

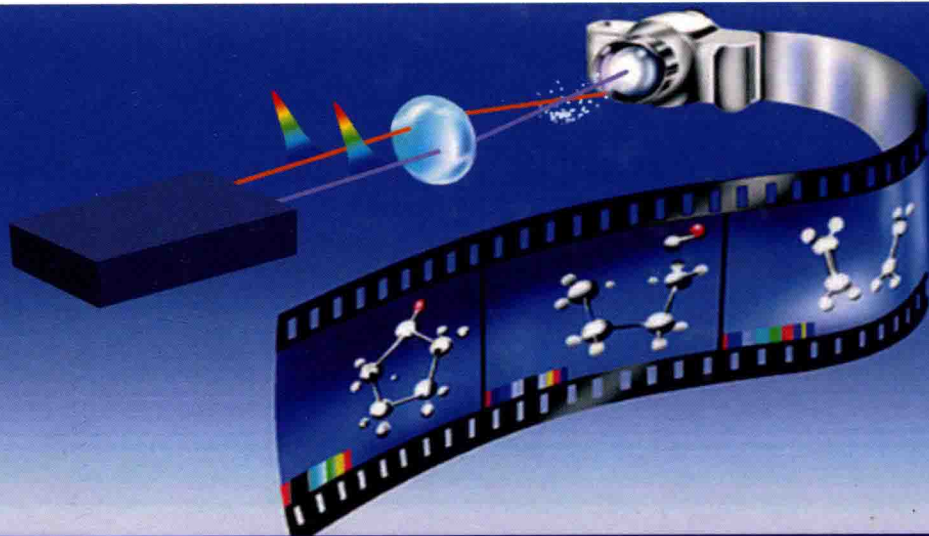


光学与光子学丛书

飞秒激光技术

(第二版)

张志刚 编著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助项目

光学与光子学丛书

飞秒激光技术

(第二版)

张志刚 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书介绍飞秒激光原理、技术和应用。全书共分为14章,第1章和第2章是飞秒光学的基本内容;第3~6章介绍飞秒固体激光器和光纤激光器的原理和设计;第7章介绍飞秒激光脉冲放大技术;第8章介绍飞秒激光脉冲特性测量技术;第9章和第10章介绍飞秒激光脉冲频率变换技术和腔外脉冲压缩与整形技术;第11章介绍脉冲的相干控制和频率合成技术;第12章介绍高次谐波与阿秒脉冲产生技术;第13章介绍飞秒激光太赫兹波技术;第14章介绍飞秒激光微加工技术。

本书可作为从事相关专业教学和研究工作的教师以及科研人员的参考书,也可作为研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

飞秒激光技术/张志刚编著. —2版. —北京:科学出版社,2017.6
(光学与光子学丛书)

ISBN 978-7-03-053140-7

I.①飞… II.①张… III.①飞秒激光 IV.①TN24

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第125105号

责任编辑:刘凤娟/责任校对:邹慧卿
责任印制:张伟/封面设计:耕者

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年3月第一版 开本:720×1000 B5

2017年6月第二版 印张:30 1/4

2017年10月第三次印刷 字数:600 000

定价:199.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

献给我的亲人、挚友和学生们

本丛书名由中国科学院院士母国光先生题写

光学与光子学丛书

《光学与光子学丛书》编委会

主 编 周炳琨

副主编 郭光灿 龚旗煌 朱健强

编 委 (按姓氏拼音排序)

| | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 陈家璧 | 高志山 | 贺安之 | 姜会林 | 李淳飞 |
| 廖宁放 | 刘旭 | 刘智深 | 陆卫 | 吕乃光 |
| 吕志伟 | 梅霆 | 倪国强 | 饶瑞中 | 宋菲君 |
| 苏显渝 | 孙雨南 | 魏志义 | 相里斌 | 徐雷 |
| 宣丽 | 杨怀江 | 杨坤涛 | 郁道银 | 袁小聪 |
| 张存林 | 张书练 | 张卫平 | 张雨东 | 赵建林 |
| 赵卫 | 朱晓农 | | | |

