и электронов без смещения (нагрев кристалла);
- ядерные превращения.

С точки зрения деградации параметров ПП и ИС при воздействии проникающей радиации основную роль играют радиационные эффекты двух видов: ионизационные эффекты и эффекты смещения. Ионизационные эффекты связаны с ионизацией вещества излучением, т.е. с образованием под действием ИИ свободных носителей заряда. Данные носители, перемещаясь по объему облучаемого материала и захватываясь на имеющиеся там ловушки, могут привести к накоплению заряда в различных областях приборных структур (как правило, это различные диэлектрические слои) и вызвать деградацию параметров ПП и ИС. Кроме того, вследствие ионизационных эффектов в активных и пассивных областях ПП и ИС могут возникать импульсы ионизационных токов. Эти токи, в зависимости от их величины и локализации, а также от типа облучаемого изделия, могут привести к различным эффектам как обратимого, так и необратимого характера. К обратимым эффектам можно отнести, например, возникновение в выходных цепях импульсных сигналов помех, что может привести к сбоям в работе РЭА, изменение логического состояния цифровых ИС (триггеров, регистров, ячеек памяти и т.п.). К необратимым эффектам, которые могут развиваться в катастрофический отказ облучаемого изделия, можно отнести радиационное защелкивание в КМОП-схемах (включение паразитных тиристорных структур), вторичный пробой в МОП-транзисторах и ИС динамической памяти, связанный с механизмом усиления ионизационных токов паразитными биполярными транзисторами, пробой подзатворного диэлектрика в мощных МОП-транзисторах и др.

К структурным нарушениям в первую очередь относится образование первичных радиационных дефектов типа пар Френкеля (вакансия и междоузельный атом) в кристаллической решетке в результате упругого столкновения движущейся частицы с ядром атома или с атомом вещества. Возможно также образование первичных дефектов в виде дивакансий. Вакансии и выбитые атомы могут перемещаться по твердому телу и приводить к образованию вторичных дефектов

при взаимодействии друг с другом и с дефектами, существующими до облучения. Образование радиационных дефектов в объеме облучаемых полупроводниковых материалов ведет к изменению их электрофизических параметров, что приводит, в свою очередь, к изменению характеристик облучаемых ПП и ИС. Механизмы отказа при радиационном облучении, связанные с эффектами смещения, наиболее характерны для ПП и ИС, изготовленных по биполярной технологии, и особенно – для изделий оптоэлектроники, поскольку их основные характеристики в основном определяются объемными свойствами полупроводниковых материалов (отказы изделий данного типа, связанные с ионизационными эффектами, также возможны). Кроме того, проявление эффектов смещения более характерно в случае воздействия корпускулярного излучения: электронов, протонов, нейтронов, тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ). Однако при воздействии гамма-квантов также могут наблюдаться эффекты смещения как результат взаимодействия атомов мишени с образующимися при облучении комптоновскими электронами.

Данная работа посвящена вопросам радиационно-индуцированной деградации ПП и ИС различных видов и различных конструктивно-технологических вариантов при воздействии ИИ КП. При этом подразумевается, что образование в изделиях микро- и наноэлектроники структурных и ионизационных дефектов является схожим как для радиационных воздействий КП, так и для факторов ядерного взрыва (ЯВ) и атомных электростанций (АЭС).

В первой главе кратко проанализированы характеристики радиационных условий в окружающем пространстве. При этом основное внимание уделено радиационным факторам КП, но также кратко рассмотрены характеристики ИИ ЯВ и АЭС.

Во второй главе рассмотрены физические процессы взаимодействия высокоэнергетических частиц и фотонов с полупроводниками, приводящие к ионизации облучаемого материала и образованию структурных повреждений. Также рассмотрено влияние радиационных эффектов на электрофизические характеристики полупроводников.

В третьей главе обсуждается изменение характеристик «обычных» ПП и ИС (не относящихся к изделиям оптоэлектроники), обусловленное радиационно-индуцированными дефектами смещений. Здесь рассмотрена деградация основных приборных структур (биполярных диодов и транзисторов, диодов Шоттки, полевых транзисторов с управляющим $p-n$ -переходом и затвором в виде диода Шоттки, МОП-транзисторов), а также приведены типовые примеры, иллюст-

рирующие влияние дефектов смещений на работоспособность кремниевых ИС различных технологических вариантов.

Четвертая глава посвящена деградации различных изделий оптоэлектроники при радиационном облучении. Следует отметить, что изделия оптоэлектроники характеризуются высокой чувствительностью к структурным повреждениям, образующимся в материале их активных областей, и при радиационных испытаниях этих изделий учет структурной составляющей поглощенной дозы ИИ КП, как правило, является обязательным.

Пятая глава посвящена ионизационным дозовым эффектам в ПП и ИС, изготовленных по МОП- и КМОП-технологии. Здесь проанализированы особенности строения структуры Si/SiO₂ и рассмотрены основные виды дефектов, отвечающих за накопление заряда в диэлектрике и на границе раздела полупроводник/диэлектрик. Описаны механизмы накопления заряда в SiO₂ при радиационном облучении и его нейтрализации. Рассмотрены существующие модели встраивания поверхностных состояний на границе раздела Si/SiO₂. Кроме того, рассмотрено влияние процессов, протекающих при радиационном облучении в диоксиде кремния и на границе Si/SiO₂, на электрические характеристики изделий микро- и нанoeлектроники. Рассмотрено влияние конструктивно-технологических параметров этих изделий на деградацию их электрических характеристик. Описаны основные особенности радиационно-индуцированной деградации интегральных микросхем, связанные с накоплением заряда в толстых диэлектриках (полевых оксидах и скрытых оксидах КНИ-структур). Также рассмотрены так называемые зависящие от времени эффекты, наблюдаемые в изделиях МОП- и КМОП-технологии при длительном воздействии низкоинтенсивного ИИ КП.

В шестой главе рассмотрены ионизационные дозовые эффекты, характерные для изделий биполярной технологии. Особое внимание здесь уделено «истинным» эффектам низкоинтенсивного облучения, характерным для изделий данного типа, которые проявляются в виде «усиленной» деградации при длительном воздействии низкоинтенсивного радиационного облучения в условиях космического пространства.

Седьмая глава посвящена методическим вопросам испытаний ПП и ИС на стойкость к воздействию поглощенной дозы ИИ КП (как в части ионизационных эффектов, так и в части эффектов структурных повреждений). Здесь рассмотрены рекомендации из отечественных и зарубежных нормативных документов, регламентирующих радиационные испытания РЭА и комплектующих элементов космического

применения, которые разрабатывались с учетом большого накопленного опыта проведения испытаний и исследований подобного рода.

