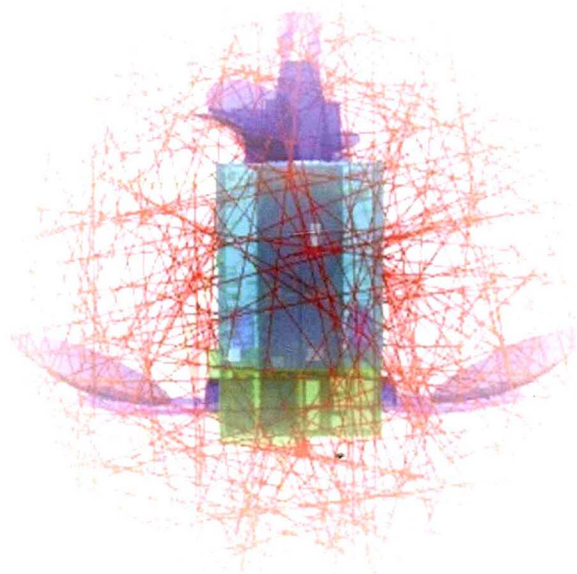


中国科协三峡科技出版资助计划

抗辐射设计与 辐射效应

沈自才 丁义刚 著



中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

中国科协三峡科技出版资助计划

抗辐射设计与辐射效应

沈自才 丁义刚 著



中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

抗辐射设计与辐射效应 / 沈自才, 丁义刚著. —北京: 中国科学技术出版社, 2015. 1

(中国科协三峡科技出版资助计划)

ISBN 978-7-5046-6738-0

I. ①抗… II. ①沈… ②丁… III. ①辐射防护-设计-研究
②辐射效应-研究 IV. ①TL7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 242249 号

总 策 划 沈爱民 林初学 刘兴平 孙志禹

责任编辑 包明明

项目策划 杨书宣 赵崇海

责任校对 孟华英 何士如

出版人 苏青

印刷监制 李春利

编辑组组长 吕建华 赵晖

责任印制 张建农

出 版 中国科学技术出版社

发 行 科学普及出版社发行部

地 址 北京市海淀区中关村南大街 16 号

邮 编 100081

发行电话 010-62103349

传 真 010-62103166

网 址 <http://www.cspbooks.com.cn>

开 本 787mm×1092mm 1/16

字 数 540 千字

印 张 22.5

版 次 2015 年 5 月第 1 版

印 次 2015 年 5 月第 1 次印刷

印 刷 北京盛通印刷股份有限公司

书 号 ISBN978-7-5046-6738-0/TL·4

定 价 102.00 元

(凡购买本社图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换)

总 序

科技是人类智慧的伟大结晶，创新是文明进步的不竭动力。当今世界，科技日益深入影响经济社会发展和人们日常生活，科技创新发展水平深刻反映着一个国家的综合国力和核心竞争力。面对新形势、新要求，我们必须牢牢把握新的科技革命和产业变革机遇，大力实施科教兴国战略和人才强国战略，全面提高自主创新能力。

科技著作是科研成果和自主创新能力的重要体现形式。纵观世界科技发展历史，高水平学术论著的出版常常成为科技进步和科技创新的重要里程碑。1543年，哥白尼的《天体运行论》在他逝世前夕出版，标志着人类在宇宙认识论上的一次革命，新的科学思想得以传遍欧洲，科学革命的序幕由此拉开。1687年，牛顿的代表作《自然哲学的数学原理》问世，在物理学、数学、天文学和哲学等领域产生巨大影响，标志着牛顿力学三大定律和万有引力定律的诞生。1789年，拉瓦锡出版了他的划时代名著《化学纲要》，为使化学确立为一门真正独立的学科奠定了基础，标志着化学新纪元的开端。1873年，麦克斯韦出版的《论电和磁》标志着电磁场理论的创立，该理论将电学、磁学、光学统一起来，成为19世纪物理学发展的最光辉成果。

这些伟大的学术论著凝聚着科学巨匠们的伟大科学思想，标志着不同时代科学技术的革命性进展，成为支撑相应学科发展宽厚、坚实的奠基石。放眼全球，科技论著的出版数量和质量，集中体现了各国科技工作者的原始创新能力，一个国家但凡拥有强大的自主创新能力，无一例外也反映到其出版的科技论著数量、质量和影响力上。出版高水平、高质量的学术著

