



《中国工程物理研究院科技丛书》第072号

# 放射性测量及其应用

Radioactive Measurement and Its Applications

主 编 蒙大桥

副主编 杨明太 吴伦强



国防工业出版社  
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

《中国工程物理研究院科技丛书》第 072 号

# 放射性测量及其应用

Radioactive Measurement and Its Applications

主 编 蒙大桥

副主编 杨明太 吴伦强

常州大学图书馆  
藏书章

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

放射性测量及其应用/蒙大桥主编. —北京:国防工业出版社, 2018. 1

ISBN 978-7-118-11409-6

I. ①放… II. ①蒙… ②杨… III. ①放射性分析  
IV. ①TL73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 318784 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 100048)

天津嘉恒印务有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 787 × 1092 1/16 印张 16 $\frac{3}{4}$  字数 318 千字

2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 109.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

## 致 读 者

本书由中央军委装备发展部国防科技图书出版基金资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,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。这是一项具有深远意义的创举。

**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中央军委装备发展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,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展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。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断摸索、认真总结和及时改进,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

国防科技图书出版基金  
第七届评审委员会组成人员

|           |     |     |     |     |     |  |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| 主任委员      | 潘银喜 |     |     |     |     |  |
| 副主任委员     | 吴有生 | 傅兴男 | 赵伯桥 |     |     |  |
| 秘书长       | 赵伯桥 |     |     |     |     |  |
| 副秘书长      | 许西安 | 谢晓阳 |     |     |     |  |
| 委员        | 才鸿年 | 马伟明 | 王小谟 | 王群书 | 甘茂治 |  |
| (按姓氏笔画排序) | 甘晓华 | 卢秉恒 | 巩水利 | 刘泽金 | 孙秀冬 |  |
|           | 芮筱亭 | 李言荣 | 李德仁 | 李德毅 | 杨伟  |  |
|           | 肖志力 | 吴宏鑫 | 张文栋 | 张信威 | 陆军  |  |
|           | 陈良惠 | 房建成 | 赵万生 | 赵凤起 | 郭云飞 |  |
|           | 唐志共 | 陶西平 | 韩祖南 | 傅惠民 | 魏炳波 |  |

# 《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 50 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技任务。通过完成任务,在许多专业领域里,不论是在基础理论方面,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才。

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 50 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技工作的成果,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。

这套丛书自 1989 年开始出版,在今后一段时期还将继续编辑出版。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 50 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

2008 年 5 月 8 日修改

# 《中国工程物理研究院科技丛书》

## 第七届编审委员会

学术顾问 杜祥琬

编委会主任 彭先觉

副主任 孙承纬 汪小琳 赵武文

委员 (以姓氏笔画为序)

王 韬 帅茂兵 田 勇 李 凡 李正宏

李泽仁 李敬明 吴兴春 何建国 何宴标

张 凯 张 健 张文平 张方晓 张保汉

陈贤林 罗文华 孟凡宝 赵 锋 赵 强

赵小东 袁光伟 莫 军 黄秀光 彭述明

曾 超 魏晓峰

科技丛书编辑部

负责人 唐 勇

本册编辑 李代斌 李天惠 王立楠

# 《中国工程物理研究院科技丛书》

## 公开出版书目

- |     |                          |         |             |
|-----|--------------------------|---------|-------------|
| 001 | 高能炸药及相关物性能<br>董海山 周芬芬 主编 | 科学出版社   | 1989 年 11 月 |
| 002 | 光学高速摄影测试技术<br>谭显祥 编著     | 科学出版社   | 1990 年 02 月 |
| 003 | 凝聚炸药起爆动力学<br>章冠人 陈大年 编著  | 国防工业出版社 | 1991 年 09 月 |
| 004 | 线性代数方程组的迭代解法<br>胡家赣 著    | 科学出版社   | 1991 年 12 月 |
| 005 | 映象与混沌<br>陈式刚 编著          | 国防工业出版社 | 1992 年 06 月 |
| 006 | 再入遥测技术(上册)<br>谢铭勋 编著     | 国防工业出版社 | 1992 年 06 月 |
| 007 | 再入遥测技术(下册)<br>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<br>李世昌 著   | 国防工业出版社 | 1992 年 10 月 |
| 009 | 粘性消去法和差分格式的粘性<br>郭柏灵 著   | 科学出版社   | 1993 年 03 月 |
| 010 | 无损检测技术及其应用<br>张俊哲 等 著    | 科学出版社   | 1993 年 05 月 |
| 011 | 半导体材料的辐射效应<br>曹建中 等 著    | 科学出版社   | 1993 年 05 月 |
| 012 | 炸药热分析<br>楚士晋 著           | 科学出版社   | 1993 年 12 月 |
| 013 | 脉冲辐射场诊断技术<br>刘庆兆 等 著     | 科学出版社   | 1994 年 12 月 |
| 014 | 放射性核素活度测量的方法和技术<br>古当长 著 | 科学出版社   | 1994 年 12 月 |
| 015 | 二维非定常流和激波<br>王继海 著       | 科学出版社   | 1994 年 12 月 |



