

№ 1896

К.И. Таперо

Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения

Основы радиационной стойкости
изделий электронной техники
космического применения

Курс лекций

№ 1896

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

Кафедра полупроводниковой электроники
и физики полупроводников

К.И. Таперо

Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения

Основы радиационной стойкости
изделий электронной техники
космического применения

Курс лекций

Рекомендовано редакционно-издательским
советом университета



Москва 2011

УДК 621.38

T12

Рецензент

д-р техн. наук, проф. *В.Н. Улимов*

Таперо, К.И.

T12 Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения : основы радиационной стойкости изделий электронной техники : курс лекций / К.И. Таперо. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2011. – 252 с.

ISBN 978-5-87623-415-5

В курсе лекций по дисциплине «Основы радиационной стойкости изделий электронной техники космического применения» рассмотрены следующие вопросы: основы физики взаимодействия ионизирующих излучений с полупроводниками; изменение электрофизических параметров биполярных приборных структур вследствие введения структурных дефектов при радиационном облучении; дозовые ионизационные эффекты в структуре Si/SiO₂ и их влияние на характеристики полупроводниковых приборов и микросхем; особенности деградации биполярных приборов и микросхем при воздействии низкоинтенсивного ионизирующего излучения; одиночные события в изделиях электроники и микроэлектроники при воздействии отдельных заряженных частиц космического пространства; численное моделирование радиационных эффектов в кремниевых приборах при воздействии ионизирующего излучения космического пространства.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 210100 «Электроника и нанoeлектроника» и по специальности 210104 «Микроэлектроника и твердотельная электроника».

УДК 621.38

ISBN 978-5-87623-000-0

© Таперо, К.И., 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

Оглавление.....	3
Условные обозначения.....	6
Введение.....	9
1. ОСНОВЫ ФИЗИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ С ПОЛУПРОВОДНИКАМИ.....	12
1.1. Радиационные условия в космическом пространстве.....	12
1.1.1. Внешние воздействующие факторы космического пространства....	12
1.1.2. Источники ионизирующих излучений в космическом пространстве.....	14
1.2. Величины, характеризующие ионизирующее излучение и его взаимодействие с веществом.....	16
1.2.1. Некоторые величины и единицы, характеризующие ионизирующее излучение и его поле.....	16
1.2.2. Некоторые величины и единицы, характеризующие взаимодействие ионизирующего излучения с веществом.....	18
1.2.3. Некоторые дозиметрические величины и единицы.....	20
1.2.4. Некоторые величины и единицы, характеризующие изотопные источники ионизирующих излучений.....	23
1.3. Физические процессы при взаимодействии ионизирующих излучений с материалами электронной техники.....	24
1.3.1. Первичные радиационные эффекты при воздействии проникающей радиации на полупроводниковые материалы.....	25
1.3.2. Смещение атомов из узлов решетки при воздействии ионизирующих излучений.....	26
1.3.3. Ионизация при воздействии проникающей радиации на полупроводниковые материалы.....	40
1.3.4. Ядерные превращения при воздействии ионизирующих излучений.....	49
1.3.5. Термостабильные радиационные центры в полупроводниках.....	51
1.3.6. Изменение электрофизических параметров полупроводниковых материалов при радиационном облучении.....	55
2. ИЗМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БИПОЛЯРНЫХ ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР В СЛЕДСТВИЕ ВВЕДЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ РАДИАЦИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ.....	60
2.1. Дiodные структуры.....	60
2.2. Транзисторные структуры.....	64
2.3. Устойчивость радиационных изменений электрических параметров полупроводниковых приборов.....	68
3. ДОЗОВЫЕ ИОНИЗАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В СТРУКТУРЕ Si/SiO₂ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И МИКРОСХЕМ.....	71