序 言

超短脉冲激光的持续创新发展与应用开拓,是当前国际上激光高技术乃至现代科学技术中一个非常重要的前沿领域,也是我国已具有较好基础并可望取得重大突破,将在国家战略高技术与众多学科领域中起到重要推动作用的科学技术领域。

近 20 年来飞秒激光技术发展非常快,已经从单纯的对强度和脉宽的控制过渡到对振幅、相位、频率和偏振的控制,从超短、超强过渡到超宽带、超稳定;从对原子的控制过渡到对电子运动的控制。

飞秒激光的应用涉及很多重大科学的前沿课题,如超快乃至极端超快非线性光学前沿、强场与超强场科学技术、相对论性非线性物理与光学、强场核物理与天体物理等。同时,在相关战略高技术方面涉及的课题有:激光核聚变“快点火”等新概念、小型化超高梯度粒子加速器新原理、突破飞秒 (10^{-15}s) 级壁垒的阿秒 (10^{-18}s) 科学新原理、超短波长超快台式相干辐射源新机制等。此外,在信息、生命和材料科学等交叉学科前沿领域也有重要应用,如超快乃至极端超快信息光子技术、微纳尺度三维微结构制备及其应用、超快生物信息光子技术、超快 X 射线衍射及其应用开拓等。

我国许多知名大学和研究所都有和飞秒激光相关的研究,并取得了一些世界瞩目的研究成果。无论是飞秒激光技术的研究人员,还是飞秒激光器的使用人员,都需要一本系统讲解飞秒激光技术的参考书。《飞秒激光技术》一书的出版正顺应了这种需求。

该书涵盖了飞秒激光的基础理论和大部分技术,自 2011 年出版以来受到读者的欢迎。此次再版,我高兴地看到著者改进了基础理论的描述,增加了很多飞秒激光技术领域的新技术和新成果,包括高次谐波和阿秒脉冲产生、超稳定飞秒光纤激光技术;著者有突出进展的飞秒光纤激光频率梳、天文光学频率梳等,使该书具有重要的参考价值。

希望该书的再版,为更多的读者了解飞秒激光技术的基本知识和前沿课题、为我国飞秒激光科学与技术的发展起到积极的作用。

徐至展

中国科学院院士

2016 年 4 月 22 日

第二版前言

作为 20 世纪最伟大的发明之一, 激光器已经走过了 50 多个年头. 锁模方式产生的超短脉冲出现在 1964 年. 飞秒量级的激光脉冲 20 世纪 70 年代首先在染料激光器中实现; 90 年代初克尔透镜锁模飞秒钛宝石激光器的出现, 推动了飞秒激光技术的飞跃发展, 主要表现为脉宽急剧缩小和峰值功率的大幅提高. 按照峰值功率和平均功率的划分, 飞秒激光技术经历了三代的发展.

第一代是 20 世纪 70 年代发明的染料激光器, 其脉宽可缩短到几十飞秒. 由于储能能力的限制, 脉冲能量只有微焦, 峰值功率只有兆瓦. 就是这一点点脉冲能量和功率, 给研究分子反应动力学提供了最初的手段.

80 年代出现的宽带固体激光介质, 特别是钛宝石激光介质, 把飞秒激光技术推进第二代. 得益于啁啾反射镜技术, 小于 5fs 的脉冲可以常规地得到. 利用啁啾脉冲放大技术, 脉冲的峰值功率达拍瓦 ($1PW=10^{15}W$), 平均功率也可到瓦级. 这种脉冲电场推动了阿秒脉冲的产生, 甚至驱动电子加速.

第三代飞秒激光技术, 以高峰值功率和高平均功率为目标. 前沿技术是所谓光参量啁啾脉冲放大 (OPCPA) 技术. 激光介质由倍频的钷酸钷激光泵浦的钛宝石晶体, 转换为可用半导体激光器直接泵浦的掺镱薄片晶体. 大功率连续光泵浦, 可使 10kHz、数焦耳能量的脉冲成为可能. 通过 OPCA 技术和光谱相干合成, 超过几个倍频程 (450~2500nm) 的光谱, 小于 5fs 的脉冲也唾手可得.

伴随飞秒激光理论和应用的扩展, 一本系统讲述基本原理和技术的参考书是必要的. 然而, 市面上的飞秒激光技术书籍多是论文集, 缺乏系统性; 或受限于著者的研究范围, 内容有限. 这就是编写本书的最初动机.