- 016 抛物型方程差分方法引论  
李德元 陈光南 著 科学出版社 1995 年 12 月
- 017 特种结构分析  
刘新民 韦日演 编著 国防工业出版社 1995 年 12 月
- 018 理论爆轰物理  
孙锦山 朱建士 著 国防工业出版社 1995 年 12 月
- 019 可靠性维修性可用性评估手册  
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 01 月
- 021 近代成象技术与图象处理  
吴世法 编著 国防工业出版社 1997 年 03 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 02 月
- 023 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 1998 年 07 月
- 024 金属的环境氢脆及其试验技术  
周德惠 谭 云 编著 国防工业出版社 1998 年 12 月
- 025 实验核物理测量中的粒子分辨  
段绍节 编著 国防工业出版社 1999 年 06 月
- 026 实验物态方程导引(第二版)  
经福谦 著 科学出版社 1999 年 09 月
- 027 无穷维动力系统  
郭柏灵 著 国防工业出版社 2000 年 01 月
- 028 真空吸取器设计及应用技术  
单景德 编著 国防工业出版社 2000 年 01 月
- 029 再入飞行器天线  
金显盛 著 国防工业出版社 2000 年 03 月
- 030 应用爆轰物理  
孙承纬 卫玉章 周之奎 著 国防工业出版社 2000 年 12 月
- 031 混沌的控制、同步与利用  
王光瑞 于熙龄 陈式刚 编著 国防工业出版社 2000 年 12 月
- 032 激光干涉测速技术  
胡绍楼 著 国防工业出版社 2000 年 12 月
- 033 气体炮原理及技术  
王金贵 编著 国防工业出版社 2000 年 12 月
- 034 一维不定常流与冲击波  
李维新 编著 国防工业出版社 2001 年 05 月

- 035 X射线与真空紫外辐射源及其计量技术  
孙景文 编著 国防工业出版社 2001年08月
- 036 含能材料热谱集  
董海山 胡荣祖 姚朴 张孝仪 编著 国防工业出版社 2001年10月
- 037 材料中的氦及氘渗透  
王佩璇 宋家树 编著 国防工业出版社 2002年04月
- 038 高温等离子体X射线谱学  
孙景文 编著 国防工业出版社 2003年01月
- 039 激光核聚变靶物理基础  
张钧 常铁强 著 国防工业出版社 2004年06月
- 040 系统可靠性工程  
金碧辉 主编 国防工业出版社 2004年06月
- 041 核材料 $\gamma$ 特征谱的测量和分析技术  
田东风 龚健 伍钧 胡思得 编著 国防工业出版社 2004年06月
- 042 高能激光系统  
苏毅 万敏 编著 国防工业出版社 2004年06月
- 043 近可积无穷维动力系统  
郭柏灵 高平 陈瀚林 著 国防工业出版社 2004年06月
- 044 半导体器件和集成电路的辐射效应  
陈盘训 著 国防工业出版社 2004年06月
- 045 高功率脉冲技术  
刘锡三 编著 国防工业出版社 2004年08月
- 046 热电池  
陆瑞生 刘效疆 编著 国防工业出版社 2004年08月
- 047 原子结构、碰撞与光谱理论  
方泉玉 颜君 著 国防工业出版社 2006年01月
- 048 非牛顿流动力系统  
郭柏灵 林国广 尚亚东 著 国防工业出版社 2006年02月
- 049 动高压原理与技术  
经福谦 陈俊祥 主编 国防工业出版社 2006年03月
- 050 直线感应电子加速器  
邓建军 主编 国防工业出版社 2006年10月
- 051 中子核反应激发函数  
田东风 孙伟力 编著 国防工业出版社 2006年11月
- 052 实验冲击波物理导引  
谭华 著 国防工业出版社 2007年03月
- 053 核军备控制核查技术概论  
刘成安 伍钧 编著 国防工业出版社 2007年03月

