

光学与光子学丛书

飞秒激光技术

张志刚 编著



科学出版社

光学与光子学丛书

飞秒激光技术

张志刚 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是一本介绍飞秒激光原理、技术和应用的读物. 全书共分为 13 章. 第 1 章和第 2 章是飞秒光学的基本内容; 第 3~6 章是飞秒固体激光器和光纤激光器的原理和设计; 第 7 章是飞秒激光脉冲放大技术; 第 8 章是飞秒激光脉冲特性测量技术; 第 9 章和第 10 章是飞秒激光脉冲频率变换和腔外脉冲压缩与整形技术; 第 11 章是飞秒激光脉冲相干控制和频率合成技术; 第 12 章是飞秒激光太赫兹波技术; 第 13 章是飞秒激光微加工技术.

本书可作为进行有关研究的教师和科研人员的参考书, 也可作为相关专业的研究生教材.

图书在版编目(CIP)数据

飞秒激光技术/张志刚编著. —北京: 科学出版社, 2011

(光学与光子学丛书)

ISBN 978-7-03-015629-7

I. 飞… II. 张… III. 激光技术 IV. TN24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005) 第 055767¹号

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>

新 蕾 印 刷 厂 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: B5 (720 × 1000)

2011 年 3 月 第一次印刷 印张: 24 1/2

印数: 1—2 000 字数: 465 000

定价: 85.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

丛书序

长期以来,我一直想组织同行出一套适合于光学、光学工程工作者和研究人员需求的光学与光子学的丛书.如今,在科学出版社同志们的努力推进和工作在光学和光子学科研、教学一线的广大专家们的大力支持下,这样一个愿望终于得以实现,这使我感到由衷的欣慰和喜悦,我深信这样一套丛书的出版必将有效地促进我国光学、光电子以及光学工程技术的创新发展.

当今世界科学技术发展日新月异.科技创新能力已成为一个地区、一个国家,尤其是一个大国经济和社会发展的核心竞争力.在众多纷繁的科技领域中,光学与光子学的发展直接影响到其他诸多学科领域的发展及其可能取得的成就.不但物理学、化学、生命科学、天文学等基础科学的发展离不开光学与光子学,对现代人类生活和人类生活影响甚大的一些技术科学如照明、通信、洁净能源、遥感、显示、环境监测、国防和空间开发、医疗与诊断、先进制造等都需要光学与光子学的知识.光学与光子学是渗透到各个学科领域内的前沿科学,光学与光子学涉及到几乎所有技术前沿的核心技术.中华民族要真正走向繁荣昌盛离不开对光的驾驭.

编委会把丛书的名称定为《光学与光子学丛书》,是想以此既包含经典光学(classical optics)的精华,也容纳现代光学(modern optics)即光子学(photronics)的最新研究进展.我和所有编委们一同期待着这套丛书能够在涉及光科学和光学技术知识的深度和广度上都达到一个崭新的高度.积跬步至千里,汇小溪成江河.改革开放三十年的成就使得我国的光学事业处在了一个新的起点上.让我们大家共同努力,以此套高质量、高水准的《光学与光子学丛书》作为对中国光学事业大发展的鼎力贡献.

母国光

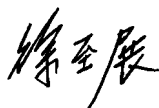
2011年1月

序

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.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,从对原子运动的控制过渡到对电子动力学过程的控制等.

飞秒激光的应用涉及很多科学技术的前沿,如超快乃至极端超快非线性光学前沿、量子相干操控原子和电子、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有突破飞秒(10^{-15}s)级壁垒的阿秒(10^{-18}s)科学新原理、小型化超高梯度粒子加速器新方案、激光核聚变“快点火”新途径、超短波长超快台式相干辐射源新机制、飞秒频率梳新技术、太赫兹相干辐射产生新机理等.此外,在信息、材料、生命与环境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、三维微纳结构制备及应用、飞秒化学反应动力学、超快生物医学光子学、飞秒白光雷达、四维电子显微术等.美国科学家 A. H. Zewail 由于在发展飞秒光谱技术并研究化学反应过程中寿命极短的过渡态方面的成就,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 因在基于激光的精密光谱学,特别是光学频率梳技术的开拓性工作获得 2005 年诺贝尔物理学奖.

