
Оглавление

Введение	3
Глава 1. Основы физики взаимодействия ионизирующих излучений с полупроводниками	7
1.1. Краткое описание радиационных характеристик в окружающем пространстве	8
1.1.1. Радиационные условия в космическом пространстве	8
1.1.2. Ионизирующие излучения ядерного взрыва	13
1.1.3. Ионизирующие излучения атомных электростанций	15
1.2. Величины, характеризующие ионизирующее излучение и его взаимодействие с веществом ..	17
1.2.1. Характеристики ионизирующего излучения и его поля	17
1.2.2. Характеристики взаимодействия ионизирующего излучения с веществом	19
1.2.3. Дозиметрические величины и единицы	21
1.2.4. Характеристики изотопных источников ионизирующих излучений	25
1.3. Физические процессы при взаимодействии ионизирующих излучений с материалами электронной техники	27
1.3.1. Первичные радиационные эффекты в полупроводниковых материалах	27
1.3.2. Смещение атомов из узлов решетки при воздействии ионизирующих излучений	29
1.3.3. Ионизация при воздействии проникающей радиации на полупроводниковые материалы	44
1.3.4. Ядерные превращения при воздействии ионизирующих излучений	54
1.3.5. Термостабильные радиационные центры в полупроводниках	56
1.3.6. Изменение электрофизических параметров полупроводников при радиационном облучении	61
Глава 2. Изменение электрофизических параметров биполярных приборных структур в результате введения структурных дефектов при радиационном облучении	67
2.1. Диодные структуры	67

2.2.	Транзисторные структуры	72
2.3.	Устойчивость радиационных изменений электрических параметров полупроводниковых приборов	77
Глава 3. Дозовые ионизационные эффекты в структуре Si/SiO₂ 81		
3.1.	Особенности строения структуры Si/SiO ₂	82
3.1.1.	Особенности строения диоксида кремния	82
3.1.2.	Особенности строения границы раздела Si/SiO ₂	88
3.1.3.	Влияние водорода и водородсодержащих соединений на свойства структуры Si/SiO ₂	92
3.2.	Методы исследований заряда в оксиде и плотности поверхностных состояний	96
3.2.1.	Метод вольт-фарадных характеристик	96
3.2.2.	Метод подпороговых вольт-амперных характеристик	100
3.2.3.	Методы, основанные на измерении надпороговой вольт-амперной характеристики транзисторов	103
3.2.4.	Метод накачки заряда	104
3.3.	Накопление и релаксация зарядов в структуре Si/SiO ₂ при радиационном облучении и отжиге	106
3.3.1.	Общее описание процессов накопления заряда в структурах Si/SiO ₂ при радиационном облучении	106
3.3.2.	Выход заряда	109
3.3.3.	Перенос дырок через SiO ₂	112
3.3.4.	Накопление и нейтрализация заряда на ловушках в оксиде	116
3.3.5.	Механизм нейтрализации заряда в оксиде	122
3.3.6.	Особенности накопления поверхностных состояний при радиационном облучении	125
3.3.7.	Латентное накопление поверхностных состояний	132
3.3.8.	Накопление поверхностных состояний в зависимости от интенсивности излучения	134
3.3.9.	Отжиг поверхностных состояний	137
3.3.10.	Механизм накопления поверхностных состояний	138
3.3.11.	Граничные ловушки	145
Глава 4. Влияние космической радиации на характеристики приборов и микросхем, изготовленных на основе МОП-структур 149		

