

半导体器件 和集成电路的辐射效应

Radiation Effects on Semiconductor Devices
and Integrated Circuits

陈盘训 著



国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

《中国工程物理研究院科技丛书》第 044 号

半导体器件和集成电路的 辐射效应

**Radiation Effects on Semiconductor
Devices and Integrated Circuits**

陈盘训 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

半导体器件和集成电路的辐射效应/陈盘训著. —北京:国防工业出版社, 2005. 6

ISBN 7-118-03761-3

I. 半... II. 陈... III. ①半导体器件—辐射效应
②集成电路—辐射效应 IV. TL7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 002149 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 13% 336 千字

2005 年 6 月第 1 版 2005 年 6 月北京第 1 次印刷

印数:1—2500 册 定价:40.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列出出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

《中国工程物理研究院科技丛书》 出版说明

中国工程物理研究院建院 40 多年来,坚持理论研究、科学实验和工程设计密切结合的科研方向,完成了国家下达的各项国防科研任务。通过完成任务,在许多专业学科领域里,不论在基础理论方面,还是在实验测试技术和工程应用技术方面,都有重要发展和创新,积累了丰富的知识经验,造就了一大批优秀科技人材。

为了扩大科技交流与合作,促进我院事业的继承与发展,系统地总结我院 40 多年来各个专业领域里集体积累起来的经验,吸收国内外最新科技成果,形成一套系列科技丛书,无疑是一件十分有意义的事情。

这套丛书将部分地反映中国工程物理研究院科技工作的成果,内容涉及本院过去开设过 20 几个主要学科。现在和今后开设的新学科,也将编著出书,续入本丛书中。

这套丛书将在今后几年里陆续编辑出版。我院早些年零散编著出版的专业书籍,经编委会审定后,也纳入本丛书系列。

谨以这套丛书献给 40 多年来为我国国防现代化而献身的人们!

《中国工程物理研究院科技丛书》
编审委员会
1999 年 6 月 4 日修改

前 言

核辐射效应是随着核武器的产生而发展起来的一门边缘学科,主要研究核辐射对材料、器件、电路和电子系统的影响。此外,卫星和航天技术的发展使得宇宙空间环境的辐射效应研究也相继展开。由于研究的对象十分广泛,因此这门学科涉及到核物理、原子物理、中子物理、辐射剂量学、物理电子学、半导体物理、器件物理与工艺、表面物理和电子学等学科。

本书较为全面地介绍了各类典型半导体器件和集成电路在核辐射环境(主要为中子注量、总剂量和剂量率等)下的损伤机理和效应。书中的许多内容是作者和同事们多年来有关核辐射效应研究的总结,许多研究成果已发表于国内的一些著名刊物,这次在成书过程中将这些内容加以提炼、归纳和综合。对目前国内外辐射效应行业中有关的一些热点题目,例如单粒子效应、剂量增强效应、低剂量率效应、异质结双极晶体管及与 NMD 有关的光学器件等的辐射效应内容,在本书中都作了较为详细的介绍。书中还给出了典型半导体器件和集成电路相关的辐射效应数据。

全书共分 9 章。第 1 章为绪论,介绍国内外核辐射效应发展简史、研究对象和方法;第 2 章简述核爆炸、空间、模拟源和核动力等辐射环境;第 3 章论述位移效应、电离效应、剂量增强效应和低剂量率效应机理;第 4、第 5 章详细阐述各类二极管、微波器件、双极和单结晶体管、异质结器件、场效应晶体管、各类线性和数字集成电路等的辐射效应;第 6 章论述单个宇宙射线重离子、质子和中子等粒子在大规模集成电路和超大规模集成电路中产生的单粒子效应,也介绍了一般线性集成电路的单粒子瞬时现象(SET);第 7 章研究 X 射线和低能 γ 射线辐射器件和电路引起的剂量增强效