В восьмой главе рассмотрены основные виды и классификация одиночных радиационных эффектов (одиночных событий) при воздействии отдельных заряженных частиц космического пространства. Приведено описание физических процессов, вследствие которых возникают одиночные события. Рассмотрены основные экспериментальные и расчетно-экспериментальные методы, используемые для получения информации о чувствительности изделий полупроводниковой электроники к одиночным событиям при воздействии отдельных заряженных частиц космического пространства.

В девятой главе обобщены основные радиационные эффекты, определяющие стойкость различных ПП и ИС к воздействию ионизирующего излучения космического пространства.

Понимая невозможность полноценного рассмотрения всех аспектов тематики радиационных эффектов в изделиях микро- и нанoeлектроники в рамках одного издания, авторы ограничились лишь достаточно кратким описанием основных моментов данной проблемы, и только для ионизирующих излучений космического пространства. Изложенный материал поясняется большим количеством рисунков, взятых из опубликованных научных работ. В конце издания приведен библиографический список, который можно порекомендовать для более подробного изучения вопросов, связанных с рассматриваемой тематикой. Данный список разделен на две категории: основная и дополнительная литература. В список основной литературы вошли книги и обзоры, обобщающие накопленный научно-технический материал по отдельным направлениям тематики радиационных эффектов в ПП и ИС. В список дополнительной литературы вошли опубликованные научные статьи, обзоры, справочные издания, нормативно-технические документы, а также некоторые книги. Эти источники могут быть использованы для более детального рассмотрения отдельных вопросов, в частности, для рассмотрения особенностей проведения экспериментов, результаты которых приведены для иллюстрации изложенного материала.

1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ В ОКРУЖАЮЩЕМ ПРОСТРАНСТВЕ

1.1. Радиационные условия в космическом пространстве

Космические аппараты в течение срока своего существования подвергаются воздействию различных факторов космического пространства. Согласно современным представлениям, основными факторами космического пространства, способными вызвать деградацию РЭА КА, являются следующие:

- ионизирующее излучение;
- космическая плазма;
- тепловое излучение Солнца, планет и космического пространства;
- невесомость;
- собственная внешняя атмосфера;
- микрометеориты;
- космический вакуум;
- замкнутый объем.

Радиационная обстановка (ионизирующее излучение) в космическом пространстве определяется потоками электронов, протонов и тяжелых ионов ($Z \geq 2$), при этом интегральные (или дозовые), радиационные эффекты в полупроводниковых приборах и микросхемах в основном определяются потоками протонов и электронов, а вкладом тяжелых ионов, как правило, пренебрегают. Суммарная поглощенная доза за срок активного существования космического аппарата (КА) во многом зависит от параметров его орбиты. Для геостационарной или высокоэллиптической орбит основной вклад в поглощенную дозу дают частицы солнечных космических лучей (СКЛ). На низких околоземных орбитах также учитывается вклад радиационных поясов Земли (РПЗ), который в ряде случаев может преобладать. Имеются также частицы галактических космических лучей (ГКЛ), количество которых относительно мало по сравнению с протонами и электронами, и при рассмотрении интегральных радиационных эффектов их вкладом обычно пренебрегают, однако частицы ГКЛ могут быть одной из основных причин возникновения одиночных радиационных эффектов в ПП и ИС.

Основные эффекты воздействия ИИ на РЭА связаны с ионизационными и ядерными потерями энергии первичных и вторичных час-

тиц в активных и пассивных областях ПП и ИС, входящих в состав РЭА. Эти эффекты могут вызвать параметрический отказ ПП и ИС вследствие накопления дозы ИИ, а также возникновение одиночных сбоев и отказов от воздействия отдельных высокоэнергетических ядерных частиц. Кроме этих эффектов также могут наблюдаться: изменение прозрачности оптических сред (радиационное окрашивание и растрескивание оптических стекол); световые помехи в оптико-электронной аппаратуре вследствие радиолюминесценции и воздействия ядер космических излучений в оптических деталях; пробой и растрескивание изолирующих материалов вследствие электризации диэлектриков и протекания радиационно-стимулированных химических реакций; уменьшение мощности источников питания из-за деградации солнечных батарей.

Влияние космической плазмы проявляется через электризацию диэлектрических защитных и термоизолирующих покрытий. При достижении критического заряда происходит внутренний локальный электростатический пробой, который может привести к непосредственному отказу или сбою прибора. Кроме того, возможен косвенный эффект, вызванный действием электромагнитного поля, возникающего при пробое.

При воздействии теплового излучения Солнца, а также при попадании в зону тени от других объектов, происходит неравномерный разогрев конструкций КА, приводящий к значительным циклическим изменениям температуры поверхности КА. В результате возникают температурные градиенты, которые могут приводить к возникновению термомеханических напряжений и термоЭДС. Кроме того, температурные эффекты приводят к изменению характеристик ПП и ИС, входящих в состав РЭА КА.

Из-за действия невесомости ухудшается тепловой режим работы РЭА, так как отсутствует конвекционный съем тепла с нее. Воздействие микрометеоритов приводит к механическим повреждениям внешней поверхности приборов. Наиболее существенно этому воздействию подвержены солнечные батареи. Влияние замкнутого объема проявляется в виде отсутствия привычной шины земли, вследствие чего общий потенциал колеблется, а протекание поверхностных токов по поверхности КА может служить дополнительным источником возникновения сигналов помех.

Таким образом, на функционирование РЭА КА воздействует много различных факторов, каждый из которых может вызвать сбой или отказ всей системы, и в общем случае необходимо принимать во внимание все действующие факторы, однако влияние двух первых из

перечисленных выше факторов (ионизирующее излучение и космическая плазма) доминирует. Далее будут рассмотрены эффекты, вызванные действием проникающей радиации КП и радиационные условия в космическом пространстве.

1.1.1. Радиационные пояса Земли

Основной вклад в радиационную обстановку на низких и средних околоземных орбитах дают радиационные пояса, окружающие Землю. Оценке радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве уделялось значительное внимание уже с первых лет освоения космического пространства. На базе данных, полученных с ряда спутников, были построены различные модели, описывающие радиационную обстановку. Вследствие того, что все области радиационного окружения непрерывно изменяются, ни одна из существующих моделей не является полностью всеохватывающей. В настоящее время общепризнанными являются модели РПЗ АЕ-8 (АЕ-8min, АЕ-8max) и AP-8 (AP-8min, AP-8max), которые описывают пространственные распределения электронов с энергией $0,1 \dots 10$ МэВ и протонов с энергией $0,1 \dots 400$ МэВ для минимума и максимума солнечной активности. Радиационные пояса Земли схематически показаны на рис. 1.1.

