

光子技术

第二版

谢树森 雷仕湛 主编

科学出版社

光子技术

第二版

谢树森 雷仕湛 主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

光子学是一门具有极强应用背景的新兴学科,光子技术的基础是光子学。随着现代科学技术的发展,人们对光子学推动现代科学技术和生产发展的潜力有了进一步的了解,光子技术已成为当代的热门话题。它像电子学一样,正深入到科学技术、国民经济和社会生活的各个领域。

近年生物医学光学与光子学的迅速崛起,引发生成了一门新兴学科——生物医学光子学。探测生物光子,可以揭示生命的秘密,利用光子技术也可以改造生物体特性,获取创新知识。这些研究和应用正在造福人类。目前,已充分显示出光子在光通信、光盘、光计算机等领域的竞争能力和发展潜力。毋庸置疑,光子技术将是21世纪的骨干技术。

本书详细介绍了光子技术的内涵,光子的产生、传播、与物质相互作用、控制、探测的基本规律,以及在信息、生物等主要科学技术领域的应用。具体内容有光子信息技术、光子生物技术、激光技术、非线性光子技术及关键的光子技术基本术语。

本书可供从事光子技术研究与开发的科技人员和管理人员,高等院校相关专业的学生和教师阅读。

图书在版编目(CIP)数据

光子技术/谢树森,雷仕湛主编. —北京:科学出版社,2004

ISBN 978-7-03-013275-8

I. 光… II. ①谢…②雷… III. 光子技术 IV. TN2

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第039625号

责任编辑:姚平录 曲衍立 曾晓辉 / 责任校对:包志虹 钟 洋

责任印制:白 羽 / 封面设计:高海英

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004年9月第 一 版 开本:850×1168 1/16

2011年2月第 二 版 印张:66.5

2011年2月第二次印刷 印数:1 501—6 500

字数:1 918 000

定价:230.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序 言

人类的生存和社会文明不能没有光，其重要性与我们离不开空气和水那样。光的确太重要了，它不仅给我们光明，给我们世界的美丽，也是人类生存的保证。正因为如此，人类很早便开始研究和应用光，长期的知识累积形成了一门学科——光学。

激光、红外、光电子学和纤维光学等技术的发展，使光学技术又进入一个崭新的阶段，促进了光通信、光传感、光探测、全息术、信息处理、高速摄影以及光电医学等的发展。这些现代光学技术的进展促使光子学应运而生，并成为一门新兴学科。光子学相对于传统的光学有如电子学相对于经典电学。电学从宏观的角度研究电学现象；电子学以电子为基本单元研究它的性能和活动机制。光子学以光子作为能量载体进行各类加工处理，更重要的是以光子作为信息载体在信息科学技术领域的应用。光子学在科学技术领域已占据相当重要的位置。它像电子学一样，正深入到科学技术、国防建设、国民经济、社会生活的各个领域。实际上，光子学是一门具有极强应用背景的学科，并由此形成了一系列的光子技术，如光子产生技术（激光技术）、光子传输技术、光子调制与开关技术、光子存储技术、光子探测技术、光子显示技术及生物医学光子技术等。光子技术的基础是光子学。

电荷的最小单元是电子，光的最小能量单元是光子。从科学技术的发展史来看，电子和光子的发现是在同一年代。不过，电子器件的发展速度快，电子技术推动科学技术和生产发展的能力获得了充分发挥，人们对这门技术已经比较熟悉；相比之下，对光子技术是有几分陌生。随着现代科学技术的发展，人们对光子推动现代科学技术和生产发展的潜力有了进一步了解。特别是在 1960 年发明了激光器，它能为我们提供高强度的光子源，这使开发应用光子技术有了更强大的物质基础。光子技术是当代的热门话题，各国都为发展光子技术注入了巨大力量。

生物或者生命科学是光子学的又一个重要应用领域。20 世纪末叶生物医学光学与光子学的迅速崛起，令人瞩目，并因此引发生了一门新兴学科——生物医学光子学（biomedophotonics 或 biomedical optics）。它涉及生物系统以光子形式释放的能量与来自生物系统的光子的探测，以及这些光子携带有关生物系统的结构与功能信息，还包括利用光子对生物系统进