本书的编写始于 1996 年, 当时我在日本通产省工业技术院电子技术综合研究所工作. 得益于赶上飞秒激光飞速发展的大好时光, 博士毕业后就一直从事飞秒激光技术的研究工作, 积累了一些心得体会, 又受到一些国际大家的言传, 总想整理出来与大家分享. 从那时起, 到 2010 年正式列入出版计划, 断断续续地写了 14 年. 期间, 2000 年回国到天津大学任教, 2005 年转入北京大学工作.

本书第一次出版是在 2011 年, 从那时起又过了 5 年, 这期间我一直致力于对本书的修改和完善. 目前为止修改的主要部分如下.

基础部分, 对非线性超快光学内容做了重新安排, 力求系统化. 例如, 缓变包络近似和非线性薛定谔方程的导出, 各种非线性光学效应的引入.

技术部分, 鉴于可饱和吸收体的种类逐渐丰富, 不局限于半导体, 因此第 4 章的

标题去掉了“半导体”三个字. 内容上, 半导体可饱和吸收镜部分增加了高破坏阈值设计, 还增加了石墨烯的内容. 在放大技术上, 增加了时域分割放大、板条放大器和微片放大器的内容. 对光纤激光技术一章进行了大幅修改, 以新的视角写出了我对飞秒光纤激光技术的认识. 在测量技术一章中, 增加了简化的频率分辨光学开关(FROG)技术. 在频率变换一章, 增加了薄片组光谱展宽和频域参量放大(FOPA)技术. 在相干控制和频率合成一章, 对光频梳技术做了大量补充, 包括新型载波包络相位控制技术和天文频率梳技术. 还增加了一章: 高次谐波和阿秒脉冲产生技术.

应用部分, 主要是太赫兹部分, 增加了高能量太赫兹产生, 以及可调谐单频太赫兹波产生的内容.

本书的初版和再版, 都离不开海内外老师和朋友们的指导和帮助. 日本东海大学的八木隆志教授、经济产业省产业技术综合研究所鸟塚健二研究员、北海道大学山下干雄教授为我提供了在飞秒激光技术领域发展和成长的平台. 在和瑞士联邦工业大学 U. Keller 教授、麻省理工学院 F. X. Kaertner 教授、加利福尼亚大学圣克鲁兹分校林潮教授、挪威科技大学 I. Sorokina 教授、日本电气通信大学美浓岛熏教授、日本国立分子研究所平等拓范准教授的长期交往中, 我受益匪浅. 还有中川格、板谷太郎、高田英树、欠端雅之、菅谷武芳、小仓睦郎、小林洋平、山根启作、Y. Pang、蒋捷等, 在技术和器件上提供过无私的帮助. 回国工作后, 受到张杰院士、徐至展院士、姚建铨院士、李天初院士、李儒新研究员、魏志义研究员、钱列加教授、朱晓农教授、周国生教授、杨昌喜教授、李艳秋教授、宋晏蓉教授、孔繁鳌研究员、江德生研究员、徐军研究员、方占军研究员、高克林研究员、陈国夫研究员、赵刚研究员、夏安东研究员、樊仲维研究员、周维虎研究员等众多人士的大力支持和帮助. 我对他们感激不尽.

离开天津大学 11 年了, 天津大学各级领导的厚爱以及教育部光电信息重点实验室的同事们的关心和帮助我一直难以忘怀. 没有王清月教授的提携, 邢歧荣教授、柴路教授、章若冰教授的大力支持, 就没有我回国最初阶段开展飞秒激光技术研究的基础. 到北京大学工作以来, 信息科学技术学院和电子学系的领导和同事们的巨大支持使我能继续进行飞秒激光技术的研究. 这些年从量子电子学研究所前辈王义道教授、董太乾教授、杨东海教授和同事陈徐宗教授、郭弘教授、陈景标教授、王爱民副教授那里学到了很多知识, 弥补了我在原子频标和光子晶体光纤方面的缺陷. 还要追溯到母校北京工业大学, 在那里我学习了现代科学基础知识. 有些章节包含其他老师及我在天津大学和北京大学的研究生和本科生的贡献, 初版前言中已有详述. 此处追述马丁、杨弘宇、李辰和马宇轩在高重复频率光纤激光技术上的贡献.

