



《中国工程物理研究院科技丛书》第 038 号

高温等离子体 X 射线谱学

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 038 号

高温等离子体 X 射线谱学

High Temperature Plasma X-ray Spectroscopy

孙景文 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

高温等离子体 X 射线谱学 / 孙景文编著. —北京:国防工业出版社, 2003. 1

ISBN 7-118-02933-5

I. 高... II. 孙... III. 高温等离子体-X 射线谱-研究 IV. 053

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 062286 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)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 13 $\frac{3}{4}$ 352 千字

2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 33.00 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。

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 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员 陈达植

顾问 黄 宁

主任委员 殷鹤龄

副主任委员 王 峰 张涵信 张又栋

秘书长 张又栋

副秘书长 崔士义 蔡 镭

委 员 于景元 王小谟 甘茂治 冯允成

(按姓名笔画排序) 刘世参 杨星豪 李德毅 吴有生

何新贵 佟玉民 宋家树 张立同

张鸿元 陈火旺 侯正明 常显奇

崔尔杰 彭华良 韩祖南 舒长胜

《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际科研任务。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

《中国工程物理研究院科技丛书》 编审委员会名单

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)

邓门才 水鸿寿 田常津 江金生 沈元如

李 凡 李泽仁 汪晓琳 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 贺云汉 黄 辉

黄清南 蒲仁璧

科技丛书编辑部

负 责 人 唐 勇 吴衍斌 李天惠

本册编辑 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 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 韦日演主编 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 射线与超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 03 月 |
| 036 | 含能材料热谱集 | 董海山等编著 | 国防工业出版社 | 2001 年 03 月 |
| 037 | 材料中的氦及氚渗透 | 王佩璇 宋家树著 | 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 1 月 |

前 言

目前,随着高温高密度等离子体物理的长足进展,无论热核聚变研究方面还是惯性约束聚变与磁约束聚变以及天体物理的研究工作都得到了迅猛的发展,从而为高功率激光器、离子束和脉冲功率设备的发展奠定了坚实的技术基础。

当前,在实验室里的高温等离子体中的电子温度与离子温度 $> 10^8\text{K}$ 、压力 $> 1.01 \times 10^{16}\text{Pa}$ 、辐射温度 $> 3.5 \times 10^6\text{K}$ 。为了精确地诊断高温高密度等离子体的物理状态,时间分辨的等离子体 X 射线谱学是研究热稠密等离子体的一种强有力的技术。这种技术在研究激光驱动的惯性约束聚变(ICF)过程中是极其重要的,而 X 射线发射与中子是压缩的芯子条件的仅有的可观测的特征信号。由于 X 射线测量使用了快速探测器,则可提供关于皮秒时间尺度在爆聚小丸中测量迅速演变的等离子体条件的一种手段。在间接驱动的内爆试验中可以使用 X 射线谱学,因为从 X 射线能谱和 X 射线成像的测量数据中可以提供关于等离子体的电子温度、电子密度、温度梯度与密度梯度以及等离子体的不透明度等物理参数。借助于点火具有高 Z 气体的氙燃料,我们可以推论与时间相关的燃料密度(根据斯塔克(Stark)增宽发射线轮廓测量)和电子温度(根据 X 射线能谱的斜率或谱线强度比)。另外,通过在推进器中包含高 Z 掺杂剂,利用 X 射线发射谱学与吸收谱学技术我们可以研究推进器的条件。对于具有相对低的不透明度的推进器的内爆,我们可以观测作为燃料掺杂剂所包含的 Ar 的发射和来自塑料推进器的 Cl 的发射。这些测量指出峰值芯子的电子温度为 $1\text{keV} \sim 1.6\text{keV}$ 和电子(与氙核)密度在 $(1.0 \sim 2.0) \times 10^{24}\text{cm}^{-3}$ 范围。为

