



“十二五”国家重点图书出版规划项目

光物理研究前沿系列

总主编 张杰

# 强场激光物理

## 研究前沿

盛政明 等 编著

*Advances in  
High Field  
Laser Physics*



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点图书出版规划项目

光物理研究前沿系列

总主编 张杰

# 强场激光物理研究前沿

## Advances in High Field Laser Physics

盛政明 等 编著



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

## 内容提要

本书是“十二五”国家重点图书出版规划项目“光物理研究前沿系列”之一,包括超短脉冲强激光与等离子体相互作用基础、气体高次谐波与阿秒产生、飞秒激光在空气中的成丝传输、强激光驱动新型辐射源、强激光驱动离子加速、强激光驱动超热电子产生及应用等前沿专题。

本书可供光学及物理专业的本科生、研究生及相关研究人员阅读参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

强场激光物理研究前沿/盛政明等编著. —上海:上海交通大学出版社, 2014  
(光物理研究前沿系列/张杰主编)  
ISBN 978-7-313-11754-0

I. ①强… II. ①盛… III. ①强场效应—激光物理—研究 IV. ①TN241

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 157772 号

## 强场激光物理研究前沿

编 著: 盛政明 等

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 韩建民

印 制: 山东鸿杰印务集团有限公司

开 本: 710 mm × 1000 mm 1/16

字 数: 546 千字

版 次: 2014 年 10 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-11754-0/TN

定 价: 135.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 31

印 次: 2014 年 10 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 0533-8510898

# 光物理研究前沿系列 丛书编委会

总主编

张 杰

(上海交通大学, 院士)

编 委

(按姓氏笔画排序)

- |     |                       |
|-----|-----------------------|
| 刘伍明 | 中国科学院物理研究所, 研究员       |
| 许京军 | 南开大学, 教授              |
| 李儒新 | 中国科学院上海光学精密机械研究所, 研究员 |
| 张卫平 | 华东师范大学, 教授            |
| 陈良尧 | 复旦大学, 教授              |
| 陈险峰 | 上海交通大学, 教授            |
| 陈增兵 | 中国科学技术大学, 教授          |
| 金奎娟 | 中国科学院物理研究所, 研究员       |
| 骆清铭 | 华中科技大学, 教授            |
| 钱列加 | 上海交通大学, 教授            |
| 高克林 | 中国科学院武汉物理与数学研究所, 研究员  |
| 龚旗煌 | 北京大学, 院士              |
| 盛政明 | 上海交通大学, 教授            |
| 程 亚 | 中国科学院上海光学精密机械研究所, 研究员 |
| 童利民 | 浙江大学, 教授              |
| 曾和平 | 华东师范大学, 教授            |
| 曾绍群 | 华中科技大学, 教授            |
| 詹明生 | 中国科学院武汉物理与数学研究所, 研究员  |
| 潘建伟 | 中国科学技术大学, 院士          |
| 戴 宁 | 中国科学院上海技术物理研究所, 研究员   |
| 魏志义 | 中国科学院物理研究所, 研究员       |

## 分享光物理之美

经过三年时间的策划,在数十位活跃在光物理研究最前沿科学家的巨大努力和重量级资深科学家的倾情参与下,“光物理研究前沿系列”丛书中英文版终于同时面世了。

光物理是近代物理学中历史最悠久、同时也最具活力的领域之一,特别是激光问世以来,光学渗透到众多学科领域,光学自身的面貌不断发生着深刻的变化。与此同时,光物理的研究内容也从传统的光学与光谱学迅速扩展到光学与其他学科的交叉分支领域,逐渐形成了丰满的学科体系;层出不穷的光学诊断方法和技术发明推动了许多学科的快速发展,并进一步演化为新的科学前沿,这也是光物理研究中最美的景象。

近年来,随着我国科研实力的大幅增强,不少实验室都做出了国际水平的研究成果,我国科学家在 *Nature*, *Science*, *Physical Review Letters* 等国际顶级学术期刊上发表的论文数量已经在全世界占据了相当的份额,同时,国际顶级的综述类学术刊物也邀请我国科学家撰写了大批综述性论文。但是,令人遗憾的是,面向高年级大学生、研究生以及青年学者,介绍我国光物理科学前沿研究成果的专著还比较少,这也将成为制约我国光物理前沿研究未来发展的瓶颈。