我国许多知名大学和研究所都开展了和飞秒激光有关的研究与应用,取得了一些重要的研究成果.无论是飞秒激光器的研究人员,还是飞秒激光器的使用人员,都需要一本较为系统讲解飞秒激光技术的参考书.《飞秒激光技术》一书正是适应了这种需要.该书内容比较丰富,涵盖了飞秒激光技术的大部分内容和该研究领域的最新成果,特别是包含了许多作者自己的科研成果.例如,矢量色散图法辅助设计飞秒激光器和放大器、啁啾放大器中的脉冲展宽器的计算公式和啁啾放大器色散的整体设计、宽带低损耗半导体可饱和吸收镜技术、飞秒光纤激光器中获得最短脉冲技术以及飞秒激光脉冲位相测量技术等.作者丰富的研究经历也使该书有较高的实用价值.希望该书的出版,能够使更多的读者了解飞秒激光技术的基本知识和前沿方向,从而进一步推动我国飞秒激光科学与技术的发展与应用.



中国科学院院士

2011 年 3 月

极限光学今后的发展方向（代序）

关于极限光学自身今后的发展方向，有以下三个视点可以考虑：

(1) 不仅像迄今为止的光脉冲技术那样控制强度波形、强度光谱，而且像控制电波那样自由控制合成光波的振幅、相位、周波数、偏振。因此，利用四维并列控制的想法，即时间和空间三维共四维控制光波是非常重要的。具体地说，就是从缓变振幅近似向自由单周期非线性光学方向发展。

(2) 光波脉冲机能的极限化。包括超过拍瓦 (PW, 10^{15} W) 的巨大峰值功率脉冲的产生，飞秒以下的阿秒脉冲的产生，X 射线、 γ 射线的单周期脉冲的产生，太赫兹波脉冲的产生，单光子域的单周期光波的产生，光频率的绝对计量等。

(3) 利用半导体激光器、光纤激光器、非线性光学材料、分子聚合物等把飞秒激光器做得小型化、高效率化、集成化和通用化，这是器件研究的方向，如最近发明的电池驱动的飞秒光源，以及光子晶体光纤的利用等。总之，这是飞秒激光器的实用化。

同时，这样的极限光学的潜在应用将向更广阔的范围发展。

(1) 解明物理、化学、生物学、医学中的超高速现象，各种可能的相关应用于超高速非线性光谱学等。电场的振幅、相位等超高速响应测量、宽带傅里叶分光等都是可能的。纳米构造、物质表面的单一原子分子水平的动力学等，包含从原子、分子、离子到半导体、超导体、分子集合体、生体分子系，各种物质的量子过程等研究对象。从振动状态波束到电子状态波束的动力学的光迁移偶极矩的时间分解光谱学（即对光吸收的响应的测量）也会变得可能。

(2) 与量子过程的超高速时间演变相对应，在多个延迟同步的异波长整型光波照射下，激发特定量子状态（电子状态、振动状态、旋转状态）选择多重共振，人工的特异的量子相互作用的控制、分子反应的生成、物质创成、分子运动控制、分子认识控制、分子机能控制、分子水平的治疗诊断实现也会变得可能。例如，“多维量子光波共振能够类比多维核磁共振吗”、“是光触发了生命吗”等问题就暗示了今后这个研究方向的意义。

(3) 时分复用、光的孤子传播、接近 1000 Tbits 的高密度光通信以及时空并列控制活跃的光信息处理、光计算机等高度信息化社会方向的应用（单周期光脉冲会成为极端的数字化 IT 革命技术的主干）。

其他的还有，用高效率的超高峰值功率的（载波包络相位控制的）光源作为激励光源，制作通用的桌面型 X 射线激光器，在核聚变等领域的应用，进一步包含宇

宙空间的远距离进行可能的操作以及环境的测量等.

可以预见, 以有限尺度和具有动力的电子作为媒体已经到达极限的电子学, 在 21 世纪, 可能被包括光子、电子、原子、分子、超分子等过程概念在内的量子学所取代.

山下真治

北海道大学教授

2011 年 3 月

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. 本书的出版既可视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. 杨頔、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!