感谢徐至展院士、周炳琨院士、方占军研究员对本书申请“国家科学技术学术

著作出版基金”的大力推荐, 特别感谢徐至展院士再次作序.

感谢国家科学技术学术著作出版基金、国家自然科学基金重大项目、仪器专项及教育部“长江学者奖励计划”和李嘉诚基金会的资助.

父母和家人默默的支持是我持续进行科研工作的动力. 女儿凡凡很小就离开家在海外单独生活和学习, 我常常为此深感内疚. 本书的出版和再版也是告诉孩子她的父亲这些年做了些什么.

《飞秒激光技术》的第二版, 虽然丰富并更新了很多内容, 但受著者水平和编写时间所限, 很多重要内容未能包括在内, 期待今后再版时补充. 也恳请读者对新版内容提出宝贵意见, 以便再版时修正.

张志刚

2016年4月于北京大学逸夫苑

第一版前言

作为 20 世纪最伟大的发明之一, 激光器已经走过了 50 个年头. 锁模方式产生的超短脉冲激光器出现在 1964 年. 80 年代飞秒量级 (10^{-15}s) 的激光脉冲首先在染料激光器中实现, 90 年代初克尔透镜锁模飞秒钛宝石激光器的出现, 推动了飞秒激光技术的飞跃发展, 主要表现为脉宽急剧缩小和峰值功率的大幅提高. 脉宽由最初的 100 fs 左右到今天的接近单周期的小于 3 fs. 通过高次谐波产生, 脉冲宽度已经缩短到惊人的阿秒 (attosecond, $1\text{as}=10^{-18}\text{s}$) 量级. 同时, 脉冲峰值功率由最初的兆瓦 (10^6W) 提高到了超过拍瓦 (PetaWatt, $1\text{PW}=10^{15}\text{W}$). 美国科学家 A. H. Zewail 由于其在发展飞秒光谱技术和并应用在研究化学反应动力学方面的成就, 被授予 1999 年度诺贝尔化学奖. 美国科学家 J. L. Hall 和德国科学家 T. W. Hänsch 因其在精密光谱学, 特别是基于飞秒激光的光学频率梳技术的开拓性工作被授予 2005 年度诺贝尔物理学奖. 诺贝尔奖两度授予与飞秒激光研究相关的科学家, 显示出飞秒激光技术对基础科学的重要意义.

本书的编写始于 1996 年, 当时我在日本通产省工业技术院电子技术综合研究所工作. 得益于赶上飞秒激光飞速发展的大好时光, 博士毕业后我一直从事飞秒激光技术的研究工作, 积累了一些个人心得体会, 又在与一些国际知名同行学者的讨论、交流中受到很多启发, 总想整理出来与大家分享. 从那时起到 2010 年正式列入出版计划, 断断续续写了 14 年. 2010 年是激光器诞生 50 周年. 本书的出版既可做是我对自己十几年来从事科研和教学工作的小结, 也算是我对这个特殊年份献上的一份心意, 更希望对相关研究人员、教师、学生起到参考作用.

本书写作时参考和引述了若干专业书籍和大量文献, 例如《超高速光エレクトロニクス》(末田正, 神谷武志, 1991), Compact Sources of Ultrashort Pulses (Irl Duling III, 1995), Ultrafast Optical Pulse Phenomena (Jean Diels and Wolfgang Rudolph, 1996), 以及 Nonlinear Fiber Optics (Govind Agrawal, 2002). 相关参考文献索引附在各章之后.

在本书的写作中, 张存林和沈京玲教授主笔了第 12 章, 宋晏蓉教授对第 3 章和第 5 章有贡献. 对本书的写作有贡献或提出修改建议、意见的人员还有: 胡明列、庞冬青、倪晓昌、邓玉强、宋振明、周春、王专、王子涵等. 游小丽、吴祖斌、李建萍、戚红霞等同学协助录入和修改大部分插图和格式. 杨颀、戚红霞和蒋凌君同学参加了本书最后的校对和文字修改. 对他们的慷慨贡献, 表示诚挚的感谢.