出于这个原因,当上海交通大学出版社邀我作为主编,筹划组织编写一套“光物理研究前沿系列”丛书的时候,我欣然同意。我们的目标是编写一套给高年级大学生、研究生和青年学者阅读的中文入门读物,介绍国内外光物理前沿研究的最新进展。本丛书首批包括《强场激光物理研究前沿》《精密激光光谱学研究前沿》《非线性光学研究前沿》《纳米光子学研究前沿》《量子光学研究前沿》《超快光学研究前沿》《凝聚态光学研究前沿》《生物分子光子学研究前沿》等八个分册。每个分册包含了若干该领域的前沿研究专题,几十位活跃在光物理研究最前沿的作者均来自中国重要大学和科研院所。我们希望能以此为契机,汇集最有价值的研究资源,以供有建树的光物理科学家展示自身的研究成果;进而形成良好的学习和借鉴氛围,为高年级大学生、研究生以及青年学者提供学术交流的

平台。在每个分册的开始,我们都邀请了重量级资深科学家作序,介绍每个主题的精华,目的是想与大家一起分享光物理最前沿令人震撼的美。

强场激光物理对应的激光场强具有非常宽的范围,因而包含了极为丰富的非线性物理。强场激光物理及相关前沿新方向是现代物理学乃至现代科学中最重要的前沿之一,不仅有重大的科学意义,而且对国家战略高新技术与交叉学科领域也有重要的推动作用。

——摘自《强场激光物理研究前沿》的序

测量是物理科学的基础。在物理学中,原子、分子和光学物理领域比其他任何学科都能更加有力地说明这一点。精密测量是原子、分子和光物理的一个重要分支:它提供了深入了解物理基本定律的重要方法,激励了科学技术前沿的发展,并且推动了许多社会意义重大的革命性应用。

——摘自叶军院士为《精密激光光谱学研究前沿》所作的序

激光的发明,引导出很多新的学科,对我们今天的科学技术以及日常生活都产生了重大影响。其中最重要的学科之一就是非线性光学,它对半个世纪以来科技的发展起了十分重要的作用。

——摘自沈元壤院士为《非线性光学研究前沿》所作的序

纳米光子学融合了光子学和当代纳米技术,研究纳米尺度下光与物质相互作用的机理和效应,在高速信息传输和处理、新能源以及生物医学等领域都有重要的应用。因此,纳米光子学既是国家层面的重点科技战略,又为科技产业发展注入了新的源动力。

——摘自张翔院士为《纳米光子学研究前沿》所作的序

量子信息科学的重大意义在于它的发展不仅仅具有诱人的应用前景,还在于它使得我们意识到:量子其实是信息的载体,而且对某些应用来说也许是最好的载体。我们再次发现,在量子信息科学的发展中,量子光学仍然扮演了重要的角色。这包括人们对光子纠缠操纵能力的逐步提升,光子系统在光量子计算、量子通信和量子精密测量等诸多方面的应用。

——摘自潘建伟院士为《量子光学研究前沿》所作的序

超快光学是随着超短脉冲激光的出现而诞生,并随着飞秒激光技术的迅猛发展而快速发展起来的。它始终与超快现象研究相互促进、共同发展。超快现象研究的需求带动了超快光学的发展,超快光学的进步又促进了超快现象研究范围的扩展和深度的提升。

——摘自侯洵院士为《超快光学研究前沿》所作的序

光与凝聚态物质相互作用是光物理学科的重要研究内容之一。一般说来,凝聚态光学研究包括两个方面。一方面激光作为一种性能优异的探针,可用于研究凝聚态物质的结构和运动规律。另一方面,通过凝聚态光学研究可以发现新的物质状态和新的运动规律,这些新发现可用于产生新的光源、新的探测器和多种其他器件。

——摘自杨国桢院士为《凝聚态光学研究前沿》所作的序

光物理的研究领域包罗万象,但从书规模有限,不可能面面俱到。作者和出版社已经尽了最大的努力,希望能从浩瀚广阔的光物理成就的海洋中选取最漂亮的“前沿浪花”结集成册。目前八个分册的阵容中,既有光物理研究领域的经典方向,也有近十年来发展迅猛的前沿方向;既有主要介绍科学进展的内容,也有主要介绍新技术的章节。然而,本丛书远不能代表光物理发展前沿的全部,更何况光物理研究前沿也处在日新月异的快速变化中,所以出版本丛书的目的就是抛砖引玉,希望能够吸引更多的年轻人走入光物理的科学殿堂,领略光物理之美。