4.1.	Изменение характеристик МОП-транзисторов и логических КМОП-элементов при радиационном облучении	149
4.2.	Влияние конструктивно-технологических характеристик на радиационную стойкость МОП-структур	156
4.3.	Радиационные эффекты в МОП-структурах с ультратонкими оксидами	159
4.4.	Некоторые особенности дозовых радиационных эффектов в МДП-структурах с альтернативными диэлектриками	163
4.5.	Влияние полевых оксидов на радиационную стойкость ИС	168
4.6.	Особенности проявления дозовых радиационных эффектов в микросхемах, изготовленных по КНИ-технологии.	173
Глава 5. Особенности радиационных испытаний приборов и микросхем на основе МОП- и КМОП-структур		
5.1.	Корреляция между отдельными транзисторами и микросхемами.	184
5.2.	Наихудший электрический режим	187
5.3.	Влияние на радиационную стойкость высокотемпературной нагрузки перед облучением	195
5.4.	Выбор источников ионизирующих излучений при проведении радиационных испытаний МОП и КМОП ИС	199
5.5.	Процедуры радиационных испытаний, учитывающие влияние факторов низкой интенсивности облучения	204
Глава 6. Особенности деградации биполярных приборов и микросхем при воздействии низкоинтенсивного ионизирующего излучения (эффект ELDRS)		
6.1.	Влияние интенсивности излучения на радиационный отклик биполярных транзисторов	211

6.2.	Влияние интенсивности излучения на радиационный отклик биполярных интегральных схем	219
6.3.	Физические модели эффектов низкоинтенсивного облучения биполярных приборов и микросхем.	225
6.4.	Проблема экспериментального моделирования воздействия излучений низкой интенсивности на биполярные изделия	227
6.5.	Выводы	231
Глава 7. Одиночные события в БИС при воздействии отдельных заряженных частиц космического пространства.		
7.1.	Основные виды и классификация одиночных событий	234
7.1.1.	Краткое описание основных видов ОС.	235
7.1.2.	Основные параметры чувствительности полупроводниковых приборов и микросхем к одиночным событиям	246
7.2.	Физические процессы, приводящие к возникновению одиночных событий	252
7.2.1.	Общее описание процессов возникновения одиночных событий	252
7.2.2.	Образование носителей заряда (ионизация)	257
7.2.3.	Рекомбинация неравновесных носителей заряда	264
7.2.4.	Перенос неравновесных носителей	270
7.2.5.	Сбор заряда	273
7.3.	Экспериментальные методы исследования чувствительности изделий полупроводниковой электроники к одиночным событиям при воздействии тяжелых заряженных частиц и протонов	279
7.3.1.	Эксперименты на ускорителях протонов	280
7.3.2.	Эксперименты на ускорителях ионов	282
7.3.3.	Эксперименты с изотопными источниками.	286
7.3.4.	Эксперименты с использованием ионных микропучков	288
7.3.5.	Эксперименты с использованием имитаторов	288
Список литературы		289
Список сокращений		298

Введение

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

- 1) физика взаимодействия ионизирующего излучения с твердым телом;
- 2) применение проникающей радиации (ПР) в технологии микро- и нанoeлектроники;
- 3) исследование 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, так и для корректного проведения радиационных испытаний изделий микро- и нанoeлектроники и последующего анализа и интерпретации результатов испытаний.

Применение ПР в технологии ПП и ИС представляет большой практический интерес с точки зрения возможности управления их параметрами. 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 радиационно-стимулированной деградации ПП и ИС и определения уровней 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 настоящем издании излагается материал, посвященный радиационным эффектам в кремниевых ПП и ИС при воздействии ИИ КП.

В первой главе проанализированы характеристики радиационных условий в окружающем пространстве. При этом основное внимание уделено внешним воздействующим факторам КП (в частности, радиационным), но также кратко рассмотрены характеристики ИИ ядерного взрыва (ЯВ) и атомных электростанций (АЭС). Рассмотрены некоторые физические величины и единицы их измерения, с которыми постоянно приходится иметь дело при определении радиационных нагрузок на аппаратуру и ее комплектующие, при расчетной оценке стойкости ПП и ИС, а также при организации, проведении и обработке результатов радиационных испытаний и исследований, проводимых в лабораторных условиях. Кратко проанализированы основные физические процессы при взаимодействии ионизирующих излучений с полупроводниковыми материалами.

Вторая глава посвящена деградации параметров биполярных приборных структур (диодов и транзисторов) вследствие введения структурных дефектов при радиационном облучении.

В третьей главе изложены различные аспекты радиационно-индуцированного накопления заряда в структуре Si/SiO₂. Проанализированы особенности строения структуры Si/SiO₂ и 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.

В четвертой главе анализируется влияние процессов, протекающих при радиационном облучении в диоксиде кремния и на границе Si/SiO₂, на электрические характеристики изделий микро- и наноэлектроники. 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).

