



《中国工程物理研究院科技丛书》第 023 号

抗辐射电子学

——辐射效应及加固原理

赖祖武 等编著



国防工业出版社

TN386

L07

412480

《中国工程物理研究院科技丛书》第 023 号

抗辐射电子学
——**辐射效应及加固原理**
Radiation Hardening Electronics
——Radiation Effects and Hardening Techniques

赖祖武 主 编
包宗明 副主编
赖祖武 包宗明 宋德海 编 著
王长河 黄胜明



国防工业出版社

· 北京 ·

D123.56

图书在版编目(CIP)数据

抗辐射电子学:辐射效应及加固原理/赖祖武等编著.
—北京:国防工业出版社,1998.7
(中国工程物理研究院科技丛书)
ISBN 7-118-01866-X

I. 抗… II. 赖… III. 场效应晶体管-辐射效应
IV. TN386

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 00242 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)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 12 $\frac{1}{4}$ 306 千字

1998 年 7 月第 1 版 1998 年 7 月北京第 1 次印刷

印数:1—1500 册 定价:18.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

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,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. 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,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防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,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,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,由国防工业出版社列选出版。

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,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工业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

国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模			
主任委员	黄 宁			
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾 铎
秘 书 长	崔士义			
委 员	于景元	王小谟	尤子平	冯允成
(以姓氏笔划为序)	刘 仁	朱森元	朵英贤	宋家树
	杨星豪	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果	张均武
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安
	侯正明	莫梧生	崔尔杰	

《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 30 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,积累了丰富的知识和经验,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 30 年来在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研工作的成果,内容涉及本院过去开设过的二十几个主要学科。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 30 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

1989 年 1 月 25 日

《中国工程物理研究院科技丛书》 第二届编审委员会

主 任 杜祥琬

副 主 任 章冠人 华欣生

委 员 王之康 王铁铮 水鸿寿 方乃相 刘庆兆
(以姓氏笔画为序) 汤绍源 杨成龙 吴宏志 汪源浚 张仕发
张永昌 张寿齐 陈银亮 周正朝 赵维晋
胡在军 俞太光 姜学贤 姚景华 徐玉彬
徐锡申 高天祐 高国桐 董海山 赖祖武

丛书编辑部负责人 吴衍斌

本 册 编 辑 郭玉团 吴衍斌

《中国工程物理研究院科技丛书》

已 出 版 书 目

- | | | | | |
|------------|----------------------|-----------|---------|-------------|
| 001 | 高能炸药及相关物性能 | 董海山、周芬芬主编 | 科学出版社 | 1989 年 10 月 |
| 002 | 光学高速摄影测试技术 | 谭显祥编著 | 科学出版社 | 1990 年 2 月 |
| 003 | 凝聚炸药起爆动力学 | 章冠人等编著 | 国防工业出版社 | 1991 年 11 月 |
| 004 | 线性代数方程组的迭代解法 | 胡家赣编著 | 科学出版社 | 1991 年 12 月 |
| 005 | 映象与混沌 | 陈式刚编著 | 国防工业出版社 | 1992 年 6 月 |
| 006 | 再入遥测技术(上册) | 谢铭勋编著 | 国防工业出版社 | 1992 年 6 月 |
| 007 | 再入遥测技术(下册) | 谢铭勋编著 | 国防工业出版社 | 1992 年 12 月 |
| 008 | 高温辐射物理与量子辐射理论 | 李世昌编著 | 国防工业出版社 | 1992 年 10 月 |
| 009 | 粘性消去法和差分格式粘性 | 郭柏灵著 | 科学出版社 | 1993 年 3 月 |
| 010 | 无损检测技术及其应用 | 张俊哲等著 | 科学出版社 | 1993 年 5 月 |
| 011 | 半导体材料辐射效应 | 曹建中著 | 科学出版社 | 1993 年 5 月 |

- 012 炸药热分析**
楚士晋编著 科学出版社 1994 年 12 月
- 013 脉冲辐射场诊断技术**
刘庆兆主编 科学出版社 1994 年 12 月
- 014 放射性核素活度的测量方法和技术**
古当长编著 科学出版社 1994 年 12 月
- 015 二维非定常流与激波**
王继海编著 科学出版社 1994 年 12 月
- 016 抛物型方程差分方法**
李德元 陈光南著 科学出版社 1995 年 6 月
- 017 特种结构分析**
刘新民 韦日演著 国防工业出版社 1995 年 10 月
- 018 理论爆轰物理**
孙锦山 朱建士著 国防工业出版社 1995 年 10 月
- 019 可靠性维修性可用性手册**
潘吉安编著 国防工业出版社 1995 年 12 月
- 020 脉冲辐射场测量数据处理与误差分析**
陈元金编著 国防工业出版社 1997 年 1 月
- 021 近代成象技术和图象处理**
吴世法著 国防工业出版社 1997 年 3 月
- 022 一维流体力学差分方法**
水鸿寿著 国防工业出版社 1998 年 2 月
- 023 抗辐射电子学**
——辐射效应及加固原理
赖祖武等著 国防工业出版社 1998 年 7 月