当我掩上厚厚的书稿,准备送出付印之际,感慨万千。转眼间三年时间过去了,许多在三年前还认为只是个美好梦想的事情,现在变成了现实。作为主要策划者及丛书主编的我,对这套书有特殊的感情。可以说,本丛书凝聚了两代中国光物理学家多年来对世界科学发展的贡献和感情!为此,我要特别感谢丛书的所有作者,他们都是活跃在光物理研究最前沿的科学家。尽管他们每天的时间分配都是以分秒来计算的,但是,他们仍然抽出了大量的时间,撰写了各自前沿领域的进展。作为一个在光物理领域从业多年的科学家,我对他们非常了解,也非常敬佩他们的责任感与使命感。正是出于对科研和教育的强烈责任感和使命感,促使他们从繁忙的研究工作中抽出宝贵时间,甚至牺牲了很多与家人团聚的时间,撰写了各分册,对本丛书作出了至关重要的贡献。我还要感谢丛书的全部编委,他们不仅承担了写作的任务,还承担了策划组稿、审校稿件的繁重任务,是

他们的努力,构架了本丛书的有机结构和宏大涉猎,保证了本丛书的质量。感谢美国科学院院士沈元壤先生为本丛书策划所作的努力,沈先生早年写就的《非线性光学》已经成为非线性光学研究的经典之作,他在“非线性光学五十年”的序言中,更是深入浅出地回顾和展望了非线性光学的发展脉络。感谢中国科学院院士杨国桢先生给予本丛书策划和出版的帮助,多年来,杨先生引领、见证了凝聚态光学研究的发展。他为《凝聚态光学研究前沿》所作的序言见解精辟,同时为凝聚态光学研究指出了未来的新前沿。感谢中国科学院院士侯洵先生为《超快光学研究前沿》作序,侯先生为中国超快光学的发展作出了奠基性的贡献,二十多年前,他访问英国时对超快光学领域进展的精辟点评,我至今犹在耳边。他们三位都是我老师辈的先生,从我还是学生的时候起,就从他们撰写的论文和学术专著中向他们学习,从他们的言传身教中向他们学习,多年来,我向他们学到了很多很多,至今他们也还是我的老师。

感谢美国科学院院士叶军先生为《精密激光光谱学研究前沿》作序,他是上海交通大学的校友,也是我交往多年的好朋友。他在精密测量、冷分子物理和冷原子光钟等方面的开拓性研究工作,至今都是光物理领域的重要里程碑。感谢美国国家工程院院士张翔先生为《纳米光子学研究前沿》作序,他在光学超材料方面的杰出成果在国际上引起了很大反响。感谢中国科学院院士潘建伟先生为《量子光学研究前沿》作序,作为我国最年轻的院士之一,他在量子通信前沿和应用方面所做出的杰出成果,让量子通信不再神秘。在本丛书中,我与他们联袂作序,用我们的共同努力,用我们各自对光物理前沿的理解和积淀,努力向读者介绍本丛书试图展现的光物理之美,希望能成为各自分册的点睛之笔。

最后,我想感谢上海交通大学出版社韩建民社长及编辑团队,他们付出了巨大的努力,使梦想成为现实。令人欣喜的是,在上海交通大学出版社和德古意特出版社的合力打造下,这套丛书前两册的英文版将作为“中国学术出版走出去”的第一波,同步在海外发行。在此,我祝愿这套丛书成为“中国学术出版走出去”第一波中最美的一朵“浪花”! 让我们一起分享光物理之美!