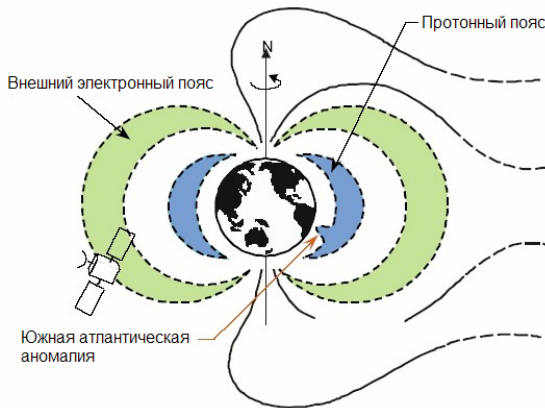


Рис. 1.1. Наглядное изображение радиационных поясов Земли (внутренний электронный пояс не показан)

Протонная обстановка на околоземной орбите КА зависит от ее высоты и наклона. Интенсивность протонного пояса резко возрастает с высотой, и его границы простираются от 800 до 15000 км. Края пояса

достаточно точно не определены, и изображение, показанное на рис. 1.1, в этом отношении несколько обманчиво. На рис. 1.2 показаны профили распределения плотности потока протонов различных энергий по высоте в экваториальной плоскости (для большей широты пояса располагаются ближе к Земле). Из рис. 1.2 видно, что край протонного пояса соответствует высоте порядка 500 км, и на высоте свыше 2000 км имеют место очень высокие уровни протонного излучения. Большинство спутников, работающих на низких околоземных орбитах, имеет высоту орбиты не более 1500 км для того, чтобы избежать интенсивных уровней радиации в центре протонного радиационного пояса.

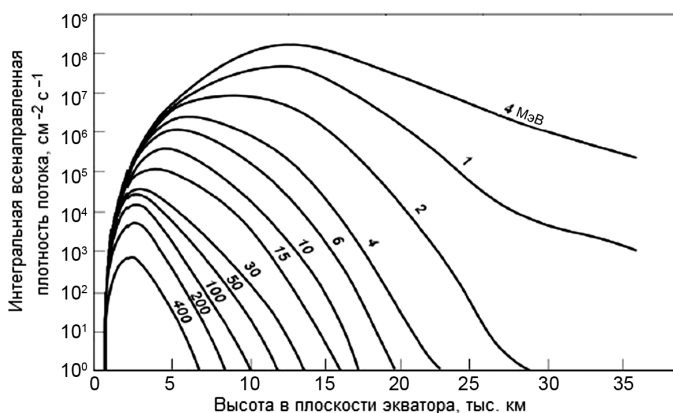


Рис. 1.2. Энергетические профили для протонов на различной высоте в плоскости экватора

Очень низкие орбиты (например, такие, как орбита Space Shuttle, приблизительно 305 км) располагаются ниже протонного пояса, и большая часть протонов попадает при прохождении КА через южную атлантическую аномалию. В этой области протонный пояс расширяется (локально) в область меньших значений высоты. Основной причиной возникновения южной атлантической аномалии является то, что магнитный диполь Земли не совпадает с ее осью вращения. Вклад протонов этой аномалии также важен на промежуточных высотах, но для орбит с большой высотой и наклоном он становится в несколько раз меньше.

Для низких и средних орбит с большим наклоном существенный вклад в суммарный флюенс также дают протоны солнечных вспышек. Однако при малом наклоне геомагнитная защита удерживает большинство частиц солнечных вспышек вне области внутреннего пояса, и влиянием солнечных вспышек можно пренебречь.

При определении радиационной обстановки на борту КА обычно учитывается защита, при этом, как правило, подразумевается сферическая защита из алюминия, что в первом приближении является справедливым представлением величины защиты, окружающего большинство электронных компонентов. Защита умеренных размеров снижает количество электронов и низкоэнергетических протонов, но слабо влияет на высокоэнергетические протоны.

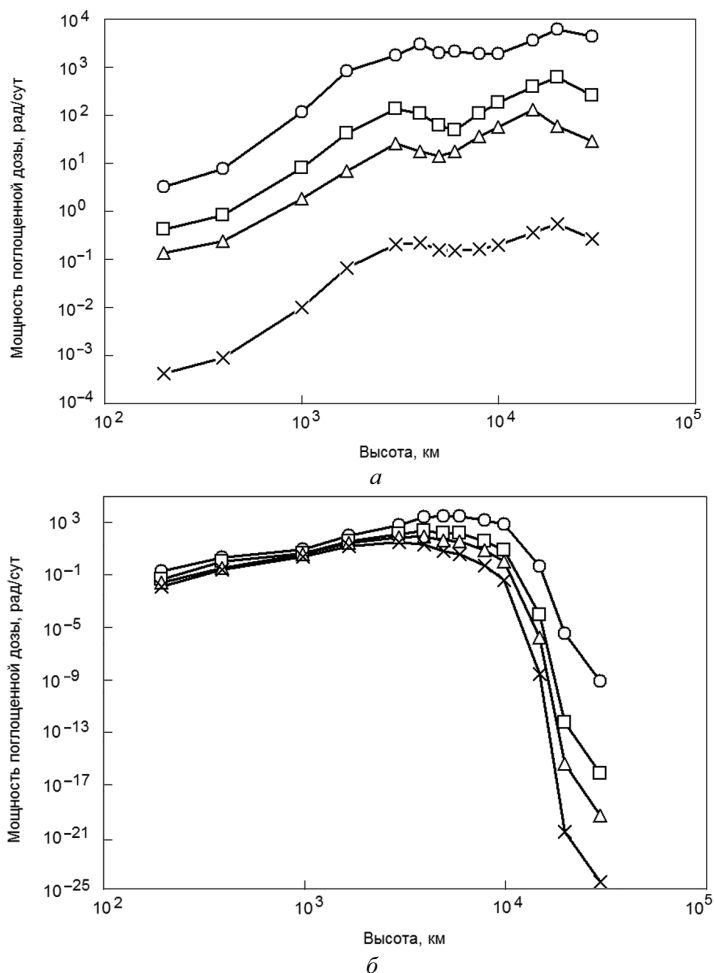


Рис. 1.3. Зависимость мощности поглощенной дозы электронов (а) и протонов (б) РПЗ от высоты круговой орбиты с углом наклона 60° при минимуме солнечной активности для защиты в форме сферы (Al):
 ○ – 0,1 г/см²; □ – 0,5 г/см²; △ – 1 г/см²; × – 3 г/см²

На рис. 1.3 показано, как меняется мощность поглощенной дозы электронов и протонов в зависимости от высоты орбиты и эффективной толщины защиты из алюминия для круговой орбиты с наклоном 60° . На рис. 1.4 показаны зависимости поглощенной дозы за 10-летний срок активного существования КА от эффективной толщины защиты для различных орбит.