了在等离子体压缩期间把燃料保持在较低的等熵线,利用先进的激光脉冲整形技术可得到高性能靶,从而增加了推进器不透明度,迫使人们去研究来自高 Z 元素的 X 射线发射,它们的谱学特征在较高光子能量处出现。

在 ICF 实验期间,在次稠密等离子体围绕烧蚀聚爆的聚变靶过程中产生参量不稳定性。在这些不稳定性中,人们特别关心受激喇曼散射(SRS)和激光等离子体的丝状作用。对于这些非线性现象,必须要超过一定的阈值功率。入射光波衰变成散射波和电子等离子体波,这种现象产生入射激光的能量损失并且产生超热电子,超热电子可以预热燃料阻止压缩并且因此减少激光聚变靶的增益。

研究这些热电子可以在等离子体中由韧致辐射产生的高能 X 射线谱的研究开始。这种硬 X 射线谱代表热电子的一种速度-空间分布。

激光等离子体的丝状作用产生入射激光束的破裂和流体动力学不稳定性,阻止燃料的对称性压缩。为了确定由丝状作用发展的热斑位置,硬 X 射线成像是有用的工具。这些 X 射线图像可能让聚变靶几何学和激光束平滑技术得到重要进展。

此外,在使等离子体成像技术方面,由于各种理由利用软 X 射线辐射具有亚微米的分辨能力。第一,软 X 射线辐射的空间分辨能力极限要比光学系统的好得多;其次,利用软 X 射线辐射而不是可见辐射能够贯穿折射介质如像等离子体进入更高的密度。如利用激光辐照 Au 靶产生热 X 射线后向照明源可使空间分辨达到 $0.8\mu m$ 。

利用时间分辨超紫外光谱学可测量 $5 \times 10^{10} Pa \sim 10^{13} Pa$ 以上的高压激光冲击波的辐射温度($20 eV \sim 70 eV$)。这种技术可在这种高压范围获得材料的状态方程数据。

本书的目的在于全面阐述高温高密度等离子体 X 射线的产生机制、高温等离子体 X 射线的诊断技术基础,包括测量 X 射线能谱、时间谱、总能量以及高分辨的时间与空间分布的基本方法、

主要的离子源和等离子体 X 射线谱学的应用。

全书共分七章:第一章绪论概括地描述了强激光、离子束和脉冲功率设备取得的重大进展以及等离子体 X 射线谱学在诊断惯性约束聚变与磁约束聚变高温高密度等离子体中的重要作用;第二章重点讨论等离子体 X 射线的产生机制,包括韧致辐射、复合辐射、线辐射、磁韧致辐射和离子 X 射线;第三章为高温等离子体 X 射线诊断技术基础,包括 X 射线针孔照相、菲涅尔波带片、各种测量等离子体电子温度与电子密度的相关技术、热稠密等离子体的不透明度测量方法和 X 射线编码孔成像技术;第四章详细地阐述了测量 X 射线能谱的各种谱仪与分光技术;第五章讨论了 X 射线时间谱与空间分布的测量技术;第六章重点介绍了强带电离子的 X 射线辐射,包括各种离子源、电子束离子阱;第七章详细介绍了等离子体 X 射线谱学的应用。

本书属高温高密度等离子体 X 射线谱学的专著,可供从事热核聚变、惯性约束聚变、磁约束聚变、高温等离子体物理和天体物理及其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。

尽管笔者在编写过程中尽力结合本人与同事们的科研成果,但是由于本人的学识水平有限,又疏于讨论,文中难免有谬误之处,敬请读者热心指正。通讯地址为:四川省绵阳市 919 信箱 805 分箱;邮编:621900;电话号码:(0816)2485223。

最后,作者诚挚地感谢老科学家方正知教授和淳于书泰研究员为本书的初稿提了许多宝贵意见,使本书增辉不少。本书在编写和出版过程中,中国工程物理研究院科学技术委员会主任彭先觉院士和科技信息中心主任李志民高级工程师与编辑部研究员吴衍斌均热情鼓励和支持本书的出版,在此一并表示感谢。