2014年10月于飞越太平洋的飞机上



# 序

强场激光物理是过去二十多年随着超短强激光技术的发展而快速发展起来的前沿学科。它对应的激光场强具有非常宽的范围,因而包含了极为丰富的非线性物理。早些时候,强激光场的概念主要是相对于原子轨道上的电子感受到的束缚电场而言的。氢原子第一玻尔轨道上电子受到的电场( $\sim 5 \times 10^9$  V/cm)对应的激光强度约为  $10^{16}$  W/cm<sup>2</sup>,在这种光场条件下,微扰理论已经完全不适用。实际上,在比这个光强更低的条件下,电子在激光场中的振荡势能就可以超过某些原子的电离势能而使原子电离。强场激光与单个原子作用已经包含二阶非线性以上的高阶非线性过程,譬如高次谐波产生。在激光强度接近或者大于  $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>时,一方面由于大量原子被快速电离后形成等离子体,并产生由等离子体集体运动引起的非线性效应,另一方面由于电子在振荡电场中的速度已经接近光速,因而引起的相对论非线性效应开始起作用。所以这个激光强度下的激光与物质相互作用又被称为相对论光学,它是目前国际上高度关注的高能量密度物理的重要研究内容。最近几年,随着欧洲开始实施建造极端光场设施(ELI),人们甚至开始关注激光强度达到和超过  $10^{24}$  W/cm<sup>2</sup>时的非线性物理,诸如辐射阻尼、真空极化非线性,乃至真空正负电子对产生等量子电动力学效应,将强场激光物理推向新极致。

强场激光物理及相关前沿新方向是现代物理学乃至现代科学中最重要的前沿之一,不仅有重大的科学意义,而且对国家战略高新技术与交叉学科领域也有重要的推动作用。高次谐波和阿秒脉冲产生、强激光在大气中长距离传输和应用、强激光驱动产生超高梯度电子和离子加速、新型光源(从太赫兹辐射到伽玛射线)产生、光核物理、快点火激光核聚变和其他新型激光聚变概念等都是这个领域受到极大关注的课题。针对各种潜在的应用,这些课题不仅有大量的技术问题有待解决,还有极为丰富的新物理有待人们去认识。正是由于这个学科的重要意义,徐至展院士等人多年来在国内组织主办了系列的“全国强场激光物理会议”,贺贤土院士、张杰院士、张维岩院士等人发起组织了系列的“全国高能量密度物理会议”。这两个专业系列会议起到了引领作用,极大地推动了我国在这

个领域的研究。

目前,有关这个领域的研究有大量的英文文献,也有不少综述性的英文文章以及一些专著出版。但这方面的中文综述文章和中国人写的专著仍较为少见。此次由上海交通大学出版社出版“光物理研究前沿系列”之一《强场激光物理研究前沿》非常及时,在一定程度上弥补了这方面的欠缺。本书的专题内容涉及超短脉冲强激光与等离子体相互作用基础、气体高次谐波与阿秒产生、飞秒激光在空气中的成丝传输、强激光驱动新型辐射源、强激光驱动离子加速、强激光驱动超热电子产生及应用等。参与本书撰写的作者大都是本领域的知名专家,在各个不同研究课题有多年丰富的积累。我们希望本书的出版对有兴趣从事这个领域研究的学生、学者能提供有益的参考。

需要指出的是,由于篇幅和时间有限,本书涵盖的内容远不是强场激光物理的全部,仍有些重要方向(譬如激光尾场加速电子及其辐射、固体靶高次谐波产生、强激光驱动产生太赫兹辐射、强激光产生真空非线性物理等)没有包含其中,而且这个领域还处在快速发展之中。希望本书的出版可以起到抛砖引玉的作用,推动强场激光物理的研究向前发展。

张 杰 盛政明

2014年10月

# 目 录

I 超短脉冲强激光与等离子体相互作用基础/ 余 玮 .....	1
1.1 引言 .....	3
1.2 强激光与等离子体相互作用的理论基础 .....	4
1.2.1 电子运动方程 .....	4
1.2.2 电磁场方程 .....	5
1.2.3 基本方程组 .....	6
1.3 平面激光场中的单电子理论 .....	6
1.3.1 真空中的平面激光脉冲 .....	6
1.3.2 平面激光场中的自由电子 .....	7
1.3.3 平面激光场中的电离电子 .....	9
1.4 电子对激光的散射 .....	10
1.4.1 “平均静止”运动 .....	11
1.4.2 “平均静止”电子对激光的散射 .....	12
1.4.3 运动电子对激光的散射 .....	14
1.5 聚焦激光场中电子运动 .....	16
1.5.1 聚焦激光脉冲在真空中的传播 .....	16
1.5.2 电子净能量增益 .....	17
1.6 等离子体对激光脉冲的响应 .....	19
1.6.1 按照激光频率对基本方程的展开 .....	19
1.6.2 低密度等离子体的出发方程 .....	21
1.7 激光尾波场激发 .....	21
1.7.1 一维尾场理论 .....	22
1.7.2 二维尾场理论 .....	24
1.7.3 离子运动对尾场激发的影响 .....	26
1.8 激光在低密度等离子体中的传输 .....	28
1.8.1 傍轴波动方程 .....	29