- 054 强流粒子束及其应用  
刘锡三 著 国防工业出版社 2007 年 05 月
- 055 氦和氙的工程技术  
蒋国强 罗德礼 陆光达 孙灵霞 编著 国防工业出版社 2007 年 11 月
- 056 中子学宏观实验  
段绍节 编著 国防工业出版社 2008 年 05 月
- 057 高功率微波发生器原理  
丁武 著 国防工业出版社 2008 年 05 月
- 058 等离子体中辐射输运和辐射流体力学  
彭惠民 编著 国防工业出版社 2008 年 08 月
- 059 非平衡统计力学  
陈式刚 编著 科学出版社 2010 年 02 月
- 060 高能硝胺炸药的热分解  
舒远杰 著 国防工业出版社 2010 年 06 月
- 061 电磁脉冲导论  
王泰春 贺云汉 王玉芝 著 国防工业出版社 2011 年 03 月
- 062 高功率超宽带电磁脉冲技术  
孟凡宝 主编 国防工业出版社 2011 年 11 月
- 063 分数阶偏微分方程及其数值解  
郭柏灵 蒲学科 黄凤辉 著 科学出版社 2011 年 11 月
- 064 快中子临界装置和脉冲堆实验物理  
贺仁辅 邓门才 编著 国防工业出版社 2012 年 02 月
- 065 激光惯性约束聚变诊断学  
温树槐 丁永坤 等 编著 国防工业出版社 2012 年 04 月
- 066 强激光场中的原子、分子与团簇  
刘杰 夏勤智 傅立斌 著 科学出版社 2014 年 02 月
- 067 螺旋波动力学及其控制  
王光瑞 袁国勇 著 科学出版社 2014 年 11 月
- 068 氟化学与工艺学  
彭述明 王和义 主编 国防工业出版社 2015 年 04 月
- 069 微纳米含能材料  
曾贵玉 聂福德 等 著 国防工业出版社 2015 年 05 月
- 070 迭代方法和预处理技术(上册)  
谷同祥 安恒斌 刘兴平 徐小文 编著 科学出版社 2016 年 01 月
- 071 迭代方法和预处理技术(下册)  
谷同祥 徐小文 刘兴平 安恒斌 杭旭登 编著 科学出版社 2016 年 01 月
- 072 放射性测量及其应用  
蒙大桥 杨明太 吴伦强 等 编著 国防工业出版社 2018 年 01 月

## 编审委员会

主 任 蒙大桥

副主任 杨明太 吴伦强

编写组 赵德山 张连平 熊忠华 钟火平

# 前 言

以 1895 年伦琴发现 X 射线为开端,特别是放射性的发现,引起了人类科学思想上的革命,对认识宇宙、促进人类知识的发展产生了巨大的推动作用。100 多年来,放射性、原子能和核技术的应用深远地影响着人类的生存与发展。所有这一切,离不开放射性测量这一重要核技术支撑。

放射性测量是核物理实验和核技术应用的重要技术手段之一。近年来,放射性测量技术的应用几乎涵盖国防军事、工业、农业、医疗卫生、地质矿山、环境保护、航天、教学、科研、海关等众多领域。放射性测量紧紧伴随着放射性的发现和核技术的发展而发展,在核技术的研究和应用中发挥了不可或缺的作用。本书的编写旨在适应核科学技术快速发展的要求,系统整理放射性测量理论,总结、固化、传播核工程实践相关经验和成果,培养核科技人才,为核科技工作者及其相关科技工作人员提供参考。

通常,放射性测量包括对元素特征 X 射线的测量。由于本编写组先前已编著《实用 X 射线光谱分析》(原子能出版社,2008 年)一书,对元素特征 X 射线的测量进行了十分详尽的介绍,所以在本书编写中未对元素特征 X 射线的测量另设章节,仅以附件列出了元素 K、L 壳层特征 X 射线能量及其相对强度的最新数据。

全书共分六章,其中:第 1 章和第 6 章由蒙大桥撰写;第 2 章由杨明太撰写;第 3 章由张连平撰写;第 4 章由赵德山、熊忠华和钟火平撰写;第 5 章由吴伦强撰写。在本书的编写过程中,承蒙彭先觉院士的大力支持,李炬、罗文华、杨江荣等研究员和周南华、白贵元及相关部门领导对本书进行了仔细审阅,陈竹、金丹、李洁和王华菊等对本书做了大量的编辑、校对和标准化工作。藉此,向为本书付出辛勤劳动的各位同仁和相关部门表示衷心感谢!同时,向本书所引用的论著作者表示衷心感谢!