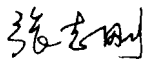
由衷感谢范滇元院士、张杰院士、林礼煌研究员对本书申请出版基金的大力推荐,感谢给予我支持和鼓励的徐至展院士、姚建铨院士、陈国夫研究员、魏志义研究员、李儒新研究员、钱列加教授、朱晓农教授、周国生教授、江德生研究员、徐军研究员、李天初研究员、方占军研究员、夏安东研究员。特别感谢为本书作序的徐至展院士和山下幹雄教授。

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

谨以此书献给凡凡

目 录

第 1 章 飞秒光学基础	1
1.1 光在各向同性介质中的传播	1
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	8
1.3 超短光脉冲在介质中的非线性传播	14
1.3.1 超短脉冲与介质的非线性相互作用	14
1.3.2 克尔透镜效应	15
1.3.3 自相位调制	16
1.3.4 互相位调制作用	18
1.3.5 自陡峭效应	19
1.3.6 可饱和吸收	19
1.3.7 其他非线性作用	20
1.3.8 非线性薛定谔方程	21
1.3.9 孤子传输过程	22
参考文献	24
第 2 章 色散器件的原理与计算	25
2.1 固体介质	25
2.2 多层膜结构	27
2.2.1 多层介质反射膜	27
2.2.2 啁啾反射镜	31
2.2.3 超宽带配对啁啾镜	38
2.2.4 Gires-Tournois 反射镜	39
2.2.5 多腔和优化 Gires-Tournois 反射镜	41
2.3 棱镜对	42
2.4 光栅对	46
2.4.1 负色散光栅对	46
2.4.2 正色散光栅对	48
2.4.3 无像差正色散光栅对	51
2.4.4 光栅对与棱镜对的组合	53

2.5	可编程相位补偿系统	54
2.5.1	液晶相位调制器	54
2.5.2	声光可编程色散滤波器	56
2.5.3	可变形反射镜	59
2.6	矢量色散图与矢量色散补偿法	60
2.7	白光干涉与色散测量	61
2.7.1	时域法	61
2.7.2	频域法	64
2.7.3	频域小波变换法	66
	参考文献	69
第 3 章	固体激光器锁模理论	73
3.1	克尔透镜锁模原理	73
3.1.1	克尔透镜效应	74
3.1.2	脉冲形成阶段的分析	76
3.2	主方程和微扰算符方程	79
3.2.1	主方程的导出	79
3.2.2	主方程的解	82
3.3	周期性和高阶色散的微扰	85
3.3.1	稳态脉冲参数	87
3.3.2	色散波及稳定性考虑	89
	参考文献	92
第 4 章	半导体可饱和吸收镜锁模技术	93
4.1	半导体可饱和吸收体	93
4.1.1	半导体可饱和吸收体的能带	93
4.1.2	半导体的能带与晶格常数	94
4.1.3	半导体的能带与量子阱	95
4.1.4	半导体可饱和吸收体的时间特性	96
4.2	激光器参数与半导体可饱和吸收镜宏观特性的关系	96
4.2.1	半导体可饱和吸收镜的宏观特性	96
4.2.2	饱和吸收恢复时间的影响	98
4.2.3	调制深度与非饱和损耗	99
4.2.4	锁模建立时间	99
4.2.5	饱和通量和多脉冲	101
4.2.6	自调 Q 的抑制	101
4.3	半导体可饱和吸收镜的类型	103