序

本专著在国内属首次编著,主要以全面系统地总结我国二十多年来抗辐射电子学领域取得的巨大进展为基础,并辅以国外有关科研发展成果。其内容具有抗辐射电子学内在的较完整的理论与实践相结合的体系,包括:对人工与天然的强辐射环境特性参数分析;电子材料辐射效应与损伤机理的物理学基础;各种有源半导体元器件与集成电路的辐射效应与加固技术;强电磁场对电子系统的损伤效应与加固方法;电子系统的总体加固设计与评价;辐射效应试验的模拟源和测试技术;半导体元器件和集成电路辐射效应的计算机模拟分析与预测。

本专著不仅适用于从事抗辐射电子学领域的科研、教学、生产与管理的专业人员参考,也可作为有关专业的研究生、高年级本科生以及在职人员继续工程教育的参考教材。

毛用泽

1996. 6

前 言

抗辐射电子学,亦即电子元、器件和系统的抗辐射加固工作的学科领域,中国工程物理研究院是这个领域在国内最早开展研究的单位之一。早在 70 年代,就对电子元、器件,线路进行辐射效应实验,以及对小功率半导体晶体管的抗中子辐射加固进行一些基础研究;建立快中子脉冲堆以及高功率脉冲电子束加速器等大型模拟源,接着又开展辐射损伤机制及电子系统的工程加固设计的研究。

二十多年来,抗辐射电子学已形成一个重要的学科,全国在这个领域也得到了重要的进展。总的说来,已组织了一支专业配套的科技队伍,建立了一批重要的核效应及电磁脉冲效应的模拟实验设备,取得了不少可供应用的成果,在核辐射效应及电磁脉冲效应的研究中有些成果已达到或接近国际水平,为今后的进一步发展打下了良好的基础。

抗辐射电子学不仅在国防上有重要的应用,在航天技术以及国民经济中许多部门都引起了广泛重视。

许多同志都为我国发展这门新学科,包括创建工作,付出了辛勤的劳动,作出了卓越的贡献,累积了丰富的知识和宝贵的经验,很需要加以总结、写出一些较为全面、系统介绍这门新学科的书,以便帮助准备从事这方面工作的后继人员能较快地了解这个领域的概貌和便于入门。

1990 年全国原子能类教材委员会曾将这本书列为全国研究生的教材计划,现在这本书既可作为从事这个领域工作的科研、生产及管理人士的参考书,也可作为有关专业的研究生、高年级本科生及继续工程教育的教材。

关于抗辐射电子学及核电磁脉冲全国学术交流会已开了5次(1980年12月在成都,1984年4月在无锡,1987年12月在四川灌县,1991年3月在西安,1993年9月在大连),每次会议都有论文集,但至今还没有一本能全面反映这门新学科的系统论述的著作,本书就是为填补这一空白而撰写的。

本书共分为九章:第一章为绪论,对抗辐射电子学的意义,主要的研究对象及内容发展的历史及趋势作综合的概述;第二章介绍主要的强辐射环境;第三章至第五章为电子系统(重点为半导体器件及集成电路)的辐射效应及加固技术,其中第三章主要是MOS场效应晶体管,第四章为双极型及结型场效应晶体管,第五章为半导体集成电路;第六章为电磁脉冲对电子系统的效应及加固技术;第七章为电子系统的总体抗辐射加固设计及评价方法;第八章为辐射效应的测试方法;第九章为半导体器件和集成电路辐射效应的计算机模拟分析预测。

赖祖武负责全书的主编,提出全书的内容设计及安排,直接执笔写了第一、二、六、七、八章,并对其余各章进行修改和补充。包宗明为副主编,负责第三、四、五章半导体器件部分的统稿及修改。宋钦歧具体承担第三、五章初稿的编写,王长河承担第四章的编写,黄胜明承担第九章的编写。

抗辐射电子学是一门涉及核物理、半导体物理、电子学及电磁场理论的交叉学科,本书全面、系统地介绍了这门新学科的主要内容。从事这个领域工作的有半导体器件的研制和生产人员,电子系统的设计工程人员,科学实验及应用工作者,辐射效应测试、评价及管理人员等可以重点选择其中某些章节进行阅读。

本书作为专著,并以读者已具备核物理、半导体物理、模拟及数字电路、电磁场及电磁波,计算机等大学专业课程的基础,没有过多地涉及基础理论,且避免了繁琐的数学推导,但也考虑到尽量保持全书的系统性、完整性和可读性,因此也可以作有关专业研究生及高年级学生的参考教材。在此还要说明一下,随着科学技术的发展,抗辐射电子学的内容也在逐渐扩大,例如激光武器(包括核