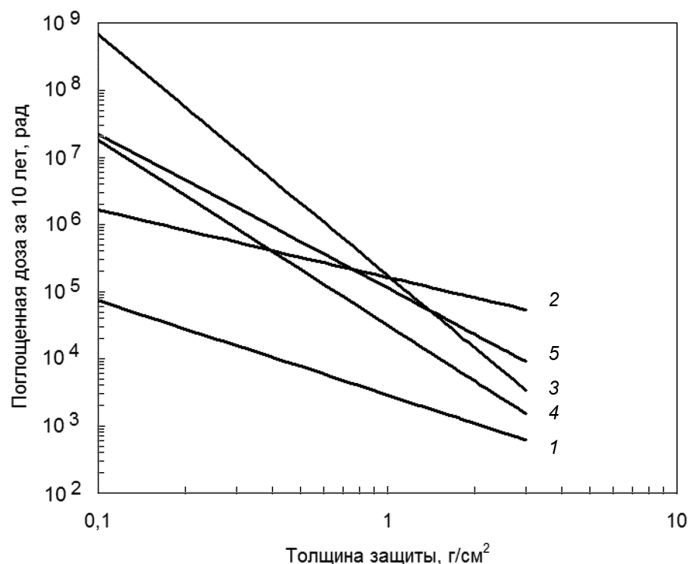


Рис. 1.4. Зависимости поглощенной дозы за 10 лет от эффективной толщины защиты в форме сферы (Al) при максимальной солнечной активности, рассчитанные для различных орбит:

- 1 – круговая орбита, 450 км, 60° ; 2 – круговая орбита, 2000 км, 60° ;
- 3 – круговая орбита, 20 000 км, 60° ; 4 – геостационарная орбита, 36 000 км, 0° ;
- 5 – высокоэллиптическая орбита, апогей 40 000 км, перигей 600 км, 63°

Следует также отметить, что при прохождении заряженных частиц космического пространства через защиту возникает тормозное излучение. Уровни поглощенной дозы, обусловленные тормозным излучением, как правило, не высокие, и вкладом тормозного излучения в суммарную поглощенную дозу во многих случаях можно пренебречь. Однако это излучение присутствует даже при очень большой толщине защиты, и оно определяет нижний предел эффективности защиты.

1.1.2. Солнечные космические лучи

Солнечные вспышки играют важную роль в радиационной обстановке для многих КА. Активность солнечных вспышек изменяется с периодом в 11 лет (так называемые 11-летние солнечные циклы). Большая часть солнечных вспышек имеет очень низкую интенсивность, однако статистические результаты за последние три солнечных цикла показали, что существует высокая вероятность возникновения, по крайней мере, одного солнечного события в каждом цикле с относительно высокой интенсивностью. Следовательно, при определении радиационных условий эксплуатации разрабатываемых КА, рассчитанных на 5–6 лет работы в более интенсивный период солнечной активности, обязательно должны учитываться интенсивные солнечные события. Однако требования, основанные на экстремально жестком, интенсивном солнечном событии (таком как вспышка, наблюдавшаяся в октябре 1989 г.), для большинства КА будут очень консервативными, поскольку такие интенсивные вспышки возникают крайне редко.

В результате солнечных вспышек происходит, как правило, выброс высокоэнергетических солнечных частиц, состоящих преимущественно из протонов с небольшим содержанием α -частиц (5...10 %) и более тяжелых ядер от углерода до никеля (с преобладанием кислорода) с энергией 1...100 МэВ/нуклон. Потоки солнечных космических лучей (СКЛ) появляются эпизодически, а их интенсивность может достигать величин, превосходящих на многие порядки потоки галактических космических лучей (ГКЛ). В большинстве случаев максимальная энергия ускоренных частиц не превышает 10 МэВ/нуклон. Такие вспышки происходят довольно часто (в годы солнечной активности примерно 1 раз в неделю). Реже, примерно раз в месяц, бывают вспышки, в которых частицы ускоряются до 100 МэВ/нуклон. В еще более редких событиях, раз в год, частицы получают энергию до 1 ГэВ. Особенно мощные события, возникающие 2–4 раза за 11-летний цикл солнечной активности, характеризуются очень большими потоками ускоренных частиц, максимальные энергии которых достигают 10 ГэВ и выше.

Существует статистическая модель для менее консервативного предсказания максимального ожидаемого потока от солнечной вспышки, которая объединяет данные за 30 лет наблюдений. Данная модель дает оценки для предельных значений флюенса частиц в зависимости от их энергии. Данные значения не учитывают геомаг-

нитную или атмосферную защиту, но они применимы для геостационарной орбиты (ГСО) или глубокого космоса. В табл. 1.1 приведены результаты расчета с использованием данной модели для различных энергий протонов. Эти значения представляют собой суммарный флюенс на Земле от отдельной интенсивной вспышки, а не суммарный флюенс от всех солнечных вспышек, возникающих за все время полета КА. Однако эти результаты показывают, что максимальный ожидаемый флюенс от отдельной вспышки составляет порядка 10^{10} см⁻². Флюенс от солнечной вспышки также зависит от расстояния до Солнца: он резко падает обратно пропорционально этому расстоянию.

Таблица 1.1

Результаты расчетов флюенсов протонов для наихудшего солнечного события с использованием статистической модели

Энергия, МэВ	Флюенс протонов для наихудшего случая, см ⁻²
10	$4,4 \cdot 10^{10}$
30	$1,3 \cdot 10^{10}$
50	$6,1 \cdot 10^9$
100	$1,7 \cdot 10^9$

Магнитосфера Земли существенно экранирует протонный поток для низких орбит и при малых углах наклона, вследствие чего для низких орбит остаются только высокоэнергетические протоны. Ионы более тяжелых элементов, входящие в состав СКЛ, в общем случае не дают существенного вклада в суммарную величину поглощенной дозы. Однако они могут вызывать возникновение сбоев и отказов за счет эффектов от отдельных ядерных частиц. При оценке этих эффектов необходимо иметь интегральные энергетические спектры протонов и спектры линейных потерь энергии (ЛПЭ) для ионов.