作，成为科技工作者的奋斗目标和出版工作者的不懈追求。

中国科学技术协会是中国科技工作者的群众组织，是党和政府联系科技工作者的桥梁和纽带，在组织开展学术交流、科学普及、人才举荐、决策咨询等方面，具有独特的学科智力优势和组织网络优势。中国长江三峡集团公司是中国特大型国有独资企业，是推动我国经济发展、社会进步、民生改善、科技创新和国家安全的重要力量。2011年12月，中国科学技术协会和中国长江三峡集团公司签订战略合作协议，联合设立“中国科协三峡科技出版资助计划”，资助全国从事基础研究、应用基础研究或技术开发、改造和产品研发的科技工作者出版高水平的科技学术著作，并向45岁以下青年科技工作者、中国青年科技奖获得者和全国百篇优秀博士学位论文获得者倾斜，重点资助科技人员出版首部学术专著。

由衷地希望，“中国科协三峡科技出版资助计划”的实施，对更好地聚集原创科研成果，推动国家科技创新和学科发展，促进科技工作者学术成长，繁荣科技出版，打造中国科学技术出版社学术出版品牌，产生积极的、重要的作用。

是为序。

作者简介



沈自才，1980年3月出生。祖籍山东省临沂市临沭县。高级工程师。于中国科学院研究生院和中国科学院上海光学精密机械研究所获得材料学硕士学位和光学工程博士学位。现在中国空间技术研究院北京卫星环境工程研究所从事航天器空间环境效应及深空探测技术研究工作。先后承担或主持国家自然科学基金、国防基础科研、国防技术基础、“863”、“973”等国家重大课题。对空间环境下卫星长寿命评估与保障技术、空间辐射环境与效应地面模拟试验技术、航天器加速实验与寿命预示技术等进行了研究。参与多型号卫星的关键技术、研制保障条件的系统论证工作，主持多项型号用关键材料与器件的地面模拟试验评价与鉴定工作，参与深空探测等多项国家航天发展规划的编写工作。出版学术专著《空间辐射环境工程》，主持编写 QJ 标准 1 项。发表期刊论文和会议论文 100 余篇，其中 SCI、EI 收录 50 余篇。



丁义刚，1973年9月出生。祖籍湖北省应城市。高级工程师。主要从事空间辐射环境及效应地面模拟试验技术、空间辐射环境及效应飞行试验技术等研究工作。先后主持国防技术基础、总装共性技术、环境试验与观测等课题研究工作，对航天器材料及太阳能电池辐射效应模拟方法、综合辐射环境效应模拟及评估方法、在轨性能退化预示技术、航天器材料性能退化飞行试验技术、航天器功能材料辐射效应及加固技术等进行了研究。曾获得国防科技进步奖二等奖 1 项，在《中国空间科学技术》《航天器环境工程》等期刊以及会议上发表论文 20 余篇。

序

自19世纪90年代伦琴发现X射线及其放射性以来，辐射环境及辐射效应就逐渐受到人们的重视，并加以研究、应用和防护，尤其在核技术、航天工程等领域，辐射效应是需要给予关注的重点方向。在空间技术中，航天器在轨所遭遇的辐射环境主要来源于太阳的辐射和星际空间的辐射，包括粒子辐射和太阳电磁辐射。其中，粒子辐射环境主要由电子、质子和少量的重离子等组成，主要来源于星体俘获辐射带、太阳宇宙射线、银河宇宙射线等。在地面环境中，核反应堆的辐射环境、核武器爆炸环境、地面模拟加速器辐射环境等是很重要的辐射源，可对关键材料和器件带来损伤。同时，不同种类的辐射源，尤其是钴源产生的伽马射线，可用于材料加工和医用消毒等。

辐射环境及其引发的单粒子效应、电离总剂量效应、位移损伤效应、表面充放电效应、内带电效应等是导致材料与器件性能退化甚至失效的主要原因。为此，人们通过策划并采取一定的措施，以减缓和屏蔽辐射对物质的损伤，尽可能地避免辐射对人类活动的危害，称之为抗辐射设计。

经过多年的发展，我国在抗辐射设计领域和辐射效应研究方面取得了长足的发展，但与国外相比仍存在较大差距：一方面，关于抗辐射设计的方法仍然不能满足型号研制的需要；另一方面，关于型号用材料与器件的辐射效应数据仍然缺乏系统性梳理。