3.1. Особенности строения структуры Si/SiO ₂	71
3.1.1. Особенности строения диоксида кремния.....	71
3.1.2. Особенности строения границы раздела Si/SiO ₂	78
3.1.3. Влияние водорода и водородсодержащих соединений на свойства структуры Si/SiO ₂	81
3.2. Электрические методы исследований заряда в оксиде и плотности поверхностных состояний	84
3.2.1. Метод вольт-фарадных характеристик.....	85
3.2.2. Метод подпороговых вольт-амперных характеристик.....	87
3.2.3/ Методы, основанные на измерении надпороговой вольт-амперной характеристики транзисторов	91
3.2.4. Метод накачки заряда	92
3.3. Накопление и релаксация зарядов в структуре Si/SiO ₂ при радиационном облучении и отжиге	94
3.3.1. Общее описание процессов накопления заряда в структурах Si/SiO ₂ при радиационном облучении.....	94
3.3.2. Выход заряда	96
3.3.3. Перенос дырок через SiO ₂	98
3.3.4. Накопление и нейтрализация заряда на ловушках в оксиде.....	102
3.3.5. Механизм нейтрализации заряда в оксиде	107
3.3.6. Особенности накопления поверхностных состояний при радиационном облучении	110
3.3.7. Латентное накопление поверхностных состояний	116
3.3.8. Накопление поверхностных состояний в зависимости от интенсивности излучения	118
3.3.9. Отжиг поверхностных состояний	120
3.3.10. Механизм накопления поверхностных состояний.....	121
3.3.11. Граничные ловушки.....	127
3.4. Влияние космической радиации на характеристики приборов и микросхем, изготовленных на основе МОП-структур.....	130
3.4.1. Изменение характеристик МОП-транзисторов при радиационном облучении	130
3.4.2. Влияние конструктивно-технологических характеристик на радиационную стойкость МОП-структур	136
3.4.3. Радиационные эффекты в МОП-структурах с ультратонкими оксидами.....	138
3.4.4. Некоторые особенности дозовых радиационных эффектов в МДП-структурах с альтернативными диэлектриками	141
3.4.5. Влияние полевых оксидов на радиационную стойкость интегральных схем.....	146
3.4.6. Особенности проявления дозовых радиационных эффектов в микросхемах, изготовленных по КНИ-технологии	150
3.5. Особенности радиационных испытаний приборов и микросхем на основе МОП- и КМОП-структур.....	159

3.5.1. Корреляция между отдельными транзисторами и микросхемами	159
3.5.2. Наихудший электрический режим	162
3.5.3. Влияние высокотемпературной нагрузки (наработки) перед облучением на радиационную стойкость	169
3.5.4. Выбор источников ионизирующих излучений при проведении радиационных испытаний МОП и КМОП ИС	172
3.5.5. Процедуры радиационных испытаний, учитывающие влияние факторов низкой интенсивности облучения	176
4. ОСОБЕННОСТИ ДЕГРАДАЦИИ БИПОЛЯРНЫХ ПРИБОРОВ И МИКРОСХЕМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ (ЭФФЕКТ ELDRS)	181
4.1. Влияние интенсивности излучения на радиационный отклик биполярных транзисторов	182
4.2. Влияние интенсивности излучения на радиационный отклик биполярных интегральных схем	189
4.3. Физические модели эфффектов низкоинтенсивного облучения биполярных приборов и микросхем	193
4.4. Проблема экспериментального моделирования воздействия излучений низкой интенсивности на биполярные изделия	195
4.5. Выводы	199
5. ОДИНОЧНЫЕ СОБЫТИЯ В БИС ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ОТДЕЛЬНЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА	200
5.1. Основные виды и классификация одиночных событий	200
5.1.1. Краткое описание основных видов ОС	202
5.1.2. Основные параметры чувствительности полупроводниковых приборов и микросхем к одиночным событиям	211
5.2. Физические процессы, приводящие к возникновению одиночных событий	216
5.2.1. Общее описание процессов возникновения одиночных событий	216
5.2.2. Образование носителей заряда (ионизация)	221
5.2.3. Рекомбинация неравновесных носителей заряда	226
5.2.4. Перенос неравновесных носителей	232
5.2.5. Сбор заряда	234
5.3. Экспериментальные методы исследования чувствительности изделий полупроводниковой электроники к одиночным событиям при воздействии тяжелых заряженных частиц и протонов	239
5.3.1. Эксперименты на ускорителях протонов	240
5.3.2. Эксперименты на ускорителях ионов	242
5.3.3. Эксперименты с изотопными источниками	245
5.3.4. Эксперименты с использованием ионных микропучков	247
5.3.5. Эксперименты с использованием имитаторов	247
Библиографический список	249

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

ELDRS — повышенная чувствительность при низкой интенсивности излучения (Enhanced Low Dose Rate Sensitivity)

EOT – эквивалентная толщина оксида (equivalent oxide thickness)

RILC – радиационно-индуцированный ток утечки (radiation-induced leakage current)

RNO – переокисленный азотированный оксид (reoxidized nitrided oxide)

SEB – одиночный эффект выгорания (Single Event Burnout)

SEFI – одиночный эффект функционального прерывания (Single Event Functional Interrupt)

SEGR – одиночный эффект пробоя подзатворного диэлектрика (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)

SET – переходная ионизационная реакция, вызванная попаданием ионизирующей частицы в чувствительную область микросхемы (Single Event Transient)

SEU – одиночные обратимые сбои (Single Event Upset)

SILC – ток утечки, вызванный электрическим полем в оксиде (stress-induced leakage current)

STI – изоляция с использованием поверхностных канавок (shallow-trench isolation)