1.1.3. Галактические космические лучи

Галактические космические лучи не дают заметного вклада в суммарную поглощенную дозу (менее нескольких рад за год). Однако они являются причиной возникновения в микросхемах эффектов от отдельных ядерных частиц (одиночные радиационные эффекты). Состав ГКЛ изучен довольно подробно. Сейчас известны не только потоки групп ядер в различных диапазонах энергий, но и относительное процентное содержание отдельных ядер. Ядерная компонента ГКЛ разбивается на пять групп: протоны, α -частицы, L-группа (легкие ионы с атомными

номера $Z = 3-5$), M -группа (средние ионы $Z = 6-9$) и H -группа (тяжелые ионы $Z \geq 10$). Интенсивность различных групп ядер в области релятивистских энергий изучена достаточно хорошо. Изменение интенсивности ГКЛ с фазой солнечного цикла называют 11-летней вариацией космических лучей. Величина ее для разных энергий различна. Так, например, для $E \sim 100$ МэВ она достигает 20...30 %, в то время как для $E > 2$ ГэВ ее величина не превышает 1...3 %.

Отличия ЛПЭ-спектров ТЗЧ ГКЛ для разных орбит незначительны. Только для орбит с малыми углами наклона и низкими высотами необходимо учитывать экранирование потока протонов и ТЗЧ магнитосферой Земли. Практически для всех важных случаев (ЛПЭ более 1 МэВ·см²/мг) спектры отличаются между собой не более, чем в два раза, поэтому для многих приложений эти различия можно считать незначительными и пользоваться данными, полученными, например, для геостационарной орбиты.

Важной особенностью ЛПЭ-спектров ТЗЧ ГКЛ является то, что в области значений ЛПЭ 30...35 МэВ·см²/мг наблюдается резкий (на несколько порядков величины) спад интегральной плотности потока частиц. Вследствие этого частицы, имеющие ЛПЭ, превосходящие данные значения, практически не дают вклада в частоту возникновения эффектов от отдельных ядерных частиц, следовательно, они часто не учитываются при оценке показателей стойкости микросхем к данным эффектам.

1.1.4. Межпланетное пространство

Уровни протонного воздействия в глубоком космосе схожи с наблюдаемыми на геостационарной орбите, при этом наибольший вклад дают СКЛ (тем не менее, необходима корректировка на спад интенсивности потоков частиц солнечных вспышек с ростом расстояния до Солнца). Однако межпланетные КА могут проходить через интенсивные радиационные пояса других планет. В частности, Юпитер и Сатурн обладают интенсивными радиационными поясами, которые распространяются на значительно большее расстояние, чем радиационные пояса Земли. КА, которые должны проходить через эти области, будут испытывать очень высокие уровни радиационного воздействия.

Не все планеты обладают радиационными поясами. Например, Марс имеет слабое магнитное поле, слишком малое для захвата высокоэнергетических частиц. Следовательно, уровни радиационного воздействия вблизи Марса будут определяться частицами

ГКЛ и СКЛ. Атмосфера Марса намного тоньше земной, однако она все еще обеспечивает защиту, достаточную для снижения радиационных уровней на поверхности Марса до относительно низких значений.

1.2. Ионизирующие излучения ядерного взрыва

Состав, интенсивность, длительность импульсов излучения и временные интервалы между компонентами излучения ЯВ зависят от типа и мощности боеприпаса, высоты взрыва над Землей и удаленности точки регистрации излучения от эпицентра.

В современных ядерных и термоядерных боеприпасах выделяют мгновенное гамма-излучение, вторичные гамма-излучения, сверхжесткое рентгеновское излучение (СЖР) и излучение нейтронов деления и термоядерных нейтронов. После инициации ЯВ излучение боеприпаса взаимодействует с элементами конструкции боеприпаса и с окружающей средой, в результате чего возможны различные спектрально-энергетические и временные сочетания факторов ЯВ. За счет торможения заряженных частиц в элементах конструкции и атмосфере создается мощный электромагнитный импульс (ЭМИ). Например, при взрыве в атмосфере СЖР-излучение, имеющее энергию ~ 80 кэВ, активно тормозится, генерируя при этом мощный импульс ЭМИ.

Временная форма гамма-излучения высотного и наземного ЯВ приведена на рис. 1.5, форма ЭМИ – на рис. 1.6. Спектр быстрых нейтронов, выходящих с поверхности термоядерного взрывного устройства, приведен в табл. 1.2, а удельный выход мгновенных нейтронов и гамма-излучения из атомного и термоядерного взрывного устройства – в табл. 1.3.

Таким образом видно, что излучение ЯВ состоит из импульсов гамма-, СЖР- и нейтронного излучений и сопровождается ЭМИ. Эти излучения приводят к образованию структурных дефектов в полупроводниках, образованию фототоков и переходных эффектов в $p-n$ -переходах, импульсным электрическим перенапряжениям и термомеханическим эффектам (за счет СЖР). В свою очередь эти эффекты приводят к временному или окончательному выходу из строя радиоэлектронной аппаратуры, систем управления и связи.

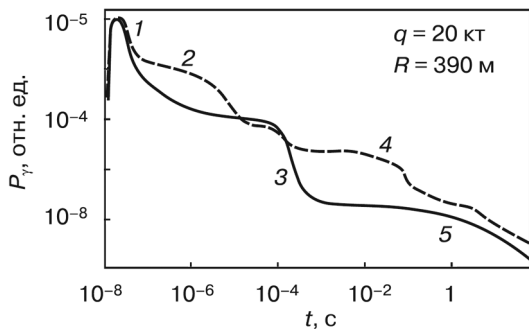


Рис. 1.5. Временная форма гамма-излучения высотного (сплошная линия) и наземного (пунктирная линия) ЯВ:
 1 – мгновенная компонента; 2 – гамма-излучение, рождаемое в актах неупругого рассеяния нейтронов; 3 – изомерное излучение;
 4 – излучение, рождаемое в актах захвата нейтронов;
 5 – осколочное излучение

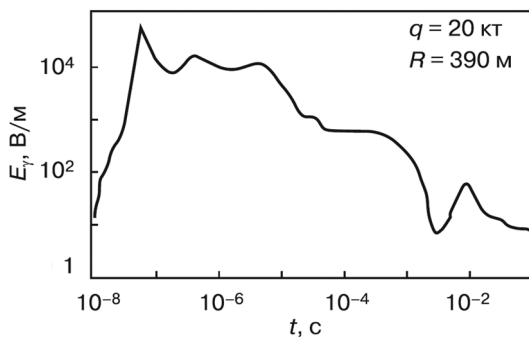


Рис. 1.6. Временная форма радиального компонента ЭМИ наземного ЯВ

Таблица 1.2

Энергетическое распределение быстрых нейтронов, выходящих с поверхности термоядерного взрывного устройства