应;第8章专论低剂量率辐射在器件和电路中产生的增强损伤;第9章介绍红外探测器、光电器件、电光器件、激光器件和CCD等光学器件的辐射效应。

本书在编写过程中得到中国工程物理研究院电子工程研究所姚军所长等领导和辐射效应与加固技术研究室的支持和帮助。俞大光院士对书稿作了终审;赵汝清研究员对本书作了初审和专审;贺云汉研究员为该书的立项做了许多工作,并作初审;中科院新疆理化技术研究所严荣良教授对本书进行了专审;徐曦研究员对本书的编写提出了许多宝贵的意见。此外,对中国工程物理研究院科技丛书编辑部吴衍斌研究员、李天惠编辑和国防工业出版社支持本书的出版,在此一并表示感谢。

本书可以作为从事辐射效应和加固技术研究工程技术人员的专业参考书,也可作为有关专业教师和硕士研究生的教材。由于本书涉及的学科多而广,书中介绍的有些内容正是目前国内外研究的热点,学者们对某些论点有不同的看法,有些问题还处于研究的初级阶段,加上作者的知识面相对来说较窄,书中错误之处在所难免,敬请读者指正。

中国工程物理研究院
电子工程研究所
陈盘训

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 核辐射效应发展简史	1
1.1.1 国外情况	1
1.1.2 国内情况	3
1.2 研究对象与方法	4
1.2.1 研究对象	4
1.2.2 研究方法	4
1.3 描述辐射效应的几个物理量	6
1.3.1 中子注量	6
1.3.2 总剂量	6
1.3.3 剂量率	6
参考文献	6
第 2 章 辐射环境	8
2.1 核爆炸辐射环境	8
2.1.1 大气层外爆炸	8
2.1.2 大气层内爆炸	9
2.2 空间环境	10
2.2.1 内辐射带	10
2.2.2 槽形辐射带	12
2.2.3 外辐射带和准俘获区	12
2.2.4 地磁尾区和低高度区	12
2.2.5 银河宇宙射线	12
2.2.6 太阳耀斑	14
2.3 模拟源环境	15
2.3.1 中子模拟源	16

2.3.2	$^{60}\text{Co}\gamma$ 射线源	18
2.3.3	X 射线源	19
2.3.4	瞬时 γ 射线源	20
2.3.5	重离子源	22
2.4	核动力辐射环境	23
2.5	其它辐射环境	23
	参考文献	23
第 3 章	辐射损伤机理	25
3.1	位移效应	25
3.2	电离效应	28
3.2.1	总剂量效应	28
3.2.2	剂量率效应	29
3.2.3	单粒子效应	31
3.3	剂量增强效应	33
3.4	低剂量率效应	34
	参考文献	37
第 4 章	分立半导体器件辐射效应	39
4.1	二极管	39
4.1.1	整流二极管	39
4.1.2	开关二极管	43
4.1.3	稳压二极管	46
4.2	微波半导体器件	50
4.2.1	隧道二极管	50
4.2.2	体效应二极管	55
4.2.3	阶跃恢复二极管	62
4.2.4	变容二极管	67
4.2.5	肖特基混频二极管	73
4.2.6	PIN 微波二极管	79
4.3	单结晶体管	83
4.4	双极晶体管	86
4.4.1	器件特性	86

4.4.2	中子注量	86
4.4.3	总剂量	95
4.4.4	剂量率	102
4.5	异质结双极晶体管(HBT)	105
4.5.1	半导体异质结的简单模型	105
4.5.2	AlGaAs/GaAs HBT	106
4.5.3	Si/SiGe HBT	112
4.5.4	InP/InGaAs HBT	118
4.6	场效应晶体管	122
4.6.1	结型场效应晶体管(JFET)	122
4.6.2	MOS场效应晶体管(MOSFET)	127
4.7	硅可控整流器	132
4.8	太阳能电池	136
4.9	晶体振荡器	139
	参考文献	142
第5章	集成电路辐射效应	145
5.1	双极线性集成电路	145
5.1.1	电路结构	145
5.1.2	运算放大器	147
5.1.3	比较器	158
5.1.4	集成稳压电源	160
5.2	双极数字集成电路	166
5.2.1	双极工艺	166
5.2.2	TTL和TTL/S技术	167
5.2.3	发射极耦合逻辑(ECL)技术	171
5.2.4	集成注入逻辑(I ² L)	174
5.3	结型场效应晶体管(JFET)集成电路	178
5.4	MOS线性集成电路	180
5.5	MOS数字集成电路	182
5.5.1	MOS技术	182
5.5.2	PMOS电路	182
5.5.3	NMOS电路	184