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

БИС – большая интегральная схема

БТ – биполярный транзистор

ВАХ – вольт-амперная характеристика

ВФХ – вольт-фарадная характеристика

ГКЛ – галактические космические лучи

ДОЗУ – динамическое оперативное запоминающее устройство

ИИ – ионизирующее излучение

ИС – интегральная схема

КА – космический аппарат

КМОП – комплементарные структуры металл–оксид–полупроводник

КНИ – кремний на изоляторе

КП – космическое пространство

ЛПЭ – линейные потери энергии

МДП – металл–диэлектрик–полупроводник

МНОП – металл–нитрид–оксид–полупроводник

МОП – металл–оксид–полупроводник

ННЗ – неосновные носители заряда
 ОЗЧ – отдельные заряженные частицы
 ОПЗ – область пространственного заряда
 ОС – одиночные события
 ОЯЧ – отдельные ядерные частицы
 ПЗУ – постоянное запоминающее устройство
 ПП – полупроводниковые приборы
 ПС – поверхностные состояния
 РД – радиационный дефект
 РПЗ – радиационные пояса Земли
 РТП – радиационно-технологические процессы
 РЭА – радиоэлектронная аппаратура
 СКЛ – солнечные космические лучи
 СОЗУ – статическое оперативное запоминающее устройство
 ТЗЧ – тяжелые заряженные частицы
 ТТЛ – транзисторно-транзисторная логика
 ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь
 ЭПР – электронный парамагнитный резонанс
 ЭРИ – электрорадиоизделия
 Ф – флюенс (перенос) частиц
 N_{ot}^+ – концентрация положительно заряженных ловушек в оксиде
 φ – плотность потока частиц
 σ_d – поперечное сечение взаимодействий, приводящих к смещениям атомов
 ε_i – энергия ионизации
 Ψ_{ion} – интегральная плотность потока тяжелых заряженных частиц
 Φ_{ion} – плотность потока тяжелых заряженных частиц
 ν_{ion} – частота возникновения одиночных событий при воздействии тяжелых заряженных частиц
 ε_{ox} – относительная диэлектрическая проницаемость оксида
 Ψ_p – интегральная плотность потока протонов
 Φ_p – плотность потока протонов
 ν_p – частота возникновения одиночных событий при воздействии протонов
 ε_s – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника
 C_0 – удельная емкость подзатворного оксида
 C_{fb} – емкость в режиме плоских зон
 C_{inv} – емкость в режиме инверсии
 C_{mg} – емкость в режиме середины зоны (начала инверсии)
 D_{it} – плотность поверхностных состояний
 E_a – энергия атома отдачи
 $E_{a\max}$ – максимальная энергия атома отдачи

E_d – пороговая энергия образования смещений
 E_e – энергия электронов
 E_g – ширина запрещенной зоны
 E_i – энергия ионизации движущегося атома
 E_{ox} – напряженность электрического поля в оксиде
 E_p – энергия протонов
 I_{cp} – ток накачки заряда
 I_d – ток стока
 I_{DD} – ток потребления
 I_G – ток утечки затвора
 $I_{обр}$ – обратный ток диода
 K_τ – константа радиационного изменения времени жизни неосновных носителей заряда
 K_p – константа, характеризующая скорость роста удельного сопротивления при облучении
 K_L – константа радиационного изменения диффузионной длины неосновных носителей заряда
 L – линейные потери энергии
 N_{sub} – концентрация легирующей примеси в подложке
 P_γ – мощность дозы гамма-излучения
 p_{em} – вероятность термоэмиссии в единицу времени
 p_{tun} – вероятность туннелирования в единицу времени
 Q_{it} – удельный заряд поверхностных состояний
 Q_{ot} – удельный заряд оксида
 Q_s – удельный заряд области пространственного заряда полупроводника
 R_{Auger} – скорость Оже-рекомбинации
 $R_{band-to-band}$ – скорость межзонной рекомбинации
 R_{srh} – скорость рекомбинации Шокли–Рида–Холла
 t_{ox} – толщина оксида
 U_{DD} – напряжение питания
 U_{fb} – напряжение плоских зон
 U_g – напряжение затвора
 U_{GS} – напряжение затвор-исток
 U_{it} – вклад поверхностных состояний в пороговое напряжение
 U_{mg} – напряжение середины зоны (начала инверсии)
 U_{ot} – вклад заряда оксида в пороговое напряжение
 U_{p-n} – падение напряжения на $p-n$ переходе
 U_{th} – пороговое напряжение
 U_δ – падение напряжения на базе диода
 U_k – падение напряжения на приконтактных областях диода
 U_{np} – прямое падение напряжения на диоде

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в научно-техническом мире влиянию проникающей радиации на материалы электронной техники, полупроводниковые приборы (ПП) и интегральные схемы (ИС) уделяется достаточно большое внимание. Как правило, исследования по данной тематике ведутся по трем основным направлениям:

- физика взаимодействия ионизирующего излучения с твердым телом;
- применение проникающей радиации в технологии микроэлектроники;
- исследования деградации полупроводниковых приборов и микросхем при их эксплуатации в условиях воздействия проникающей радиации.