衷心感谢日本东海大学八木隆志教授、经济产业省产业技术综合研究所鸟塚

健二教授、北海道大学山下幹雄教授的引导和教诲,是他们为我提供了在飞秒激光技术领域发展的平台.感谢密西根大学 G. Mourou 教授(现职单位法国巴黎高等工科大学)、瑞士联邦工业大学 U. Keller 教授、麻省理工学院 F. Kärtner 教授、Clark-MXR 公司 Y. Pang 博士(现职单位 Lighthouse Photonics 公司),我在与之讨论中深受启发.还要向对我在技术和器件上提供过无私帮助的中川格、板谷太郎、高田英树、欠端雅之、菅谷武芳、小仓睦郎、小林洋平、森田隆二和山根啓作先生致谢!

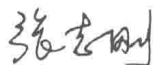
由衷感谢范滇元院士、张杰院士、林礼煌研究员对本书申请出版基金的大力推荐,感谢给予我支持和鼓励的徐至展院士、姚建铨院士、陈国夫研究员、魏志义研究员、李儒新研究员、钱列加教授、朱晓农教授、周国生教授、江德生研究员、徐军研究员、李天初研究员、方占军研究员、夏安东研究员.特别感谢为本书作序的徐至展院士和山下幹雄教授.

感谢天津大学各级领导的厚爱及教育部光电信息技术科学重点实验室的同事们,特别是王清月教授的教导和支持,邢歧荣教授、柴路教授和章若冰教授在工作上的大力协助;感谢北京大学各级领导的关心和支持,量子电子学研究所的王义道教授、董太乾教授、杨东海教授、陈徐宗教授、郭弘教授、陈景标教授对我在原子钟和光学频率标准方面的启蒙和指导.感谢母校北京工业大学的培养,也感谢我在天津大学和北京大学的学生们所做的大量工作.

感谢中国科学院科学出版基金和国家自然科学基金重大项目以及教育部“长江学者奖励计划”和李嘉诚基金会的资助.

多年来,我的父母和家人默默的支持和鼓励令我感激、感恩不尽,这里也将本书作为对他们微不足道的回报.

飞秒激光技术所涉及的内容极其丰富,发展也极为迅速,远不是本书所能涵盖的.由于水平、编写时间和篇幅的限制,直到本书付梓时回过头来再看,仍发现有些地方欠妥或不够准确.恳请各位读者提出宝贵意见,以便再版时修正.



2010年6月于北京大学逸夫苑

目 录

| | |
|-------------------------|----|
| 第 1 章 超快光学基础 | 1 |
| 1.1 光与物质相互作用 | 1 |
| 1.1.1 Maxwell 方程组 | 1 |
| 1.1.2 平面波的波动方程 | 2 |
| 1.1.3 缓变包络近似 | 3 |
| 1.2 超短光脉冲在各向同性介质中的线性传播 | 6 |
| 1.2.1 平面波啁啾脉冲的传播 | 6 |
| 1.2.2 波形的变化 | 9 |
| 1.3 二阶非线性效应 | 16 |
| 1.3.1 三波相互作用——倍频 | 16 |
| 1.3.2 三波相互作用——和频和差频 | 17 |
| 1.4 三阶非线性效应 | 17 |
| 1.4.1 克尔透镜效应 | 19 |
| 1.4.2 自相位调制 | 20 |
| 1.4.3 光谱压缩效应 | 23 |
| 1.4.4 互相位调制 | 24 |
| 1.4.5 自陡峭效应 | 25 |
| 1.4.6 拉曼效应 | 26 |
| 1.4.7 可饱和吸收 | 28 |
| 1.5 非线性薛定谔方程 | 29 |
| 1.5.1 非线性薛定谔方程的解法 | 29 |
| 1.5.2 孤子传输过程 | 30 |
| 参考文献 | 32 |
| 第 2 章 色散元器件的原理与计算 | 33 |
| 2.1 透明介质 | 33 |
| 2.1.1 极化强度矢量: 阻尼振子模型 | 33 |
| 2.1.2 Kramers-Kronig 关系 | 34 |
| 2.1.3 临界脉宽和脉冲展宽 | 36 |
| 2.2 多层膜结构 | 37 |
| 2.2.1 多层介质反射膜 | 37 |