5.5.4	CMOS/Si 电路	190
5.5.5	CMOS/SOS 电路	215
5.5.6	CMOS/SOI 电路	218
5.6	微处理器(CPU)	221
	参考文献	227
第 6 章	单粒子效应	230
6.1	单粒子扰动现象	230
6.2	扰动机理	231
6.3	扰动的电路模型	233
6.4	错误率的预计	236
6.4.1	电荷收集体积	236
6.4.2	通路长度分布	236
6.4.3	宇宙射线错误率的预计	237
6.4.4	质子错误率的预计	239
6.5	硬失效	240
6.5.1	阈值电压漂移	240
6.5.2	位移损伤	240
6.5.3	单粒子引起的闭锁(SEL)和烧毁(SEB)	242
6.5.4	单粒子引起的栅击穿(SEGR)	244
6.5.5	单粒子固定位(ESB)	246
6.6	单粒子快速反向(SER)	249
6.7	单粒子瞬时现象(SET)	250
6.7.1	单粒子瞬时信号的产生	250
6.7.2	SET 截面与 LET 和差分输入电压的关系	253
6.7.3	电荷收集模型	254
6.7.4	负载对 SET 的影响	255
6.8	实验模拟	256
6.8.1	粒子束模拟	256
6.8.2	SEB 和 SEGR 的测试方法	263
6.8.3	脉冲激光模拟	264
6.9	对 SEU 的加固方法	266
6.9.1	加固判据	266

6.9.2 加固方法	267
参考文献	269
第7章 剂量增强效应	272
7.1 引言	272
7.2 界面剂量增强	273
7.2.1 光子吸收和光电子产生	273
7.2.2 光电子的运输	274
7.2.3 金—硅界面的剂量增强	274
7.3 材料和元件的剂量增强	275
7.3.1 材料	275
7.3.2 电容器	277
7.4 器件和集成电路的剂量增强	278
7.4.1 金属化和封装结构分类	278
7.4.2 总剂量	279
7.4.3 剂量率	291
7.5 系统设计剂量增强系数	292
7.6 用于辐射模拟试验环境的剂量增强系数	294
7.7 剂量增强系数的应用	296
7.8 任意能谱下的剂量增强系数	299
参考文献	301
第8章 低剂量率辐射效应	303
8.1 引言	303
8.2 双极晶体管	304
8.2.1 NPN 晶体管	304
8.2.2 PNP 晶体管	314
8.3 双极线性集成电路	324
8.3.1 运算放大器	325
8.3.2 集成稳压电源	329
8.3.3 比较器	332
8.3.4 低剂量率飞行试验	333
8.4 低剂量率辐射试验模拟	336

8.4.1 低剂量率室温辐照	336
8.4.2 加速模拟试验方法	336
8.5 损伤与偏置的关系	345
参考文献	346
第9章 光学器件辐射效应	348
9.1 引言	348
9.2 NMD中的光学探测系统	349
9.3 红外探测器	350
9.3.1 器件工作原理	350
9.3.2 器件特性和参数	352
9.3.3 中子注量	353
9.3.4 总剂量	363
9.3.5 剂量率	367
9.4 发光二极管	368
9.5 PIN硅光电二极管	372
9.6 激光二极管	376
9.7 光电三极管	380
9.8 电荷耦合器件(CCD)	384
9.9 光学纤维	391
参考文献	397