E_n , МэВ	Доля, %	E_n , МэВ	Доля, %
0,111 ... 1,11	38,0	6,36 ... 8,18	3,3
1,11 ... 2,35	18,0	8,18 ... 10,0	2,9
2,35 ... 4,06	11,0	10,0 ... 12,2	5,3
4,06 ... 6,36	6,6	12,2 ... 14,2	14,9

Удельный выход мгновенных нейтронов и гамма-излучения

Тип устройства	Гамма-излучение ($E_\gamma > 0,1$ МэВ), квант/кТ	Нейтроны, нейтр/кТ	
		Полный поток	$E_n > 0,1$ МэВ
Атомное Термоядерное	$(2 \dots 10) \cdot 10^{22}$ $\sim 6 \cdot 10^{22}$	$(1 \dots 3) \cdot 10^{22}$ $(1,5 \dots 2) \cdot 10^{23}$	$(0,8 \dots 1) \cdot 10^{23}$ $\sim 1 \cdot 10^{23}$

В случае проведения ЯВ в космосе кроме прямого воздействия факторов ЯВ на электронику КА воздействует также излучение электронов искусственных радиационных поясов Земли (ИРПЗ). ИРПЗ образуются при захвате электронов ЯВ геомагнитным полем. Величина плотности потока электронов ИРПЗ значительно превышает плотность потока электронов, характерную для естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ).

1.3. Ионизирующие излучения атомных электростанций

Уровни нейтронного и гамма-излучения в активной зоне атомного реактора безусловно очень высоки, но они значительно снижаются после первичной защиты и еще более снижаются после вторичной защиты. В обслуживающих помещениях уровни ИИ настолько малы, что не оказывают влияния на работоспособность контрольно-измерительной аппаратуры и систем управления.

Таблица 1.4

Возможные уровни излучений за первичной и вторичной защитами реакторов АЭС

Излучение	Нормальная работа	Авария
Гамма-излучение*: доза, рад(Si) мощность дозы, рад(Si)/ч	$10^3 \dots 10^8$ $10^{-3} \dots 10^2$	$2 \cdot 10^4$ 10^6
Нейтроны**: флюенс, нейтр/см ² плотность потока, нейтр/(см ² ·с)	$10^9 \dots 10^{14}$ $10^0 \dots 10^5$	– –
Электроны/протоны: доза, рад(Si)	–	$2 \cdot 10^8$
Температура, °С	–	260
Влажность, % RH при 20 °С	10 ... 100	100

*Доза гамма-излучения: 10^8 рад(Si) между первичной и вторичной защитой, 10^6 рад(Si) за вторичной защитой.

**Энергия нейтронного излучения за вторичной защитой 100 кэВ. Количество повреждений от нейтронов с энергией 100 кэВ в 10–20 раз меньше, чем от нейтронов с энергией 1 МэВ.

В табл. 1.4 приведены возможные уровни нейтронного и гамма-излучения за первичной и вторичной защитами реакторов АЭС.

В то же время на АЭС имеется вероятность разрыва трубопровода с теплоносителем первого или второго контура, который сопровождается резким повышением температуры, воздействием парогазовой смеси, повышением давления и разлитием радиоактивного теплоносителя. Такая авария с потерей теплоносителя называется LOCA (Loss-Of-Coolant Accident). Динамика изменения мощности дозы гамма-излучения и накопления дозы при авариях типа LOCA приведены на рис. 1.7.

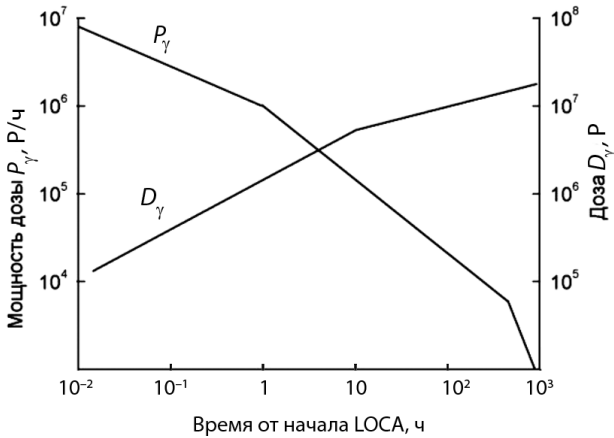


Рис. 1.7. Динамика изменения мощности дозы гамма-излучения и накопления дозы при авариях типа LOCA

Хотя в помещениях, где находятся системы управления, воздействие факторов LOCA исключено, в ряде других помещений, где расположены системы слежения, пожаротушения, управления технологическими задвижками и другой техникой, воздействия излучений на электронику возможны.

2. ОСНОВЫ ФИЗИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ С ПОЛУПРОВОДНИКАМИ

2.1. Образование структурных повреждений в полупроводниках (эффекты смещения)

Теория дефектообразования в твердом теле основывается на предположении о наличии двух процессов. Первичный процесс – взаимодействие ИИ с атомом мишени и выбивание последнего из узла решетки при сообщении ему некоторой энергии. Вторичный процесс – взаимодействие выбитого атома с соседними атомами (при этом может иметь место каскад атомных соударений, сопровождающийся вторичными смещениями атомов). Так как при образовании каскада столкновений между собой взаимодействуют атомы облучаемого материала, то различия в количестве смещенных атомов и их пространственном распределении определяются лишь энергией первично выбитых атомов.

Энергию атома отдачи определяют как функцию угла отдачи, используя законы сохранения импульса и энергии. При упругих столкновениях, в соответствии с нерелятивистской механикой, энергия атома отдачи E_a определяется как

$$E_a = \frac{4mM}{(m+M)^2} E \sin^2 \frac{\theta}{2}, \quad (2.1)$$

где m , M – массы налетающей и покоящейся частиц; E – энергия налетающей частицы; θ – угол отдачи между направлениями движения налетающей частицы до и после столкновения (рис. 2.1).