| | | |
|--------------|--------------------------|-----------|
| 2.2.2 | 啁啾反射镜 | 41 |
| 2.2.3 | 超宽带配对啁啾镜 | 48 |
| 2.2.4 | Gires-Tournois 反射镜 | 50 |
| 2.2.5 | 多腔和优化 Gires-Tournois 反射镜 | 51 |
| 2.2.6 | 啁啾光纤光栅 | 53 |
| 2.2.7 | 啁啾体光栅 | 53 |
| 2.3 | 基于角色散的色散元件 | 54 |
| 2.3.1 | 棱镜对 | 55 |
| 2.3.2 | 光栅对 | 60 |
| 2.3.3 | 光栅对与棱镜对的组合 | 67 |
| 2.3.4 | 与光栅对压缩器配对的光纤展宽器 | 68 |
| 2.4 | 可编程相位补偿系统 | 68 |
| 2.4.1 | 液晶相位调制器 | 69 |
| 2.4.2 | 声光可编程色散滤波器 | 71 |
| 2.4.3 | 可变形反射镜 | 73 |
| 2.5 | 矢量色散图与矢量色散补偿法 | 74 |
| 2.6 | 白光干涉与色散测量 | 76 |
| 2.6.1 | 时域法 | 76 |
| 2.6.2 | 频域法 | 79 |
| 2.6.3 | 频域小波变换法 | 81 |
| | 参考文献 | 84 |
| 第 3 章 | 固体激光器锁模启动及脉冲形成机制 | 88 |
| 3.1 | 克尔透镜锁模原理 | 88 |
| 3.2 | 谐振腔与稳定区 | 91 |
| 3.2.1 | 像散补偿谐振腔 | 91 |
| 3.2.2 | 无增益介质时的 $ABCD$ 矩阵 | 94 |
| 3.2.3 | 含克尔透镜的 $ABCD$ 矩阵 | 96 |
| 3.3 | 脉冲形成阶段的分析 | 103 |
| 3.4 | 主方程和微扰算符方程 | 105 |
| 3.4.1 | 主方程的导出 | 106 |
| 3.4.2 | 主方程的解 | 109 |
| 3.4.3 | 微扰算符理论 | 110 |
| 3.5 | 周期性和高阶色散的微扰 | 112 |
| 3.5.1 | 稳态脉冲参数 | 113 |
| 3.5.2 | 色散波及稳定性考虑 | 116 |

| | |
|----------------------------|------------|
| 附录 A 克尔介质的 q 参数变换 | 120 |
| 参考文献 | 122 |
| 第 4 章 可饱和吸收体锁模技术 | 124 |
| 4.1 半导体可饱和吸收体 | 125 |
| 4.1.1 半导体可饱和吸收体的能带 | 125 |
| 4.1.2 半导体的能带与晶格常数 | 125 |
| 4.1.3 半导体的能带与量子阱 | 127 |
| 4.1.4 半导体可饱和吸收体的时间特性 | 127 |
| 4.2 激光器参数与半导体可饱和吸收镜宏观特性的关系 | 128 |
| 4.2.1 半导体可饱和吸收镜的宏观特性 | 128 |
| 4.2.2 自调 Q 的抑制 | 135 |
| 4.3 半导体可饱和吸收镜的类型 | 137 |
| 4.3.1 高精度度法布里-珀罗可饱和吸收镜 | 137 |
| 4.3.2 低精度度法布里-珀罗可饱和吸收镜 | 137 |
| 4.3.3 无谐振型可饱和吸收镜 | 137 |
| 4.3.4 可饱和布拉格反射镜 | 138 |
| 4.3.5 宽带可饱和吸收镜 | 138 |
| 4.4 低损耗宽带可饱和吸收镜 | 139 |
| 4.4.1 金属膜与介质膜混合反射镜 | 139 |
| 4.4.2 氧化 AlAs 布拉格反射镜 | 141 |
| 4.4.3 氟化物与半导体混合反射镜 | 142 |
| 4.5 半导体可饱和吸收镜中吸收层的设计 | 143 |
| 4.6 低饱和通量半导体可饱和吸收镜 | 144 |
| 4.7 高破坏阈值半导体可饱和吸收镜 | 145 |
| 4.8 量子点可饱和吸收镜 | 149 |
| 4.8.1 量子点的能级结构 | 149 |
| 4.8.2 量子点半导体可饱和吸收镜的结构 | 149 |
| 4.9 碳纳米管锁模器件 | 150 |
| 4.9.1 单壁碳纳米管作为可饱和吸收体 | 150 |
| 4.9.2 单壁碳纳米管可饱和吸收镜的制备 | 152 |
| 4.10 石墨烯锁模器件 | 154 |
| 4.10.1 石墨烯的能带结构 | 155 |
| 4.10.2 石墨烯的吸收特性 | 155 |
| 4.10.3 石墨烯锁模器件的制备 | 156 |
| 参考文献 | 157 |