Первое направление исследований определяет научный базис для решения прикладных проблем: знания в области физики взаимодействия проникающей радиации с твердым телом необходимы как для обоснованного выбора оптимальных режимов радиационно-технологических процессов (РТП), так и для корректного проведения радиационных испытаний изделий электроники и микроэлектроники и последующего анализа и интерпретации результатов испытаний.

Применение проникающей радиации в технологии ПП и ИС представляет большой практический интерес с точки зрения возможности управления их параметрами. Следует отметить, что актуальность задачи регулирования электрических параметров и оптимизации технологического производства ПП и ИС непрерывно растет в связи с необходимостью увеличения объема выпуска приборов, постоянным усложнением полупроводниковой технологии и уменьшением геометрических размеров активных областей полупроводниковых приборных структур.

Актуальность тематики радиационной-стимулированной деградации ПП и ИС и радиационной стойкости элементной базы во многом обусловлена бурным развитием космической техники. Среди многочисленных факторов, влияющих на работоспособность бортовой аппаратуры и элементной базы при их эксплуатации, особое значение имеет воздействие полей ионизирующих излучений (ИИ) космического пространства (КП) – высокоэнергетических электронов, протонов и тяжелых ионов. Влияние ИИ КП на элементы, входящие в состав бортовой аппаратуры, может привести к их отказу как за счет деградации

характеристик вследствие накопления поглощенной дозы, так и за счет одиночных радиационных эффектов, имеющих вероятностный характер. Таким образом, определение радиационной стойкости ПП и ИС является одним из важных элементов задачи обеспечения надежности и безотказности бортовой аппаратуры и космического аппарата (КА) в целом.

В курсе лекций излагается материал, посвященный радиационным эффектам в кремниевых ПП и ИС при воздействии ИИ КП.

В первом разделе кратко проанализированы внешние воздействующие факторы КП, и в частности, радиационные факторы космического пространства. Рассмотрены основные величины и единицы их измерения, с которыми постоянно приходится иметь дело при определении радиационных нагрузок на аппаратуру КА и ее комплектующие, при расчетной оценке стойкости ПП и ИС, при организации, проведении и обработке результатов радиационных испытаний и исследований, проводимых в лабораторных условиях. Также кратко проанализированы основные физические процессы при взаимодействии ионизирующих излучений с полупроводниковыми материалами.

Второй раздел посвящен деградации параметров биполярных приборных структур (диодов и транзисторов) вследствие введения структурных дефектов при радиационном облучении.

Третий раздел посвящен различным аспектам радиационно-индуцированного накопления заряда в структуре Si/SiO_2 и влиянию этого процесса на характеристики ПП и ИС. Здесь также рассмотрено влияние температуры и электрического режима при облучении ПП и ИС, а также интенсивности облучения на процесс радиационно-индуцированного накопления заряда. Проанализированы процессы релаксации (отжига) накопленного при облучении заряда. Рассмотрены некоторые особенности радиационного накопления заряда, связанные с полевыми оксидами, а также со встроенными оксидами КНИ-структур. Рассмотрены основные методические моменты, которые необходимо учитывать при проведении радиационных испытаний ПП и ИС.

В четвертом разделе рассмотрены радиационные эффекты в биполярных транзисторах, а также изготовленных по биполярной технологии аналоговых и цифровых интегральных схемах, характерные для длительного низкоинтенсивного радиационного облучения при эксплуатации в условиях космического пространства.

В пятом разделе рассмотрены основные виды и классификация одиночных радиационных эффектов (одиночных событий) при воз-

действию 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.

Усвоение материала, изложенного в курсе лекций, позволит студентам:

- научиться понимать физические основы деградации изделий электроники и микроэлектроники при воздействии радиационных факторов;
- сформировать представления об организационно-техническом обеспечении радиационных испытаний изделий электроники и микроэлектроники;
- ознакомиться с существующими экспериментальными и расчетно-экспериментальными методами исследований радиационной стойкости изделий электроники и микроэлектроники.

Понимая невозможность полноценного рассмотрения всех аспектов тематики радиационных эффектов в ПП и ИС в рамках курса лекций, автор ограничился лишь достаточно кратким описанием основных моментов данной проблемы. Однако в конце курса лекций приведен список источников, которые можно порекомендовать студентам для более подробного изучения вопросов, связанных с данной тематикой.

1. ОСНОВЫ ФИЗИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ С ПОЛУПРОВОДНИКАМИ

1.1. Радиационные условия в космическом пространстве

1.1.1. Внешние воздействующие факторы космического пространства

Космические аппараты в течение срока своего существования подвергаются воздействию различных факторов космического пространства. Согласно современным представлениям, основными факторами космического пространства, способными повреждать радиоэлектронную аппаратуру (РЭА) КА, являются следующие:

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

Ионизирующее излучение состоит из потока первичных заряженных ядерных частиц (электроны, протоны и тяжелые заряженные частицы (ТЗЧ)), а также вторичных ядерных частиц – продуктов ядерных превращений, связанных с первичными частицами. Основные эффекты воздействия ИИ на РЭА связаны с ионизационными и ядерными потерями энергии первичных и вторичных частиц 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 может наблюдаться: изменение прозрачности оптических сред (радиационное окрашивание и растрескивание оптических стекол); световые помехи в оптико-электронной аппаратуре вследствие радиолюминесценции и воздей-

ствия 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 падении 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. В рамках настоящего курса будут рассмотрены эффекты, вызванные действием проникающей радиации КП. По этой причине радиационные условия в космическом пространстве следует рассмотреть несколько подробнее.