本书作者在多年从事辐射环境、辐射效应及抗辐射设计研究的基础上，对国内外的抗辐射设计和辐射效应进行梳理、分析和总结，并吸收国内外的最新研究成果，分别从抗辐射设计技术和辐射效应两个方面进行了阐述。

第一部分为抗辐射设计，包括第1章至第8章，论述了辐射环境、辐射效应、辐射损伤机制、辐照试验、辐射屏蔽、抗辐射设计、辐射加固保证等内容；第二部分为典型材料与元器件辐射效应，包括第9章至第16章，介绍了漆类材料、聚合物材料、光学材料、MOS工艺器件、二极管、双极晶体管、FPGA、CCD等典型材料与器件的辐射损伤机制和辐射损伤效应。

全书内容丰富，知识面广，思路清晰。可为从事辐射环境、辐射效应及抗辐射设计等相关领域的工程技术人员提供指导，也可作为高校、科研院所的教学参考用书。相信本书的出版将对我国的抗辐射设计及辐射应用技术研究起到积极推动作用。

A handwritten signature in black ink, appearing to be '王明' (Wang Ming), written in a cursive style.

2014年11月

前 言

随着 19 世纪 90 年代伦琴发现 X 射线及其放射性、贝克勒尔发现放射活动以及居里夫人发现辐射现象，抗辐射设计与辐射效应就成为人类非常重视的研究工作。尤其是在核领域和航天领域，辐射环境及其效应是威胁材料、器件及人类安全的主要因素。在航天工程领域，自人类研制第一颗人造地球卫星开始，以美、苏/俄等为代表的航天大国，就非常重视抗辐射设计与辐射效应的研究工作。随着航天科技的发展，我国在近地轨道探测的基础上，开始以月球探测为代表的深空探测活动和以空间站建设为代表的长期在轨实验平台的建设，这要求航天器能够实现长期在轨可靠运行，而辐射环境及效应对航天器的长寿命、高可靠带来了严峻挑战，亟须加强抗辐射设计与辐射效应的研究工作。

辐射环境引发的单粒子效应、电离总剂量效应、位移损伤效应、表面充放电效应、内带电效应等是导致材料与器件性能退化甚至失效的主要因素。经过多年的发展，我国在抗辐射设计领域和辐射效应研究方面取得了长足的进步，但仍然不能满足型号的研制需求，与国外相比也存在较大差距。一方面，关于抗辐射设计的方法仍然不能满足型号研制的需要；另一方面，关于型号用材料与器件的辐射效应数据仍然缺乏系统性梳理。

作者及其所在的研究团队在多年从事辐射环境与效应及抗辐射设计研究的基础上，对国内外的抗辐射设计和辐射效应研究进行梳理、分析和总结，并吸收国内外的最新研究成果，以期从辐射环境、辐射效应、辐射损伤机制、辐照试验、辐射屏蔽、抗辐射设计、辐射加固保证等方面对抗辐射设计进行阐述，从漆类材料、聚合物材料、光学材料、MOS 工艺器件、

二极管、双极晶体管、FPGA、CCD 等典型材料与器件对辐射效应的损伤机制和辐射效应数据进行梳理和分析。这些均是当前我国型号研制过程中所急需的，其抗辐射设计方法和辐射效应数据将可直接应用于型号研制过程中，具有较强的实用性、时效性。

本书中的第 6、第 7、第 12 章由丁义刚编写，其他章节由沈自才编写。在本书编写的过程中，得到了中国空间技术研究院李明研究员、邱家稳研究员、中国空间技术研究院通信卫星事业部朱文明研究员、中国空间技术研究院宇航物资保障事业部孟猛研究员、北京飞行器总体设计部张庆祥研究员、航天东方红卫星有限公司白照广总师的指导和帮助。北京卫星环境工程研究所刘国青研究员、向树红研究员、童靖宇研究员、刘宇明高级工程师、赵春晴工程师、牟永强工程师等给予了大量的帮助。本书的部分研究成果得到了国家自然科学基金（41174166）的支持。在此，一并表示感谢。在编写过程中，作者参阅了大量国内外科技论著、文献，并力求规范引用，在此，对所引用文献的作者表示感谢，如有不周之处，请予谅解。

抗辐射设计与辐射效应是一门多学科交叉的系统性工程科学，涉及物理学、化学、材料学、微电子学等多个学科，涵盖航空、航天、核工程、电子等诸多领域。虽然经过多年的发展，但是随着新材料、新器件、新技术的研制和开发以及空间探测等型号任务的不断推进，在理论、方法和应用上仍在不断深化。本书可为国内从事辐射环境、效应及设计等领域的工程技术人员提供指导，可为从事辐射相关的材料和电子元器件研制提供理论支持，亦可作为高校、科研院所的教学参考用书。由于作者水平有限，书中不尽完美之处在所难免，恳请广大同行、读者批评指正。