爆激励 X 射线武器的出现), 激光对电子系统的损伤效应及加固问题也日益引起关注, 但这方面目前还不很成熟, 因此本书暂不包括此内容。

参加本书编写的作者均长期从事抗辐射电子学各个方面的研究, 书中许多内容均融入了他们本人及其合作者的研究心得, 力图较全面反映我国当前在此领域的水平。当然, 由于作者们水平和经验不足, 相互间交换意见和讨论不够, 难免有不够全面和错误之处, 希读者见谅并指正。

最后, 作者诚挚地感谢中国工程院毛用泽院士和俞大光院士为本书进行专审, 吴宏志同志为本书进行初审, 提出许多宝贵的意见, 不少同志对本书还提供有关资料及模拟源的装置图片。此外, 中国工程物理研究院科技丛书编委会杜祥琬主任, 华欣生副主任, 编辑部吴衍斌, 郭玉团同志均热情鼓励和支持本书出版, 在此一并致以衷心感谢!

中国工程物理研究院
北京研究生部
赖祖武

内 容 简 介

本书主要介绍抗辐射电子学内在的较完整的理论与实践相结合的体系,包括:对强辐射环境特性参数分析;电子材料辐射效应与损伤机理的物理学基础;各种有源半导体元器件与集成电路的辐射效应与加固技术;强电磁场对电子系统的损伤效应与加固方法;电子系统的总体加固设计与评价;辐射效应实验的模拟源和测试技术;半导体元器件和集成电路辐射效应的计算分析与预测。

This book will provide a complete and systematic description of the radiation hardening electronics, involving radiation effects, radiation damage mechanisms and hardening techniques and is intended to serve engineers, scientists, managers and also graduate students who are dealing with this area. Emphasis is placed on both the principles and applicable techniques.

目 录

第一章 绪论	1
第二章 主要的强辐射环境	16
2.1 空间辐射环境	16
2.1.1 宇宙射线	17
2.1.2 太阳风	18
2.1.3 极光辐射	18
2.1.4 范·艾伦辐射带	18
2.2 核爆炸的核辐射环境	21
2.3 核电电磁脉冲环境	26
2.3.1 高空核电电磁脉冲	27
2.3.2 低空及地面核爆炸电磁脉冲	29
2.3.3 地下核爆炸电磁脉冲	32
2.4 内电磁脉冲	33
2.5 系统电磁脉冲	36
2.5.1 绝缘体的康普顿充电效应	37
2.5.2 金属导体的 γ 辐射感生电流	39
2.6 高功率微波	40
2.7 几种实验装置的辐射环境	43
参考文献	44
第三章 MOS 场效应晶体管的辐射效应及加固技术	46
3.1 概述	46
3.2 MOS 场效应晶体管(MOSFET)的主要参数	46
3.3 电离辐射在 SiO_2 中形成空间电荷的机制	48
3.3.1 空穴迁移模型	48
3.3.2 SiO_2 中空间电荷的结构	52
3.3.3 SiO_2 中俘获的正空间电荷的激活能	53
3.3.4 俘获空穴的退火过程	56

3.3.5 钠离子的影响	59
3.4 电离辐射在 Si/SiO ₂ 界面产生的界面态	59
3.4.1 界面态特征	60
3.4.2 MOS 器件电离辐射产生界面态的过程	60
3.4.3 影响界面态建立过程的因素	60
3.4.4 界面态建立的模型	65
3.4.5 MOSFET 低温辐射后退火过程中形成界面态的研究	67
3.4.6 电离辐射产生的界面态在禁带能级中的转移	70
3.5 MOSFET 的电离辐射效应及加固技术	73
3.5.1 MOSFET 的电离辐射效应	73
3.5.2 衬底材料的影响及加固选择	77
3.5.3 氧化的环境、温度和氧化后的退火对辐射效应的影响	79
3.5.4 氧化层厚度的影响	81
3.5.5 其他影响因素	82
3.5.6 MOS 器件抗电离辐射加固的原则	82
参考文献	83

第四章 双极型、结型场效应、静电感应型晶体管的辐射

效应及加固技术	87
4.1 概述	87
4.2 双极晶体管的辐射效应及加固技术	87
4.2.1 辐射对晶体管电参数的影响	87
4.2.2 γ 射线或 X 射线的瞬时辐射效应	93
4.2.3 双极型晶体管抗辐射加固技术	98
4.3 几种提高抗瞬时电离辐射能力的晶体管补偿电路	107
4.3.1 射极电阻负反馈	107
4.3.2 二极管分流	108
4.3.3 二极管钳位	108
4.3.4 负反馈分流作用	108
4.4 结型场效应晶体管(JFET)的辐射效应和加固技术	109
4.4.1 结型场效应晶体管的结构及其主要参数	109
4.4.2 JFET 的辐射效应	110
4.5 静电感应晶体管(SIT)的中子辐射效应	110
4.5.1 静电感应晶体管的辐射效应	110
4.5.2 双极模式静电感应晶体管(BSIT)的中子辐射效应	115