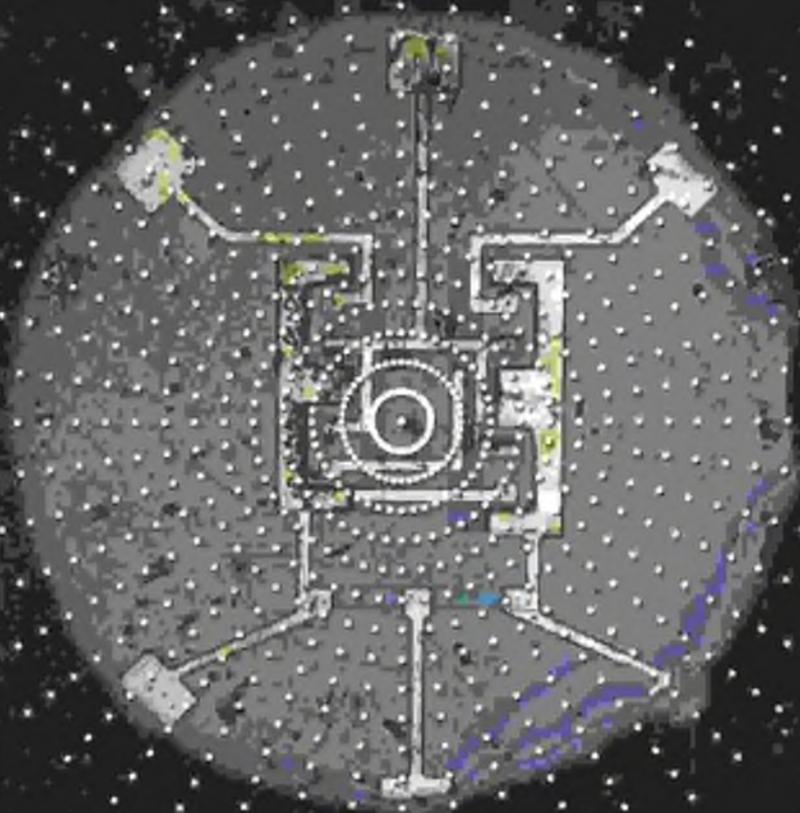


К. И. Таперо, В. Н. Улимов, А. М. Членов

# РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В КРЕМНИЕВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ



К. И. Таперо, В. Н. Улимов, А. М. Членов

**РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ  
В КРЕМНИЕВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ  
КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ**



Москва  
БИНОМ. Лаборатория знаний  
2012

УДК 621.38  
ББК 32.844.1+32.844.02  
Т18

**Таперо К. И.**

**Т18** Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения / К. И. Таперо, В. Н. Улимов, А. М. Членов. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. — 304 с. : ил.

ISBN 978-5-9963-0633-6

В монографии анализируется влияние ионизирующих излучений (ИИ), преимущественно космического пространства, на характеристики изделий микро- и наноэлектроники. Рассмотрены: основы физики взаимодействий ИИ с полупроводниками; изменение электрофизических параметров приборных структур в результате образования наноразмерных дефектов под действием ИИ; дозовые ионизационные эффекты в структуре Si/SiO<sub>2</sub> и их влияние на характеристики приборов и микросхем; особенности радиационных испытаний изделий, изготовленных по МОП-, КМОП-, а также по биполярной технологии, на стойкость к воздействию низкоинтенсивного ИИ; одиночные события в изделиях микро- и наноэлектроники при воздействии отдельных заряженных частиц.

Для технических специалистов, работающих в области электроники, а также для студентов и аспирантов.

УДК 621.38  
ББК 32.844.1+32.844.02

---

*Научное издание*

**Таперо Константин Иванович**  
**Улимов Виктор Николаевич**  
**Членов Александр Михайлович**

**РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В КРЕМНИЕВЫХ  
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ**

Ведущий редактор *И. Я. Иццоки*  
Художник *С. Инфантэ*

Технический редактор *Е. В. Денюкова*  
Компьютерная верстка: *Л. В. Катуркина*

Подписано в печать 13.12.11. Формат 60×90/16.

Усл. печ. л. 19. Тираж 1000 экз. Заказ 10734

Издательство «БИНОМ. Лаборатория знаний»  
125167, Москва, проезд Аэропорта, д. 3  
Телефон: (499) 157-5272, e-mail: binom@Lbz.ru,  
<http://www.Lbz.ru>

При участии ООО Агентство печати «Столица»  
тел.: (495) 331-14-38; e-mail: [apstolica@bk.ru](mailto:apstolica@bk.ru)

Отпечатано в ОАО «Первая Образцовая типография»,  
филиал «УЛЬЯНОВСКИЙ ДОМ ПЕЧАТИ». 432980, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 14

---

ISBN 978-5-9963-0633-6 © БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012

---

# Оглавление

---

Введение .....	3
<b>Глава 1. Основы физики взаимодействия ионизирующих излучений с полупроводниками.....</b>	<b>7</b>
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
<b>Глава 2. Изменение электрофизических параметров биполярных приборных структур в результате введения структурных дефектов при радиационном облучении .....</b>	<b>67</b>
2.1. Диодные структуры.....	67

2.2.	Транзисторные структуры . . . . .	72
2.3.	Устойчивость радиационных изменений электрических параметров полупроводниковых приборов . . . . .	77
<b>Глава 3. Дозовые ионизационные эффекты в структуре Si/SiO<sub>2</sub> . . . . . 81</b>		
3.1.	Особенности строения структуры Si/SiO <sub>2</sub> . . . . .	82
3.1.1.	Особенности строения диоксида кремния . . . . .	82
3.1.2.	Особенности строения границы раздела Si/SiO <sub>2</sub> . . . . .	88
3.1.3.	Влияние водорода и водородсодержащих соединений на свойства структуры Si/SiO <sub>2</sub> . . . . .	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 <sub>2</sub> при радиационном облучении и отжиге . . . . .	106
3.3.1.	Общее описание процессов накопления заряда в структурах Si/SiO <sub>2</sub> при радиационном облучении . . . . .	106
3.3.2.	Выход заряда . . . . .	109
3.3.3.	Перенос дырок через SiO <sub>2</sub> . . . . .	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
<b>Глава 4. Влияние космической радиации на характеристики приборов и микросхем, изготовленных на основе МОП-структур . . . . . 149</b>		

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
<b>Глава 5. Особенности радиационных испытаний приборов и микросхем на основе МОП- и КМОП-структур .....</b>		
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
<b>Глава 6. Особенности деградации биполярных приборов и микросхем при воздействии низкоинтенсивного ионизирующего излучения (эффект ELDRS) .....</b>		
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
<b>Глава 7. Одиночные события в БИС при воздействии отдельных заряженных частиц космического пространства . . . . .</b>		<b>233</b>
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
<b>Список литературы . . . . .</b>		<b>289</b>
<b>Список сокращений . . . . .</b>		<b>298</b>