1.1.2. Источники ионизирующих излучений в космическом пространстве

Основными источниками ИИ в космическом пространстве являются:

- электроны и протоны радиационных поясов Земли (РПЗ);
- солнечные космические лучи (СКЛ);
- галактические космические лучи (ГКЛ).

Оценке радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве уделялось значительное внимание уже с первых лет освоения космического пространства. На базе наборов 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.

Модели, как правило, строятся при следующих предположениях:

- потоки частиц представляются как всенаправленные (изотропные);
- орбитальная интеграция представляется для различных высот и углов наклона;
- данные по пространственному распределению заряженных частиц представляются обычно в (L, B) -координатах (L – высота орбиты, нормированная на радиус Земли; B – напряженность магнитного поля);
- интегральный поток $\Phi(>E)$ представляет собой общий поток, $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$, при всех энергиях, выше указанной пороговой энергии;
- дифференциальный поток $\phi(E)$ представляет собой скорость изменения потока от энергии для определенного уровня энергии, $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{МэВ}^{-1}$;
- модели соответствуют конкретным промежуткам времени и поэтому относятся конкретно к условиям солнечного минимума или солнечного максимума.

В настоящее время общепризнанными являются модели РПЗ АЕ-8 (АЕ-8min, АЕ-8max) и АР-8 (АР-8min, АР-8max), которые описывают распределения электронов и протонов для минимума и максимума солнечной активности. В данных моделях даются пространственные распределения электронов с энергией 0,1...10 МэВ и протонов с энергией 0,1...400 МэВ.

Ощутимый вклад для некоторых орбит КА в суммарную поглощенную дозу могут давать потоки протонов СКЛ, которые в общем случае сложно прогнозировать. Это связано с тем, что возникновение солнечных вспышек носит случайный характер, и вследствие этого

такие характеристики СКЛ, как потоки заряженных частиц и энергетические спектры, сильно варьируются от вспышки к вспышке. В результате солнечных вспышек происходит, как правило, выброс высокоэнергетических солнечных частиц, состоящих преимущественно из протонов с небольшим содержанием альфа-частиц (5...10 %) и более тяжелых ядер от углерода до никеля (с преобладанием кислорода) с энергией 1...100 МэВ/нуклон. Потоки СКЛ появляются эпизодически, а их интенсивность может достигать величин, превосходящих на многие порядки потоки 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.

Магнитосфера Земли существенно экранирует протонный поток для низких орбит и при малых углах наклона, вследствие чего для низких орбит остаются только протоны с высокими энергиями.

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.

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. 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, альфа-частицы, *L*-группа (легкие ионы с атомными номерами $Z = 3...5$), *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. 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 порядка 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, а, следовательно, они часто не учитываются при оценке показателей стойкости микросхем к данным эффектам.

1.2. Величины, характеризующие ионизирующее излучение и его взаимодействие с веществом

В данном разделе будут рассмотрены некоторые физические величины, которые наиболее часто используются для характеристики полей ИИ и взаимодействия ИИ с веществом, а также некоторые величины, используемые в дозиметрии и для характеристики изотопных источников.

1.2.1. Некоторые величины и единицы, характеризующие ионизирующее излучение и его поле

Наиболее часто используемые величины из этой группы следующие.

Энергия частиц (в случае фотонного излучения – энергия фотонов). В системе СИ единицей измерения является 1 Дж. На практике наиболее часто используются единицы 1 эВ, 1 кэВ, 1 МэВ и т.п.

Поток частиц F – отношение числа ионизирующих частиц dN , проходящих через данную поверхность за интервал времени dt , к этому интервалу:

$$F = \frac{dN}{dt}.$$

Единица измерения – 1 с^{-1} .

Флюенс (перенос) частиц Φ – отношение числа ионизирующих частиц dN , проникающих в элементарную сферу, к площади dS центрального сечения данной сферы:

$$\Phi = \frac{dN}{dS}.$$

Единица измерения – 1 м^{-2} . На практике чаще используется единица 1 см^{-2} . Флюенс также называют интегральным потоком частиц и подразумевают при этом число частиц, падающих на единицу площади поверхности облучаемого образца.