作 者

2013 年 10 月于北京航天城

目 录

总 序
序
前 言

第一部分 抗辐射设计

第1章 概 论	3
1.1 概述	3
1.2 辐射源及分类	3
1.3 基本概念与单位	4
1.4 常用辐射测量方法	8
第2章 辐射环境	13
2.1 概述	13
2.2 俘获辐射带	13
2.3 太阳宇宙射线	26
2.4 银河宇宙射线	35
2.5 次级辐射粒子	42
2.6 太阳电磁辐射	43
2.7 空间等离子体	46

2.8	太阳活动对空间辐射环境的影响	50
2.9	核反应堆辐射环境	52
2.10	核武器辐射环境	53
2.11	激光辐射	53
第3章	辐射损伤机制	57
3.1	概述	57
3.2	辐射损伤模式	57
3.3	带电粒子与物质的相互作用	59
3.4	中子与物质的相互作用	64
3.5	光子与物质的相互作用	66
第4章	辐射效应	70
4.1	概述	70
4.2	单粒子效应	78
4.3	电离总剂量效应	85
4.4	表面充放电效应	92
4.5	内带电效应	94
4.6	位移损伤效应	97
4.7	辐射生物学效应	101
4.8	辐射诱导传感器背景噪声效应	105
第5章	辐照试验	110
5.1	概述	110
5.2	辐照源	110
5.3	试验标准与规范	120
5.4	参数与测试	127

5.5 试验流程	131
第6章 辐射屏蔽	139
6.1 概述	139
6.2 辐射输运过程	139
6.3 屏蔽分析方法	144
6.4 常用的粒子输运蒙特卡罗程序	149
6.5 辐射屏蔽模型	154
第7章 抗辐射设计	158
7.1 概述	158
7.2 抗辐射设计程序	158
7.3 辐射设计余量	161
7.4 辐射计算	162
第8章 辐射加固保证	184
8.1 概述	184
8.2 电离总剂量效应加固保证	185
8.3 位移损伤效应加固保障	189
8.4 单粒子效应加固保证	191
8.5 辐射诱导背景噪声评估	200

第二部分 典型材料与元器件辐射效应

第9章 漆类材料辐射效应	207
9.1 概述	207

9.2	漆类材料辐射损伤机制	207
9.3	部分漆类材料辐射效应	210
第 10 章	聚合物材料辐射效应	219
10.1	概述	219
10.2	聚合物材料辐射损伤机制	221
10.3	辐射导致聚合物性能的变化	224
10.4	部分聚合物及聚合物基材料辐射效应	225
第 11 章	光学材料辐射效应	243
11.1	概述	243
11.2	光学材料辐射损伤机制	243
11.3	玻璃材料辐射效应	245
11.4	光纤的辐射效应	250
第 12 章	MOS 工艺器件辐射效应	255
12.1	概述	255
12.2	MOS 工艺器件辐射损伤机制	255
12.3	MOS 工艺器件辐射效应	257
第 13 章	双极晶体管辐射效应	271
13.1	概述	271
13.2	辐射损伤机制	272
13.3	双极晶体管辐射效应	275
13.4	低剂量率增强效应	277
13.5	偏置对辐射效应的影响	280

第 14 章 光电二极管辐射效应	282
14.1 概述	282
14.2 光电二极管辐射损伤机制	283
14.3 部分光电二极管的辐射效应	284
第 15 章 FPGA 辐射效应	298
15.1 概述	298
15.2 FPGA 辐射损伤机制	299
15.3 FPGA 辐射损伤效应	301
第 16 章 CCD 辐射效应	310
16.1 概述	310
16.2 CCD 辐射损伤机制	311
16.3 CCD 辐射损伤效应	316
附录 A: 常用单位名称、单位符号及换算关系	328
附录 B: 全书缩略语和专用名词对照表	329
附录 C: 太阳黑子数周期的极大值和极小值	334
附录 D: $Z \leq 28$ 的 GCR 粒子刚度谱和参数	335
附录 E: $Z \geq 29$ 的 GCR 粒子刚度谱和参数	337
索引	340

第一部分 抗辐射设计

