



《中国工程物理研究院科技丛书》第 335 号

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

《中国工程物理研究院科技丛书》第 035 号

**X 射线与真空紫外
辐射源及其计量技术**
**X-ray and VUV Radiation Sources
and Their Metrical Techniques**

孙景文 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

X射线与真空紫外辐射源及其计量技术/孙景文编著.
北京:国防工业出版社,2001.12
ISBN 7-118-02575-5

I.X... II.孙... III.①X射线源—研究②真空—
紫外线—辐射源—研究 IV.0434

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 039377 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)

腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 13 $\frac{3}{4}$ 355 千字

2001 年 12 月第 1 版 2001 年 12 月北京第 1 次印刷

印数:1—1500 册 定价:26.00 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选出版。

IV

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**

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 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 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

《中国工程物理研究院科技丛书》

第四届编审委员会

主 任 杜祥琬
副 主 任 彭先觉 华欣生 李志民
委 员 (以姓氏笔划为序)
 王艳秀 邓门才 水鸿寿 田常津 江金生
 沈元如 李 凡 李泽仁 张方晓 张友寿
 张富堂 陈银亮 杨本立 郑志坚 罗顺火
 竺家亨 周德惠 俞大光 胡三国 贺云汉
 章冠人 黄清南 蒲仁璧

本丛书编辑部

负 责 人 吴衍斌
本册编辑 吴衍斌

前 言

随着高温等离子体物理研究工作的飞速发展,热核聚变、惯性约束聚变(ICF)以及磁约束聚变领域都获得了可喜的成就。所谓惯性约束聚变,是用高功率激光辐照充有几毫克氘和氚燃料的小型密闭容器(直径几毫米)产生的热核反应。自 20 世纪 70 年代以来,ICF 一直是硕果累累的研究领域。现在,高增益 ICF 正处于实际应用的初期阶段。使用实验室微聚变装置(LMF),这些应用对于国家防御、技术基础和应用科学以及发电都将有重要意义。

大量实验证明,辐射发射的光谱分析在确定实验室和天体物理现象的等离子体特性过程中是一种非常有用的诊断手段。由于它的特有的原子结构,热等离子体的发射光谱含有大量的关于等离子体温度、尺寸、密度和电离状态的参量,因此高温等离子体 X 射线携带着瞬变高温等离子体的大量信息。通过 X 射线能谱、谱线强度的诊断可推断等离子体的电子温度、电子密度、电子密度梯度和等离子体不透明度等参数,因此世界各国都在积极地研究高温等离子体 X 射线诊断技术。尤其是在激光核聚变方面更加受到人们广泛的关注,因为激光与等离子体相互作用有着丰富的物理图像,人们常称其为微型核爆炸。各国也都在积极建立各种实验室 X 射线源,以便深入发展更高精度的具有时间、空间和能量分辨能力的诊断技术与设备。

本书的目的在于阐述实验室中的各种 X 射线强源的原理、结构、性能及其应用技术,并介绍了 X 射线的辐射剂量标准和各种 X 射线探测器的标定技术。

全书共分五章:第一章概括地描述了辐射与等离子体相互作用产生的物理图像以及它所附有的各种参量(温度、密度、电离状

态)和等离子体从几十皮秒到几十纳秒的时间尺度与空间轮廓的变化;第二章重点讨论国内外实验室中的各种 X 射线强辐射源的原理、构造、性能及其应用技术,几乎囊括了所有的 X 射线源;第三章为真空紫外辐射源;第四章介绍了 X 射线与真空紫外辐射的剂量标准;第五章为各种 X 射线探测器的标定技术。

本书属强脉冲 X 射线源及其诊断技术的专著,可供科学院有关研究所、高等院校和国防研究机构科研人员阅读,也可供从事热核聚变、惯性约束聚变、磁约束聚变和高温等离子体物理与诊断技术工作的科研人员、大学教师和研究生以及高年级大学生参考。

虽然笔者在撰写过程中尽力融入本人及我院同事们三十多年的研究成果,但是由于作者本人的学识有限,加之讨论不足,文中难免有疏漏和错误之处,敬请有关读者不吝指正。

最后,作者诚挚地感谢老科学家方正知教授、郑绍唐研究员为本书的初稿提了许多宝贵意见。著名的 X 射线物理学家方正知教授在百忙之中为本书作了详尽的审改,使作者受益匪浅;章冠人教授和淳于书泰研究员作为本书的专审也提出了许多建设性的宝贵意见,使本书增辉不少;祁兰英副研究员和江少恩副研究员为本书提供了数据资料;赵鹏骥教授为本书的化学剂量计部分做了认真的修改。本书在编写和出版过程中,《中国工程物理研究院科技丛书》编委会主任杜祥琬院士、编辑部吴衍斌研究员和郭玉团副研究员均给予了热情鼓励和支持,在此一并表示感谢。

中国工程物理研究院

孙景文

《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 11 月 |
| 002 | 光学高速摄影测试技术 | 谭显祥编著 | 科学出版社 | 1990 年 02 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 09 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 06 月 |
| 006 | 再入遥测技术(上册) | 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) | 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 | 粘性消动法和差分格式粘性 | 郭柏灵著 | 科学出版社 | 1993 年 03 月 |
| 010 | 无损检测技术及其应用 | 张俊哲等著 | 科学出版社 | 1993 年 05 月 |
| 011 | 半导体材料辐射效应 | 曹建中著 | 科学出版社 | 1993 年 05 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 | 二维非定常流和激波 | 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 | 近代成像技术与图像处理 | 吴世法著 | 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 | 试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**
金显盛编著 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**
陈式刚等著 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 空气炮理论与实验技术**
王金贵编著 国防工业出版社 2000年12月
- 034 一维不定常流与激波**
李维新著 国防工业出版社 2000年12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11月