Плотность потока ионизирующих частиц φ – отношение потока ионизирующих частиц dF , проникающих в элементарную сферу, к площади dS центрального сечения данной сферы:

$$\varphi = \frac{dF}{dS} = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d^2 N}{dS \cdot dt}.$$

Единица измерения – $1 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. На практике чаще используется единица измерения $1 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Энергетическая плотность потока ионизирующих частиц $\varphi(E)$ – отношение плотности потока ионизирующих частиц $d\varphi$ с энергией от E до $E + dE$ к энергетическому интервалу dE :

$$\varphi(E) = \frac{d\varphi}{dE} = \frac{d^2 F}{dS \cdot dE} = \frac{d^2 \Phi}{dt \cdot dE} = \frac{d^3 N}{dS \cdot dt \cdot dE}.$$

Единица измерения – $1 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ Дж}^{-1}$. На практике чаще используется единица измерения $1 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ МэВ}^{-1}$.

Угловая плотность потока ионизирующих частиц $\varphi(\Omega)$ – отношение плотности потока ионизирующих частиц $d\varphi$, распространяющихся в пределах элементарного телесного угла $d\Omega$, ориентированного в направлении Ω , к этому телесному углу:

$$\varphi(\Omega) = \frac{d\varphi}{d\Omega} = \frac{d^2 F}{dS \cdot d\Omega} = \frac{d^2 \Phi}{dt \cdot d\Omega} = \frac{d^3 N}{dS \cdot dt \cdot d\Omega}.$$

Единица измерения – $1 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}$. На практике чаще используется единица измерения $1 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}$.

Энергетическо-угловая плотность потока ионизирующих частиц $\varphi(E, \Omega)$ – отношение плотности потока ионизирующих частиц $d\varphi$ с энергией от E до $E + dE$, распространяющихся в пределах элементарного телесного угла $d\Omega$, ориентированного в направлении Ω , к энергетическому интервалу dE и этому телесному углу:

$$\varphi(E, \Omega) = \frac{d^2\varphi}{dE \cdot d\Omega} = \frac{d^3F}{dS \cdot dE \cdot d\Omega} = \frac{d^3\Phi}{dt \cdot dE \cdot d\Omega} = \frac{d^4N}{dS \cdot dt \cdot dE \cdot d\Omega}.$$

Единица измерения – $1 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}\text{Дж}^{-1}\text{ср}^{-1}$. На практике чаще используется единица измерения $1 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{МэВ}^{-1}\text{ср}^{-1}$.

1.2.2. Некоторые величины и единицы, характеризующие взаимодействие ионизирующего излучения с веществом

Наиболее часто используемые величины из этой группы следующие.

Сечение взаимодействия ионизирующих частиц (сечение взаимодействия) σ_i – отношение числа n_i определенного (i -го) типа взаимодействий ионизирующих частиц и частиц-мишеней в элементарном объеме при флюенсе Φ ионизирующих частиц к числу N частиц-мишеней в этом объеме и к этому флюенсу:

$$\sigma_i = \frac{n_i}{\Phi N}.$$

Полное сечение взаимодействия ионизирующих частиц (полное сечение взаимодействия) σ – сумма всех сечений взаимодействия σ_i ионизирующих частиц данного вида, соответствующих различным реакциям или процессам:

$$\sigma = \sum \sigma_i.$$

Единица измерения сечения взаимодействия – 1 м^2 (наиболее часто используется 1 см^2).

Средний линейный пробег заряженной частицы R – среднее значение модуля вектора между началом и концом пробега заряженной частицы в данном веществе.

Средний массовый пробег заряженной частицы R_m – произведение среднего линейного пробега R заряженной частицы в данном веществе на плотность этого вещества ρ :

$$R_m = R\rho.$$

Единица измерения среднего массового пробега – 1 кг/м^2 . На практике чаще используется единица 1 г/см^2 .

Аналогично среднему массовому пробегу вводится понятие эффективной толщины защиты как произведение толщины защиты на плотность материала, выступающего в роли защиты. Единицы измерения при этом получаются такие же, как и у среднего массового пробега.

Линейная плотность ионизации i – отношение числа dn ионов одного знака, образованных заряженной ионизирующей частицей на элементарном пути dl в веществе, к этому пути:

$$i = \frac{dn}{dl}.$$

Единицей измерения является 1 м^{-1} . На практике чаще используются единицы 1 см^{-1} или 1 мкм^{-1} .

Линейная тормозная способность вещества S – отношение энергии dE , теряемой заряженной ионизирующей частицей при прохождении элементарного пути dl в веществе, к длине этого пути:

$$S = \frac{dE}{dl}.$$

Единицей измерения является 1 Дж/м . На практике чаще используются единицы 1 МэВ/см , 1 МэВ/мкм , 1 кэВ/мкм и т.п.

Массовая тормозная способность вещества S_m – отношение линейной тормозной способности S вещества к плотности ρ этого вещества:

$$S_m = \frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dl}.$$

Вместо термина «массовая тормозная способность» часто используется термин «линейные потери энергии» (ЛПЭ), при этом вместо обозначения S_m используется обозначение L . Если введена система координат, одна из осей которой, например ось x , направлена вдоль трека ионизирующей частицы, то для ЛПЭ можно записать

$$L = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}. \quad (1.1)$$

Единицей измерения является $1 \text{ Дж}\cdot\text{м}^2/\text{кг}$. На практике чаще используется единица измерения $1 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$.