1.8.2	稳态等离子体	30
1.8.3	电子空腔	31
1.8.4	连续等离子体中的光能吸收	31
1.9	等离子体中的激光导引	32
1.9.1	等离子体的自聚焦效应	32
1.9.2	激光自导引	33
1.9.3	等离子体通道的激光导引	34
1.10	激光与稠密等离子体相互作用	35
1.10.1	稠密密度等离子体中的出发方程	35
1.10.2	Airy 函数解	36
1.10.3	共振吸收	38
1.11	相对论激光引发的强场效应	41
1.11.1	电子密度台阶	41
1.11.2	相对论因子	41
1.11.3	密度台阶出现时的激光吸收	42
1.12	强激光辐照固体靶的一维模型	43
1.12.1	线偏振激光垂直入射	43
1.12.2	p 偏振激光斜入射	46
	参考文献	48
2	气体高次谐波与阿秒产生/ 曾志男 李儒新	51
2.1	强场气体高次谐波的基本原理	53
2.1.1	强场相互作用	53
2.1.2	电离机制	56
2.1.3	高次谐波产生的理论模型	58
2.1.4	高次谐波产生过程的数值计算方法	64
2.1.5	高次谐波的实验研究	66
2.2	阿秒脉冲的产生技术	74
2.2.1	谐波相位与阿秒脉冲	77
2.2.2	单个阿秒脉冲的产生	78
2.2.3	阿秒脉冲的色散补偿	84
2.3	阿秒脉冲的测量技术	86
2.3.1	阿秒脉冲的自相关测量	86

2.3.2	阿秒脉冲的互相关测量 .....	87
2.4	高次谐波与阿秒脉冲的应用 .....	92
2.4.1	优良的相干软 X 射线光源 .....	93
2.4.2	复合成像 .....	94
2.4.3	超快泵浦-探测技术 .....	95
2.4.4	阿秒脉冲在不同领域的应用前景 .....	98
2.5	强场高次谐波的驱动激光技术 .....	102
2.5.1	锁模超短脉冲 .....	104
2.5.2	高能量周期量级激光脉冲的产生 .....	108
2.5.3	光参量放大技术 .....	113
2.5.4	载波包络相位 .....	116
	参考文献 .....	128
3	飞秒激光在空气中的成丝传输/ 鲁 欣 奚婷婷 .....	143
3.1	飞秒激光大气传输的物理机制 .....	145
3.1.1	引言 .....	145
3.1.2	基本传输方程 .....	147
3.1.3	飞秒激光成丝的物理模型 .....	148
3.1.4	高阶非线性效应 .....	151
3.2	飞秒激光成丝过程中的物理现象 .....	158
3.2.1	光丝核心与低强度背景之间的能量交换 .....	159
3.2.2	多光丝的形成 .....	159
3.2.3	超连续辐射 .....	160
3.2.4	三次谐波 .....	162
3.2.5	光丝相互作用 .....	166
3.3	光丝参数的诊断方法 .....	169
3.3.1	光丝的直径和长度 .....	169
3.3.2	光丝电子密度的测量 .....	173
3.4	激光参数对成丝模式的影响 .....	189
3.4.1	初始聚焦对光丝性质的影响 .....	189
3.4.2	飞秒激光长距离自由传输形成的光丝 .....	189
3.4.3	预聚焦成丝和自由传输成丝的对比研究 .....	192
3.4.4	紧聚焦飞秒激光产生的光丝 .....	193