| | |
|--|-----|
| 第 5 章 飞秒固体激光技术 | 160 |
| 5.1 泵浦激光 | 160 |
| 5.1.1 固体激光器 | 160 |
| 5.1.2 半导体激光器 | 160 |
| 5.1.3 光纤激光器 | 161 |
| 5.2 腔内色散补偿 | 161 |
| 5.2.1 棱镜对色散补偿 | 161 |
| 5.2.2 啁啾镜色散补偿 | 163 |
| 5.3 钛宝石激光器 | 163 |
| 5.4 掺 Cr 离子晶族的飞秒脉冲激光器 | 165 |
| 5.4.1 $\text{Cr}^{3+}:\text{LiSAF}$, $\text{Cr}^{3+}:\text{LiSCAF}$ | 166 |
| 5.4.2 $\text{Cr}^{4+}:\text{Forsterite}$ | 167 |
| 5.4.3 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ | 168 |
| 5.5 半导体激光器泵浦的掺 Yb^{3+} 介质飞秒激光器 | 168 |
| 5.5.1 Yb^{3+} 的能级结构和光谱特性 | 168 |
| 5.5.2 薄片激光器 | 172 |
| 5.6 中红外固体激光技术 | 174 |
| 5.6.1 掺 Cr 离子单晶激光器 | 174 |
| 5.6.2 氟化物玻璃 | 175 |
| 参考文献 | 176 |
| 第 6 章 飞秒光纤激光技术 | 179 |
| 6.1 光纤简介 | 179 |
| 6.1.1 单模光纤与大模场面积光纤 | 180 |
| 6.1.2 双包层光纤与泵浦光的吸收效率 | 181 |
| 6.1.3 光子晶体光纤 | 182 |
| 6.1.4 3C 光纤 | 184 |
| 6.1.5 掺杂类别 | 185 |
| 6.1.6 泵浦方式 | 185 |
| 6.2 光纤激光器的锁模启动机制 | 186 |
| 6.2.1 非线性环路反射镜 | 186 |
| 6.2.2 非线性偏振旋转 | 194 |
| 6.2.3 半导体可饱和吸收体 | 196 |
| 6.3 锁模启动机制: Jones 矩阵方法 | 197 |
| 6.3.1 矩阵定义 | 197 |
| 6.3.2 基本环形腔 | 200 |