Пятая глава посвящена вопросам проведения радиационных испытаний изделий микро- и наноэлектроники, изготовленных на основе МОП-структур, на стойкость к воздействию поглощенной дозы ИИ КП. Здесь основное внимание уделено таким моментам, как корреляция результатов испытаний ИС и отдельных элементов из их состава, выбор электрического режима при испытаниях, выбор источников ионизирующих излучений, влияние на результаты радиационных испытаний предварительных электротермотренировок. В конце раздела приведены процедуры ускоренных испытаний ПП и ИС на стойкость к воздействию поглощенной дозы ИИ КП с учетом фактора низкой интенсивности излучения, регламентированные различными отечественными и зарубежными нормативными документами.

В шестой главе рассмотрены радиационные эффекты в биполярных транзисторах, а также в изготовленных по биполярной технологии аналоговых и цифровых интегральных схемах, характерные для длительного низкоинтенсивного радиационного облучения при эксплуатации в

условиях космического пространства. Здесь также рассмотрены особенности радиационных испытаний биполярных ИС и ПП, учитывающие эффект низкой интенсивности облучения.

В седьмой главе рассмотрены основные виды и классификация одиночных радиационных эффектов (одиночных событий) при воздействии отдельных заряженных частиц космического пространства. Описаны физические процессы, вследствие которых возникают одиночные события. Рассмотрены основные экспериментальные и расчетно-экспериментальные методы, использующиеся для получения информации о чувствительности изделий полупроводниковой электроники к одиночным событиям при воздействии отдельных заряженных частиц космического пространства.

Усвоение материала, изложенного в настоящем издании, позволит читателям:

- понять физические основы деградации изделий микро- и наноэлектроники, а также радиэлектронной аппаратуры при воздействии радиационных факторов;
- сформировать представления об организационно-техническом обеспечении радиационных испытаний изделий микро- и наноэлектроники;
- ознакомиться с существующими экспериментальными и расчетно-экспериментальными методами исследований радиационной стойкости изделий микро- и наноэлектроники.

Невозможно полноценно рассмотреть все аспекты тематики радиационных эффектов в изделиях микро- и наноэлектроники в рамках одного издания. Поэтому авторы ограничились лишь достаточно кратким описанием основных аспектов данной проблемы, причем только для ионизирующих излучений КП, поскольку образование ионизационных и структурных дефектов в изделиях микроэлектроники аналогично как для радиационных воздействий КП, так и для факторов ЯВ и АЭС. Однако в конце издания приведен список источников, которые можно порекомендовать для более подробного изучения вопросов, связанных с данной тематикой.

Основы физики взаимодействия ионизирующих излучений с полупроводниками

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 различного назначения, основой которых являются изделия полупроводниковой электроники. Таким образом, изучение влияния ионизирующих излучений на полупроводниковые приборы 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 данном направлении является понимание физических основ процессов, протекающих при воздействии ионизирующих излучений на материалы электронной техники, а также знание характеристик ИИ космического пространства (КП), ядерного взрыва (ЯВ) и атомных электростанций (АЭС).

1.1. Краткое описание радиационных характеристик в окружающем пространстве

1.1.1. Радиационные условия в космическом пространстве

Внешние воздействующие факторы космического пространства. Космические аппараты (КА) в течение срока своего существования в космосе подвергаются воздействию различных факторов КП. Согласно современным представлениям, основными факторами КП, способными повреждать радиоэлектронную аппаратуру (РЭА) КА, являются следующие [1–5]:

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

ИИ состоит из потока первичных заряженных ядерных частиц — электронов, протонов и тяжелых заряженных частиц (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 в результате накопления дозы ИИ, а также возникновение одиночных сбоев и отказов вследствие воздействия отдельных высокоэнергетических ядерных частиц. Кроме этих эффектов также могут наблюдаться: изменение прозрачности оптических сред (радиационное окрашивание и растрескивание оптических стекол); световые помехи в оптоэлектронной аппаратуре вследствие радиолуминесценции 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.

Космическая плазма вызывает 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.