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Simple Development History of Nuclear Radiation	
Effects	1
1.1.1 External Condition	1
1.1.2 Internal Condition	3
1.2 Objects and Methods of Investigation	4
1.2.1 Investigating Objects	4
1.2.2 Investigating Methods	4
1.3 Several Physical Term for Radiation Effects	6
1.3.1 Neutron Fluence	6
1.3.2 Total Dose	6
1.3.3 Dose Rate	6
Reference	6
Chapter 2 Radiation Environments	8
2.1 Radiation Environment of Nuclear Explosion	8
2.1.1 Exoatmospheric Explosion	8
2.1.2 Atmospheric Explosion	9
2.2 Space Environments	10
2.2.1 Inner Radiation Zone	10
2.2.2 Slot Region	12
2.2.3 Outer Radiation Zone and Pseudo-Trapped Region	12
2.2.4 Geomagnetic Tail and Low Altitude Region	12
2.2.5 Galactic Cosmic Ray	12
2.2.6 Solar Flares	14
2.3 Simulating Source Environments	15

2.3.1	Neutron Simulating Source	16
2.3.2	^{60}Co γ -Ray Source	18
2.3.3	X Ray Source	19
2.3.4	Transient γ -Ray Simulating Source	20
2.3.5	Heavy Particle Source	22
2.4	Nuclear Power Radiation Environment	23
2.5	Other Radiation Environments	23
	Reference	23
Chapter 3 Mechanisms of Radiation Damage		25
3.1	Displacement Effects	25
3.2	Ionizing Effects	28
3.2.1	Total Dose Effects	28
3.2.2	Dose Rate Effect	29
3.2.3	Single Event Effects	31
3.3	Dose Enhancement Effects	33
3.4	Low Dose Rate Effects	34
	Reference	37
Chapter 4 Radiation Effects of Discrete Semiconductor Devices		39
4.1	Diodes	39
4.1.1	Rectification Diode	39
4.1.2	Switch Diode	43
4.1.3	Steady Voltage Diode	46
4.2	Microwave Semiconductor Devices	50
4.2.1	Tunnel Diode	50
4.2.2	Bulk Effect Diode	55
4.2.3	Step-Recovery Diode	62
4.2.4	Varactor Diode	67
4.2.5	Schottky Mixed Diode	73
4.2.6	PIN Microwave Diode	79
4.3	Unijunction Transistor	83

4.4	Bipolar Transistor	86
4.4.1	Characteristic of Device	86
4.4.2	Neutron Fluence	86
4.4.3	Total Dose	95
4.4.4	Dose Rate	102
4.5	Heterojunction Bipolar Transistors(HBT)	105
4.5.1	Simple Model of Semiconductor Heterojunction	105
4.5.2	AlGaAs / GaAs HBT	106
4.5.3	Si / GeSi HBT	112
4.5.4	InP / InGaAs HBT	118
4.6	Field Effect Transistor	122
4.6.1	Junction Field Effect Transistor(JFET)	122
4.6.2	MOS Field Effect Transistor(MOSFET)	127
4.7	Silicon-Controlled Rectifiers(SCR)	132
4.8	Solar Cell	136
4.9	Crystal Resonator	139
	Reference	142
Chapter 5	Radiation Effects of Integrated Circuits	145
5.1	Bipolar Linear Integrated Circuits	145
5.1.1	Circuit Configuration	145
5.1.2	Operational Amplifier	147
5.1.3	Comparator	158
5.1.4	Integrated Steady Voltage Power	160
5.2	Bipolar Digital Integrated Circuits	166
5.2.1	Bipolar Technology	166
5.2.2	TTL and TTL / S Circuit	167
5.2.3	Emitter Coupled Logical(ECL)Circuits	171
5.2.4	Integrated Injection Logical(I ² L)Circuits	174
5.3	Integrated Circuits of Junction Field Effect Transistor(JEFT)	178
5.4	MOS Linear Integrated Circuits	180
5.5	MOS Digital Integrated Circuits	182