基于编著者的知识水平和实践的局限性,以及时间的仓促,书中错误、疏漏和不尽人意之处在所难免,诚恳欢迎广大读者和同行专家不吝赐教、予以斧正。

编著者

2016 年 6 月

# 目 录

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第1章 绪论 .....                 | 1  |
| 1.1 X射线的发现 .....             | 1  |
| 1.1.1 阴极射线 .....             | 1  |
| 1.1.2 伦琴射线 .....             | 2  |
| 1.1.3 X射线特性 .....            | 2  |
| 1.1.4 重大意义 .....             | 3  |
| 1.2 放射性的发现 .....             | 3  |
| 1.2.1 放射性元素的发现 .....         | 4  |
| 1.2.2 $\alpha$ 粒子的发现 .....   | 4  |
| 1.2.3 $\beta$ 射线的发现 .....    | 7  |
| 1.2.4 $\gamma$ 射线的发现 .....   | 7  |
| 1.2.5 中子的发现 .....            | 8  |
| 1.2.6 中微子的发现 .....           | 9  |
| 1.3 基本常识 .....               | 10 |
| 1.3.1 原子 .....               | 10 |
| 1.3.2 原子核 .....              | 11 |
| 1.3.3 核衰变 .....              | 11 |
| 1.3.4 放射性特性 .....            | 12 |
| 1.3.5 放射性分类及来源 .....         | 15 |
| 1.3.6 激发特征X射线 .....          | 15 |
| 1.4 现状与展望 .....              | 16 |
| 1.4.1 放射性探测器 .....           | 16 |
| 1.4.2 核仪器 .....              | 17 |
| 1.4.3 放射性测量 .....            | 17 |
| 1.4.4 应用 .....               | 19 |
| 参考文献 .....                   | 19 |
| 第2章 $\alpha$ 测量 .....        | 20 |
| 2.1 $\alpha$ 射线简介 .....      | 20 |
| 2.1.1 衰变表达式 .....            | 20 |
| 2.1.2 基本特性 .....             | 20 |
| 2.2 $\alpha$ 粒子与物质相互作用 ..... | 21 |
| 2.2.1 相互作用方式 .....           | 21 |

|       |                    |    |
|-------|--------------------|----|
| 2.2.2 | 相互作用机制             | 21 |
| 2.2.3 | 电离和激发              | 22 |
| 2.2.4 | 射程                 | 23 |
| 2.3   | $\alpha$ 探测器       | 25 |
| 2.3.1 | 气体探测器              | 25 |
| 2.3.2 | 闪烁体探测器             | 28 |
| 2.3.3 | 半导体探测器             | 29 |
| 2.3.4 | 其他类型探测器            | 30 |
| 2.4   | $\alpha$ 测量仪器      | 37 |
| 2.4.1 | $\alpha$ 强度测量仪     | 38 |
| 2.4.2 | $\alpha$ 能谱仪       | 39 |
| 2.4.3 | $\alpha$ 能谱仪主要性能测试 | 41 |
| 2.5   | 试样制备               | 43 |
| 2.5.1 | 样品前处理              | 43 |
| 2.5.2 | 测量源制备              | 45 |
| 2.5.3 | 试样量计算              | 47 |
| 2.6   | $\alpha$ 能谱数据处理    | 48 |
| 2.6.1 | 能谱光滑               | 49 |
| 2.6.2 | 能峰面积计算             | 53 |
| 2.6.3 | 活度计算               | 54 |
| 2.6.4 | 测量不确定度评定           | 55 |
| 2.7   | 应用实例               | 56 |
| 2.7.1 | 核材料检测              | 56 |
| 2.7.2 | 辐射防护监测             | 64 |
| 2.7.3 | 自然环境监测             | 64 |
| 2.7.4 | 涉核环境监测             | 65 |
| 2.7.5 | 地质应用               | 67 |
| 2.7.6 | 火灾烟雾报警             | 72 |
| 2.8   | 现状与展望              | 73 |
| 2.8.1 | 仪器硬件               | 73 |
| 2.8.2 | 仪器软件               | 74 |
| 2.8.3 | 应用与开发              | 74 |
|       | 参考文献               | 75 |
| 第3章   | $\beta$ 测量         | 77 |
| 3.1   | $\beta$ 射线简介       | 77 |
| 3.1.1 | 衰变表达式              | 77 |
| 3.1.2 | 基本特性               | 78 |
| 3.1.3 | 衰变纲图               | 79 |
| 3.2   | $\beta$ 能谱与中微子     | 80 |