行加工与改造等。一切生物，包括动物、植物和微生物的发育、生长都是依靠光提供能量。生物体的光子发射特性，反映出生物体的活力；探测生物光子，可以揭示生命的秘密；同样地，利用光子技术可以改造生物体特性，获取创新知识。这些研究和应用，正在造福人类。

光子携带自然信息，携带人类交换信息。光子本身不带电，彼此之间不发生相互作用，也不受外来电磁场的影响，或者说，光子信息传递有很高的并行性；光子的传播速度又比电子快很多。所以，用光子作信息传递载体，是提高信息传递量和质量的最有效办法。当今的光通信、光盘、光计算机等，已显示出光子技术在这些领域的竞争能力和发展潜力。光子技术将是 21 世纪的骨干技术。

该书的编者们积累了多年从事光子技术研究开发的知识，编写了这本著作。特别是作为光学或者光子学前沿的“生物医学光子技术”，在该专著中亦给出了较为清晰和系统的阐述。我希望该书的出版对我国的研究技术人员和大学生学习了解光子技术会有所裨益。

王大珩

中国科学院院士

中国工程院院士

中国光学学会名誉理事长

2003 年 9 月 19 日

第一版前言

光子技术是一门新兴高技术，是当今和今后一个时期发展的主流，在科学与技术的发展中占有重要地位。

光子技术的基础是光子学。“光子”是19世纪初科学家在研究光与物质相互作用中发现的，它揭示了光的二重性：光的波动性和粒子性。光子学是与电子学平行的科学，它是研究以光子作为信息载体和能量载体的行为及其应用的科学。光子学的应用研究，就是光子技术，研究光子的产生、运动、传播、控制和探测等基本问题。从波动的物理本质来看，光子学与电子学所处理的问题是相同的，电子学的许多概念、理论和器件的原理已推广到光子学。但是，两者涉及的电磁波频率范围不同。光子学在光频段（ $10^{13} \sim 10^{16} \text{ Hz}$ ），电子学则在射频波段以下（ $< 10^8 \text{ Hz}$ ）。量变将引起质变，在光频段的光子较之在射频波段的电子，在实际应用上会有多方面显著的特点。比如，光子在物质中的传播速度比电子快（大约千倍），因此，光子器件的响应时间比电子器件快；又比如，电子之间存在电磁相互作用，而光子在一般条件下彼此之间不存在相互影响，也就是说光子具有并行处理信息的能力，而电子是没有这种能力的。因此，光子技术有着比电子技术更大的发展潜力。电子技术给人类带来社会文明，是20世纪科学技术进步的标志。可以预见，光子技术将把人类带进信息时代，是21世纪科学技术发展的标志。

信息对人类社会影响重大，光子在信息领域的应用自然备受重视，成为光子技术的重要内容，在某些方面也已经形成大规模产业。

光子是生物体发育生长的能源，同样，生物分子的光辐射反映生物物质新陈代谢状况，携带生物分子内部信息。所以，探测研究生物发光特性，能够让我们获得生物体发育生长的信息，并且可以研制微光子器件。研究相干光子的生物效应，将揭示激光生物学以及医学的普遍规律。

激光器是20世纪的重大发明，它的某些卓越特性推进了物理学、化学、生物学的研究，加深了人们对物质运动规律的认识。激光器和激光技术是光子技术的物质基础。

光子技术的涉及范围广泛，而且还在不断向其他领域渗透。要全面论述光子技术是很困难的，本书只介绍前面谈到的这几个方面。同时，光子

技术发展迅速,技术水平不断提高,限于本书编者的水平,书中所介绍的结果并非都是最先进的,其中还会有错漏之处。我们期待在往后有机会再版时进行补充修改。

两院院士王大珩先生是我国著名光学专家,他在百忙中为本书写序,这体现了他对光子学技术、光子技术发展的关注。科学出版社姚平录编审从本书的策划到编排,付出了辛勤的劳动,有他的努力,本书才得以顺利出版。我们还要感谢专家们的赐稿,参加本书编写的主要专家如下。

第一章概论:谢树森;

第二章信息光子技术:刘伟平、许立新、杜戈、李琦、明海、谭立英;

第三章生物医学光子技术:谢树森、陈荣、李晖;

第四章激光单元技术:雷仕湛、程兆谷、成向阳、夏元钦、郭亨群、林殿阳、曲彦臣、王加贤;

第五章激光器:雷仕湛、程丽元、田兆硕、姚宝权、张文珍、周海光;