1.2.3. Некоторые дозиметрические величины и единицы

Одной из основных дозиметрических величин является поглощенная доза ИИ (доза излучения) D – отношение средней энергии dw , переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе dm вещества в этом объеме:

$$D = \frac{dw}{dm}.$$

В системе СИ единицей измерения поглощенной дозы является 1 Гр. На практике очень часто используется единица 1 рад = 0,01 Гр. Вследствие того, что ионизирующее излучение в различных материалах теряет свою энергию по-разному, часто после обозначения единиц измерения в скобках указывается материал, для которого приводится значение поглощенной дозы. Например, запись 10 крад(Si) говорит о том, что значение поглощенной дозы 10 крад приводится именно для кремния.

Мощность поглощенной дозы ИИ (мощность дозы излучения) \dot{D} – отношение приращения поглощенной дозы dD за интервал времени dt к этому интервалу времени:

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt}.$$

Единицей измерения является 1 Гр/с. Кроме того, часто используется единица 1 рад/с.

Экспозиционная доза фотонного излучения (экспозиционная доза) X – отношение суммарного заряда dQ всех ионов одного знака, созданных в воздухе, когда все электроны и позитроны, освобожденные фотонами в элементарном объеме воздуха с массой dm , полностью остановились в воздухе, к массе воздуха в указанном объеме:

$$X = \frac{dQ}{dm}.$$

Единицей измерения в системе СИ является 1 Кл/кг. На практике часто используется внесистемная единица 1 Р (рентген). Связь между данными единицами следующая: 1 Р = $2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг.

Мощность экспозиционной дозы фотонного излучения (мощность экспозиционной дозы) \dot{X} – отношение приращения поглощенной дозы dX за интервал времени dt к этому интервалу времени:

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt}.$$

Единицей измерения в системе СИ является 1 А/кг. На практике чаще используется внесистемная единица $1 \text{ Р/с} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ А/кг}$.

Для различных практических применений часто бывает полезным уметь определять поглощенную дозу по величине флюенса ионизирующих частиц, падающих на облучаемый образец. Здесь будут рассмотрены два простейших примера решения данной задачи для облучения однородного образца постоянной толщины при нормальном падении моноэнергетического потока ионизирующих частиц на поверхность образца. В первом случае ЛПЭ ионизирующих частиц считаются постоянными в любой точке частицы внутри образца (такая ситуация может быть реализована только в случае «пролетной» геометрии облучения, т.е. когда ионизирующие частицы проходят облучаемый образец насквозь). Во втором случае будет учтено изменение ЛПЭ частиц по мере прохождения через образец.

*Определение поглощенной дозы при постоянном значении
ЛПЭ ионизирующих частиц*

Пусть h – толщина облучаемого образца, а S – его площадь (площадь поверхности, на которую падают ионизирующие частицы). Энергия E_i , передаваемая одной частицей облучаемому образцу, может быть рассчитана по формуле

$$E_i = \frac{dE}{dx} h = \rho L h,$$

где ρ – плотность облучаемого образца; $L \approx \text{const}$ – ЛПЭ ионизирующих частиц, определяемые в соответствии с (1.1).

Полная энергия $E_{\text{полг}}$, поглощенная образцом при облучении его моноэнергетическими ионизирующими частицами с флюенсом Φ , определяется по формуле

$$E_{\text{полг}} = N E_i = \Phi S \rho L h,$$

где $N = \Phi S$ – число частиц, попавших на поверхность S образца при облучении его флюенсом Φ .

Поглощенная доза D определяется как отношение полной поглощенной энергии к массе облучаемого образца:

$$D = \frac{E_{\text{погл}}}{m} = \frac{\Phi S \rho L h}{\rho h S} = \Phi L. \quad (1.2)$$

Если в выражении (1.2) использовать наиболее часто применяемые на практике единицы измерения флюенса (1 см^{-2}) и ЛПЭ ($1 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$), то единицей измерения поглощенной дозы будет $1 \text{ МэВ}/\text{мг}$. Чтобы перейти к греям или радам, нужно использовать соотношение [6]

$$1 \text{ МэВ}/\text{мг} = 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ Гр} = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ рад}. \quad (1.3)$$

Определение поглощенной дозы с учетом изменения ЛПЭ ионизирующих частиц по мере прохождения их через образец

Если ЛПЭ ионизирующих частиц меняются по мере их прохождения через облучаемый образец, то поглощенная доза будет неравномерно распределена по толщине образца. Во многих случаях это не важно, и тогда считают среднюю дозу для всего образца. Однако в ряде случаев необходимо учитывать неравномерность распределения дозы, например, когда радиационная деградация прибора определяется процессами, протекающими при облучении лишь в какой-то узко локализованной области. Распределение поглощенной дозы по толщине образца при облучении его флюенсом ионизирующих частиц Φ можно задать в виде

$$D(x) = \Phi L(x),$$

где $L(x)$ – распределение значения ЛПЭ ионизирующих частиц по длине их пробега в облучаемом образце.