4.3.1	反谐振法布里-珀罗型	103
4.3.2	无谐振型可饱和吸收镜	105
4.3.3	可饱和布拉格反射镜 (SBR)	105
4.3.4	宽带可饱和吸收镜	105
4.4	低损耗宽带可饱和吸收镜	106
4.4.1	金属膜与介质膜混合反射镜	106
4.4.2	氧化 AlAs 布拉格反射镜	108
4.4.3	氟化物与半导体混合反射镜	109
4.5	半导体可饱和吸收镜中吸收层的设计	110
4.6	低饱和通量 SESAM	111
4.7	量子点可饱和吸收镜	112
4.7.1	量子点的能级结构	113
4.7.2	量子点 SESAM 的结构	113
4.8	碳纳米管锁模器件	114
4.8.1	单壁碳纳米管作为可饱和吸收体	114
4.8.2	单壁碳纳米管可饱和吸收镜的制备	116
	参考文献	118
第 5 章	飞秒固体激光技术	121
5.1	谐振腔的设计	121
5.1.1	像散补偿谐振腔	121
5.1.2	无增益介质时的 $ABCD$ 矩阵	123
5.1.3	克尔透镜的 $ABCD$ 矩阵	125
5.2	腔内色散补偿	132
5.2.1	棱镜对色散补偿	132
5.2.2	啁啾镜色散补偿	133
5.3	钛宝石激光器	133
5.4	掺 Cr 离子晶族的飞秒脉冲激光器	135
5.4.1	Cr^{3+} : LiSAF, Cr^{3+} : LiSCAF	136
5.4.2	Cr^{4+} :forsterite	137
5.4.3	Cr^{4+} :YAG	138
5.5	掺 Yb^{3+} 介质飞秒激光器	138
5.5.1	Yb^{3+} 离子的能级结构和光谱特性	138
5.5.2	Yb^{3+} 掺杂介质飞秒激光器	140
	参考文献	142

第 6 章 飞秒光纤激光技术	146
6.1 光纤简介	147
6.1.1 单模光纤与大模场面积光纤	148
6.1.2 双包层光纤与泵浦光的吸收效率	148
6.1.3 微结构光纤或光子晶体光纤	150
6.1.4 掺杂类别	150
6.1.5 泵浦方式	151
6.2 光纤激光器的锁模启动机制	152
6.2.1 非线性环路反射镜	152
6.2.2 非线性偏振旋转	156
6.2.3 半导体可饱和吸收体	166
6.3 脉冲形成机制	166
6.3.1 Ginzburg-Landau 方程与解法	166
6.3.2 孤子型锁模光纤激光器	167
6.3.3 展宽-压缩型	171
6.3.4 自相似型	175
6.3.5 全正色散型	179
参考文献	182
第 7 章 飞秒激光脉冲放大技术	185
7.1 放大器中的脉冲成型	185
7.1.1 增益介质的饱和	185
7.1.2 增益窄化	186
7.1.3 ASE 的影响	187
7.2 放大器中非线性折射率的影响	187
7.2.1 自相位调制	187
7.2.2 自聚焦	187
7.3 放大器中脉冲的演化过程	188
7.4 啁啾脉冲放大器	189
7.4.1 再生放大器的构成	191
7.4.2 脉冲在再生放大器腔内的演化	193
7.4.3 隔离器	193
7.5 多通式放大器	194
7.6 啁啾脉冲放大器中的带宽控制与波长调谐	197
7.6.1 超宽带放大器	197
7.6.2 波长可调谐再生放大器	197

7.6.3	用飞秒脉冲做种子的皮秒脉冲再生放大器	199
7.7	啁啾脉冲放大器中的脉冲展宽和压缩	199
7.7.1	标准脉冲展宽器 (Martinez 型)	199
7.7.2	无像差脉冲展宽器 (Offner 型)	202
7.8	负啁啾脉冲放大器	203
	参考文献	205
第 8 章	飞秒激光脉冲特性测量技术	207
8.1	飞秒脉冲的时域测量	207
8.1.1	线性自相关	207
8.1.2	非线性自相关	208
8.1.3	三阶非线性非对称脉冲的测量	211
8.1.4	自相关仪	212
8.1.5	单脉冲自相关测量	213
8.2	飞秒脉冲的相位测量: FROG 法	215
8.2.1	三阶非线性相关频率分辨光学开关法 (FROG)	215
8.2.2	二倍频频率分辨光学开关法 (SHG-FROG)	218
8.2.3	低功率时 FROG 的应用	220
8.3	飞秒脉冲相位的测量: SPIDER 法	220
8.3.1	空间相干与时间相干	220
8.3.2	参考光与信号光的相干	221
8.3.3	信号光的自参考相干	222
8.3.4	自参考光谱相干电场重建法 (SPIDER)	223
8.3.5	SPIDER 装置的参数选择	226
8.3.6	SPIDER 光谱相位的还原方法改进	227
8.3.7	SPIDER 与 FROG 的测量精度比较	228
8.4	超宽带弱信号的相位测量: XFROG 与 XSPIDER	230
8.5	二维 SPIDER	230
8.6	PICASO	232
	参考文献	232
第 9 章	飞秒激光脉冲频率变换技术	234
9.1	非线性光学过程	234
9.2	倍频	235
9.2.1	I 类匹配	235
9.2.2	II 类匹配	242
9.3	三倍频	242