中国工程物理研究院
孙景文 于绵阳科学城

内 容 简 介

本书属高温高密度等离子体 X 射线谱学的专著。它完整地描述了等离子体 X 射线谱学的理论与实践相结合的体系。主要包括:等离子体 X 射线产生机制;高温等离子体 X 射线诊断技术基础;X 射线能谱测量技术;X 射线的时间与空间分布的高分辨测量技术;离子源的分类、原理、构造与应用技术和等离子体 X 射线谱学的应用技术等。本书可供从事热核聚变、惯性约束聚变、磁约束聚变、高温等离子体物理和天体物理及其诊断技术工作的科研人员、教学人员参考。

This book belongs to a monograph of high temperature and high density plasmas X-ray spectroscopy. It provides a complete and systematic description of the plasmas X-ray spectroscopy, involving production mechanism of plasmas X-ray; high temperature and high density plasmas X-ray diagnostic technological foundation; measured technique of X-rays energy spectrum; high-resolved measurement technique of X-ray time and space distribution; classication, principle, structure and its application technology of ions sources and application temchniques of plasma X-ray spectroscopy.

The book is for the science research worker, the teaching staff and the university students reference, these personnel are engaged in themonuclear fusion, inertial confinement fusion, magnetic confinement fusion, high temperature plasma physics and astrophysics and their diagnostic technology work.

目 录

第一章 绪论	1
第二章 等离子体 X 射线产生机制	7
2.1 等离子体	7
2.2 原子结构与光谱	8
2.3 完全电离等离子体中的库仑碰撞	17
2.4 韧致辐射	21
2.5 复合辐射	27
2.6 线辐射	34
2.7 同步辐射(磁韧致辐射)	38
2.8 离子激发的 X 射线谱	43
2.9 激光等离子体的 X 射线辐射	48
2.10 在托卡马克装置中的热 X 射线谱	59
参考文献	67
第三章 高温等离子体 X 射线诊断技术基础	70
3.1 X 射线针孔照相	71
3.2 费涅尔波带片	80
3.3 高温等离子体 X 射线测温技术	87
3.4 利用共振线与伴线测量温度与密度	91
3.5 利用等电子谱线强度比测量激光产生的等离子体电子 温度	100
3.6 用冲击波速度测量辐射温度	109
3.7 热稠密等离子体中的不透明度测量	114
3.8 X 射线编码孔成像技术	118

3.9 用吸收光谱学诊断激光聚变内爆过程中的推进器状态	
参数	126
参考文献	133
第四章 X 射线能谱测量技术	136
4.1 吸收法	138
4.2 X 射线带通滤波器	140
4.3 差分法	143
4.4 滤波荧光法	147
4.5 超滤波荧光法	151
4.6 晶体分光法	155
4.7 凸面弯晶 X 射线摄谱仪	160
4.8 凸圆柱晶体分析器	164
4.9 椭圆面晶体/多层摄谱仪	167
4.10 多层膜 X 射线反射镜	178
4.11 X 射线 Wolter 显微镜—透射光栅照相摄谱仪	181
4.12 X 射线透射光栅扫描光谱仪	188
4.13 滤波—反射镜“Dante”谱仪技术	190
4.14 平焦场掠入射光栅谱仪	197
参考文献	202
第五章 X 射线时间与空间分布的高分辨测量技术	205
5.1 应用水合电子法探测 X 射线脉冲时间谱	205
5.2 利用滤波 X 射线二极管测量亚纳秒、 亚千电子伏的脉冲 X 射线	210
5.3 高频同轴电缆快信号传输及其校正	217
5.4 光纤传输	223
5.5 皮秒扫描相机	236
5.6 X 射线扫描相机	246
5.7 软 X 射线扫描相机	248
5.8 选通微通道板 X 射线分幅相机	265
5.9 具有选通增强分幅相机的软 X 射线 Bragg 摄谱仪	270