В условиях невесомости ухудшается тепловой режим работы РЭА, так как отсутствует конвекционный съём тепла с нее.

Микрометеориты механически повреждают внешнюю поверхность приборов, особенно солнечные батареи.

В замкнутом объеме отсутствует привычная шина земли, в результате чего общий потенциал колеблется, кроме того, протекающие по поверхности КА поверхностные токи могут 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. 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 пособия будут рассмотрены эффекты, вызванные действием проникающей радиации КП. По этой причине радиационные условия в космическом пространстве следует рассмотреть несколько подробнее.

Источники ионизирующих излучений в космическом пространстве. Основными источниками ИИ в космическом пространстве являются [1, 4, 5]:

- 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 его освоения. На базе наборов данных, полученных с ряда спутников, были построены различные модели, описывающие радиационную обстановку. Однако все области радиационного окружения непрерывно изменяются, поэтому ни одна из существующих моделей не является полностью универсальной.

Модели, как правило, строятся при следующих предположениях:

- потоки частиц являются всенаправленными (изотропными);
- орбитальная интеграция представляется для различных высот и углов наклона;
- данные по пространственному распределению заряженных частиц представляются обычно в (L, B) -координатах, где L — высота орбиты, нормированная на радиус Земли; B — напряженность магнитного поля;
- задается интегральная плотность потока $\phi(>E)[\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}]$, представляющая собой скорость изменения флюенса, при всех энергиях, больших указанной пороговой энергии E ;
- задается дифференциальная плотность потока $\phi(E)[\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{МэВ}^{-1}]$, представляющая собой скорость

изменения флюенса в зависимости от энергии частиц для определенного уровня их энергии;

- модели соответствуют определенным промежуткам времени и поэтому относятся 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.

Для некоторых орбит КА ощутимый вклад в суммарную поглощенную дозу могут давать потоки протонов СКЛ. Однако в общем случае их сложно прогнозировать, поскольку возникновение солнечных вспышек носит случайный характер. Кроме того, 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 превосходить потоки ГКЛ на многие порядки. В большинстве случаев максимальная энергия ускоренных частиц не превышает 10 МэВ/нуклон. Такие вспышки происходят довольно часто — в годы солнечной активности примерно один 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 с максимальными энергиями 10 ГэВ и выше.

Магнитосфера Земли существенно экранирует протонный поток на низких орбитах и при малых углах наклона, вследствие чего на низких орбитах 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 сбои и отказы 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. 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 не существенны. 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 $1 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$) 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.

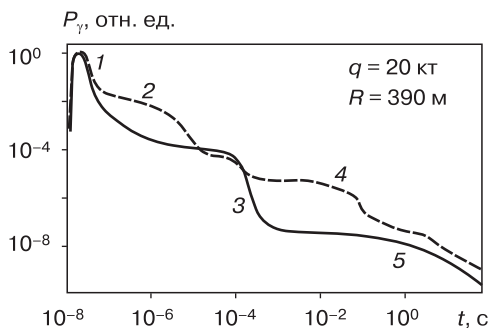


Рис. 1.1. Временная форма гамма-излучения высотного (сплошная линия) и наземного (штриховая линия) ЯВ: 1 — мгновенная компонента; 2 — гамма-излучение, рождаемое в актах неупругого рассеяния нейтронов; 3 — изомерное излучение; 4 — излучение, рождаемое в актах захвата нейтронов; 5 — осколочное излучение; q — мощность в тротиловом эквиваленте

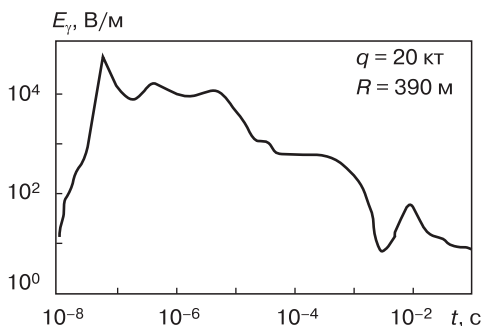


Рис. 1.2. Временная форма радиального компонента ЭМИ наземного ЯВ; q — мощность в тротиловом эквиваленте

Таблица 1.1

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