目 录

第一章 绪论	1
参考文献	6
第二章 X 射线辐射源	7
2.1 引言	7
2.2 旋转阳极 X 射线源	9
2.3 亨克型低能高强度 X 射线源	24
2.4 质子加速器 X 射线源	32
2.5 强流闪光 X 射线源	41
2.6 托卡马克等离子体 X 射线源	70
2.7 渡越辐射软 X 射线源	84
2.8 小型喷气 Z 箍缩 X 射线源	96
2.9 稠密等离子体焦点装置 X 射线源	105
2.10 同步辐射 X 射线源	117
2.11 激光等离子体 X 射线源	144
2.12 爆炸丝 X 射线源	152
2.13 X 射线激光源	163
2.14 小型可调谐激光同步加速器硬 X 射线源	191
参考文献	205
第三章 真空紫外辐射源	213
3.1 连续放电 X 射线真空紫外辐射源	213
3.2 彭宁放电极紫外辐射源	220
3.3 超短脉冲强激光产生的相干高次谐波真空紫外软 X 射线源	226
3.4 氙放电灯	245
3.5 氢电弧真空紫外辐射源	251
3.6 氩微弧作为光谱辐射率的次级标准	264

参考文献	273
第四章 X 射线与真空紫外辐射剂量测定	276
4.1 自由空气电离室	276
4.2 充氩平行平板全吸收型电离室	280
4.3 长程稀有气体电离室	287
4.4 亚大气压流气正比计数器	302
4.5 光电离光量计	318
4.6 硫酸亚铁剂量计	328
4.7 硫酸铈剂量计	335
参考文献	339
第五章 X 射线探测器标定技术	342
5.1 低能(1.5keV~10keV)X 射线检测中的锁定放大技术	342
5.2 用质子产生的 X 射线源标定亚千电子伏 X 射线探测器	351
5.3 用同步辐射软 X 射线源标定软 X 射线探测器	359
5.4 标定探测器的各种 X 射线源的比较	364
5.5 利用光电离光量计实现探测器的绝对标定	376
5.6 透射光栅衍射效率的实验标定	379
5.7 用未准直的点 X 射线源标定晶体的积分反射系数 R_c	384
5.8 平晶与凸面弯晶 X 射线摄谱仪的波长标定	390
5.9 X 射线底片的现场标定技术	398
5.10 X 射线探测器的脉冲标定技术	405
参考文献	419
附录 不同的贝赛尔(Bessel)函数与积分表	421

Contents

Chapter1	Introduction	1
Reference		6
Chapter2	X-ray Radiation Sources	7
2.1	Introduction	7
2.2	Rotating Anode X-ray Source	9
2.3	Henke type low energy high intensity X-ray Source	24
2.4	Proton Accelerator X-ray Source	32
2.5	High Current flash X-ray Source	41
2.6	Tokamak Plasma X-ray Source	70
2.7	Transition radiation soft X-ray Source	84
2.8	Small-scale Gas Puff Z-pinch X-ray Source	96
2.9	Dense Plasma Focus Device X-ray Source	105
2.10	Synchrotron X-ray Source	117
2.11	Laser-produced Plasmas X-ray Source	144
2.12	Exploding Wire X-ray Source	152
2.13	X-ray Laser Source	163
2.14	Tunable, a Compact Laser Synchrotron Hard X-ray Source	191
Reference		205
Chapter3	Vacuum Ultraviolet Radiation Source	213
3.1	Continuous Discharge X-ray and VUV radiation Source	213
3.2	Penning-Discharge XUV Radiation Source	220
3.3	Coherent High Order Harmonic VUV-Soft X-ray Source Generated by Ultrashort Pulse Strong Laser	226

3.4	Deuterium Discharge Lamp	245
3.5	Hydrogen arc VUV Radiation Source	251
3.6	Argon Mini-arc for Secondary Standard of Spectral Radiance	264
	Reference	273
Chapter4 Determine of X-ray and VUV Radiation		
	Dose	276
4.1	Free Air Ionization Chamber	276
4.2	Xenon-Filled Parallel Plate a Total Absorption type Ionization chamber	280
4.3	Long Range Rare Gas Ionization Chamber	287
4.4	Subatmospheric Pressure Flow Gas Proportional Counter	302
4.5	Photoionization Quantometer	318
4.6	Ferrisulphas Dosimeter	328
4.7	Cerium Sulphate Dosimeter	335
	Reference	339
Chapter5 Techniques of X-ray detector calibration		
5.1	Techniques of Phase-Lock Amplifier for Low Energy (1.5keV~10keV)X-ray Measurements	342
5.2	Sub-Kilovolt X-ray Detector Calibration Using Proton Generation X-ray Source	351
5.3	Soft X-ray Detector Calibration Using Synchrotron Radiation	359
5.4	Comparison of Various X-ray Source for X-ray Detector Calibration	364
5.5	Absolute Calibration X-ray Detector using Photoionization Quantometer	376
5.6	Experimental calibration of Transmission Grating Diffraction Efficiencies	379
5.7	Crystal R_c Calibration with an Uncollimated, Point X-ray Source	384
5.8	Wavelength Calibration of Flat-Crystal and Convex	