Из выражения (2.1) видно, что энергия атома отдачи E_a зависит от угла отдачи θ . При скользких столкновениях ($\theta = 0$) $E_a = 0$. При лобовых столкновениях ($\theta = 180^\circ$) атом отдачи получает максимальную энергию $E_a = E_{a \max}$, где величина $E_{a \max}$ определяется по формуле

$$E_{a \max} = \frac{4mM}{(m+M)^2} E. \quad (2.2)$$

Считается, что атом смещается, если ему передается энергия $E_a > E_d$, где E_d (согласно Зейтцу) – пороговая энергия образования смещений. При этом образуется простейший дефект по Френкелю (пара междуузельный атом + вакансия). Пороговая энергия образования смещений зависит от

атомного веса, характера химической связи, типа кристаллической решетки, условий облучения (например, температура образца) и др. Значения E_d для различных материалов определяют экспериментально по минимальной энергии бомбардирующих частиц E_{\min} , необходимой для заметного изменения какой-либо характеристики облучаемого материала. Имеющиеся в литературе значения пороговой энергии образования смещений для различных полупроводниковых материалов были получены с помощью экспериментов с использованием моноэнергетических пучков электронов с энергией в диапазоне от 0,1 до 1 МэВ. В табл. 2.1 приведены значения пороговой энергии образования смещений для некоторых полупроводниковых материалов, а также значения минимальной энергии электронов, необходимые для образования смещений.



Рис. 2.1. Схема упругого взаимодействия быстрой частицы массы m с атомом кристалла-мишени массы M

Таблица 2.1

**Пороговая энергия образования смещений
для некоторых полупроводниковых материалов**

Материал	Смещаемый атом	E_d , эВ	E_{\min} , кэВ	T , К
Si	Si	12,9	145	300
Ge	Ge	14,5	360	300
GaAs	Ga	8,8	228	300
	As	14,0	355	
InP	In	6,6	270	77
	P	8,8	110	
InAs	In	6,7	277	77
	As	8,5	236	
InSb	In	6,2	268	-
	Sb	10,0	398	
GaSb	Ga	6,2	-	77
	Sb	7,5	-	
ZnSe	Zn	7,1	180	-
	Se	8,2	238	
CdS	Cd	7,3	290	-
	S	8,7	115	

Полное число смещений в единице объема полупроводникового кристалла N_d определяется выражением

$$N_d = \int_0^{E_{\max}} n_0 \Phi \sigma_d(E) \nu(E) dE, \quad (2.3)$$

где n_0 – число атомов кристалла-мишени в единице объема ($\sim 4,99 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ для Si и $\sim 4,42 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ для Ge); Φ – интегральный поток быстрых частиц; $\sigma_d(E)$ – поперечное сечение столкновений, приводящих к смещениям (поперечное сечение столкновений быстрой частицы, приводящих к смещениям атомов, определяется площадью кольцеобразной области, в которой должен лежать путь частицы для того, чтобы могла осуществляться передача атому достаточной для смещения энергии); $\nu(E)$ – число смещений, приходящееся на каждый первично смещенный атом.

Величина ν зависит от энергии первично смещенных атомов E_a , которая, в свою очередь, определяется энергией налетающих частиц. Если $E_a \gg E_d$, то первично смещенный атом может смещать соседние атомы, которые в свою очередь также могут производить смещения. Такой каскадный процесс будет продолжаться до тех пор, пока энергия выбитых атомов не станет столь малой, что при последующих столкновениях они не смогут передавать атомам решетки энергию, большую чем E_d . Точное определение величины ν для различных видов ИИ связано с большими трудностями, и обычно проводится примерная ее оценка на основании упрощенных представлений. Согласно модели Кинчина–Пиза величина $\nu(E_a)$ равна

$$\nu(E_a) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 < E_a < 2E_d; \\ E_a / (2E_d) & \text{при } 2E_d < E_a < E_i; \\ E_i / (2E_d) & \text{при } E_a > E_i, \end{cases} \quad (2.4)$$

где E_i – пороговая энергия ионизации движущегося атома (7,1 кэВ для Si; 12,4 кэВ для Ge).

Так как каскадный процесс образования смещений является статистическим, для примерной оценки полного числа смещений можно применить значение $\nu(\bar{E}_a)$, где \bar{E}_a – средняя энергия, передаваемая выбитому атому.

В модели Кинчина–Пиза предполагается, что при энергии атомов отдачи свыше E_i вся энергия тратится на возбуждение электронов, а ниже E_i энергетические потери обусловлены смещениями атомов. При $E_a < E_i$ в среднем половина энергии первично смещенного атома расходуется на образование вторичных смещений, а вторая половина теряется в столкновениях, не сопровождающихся смещением атомов.

Согласно Зейтцу пороговая энергия ионизации движущегося атома определяется выражением

$$E_i = \frac{1}{8} \frac{M}{m} \Delta E_g, \quad (2.5)$$

где M – масса движущегося атома; m – масса электрона; ΔE_g – наименьшая энергия возбуждения электронов, совпадающая с шириной запрещенной зоны.

Условием ионизации по Зейтцу является равенство скоростей движущегося атома и самого медленного орбитального электрона.

2.1.1. Смещение атомов при воздействии нейтронов

Поскольку нейтрон не имеет электрического заряда, он рассеивается непосредственно на ядрах атомов кристалла-мишени. В зависимости от энергии нейтрона и массы ядра мишени рассеяние может быть упругим или неупругим. Упругое рассеяние нейтронов наиболее вероятно при их энергии $E \geq 300$ эВ. При этом энергия, передаваемая первично смещенному атому, определяется выражениями (2.1) и (2.2). Вследствие высокой проникающей способности быстрых нейтронов в веществах со средним атомным весом можно считать, что их рассеяние изотропно. В действительности быстрые нейтроны рассеиваются предпочтительнее в направлении своего распространения. С учетом этой небольшой анизотропии средняя энергия, передаваемая атому при упругом рассеянии, будет равна

$$\bar{E}_a = f \frac{E_{a\max}}{2}, \quad (2.6)$$

где f – поправочный множитель, учитывающий анизотропию рассеяния быстрых нейтронов (для веществ со средним атомным весом и энергии нейтронов 1...2 МэВ величина f составляет 0,6...0,85).

Нейтроны, испускаемые при делении изотопа ^{235}U , имеют спектр энергий от $\sim 0,5$ до 10 МэВ, при этом средняя энергия нейтронов состав-

ляет $\sim 1,5$ МэВ. При таких значениях энергии нейтронов можно считать, что имеют место только упругие столкновения. Поперечное сечение упругих столкновений, приводящих к смещениям, для нейтронов спектра деления очень слабо зависит от энергии нейтронов и для большинства полупроводниковых материалов составляет $(2 \dots 3) \cdot 10^{-24}$ см².

При облучении полупроводниковых материалов нейтронами спектра деления средняя энергия, передаваемая выбитому атому, значительно превосходит пороговую энергию образования смещений. Вследствие этого при нейтронном облучении первично выбитые атомы образуют каскады дополнительных смещений, в результате чего в облучаемом кристалле образуются более сложные структурные дефекты, например области разупорядочения.