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 3.2.1 $\beta$ 能谱研究                   | 80  |
| 3.2.2 泡利假说                           | 81  |
| 3.2.3 中微子假说                          | 82  |
| 3.2.4 费米理论                           | 82  |
| 3.2.5 中微子基本特性                        | 82  |
| 3.3 $\beta$ 射线与物质相互作用                | 83  |
| 3.3.1 相互作用方式                         | 83  |
| 3.3.2 减弱与吸收                          | 84  |
| 3.3.3 射程                             | 85  |
| 3.4 $\beta$ 测量仪器                     | 86  |
| 3.4.1 GM 计数器                         | 86  |
| 3.4.2 低本底 $\alpha$ 、 $\beta$ 弱放射性测量仪 | 87  |
| 3.4.3 闪烁计数器                          | 87  |
| 3.4.4 液闪测量仪                          | 88  |
| 3.4.5 $\beta$ 磁谱仪                    | 88  |
| 3.5 常用 $\beta$ 测量方法                  | 88  |
| 3.5.1 液闪测量                           | 89  |
| 3.5.2 $^3\text{H}$ 的测量               | 94  |
| 3.5.3 $^{14}\text{C}$ 的测量            | 99  |
| 3.6 应用实例                             | 101 |
| 3.6.1 环境介质 $^{14}\text{C}$ 检测        | 101 |
| 3.6.2 $\beta$ 法测尘                    | 102 |
| 3.6.3 $\beta$ 法测厚                    | 104 |
| 3.6.4 密度检测                           | 107 |
| 3.7 现状与展望                            | 108 |
| 3.7.1 生物和医学应用                        | 108 |
| 3.7.2 大气环境监测                         | 109 |
| 3.7.3 探测器研发                          | 109 |
| 参考文献                                 | 110 |
| 第4章 中子测量                             | 112 |
| 4.1 中子简介                             | 112 |
| 4.1.1 来源                             | 112 |
| 4.1.2 基本特性                           | 113 |
| 4.1.3 分类                             | 113 |
| 4.2 中子与物质相互作用                        | 114 |
| 4.2.1 相互作用方式                         | 114 |
| 4.2.2 相互作用机制                         | 117 |
| 4.3 中子探测方法原理                         | 117 |
| 4.3.1 核反冲法                           | 118 |



|       |                    |     |
|-------|--------------------|-----|
| 4.3.2 | 核反应法               | 118 |
| 4.3.3 | 核裂变法               | 119 |
| 4.3.4 | 核活化法               | 120 |
| 4.4   | 中子探测器              | 120 |
| 4.4.1 | 分类                 | 120 |
| 4.4.2 | 主要性能               | 121 |
| 4.4.3 | 热中子探测器             | 122 |
| 4.4.4 | 快中子探测器             | 126 |
| 4.4.5 | 新型探测器              | 128 |
| 4.5   | 中子测量仪器             | 131 |
| 4.5.1 | 有源中子测量仪            | 131 |
| 4.5.2 | 无源中子测量仪            | 132 |
| 4.5.3 | 中子成像装置             | 133 |
| 4.6   | 中子探测               | 135 |
| 4.6.1 | 中子能谱测量             | 135 |
| 4.6.2 | 中子通量测量             | 138 |
| 4.6.3 | 中子成像检测             | 138 |
| 4.6.4 | 常用中子测量方法           | 139 |
| 4.6.5 | 中子活化分析             | 144 |
| 4.7   | 应用实例               | 145 |
| 4.7.1 | 核保障                | 145 |
| 4.7.2 | 核废物非破坏性分析          | 146 |
| 4.7.3 | 安全检查               | 147 |
| 4.7.4 | 原油管道油垢测量           | 149 |
| 4.7.5 | 中子成像技术             | 151 |
| 4.7.6 | 中子活化分析             | 152 |
| 4.8   | 现状与展望              | 152 |
| 4.8.1 | 国防军事               | 152 |
| 4.8.2 | 民用核科技              | 153 |
| 4.8.3 | 探测器研发              | 154 |
| 4.8.4 | 大型测量装置研发           | 154 |
|       | 参考文献               | 155 |
| 第5章   | $\gamma$ 测量        | 158 |
| 5.1   | $\gamma$ 射线简介      | 158 |
| 5.1.1 | 来源                 | 158 |
| 5.1.2 | 基本特性               | 159 |
| 5.2   | $\gamma$ 射线与物质相互作用 | 160 |
| 5.2.1 | 光电效应               | 160 |
| 5.2.2 | 康普顿散射              | 161 |