Средняя доза для всего образца толщиной h определяется по формуле

$$D_{\text{ср}} = \frac{1}{h} \int_0^h D(x) dx = \frac{\Phi}{h} \int_0^h L(x) dx. \quad (1.4)$$

Если нужно усреднить значение поглощенной дозы для тонкого слоя, в пределах которого координата x принимает значения $h_1 \leq x \leq h_2$ (рис. 1.1), то выражение (1.4) примет вид

$$D_{\text{ср}} = \frac{1}{h_2 - h_1} \int_{h_1}^{h_2} D(x) dx = \frac{\Phi}{h_2 - h_1} \int_{h_1}^{h_2} L(x) dx. \quad (1.5)$$

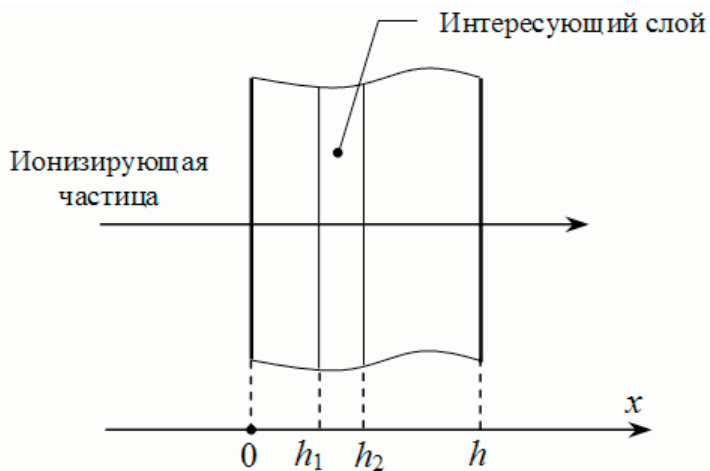


Рис. 1.1. Расположение слоя в облучаемом образце, для которого усредняется значение поглощенной дозы

Если в выражениях (1.4), (1.5) единицей измерения флюенса частиц является 1 см^{-2} , а линейных потерь энергии $1 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$, то единицей измерения дозы будет $1 \text{ МэВ}/\text{мг}$, и для получения значения поглощенной дозы в радах или греях нужно использовать соотношения (1.3).

Выражения (1.4) и (1.5) можно применять как при «пролетной» геометрии облучения, так и в случае, когда ионизирующие частицы характеризуются средней длиной пробега R в облучаемом материале, значение которого меньше толщины облучаемого образца ($R < h$). В последнем случае можно считать, что $L(x > R) = 0$.

1.2.4. Некоторые величины и единицы, характеризующие изотопные источники ионизирующих излучений

Активность радионуклида в источнике (активность радионуклида) A – отношение числа dN спонтанных переходов из определенного ядерно-энергетического состояния радионуклида, происходящих в источнике (образце) за интервал времени dt , к этому интервалу времени:

$$A = \frac{dN}{dt}$$

Единицей измерения является 1 Бк (за 1 с происходит один переход из определенного ядерно-энергетического состояния). Также часто используется внесистемная единица 1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк.

Постоянная радиоактивного распада радионуклида λ – отношение доли ядер dN/N радионуклида, распадающихся за интервал времени dt , к этому интервалу времени:

$$\lambda = \frac{1}{N} \frac{dN}{dt}.$$

Единицей измерения является 1 с^{-1} (постоянная распада, при которой за 1 с число ядер радионуклида в результате радиоактивного распада уменьшается в e раз). Зависимости числа ядер N радионуклида, не распавшихся к моменту времени t , и активности радионуклида от времени описываются выражениями

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t},$$

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t},$$

где N_0 и A_0 – начальные значения числа нераспавшихся ядер радионуклида и активности соответственно.

Период полураспада радионуклида $T_{1/2}$ – время, в течение которого число ядер радионуклида в результате радиоактивного распада уменьшается в 2 раза. Период полураспада и постоянная радиоактивного распада связаны соотношением

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}.$$

Единицей измерения периода полураспада является 1 с, хотя, в зависимости от вида радионуклида, могут использоваться минуты, часы, года и др.

1.3. Физические процессы при взаимодействии ионизирующих излучений с материалами электронной техники

Данные вопросы подробно освещены в изданиях [2, 3, 7–9]. Для более детального изучения данных вопросов в процессе подготовки к экзамену студентам следует в первую очередь руководствоваться пособиями [7, 8]. В курсе лекций рассмотрены только некоторые основные моменты, касающиеся данной тематики.