2.1.2. Смещение атомов при воздействии высокоэнергетических заряженных частиц

Рассмотрим образование смещений при воздействии протонов и электронов, поскольку, как уже ранее отмечалось, именно этими частицами определяются интегральные радиационные эффекты в ПП и ИС при их эксплуатации в условиях КП, а вклад всех остальных ионов в дозу структурных повреждений пренебрежимо мал.

При взаимодействии высокоэнергетических заряженных частиц с твердым телом доминирующим процессом передачи энергии является электромагнитное взаимодействие со свободно связанными электронами в валентной зоне. Этот процесс, известный как ионизация, переводит электрон из валентной зоны в зону проводимости материала, одновременно создавая избыточный электрон в зоне проводимости и дырку в валентной зоне (электронно-дырочная пара).

Ионизация не является единственным механизмом потерь энергии. Электроны и протоны могут передавать энергию связанным ядрам решетки путем взаимодействия с ядрами атомов. Если энергия, переданная при столкновении, достаточно велика, то атом может сместиться из своего устойчивого местоположения с образованием в материале разупорядоченной области. Этот процесс, называемый дефектом смещения, обычно является доминирующим радиационным эффектом для оптоэлектронных приборов. Пороговая энергия образования смещения в кремнии составляет приблизительно 12,9 эВ, однако общая энергия, переданная решетке, для сложных каскадов повреждений может превышать 10 000 эВ. В среднем на каждое событие смещения расходуется энергия, значительно большая, чем на событие ионизации. Процессы ионизационных потерь энергии остаются доминирующими с точки зрения общих энергетиче-

ских потерь падающих частиц, поскольку вследствие малых размеров ядер сечение ядерных взаимодействий (смещений) приблизительно в 10^4 раз меньше, чем для ионизации.

При облучении полупроводников высокоэнергетическими ионами значения энергии, передаваемой атому отдачи при упругом рассеянии, и максимальной передаваемой энергии могут быть определены по формулам (2.1) и (2.2). Здесь важной особенностью является то, что при упругом рассеянии ионов более вероятна передача атомам мишени малых количеств энергии (т.е. мала вероятность рассеяния падающих ионов под большими углами к первоначальному направлению). Вследствие указанной анизотропии рассеяния средняя энергия, передаваемая выбитым атомам, определяется с помощью следующего выражения:

$$\bar{E}_a = \frac{E_{a\max} E_d}{E_{a\max} - E_d} \ln \frac{E_{a\max}}{E_d}. \quad (2.7)$$

Как уже отмечалось выше, с точки зрения введения структурных повреждений в результате смещений атомов и дозовой деградации параметров ПП и ИС при воздействии высокоэнергетических ионов КП главную роль играют протоны. Высокоэнергетические протоны с энергией порядка нескольких мегаэлектронвольт в среднем передают при столкновении атомам кремния и германия очень малую энергию (~ 130 эВ). В результате при протонном облучении роль каскадных процессов в образовании смещений мала. Однако, поскольку в одном акте рассеяния протон теряет малую часть своей энергии, он может создать большое количество смещенных атомов.

Поперечное сечение упругих резерфордских столкновений протонов, приводящих к смещениям атомов, зависит от энергии протона и увеличивается при снижении энергии протонов, что ведет к росту эффективности образования смещений. В конце пробега протон захватывает электрон и, превращаясь в атом водорода, эффективно производит смещение атомов с сечением, равным боровскому ($\sim 8,5 \cdot 10^{-17}$ см²). При этом на глубине максимального пробега протонов при $E_p \leq 1$ кэВ образуется узкая область с существенно неравномерным распределением дефектов. Когда энергия атома водорода снизится до нуля, он останавливается в кристалле, легируя его. В процесс создания смещений атомов могут вносить вклад и ряд других механизмов как упругого, так и неупругого рассеяния протонов, которые надо учитывать в определенном диапазоне энергий протонов. На рис. 2.2 приведена энергетическая зависимость полных поперечных сечений взаимодействий протонов с атомами кремния, приводящих к смещениям атомов.

На рис. 2.3 представлена энергетическая зависимость пробегов протонов в кремнии. Видно, что при облучении кремниевых приборов (толщина ~ 400 мкм) протонами с энергией свыше 1 МэВ обеспечивается «пролетная» геометрия эксперимента, т.е. пробег протонов в кремнии значительно больше толщины пластин, на которых были изготовлены облучаемые приборы, и неравномерностью распределения дефектов по глубине проникновения протона можно пренебречь.

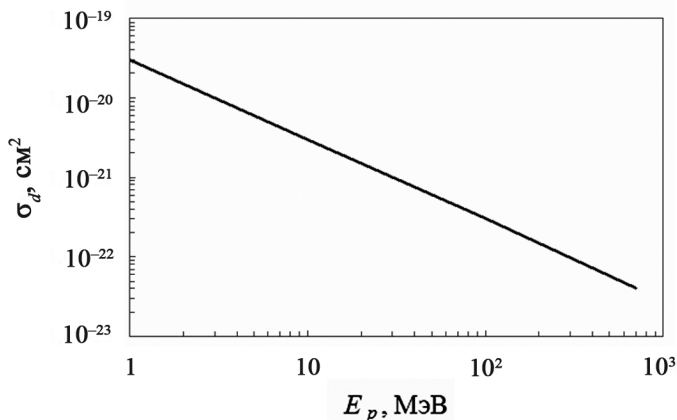


Рис. 2.2. Энергетическая зависимость полных поперечных сечений взаимодействий протонов с атомами кремния, приводящих к смещениям атомов

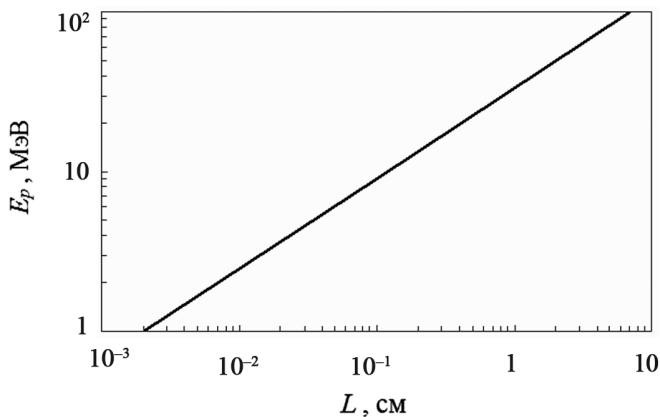


Рис. 2.3. Величина пробега протонов в кремнии для интервала энергий 0,1...100 МэВ