| | | |
|--------------|--------------------------------------|------------|
| 6.3.3 | 再线性偏振化的环形腔 | 202 |
| 6.3.4 | 线性腔 | 203 |
| 6.3.5 | 环形腔 | 206 |
| 6.4 | 脉冲形成机制 | 207 |
| 6.4.1 | Ginzburg-Landau 方程与解法 | 207 |
| 6.4.2 | Ginzburg-Landau 方程的一般解 | 208 |
| 6.4.3 | Ginzburg-Landau 方程的稳态解特例——孤子脉冲 | 209 |
| 6.4.4 | Ginzburg-Landau 方程的稳态渐近解——自相似与放大大自相似 | 212 |
| 6.5 | Ginzburg-Landau 方程的瞬态解——腔内锁模动力学 | 213 |
| 6.5.1 | 腔内色散控制: 展宽脉冲型 | 215 |
| 6.5.2 | 自相似子与放大大自相似子 | 216 |
| 6.5.3 | 更长的腔——全正色散与耗散孤子 | 218 |
| 6.6 | 超高重复频率光纤激光器 | 219 |
| 6.6.1 | 超高重复频率下的脉冲演化 | 220 |
| 6.6.2 | 超高重复频率激光器器件和技术 | 220 |
| 6.6.3 | 谐波锁模 | 221 |
| 6.6.4 | FP 腔滤波和谐波光参量振荡器 | 222 |
| 6.7 | 中红外锁模光纤激光技术 | 223 |
| | 参考文献 | 224 |
| 第 7 章 | 飞秒激光脉冲放大技术 | 227 |
| 7.1 | 放大器中的脉冲成形 | 227 |
| 7.1.1 | 增益介质的饱和 | 227 |
| 7.1.2 | 增益窄化 | 228 |
| 7.1.3 | ASE 的影响 | 229 |
| 7.2 | 放大器中非线性折射率的影响 | 229 |
| 7.2.1 | 自相位调制 | 229 |
| 7.2.2 | 自聚焦 | 229 |
| 7.3 | 放大器中脉冲的演化过程 | 230 |
| 7.4 | 啁啾脉冲放大器 | 231 |
| 7.4.1 | 再生放大器的构成 | 233 |
| 7.4.2 | 脉冲在再生放大器腔内的演化 | 235 |
| 7.4.3 | 隔离器 | 235 |
| 7.5 | 多通式放大器 | 236 |
| 7.6 | 啁啾脉冲放大器中的带宽控制与波长调谐 | 239 |
| 7.6.1 | 超宽带放大器 | 239 |

| | | |
|--------------|------------------------------|------------|
| 7.6.2 | 波长可调谐再生放大器 | 240 |
| 7.6.3 | 用飞秒脉冲做种子的皮秒脉冲再生放大器 | 241 |
| 7.7 | 啁啾脉冲放大器中的脉冲展宽和压缩 | 241 |
| 7.7.1 | 标准脉冲展宽器 (Martinez 型) | 241 |
| 7.7.2 | 无像差脉冲展宽器 (Offner 型) | 244 |
| 7.8 | 负啁啾脉冲放大器 | 245 |
| 7.9 | 薄片放大器 | 247 |
| 7.10 | 板条型放大器 | 248 |
| 7.11 | 光纤放大器 | 248 |
| 7.11.1 | 双包层光纤放大 | 249 |
| 7.11.2 | 三阶色散补偿 | 249 |
| 7.12 | 时间分割脉冲放大 | 250 |
| | 参考文献 | 251 |
| 第 8 章 | 飞秒激光脉冲特性测量技术 | 254 |
| 8.1 | 飞秒脉冲的时域测量 | 254 |
| 8.1.1 | 线性自相关 | 254 |
| 8.1.2 | 非线性自相关 | 255 |
| 8.1.3 | 三阶非线性非对称脉冲的测量 | 259 |
| 8.1.4 | 自相关仪 | 259 |
| 8.1.5 | 单脉冲脉宽测量 | 261 |
| 8.2 | 飞秒脉冲的相位测量: FROG 法 | 262 |
| 8.2.1 | 高阶非线性相关 FROG 法 | 262 |
| 8.2.2 | SHG-FROG 法 | 265 |
| 8.2.3 | 低功率时 FROG 的应用 | 267 |
| 8.2.4 | 简化版 FROG-GRENOUILLE | 267 |
| 8.3 | 飞秒脉冲相位的测量: SPIDER 法 | 271 |
| 8.3.1 | 空间相干与时间相干 | 271 |
| 8.3.2 | 参考光与信号光的相干 | 271 |
| 8.3.3 | 信号光的自参考相干 | 272 |
| 8.3.4 | SPIDER 法 | 273 |
| 8.3.5 | SPIDER 装置的参数选择 | 277 |
| 8.3.6 | SPIDER 光谱相位的还原方法改进 | 278 |
| 8.3.7 | SPIDER 与 FROG 的测量精度比较 | 280 |
| 8.4 | 超宽带弱信号的相位测量: XFROG 与 XSPIDER | 281 |
| 8.5 | 二维 SPIDER | 281 |