9.4 参量过程	244
9.4.1 参量产生与放大	245
9.4.2 参量振荡	246
9.4.3 非共线相位匹配的光参量过程	247
9.5 参量啁啾放大器	251
9.6 准相位匹配技术——周期极化结构晶体的应用	254
参考文献	257
第 10 章 飞秒激光脉冲压缩与整形技术	259
10.1 普通光纤中的光谱扩展和脉冲压缩	260
10.1.1 光纤中的脉冲非线性传播方程	260
10.1.2 正常色散介质 $k'' > 0$ 中的脉冲压缩	261
10.1.3 反常色散介质 $k'' < 0$ 中的孤子脉冲	265
10.2 光子晶体光纤中的白光产生与脉冲压缩	266
10.2.1 光子晶体光纤中的白光产生	266
10.2.2 锥形光纤中的白光产生	271
10.2.3 白光脉冲压缩	272
10.3 中空光纤中的光谱展宽与脉冲压缩	273
10.3.1 惰性气体的折射率	274
10.3.2 脉冲在中空光纤中的传播	276
10.3.3 脉冲在中空光纤中传播的色散和非线性效应	279
10.3.4 SLM 补偿与周期量级脉冲产生	282
10.4 中空光纤中的高能量周期量级脉冲产生	284
10.4.1 气压梯度	285
10.4.2 温度梯度	286
10.5 体材料中的脉冲压缩	287
10.5.1 基于三阶非线性的脉冲压缩	287
10.5.2 基于二阶非线性的脉冲压缩	288
10.6 脉冲的整型——频域调制与解调	289
10.6.1 $4f$ 系统相位控制技术	290
10.6.2 逐线控制的脉冲整形	292
参考文献	293
第 11 章 飞秒激光脉冲相干控制与光学频率合成技术	297
11.1 从频率计量学到光学相位控制	297
11.2 飞秒激光器的相位控制	298
11.2.1 载波包络相位的定义	299

11.2.2	脉冲与脉冲之间的载波包络相位差	300
11.2.3	载波包络频率偏差 f_{CEO} 的测量	302
11.2.4	飞秒激光脉冲载波包络相位的控制	303
11.2.5	绝对载波包络相位	306
11.3	飞秒脉冲放大器的相位测量和控制	308
11.3.1	非线性光谱干涉法	308
11.3.2	线性光谱干涉法	310
11.4	参量放大器中的相位控制	313
11.5	激光器的光学频率合成	314
11.5.1	两个独立激光器的相干合成	315
11.5.2	两个不同增益介质的固体激光器的相干合成	317
11.5.3	飞秒光纤激光器的同步	319
11.5.4	飞秒光纤激光器的相干合成: 获得单周期脉冲	323
	参考文献	325
第 12 章	飞秒激光太赫兹波技术	329
12.1	太赫兹波的产生	329
12.1.1	光电导天线	330
12.1.2	光整流	331
12.1.3	空气等离子体产生太赫兹脉冲	332
12.2	太赫兹波的探测	333
12.2.1	光电导取样	333
12.2.2	自由空间电光技术	335
12.2.3	空气等离子体探测太赫兹	337
12.3	太赫兹波光谱学	338
12.4	太赫兹波成像技术	340
12.4.1	太赫兹射线成像的基本原理	340
12.4.2	太赫兹时域扫描成像	340
12.4.3	太赫兹实时成像	341
12.4.4	太赫兹层析成像	342
12.4.5	太赫兹近场成像	344
12.4.6	太赫兹成像技术的应用	346
	参考文献	347
第 13 章	飞秒激光微加工技术	349
13.1	超短脉冲激光与金属材料相互作用模型	350
13.1.1	理论基础	350