3.5	光丝寿命的延长 .....	195
3.5.1	光丝的时间演化 .....	196
3.5.2	延长光丝寿命的实验研究 .....	197
3.6	飞秒激光大气传输的应用前景 .....	205
3.6.1	激光引雷 .....	205
3.6.2	激光遥感 .....	210
3.6.3	空气等离子体太赫兹辐射源 .....	215
3.6.4	激光人工增雨雪 .....	216
3.6.5	其他相关应用 .....	218
3.6.6	小结 .....	218
3.7	总结 .....	219
	参考文献 .....	219
4	强激光驱动新型辐射源/ 陈黎明 .....	229
4.1	激光驱动硬 X 射线源 .....	231
4.1.1	超热电子产生机制 .....	232
4.1.2	硬 X 射线基本产生过程 .....	234
4.1.3	激光驱动 X 射线源的研究现状 .....	235
4.2	激光驱动的 K 壳层 X 射线源 .....	237
4.2.1	能谱优化的超热电子的产生 .....	237
4.2.2	基于固体靶的 $K_{\alpha}$ X 射线源 .....	254
4.2.3	基于原子团簇的 K 壳层 X 射线源 .....	260
4.3	激光驱动准直 X 射线源 .....	271
4.3.1	激光等离子体电子加速 .....	274
4.3.2	原子团簇的 betatron 辐射 .....	287
4.3.3	准直 $\gamma$ 射线源 .....	294
4.4	X 射线诊断和应用 .....	296
4.4.1	X 射线探测系统 .....	296
4.4.2	X 射线成像应用 .....	317
	参考文献 .....	318
5	强激光驱动离子加速/ 沈百飞 张晓梅 .....	323
5.1	引言 .....	325

5.2	靶后鞘层离子加速 .....	326
5.2.1	概述 .....	326
5.2.2	靶后鞘层加速的基本理论 .....	327
5.2.3	激光对比度对靶后鞘层加速的影响 .....	329
5.2.4	改进型靶后鞘层加速 .....	330
5.2.5	利用靶后鞘层加速机制产生准单能离子束 .....	334
5.3	光压加速 .....	336
5.3.1	圆偏振激光与固体靶相互作用的基本理论 .....	336
5.3.2	光压加速的打孔阶段 .....	339
5.3.3	重离子加速方案 .....	343
5.3.4	光压加速的光帆阶段 .....	346
5.3.5	光压加速中的不稳定性 .....	356
5.3.6	实验进展 .....	369
5.4	强激光驱动尾场质子加速 .....	371
5.4.1	自注入方式 .....	372
5.4.2	光压和空泡联合加速 .....	376
5.5	其他加速机制 .....	379
5.5.1	无碰撞静电激波加速 .....	379
5.5.2	库仑爆炸 .....	385
5.5.3	BOA 机制 .....	388
5.5.4	质子束驱动尾场质子加速 .....	390
5.5.5	其他方案 .....	391
5.6	总结与展望 .....	393
	参考文献 .....	395
6	强激光驱动超热电子产生及应用/ 李玉同 蔡洪波 .....	401
6.1	引言 .....	403
6.2	超短脉冲强激光在高密度等离子体中的吸收和超热电子的 产生 .....	405
6.2.1	碰撞吸收 .....	406
6.2.2	鞘层逆韧致吸收和反常趋肤效应 .....	407
6.2.3	共振吸收 .....	408
6.2.4	真空加热 .....	410

6.2.5	$J \times B$ 加热	411
6.2.6	参量不稳定性导致的吸收	412
6.2.7	随机加速	413
6.2.8	超热电子转换效率和温度定标关系	413
6.3	准静态超强磁场产生及其对超热电子输运的影响	416
6.3.1	等离子体通道中的自生磁场	417
6.3.2	特殊结构靶产生界面磁场对强流电子束输运的影响	418
6.3.3	强流电子束发散角的产生原因	422
6.3.4	束流不稳定性对强流电子束输运的影响	423
6.4	强电子束流激发的次级物理过程及其应用前景	426
6.4.1	电子加速	426
6.4.2	离子源	427
6.4.3	新型超快 X 射线源	430
6.4.4	基于等离子体的新型太赫兹源	432
6.5	超热电子的诊断方法	435
6.5.1	探测器的选择	436
6.5.2	逃逸电子的诊断	437
6.6	激光聚变快点火	442
6.6.1	国内外物理实验研究发展现状与发展趋势分析	446
6.6.2	国内外物理模拟研究发展现状与发展趋势分析	448
6.6.3	快点火过程中的成道现象	451
6.6.4	强流电子束的产生及其面临的困难	456
6.6.5	强激光与锥靶相互作用	457
6.6.6	强流电子束的输运	460
6.6.7	强流电子束的能量沉积	462
6.6.8	我国目前在快点火方面的研究进展	462
6.7	结语和发展趋势	466
	参考文献	467
	索引	477



# 超短脉冲强激光与等离子体相互作用基础

余 玮