第六章非线性光子技术:林殿阳、刘伟平、陈建新;

第七章光子技术基本术语:雷仕湛、谢树森、明海、陈荣;

参加编写的还有骆清铭及其研究组,以及李步洪、李德品、周传农、翁国星、吴让大、王军、赵永蓬等。

雷仕湛担负了本书的整理统稿;《激光与光电子学进展》编辑部陈秀娥、刘美红为本书的出版也做了大量工作。在此我们一并表示感谢。

谢树森 雷仕湛

2003年12月

第二版前言

光子技术是 20 世纪后半叶科学进步最重大成就之一，并且已经在科学技术、国民经济建设、国防建设、社会文明生活各个领域发挥了重要作用。

光子技术是一门蓬勃发展的技术，在 2004 年本书出版后的几年时间里又获得了许多新进展。为适应光子技术发展的需要，并应一些读者的要求，我们在 2008 年末决定出版第二版，先后多次修改，几易其稿，历时 2 年。在这一版我们新增加 4 章内容，它们是第七章高能超短脉冲激光技术；第八章半导体光子技术；第九章高功率激光薄膜技术；第十章先进光学遥感技术。此外，我们还对原来的第二章到第六章做了修改和补充。第二章重点修改和补充的是 2.1 光通信、2.2 无源光耦合器件和 2.8 光存储这三节；第三章新增加 3.8 视觉光学技术与波前工程和 3.9 经络的光学研究这两节，还对 3.6 生物组织的光学成像技术和 3.7 激光医学技术这两节做了较大的修改和补充；第四章重点修改和补充的是 4.3 脉冲压缩、4.7 激光放大技术、4.10 光电子元件、4.12 激光能量测量和 4.14 其他参数测量等 5 节；第五章重点修改和补充的是 5.1 固体激光器和 5.6 光纤激光器这两节；第六章重点修改补充的是 6.2 气体光学谐波发生，新增加固体材料光学谐波技术。

我们感谢中国科学院院士林尊琪先生的大力支持和帮助，他推荐了一些著名光学家为本书撰写稿件并进行了审阅；我们也感谢科学出版社编审姚平录、《激光与光电子学进展》责任编辑王晓峰对再版工作所付出的辛勤劳动。我们还要感谢专家们的赐稿，再版赐稿的主要专家有：

于思源、刘伟平、杜戈（第二章的修改、补充）；

骆清铭、张雨东、曾绍群、陈建新、李步洪、杨洪钦、龚玮、张先增、戴云（第三章的修改、补充）；

陈嘉琳、高云凯、康俊、韦辉、陈绍和、庄大奎、明海、黄观龙、朱宝强、李永平、戴亚平、陈波、叶金祥、吕百达、傅恩生、鲁敬平、王桂英（第四章的修改、补充）；

李明中、汤星里、姜中宏、张俊洲、胡丽丽、潘守夔、高樟寿、苏根博、朱从善、王中军、王军（第五章的修改、补充）；

黄观龙、朱宝强、李永平、戴亚平（第六章的修改、补充）；

黄观龙、朱宝强、李永平、戴亚平（第六章的修改、补充）；

钱列嘉（撰写第七章）；

余金中（撰写第八章）；

范正修（撰写第九章）；

赵慧洁、张春熹、袁艳、李娜、贾豫东（撰写第十章）。

我们希望本书对光子技术研究和应用的专家们有所裨益，更希望广大读者对本书的不妥之处给予批评和指正。

谢树森 雷仕湛

2010年10月

目 录

序言

第二版前言

第一版前言

第一章 概 论

1.1 光子学及其技术的发展	1	1.2.1 基础光子学	5
1.1.1 光子学的内涵	1	1.2.2 信息光子学及技术	7
1.1.2 光子学与电子学	3	1.2.3 生物医学光子学及技术	9
1.1.3 光子学技术的发展及其意义	4	1.2.4 光子学器件	10
1.2 光子学的重要分支学科及其研究内容	5	1.2.5 集成与微结构光子学	11

第二章 信息光子技术

2.1 光通信	14	2.3.5 掺铒光纤放大器在光纤传输系统中的噪声 考虑	98
2.1.1 光纤通信	14	2.3.6 光纤放大器干线传输系统中若干问题 分析	102
2.1.2 光发射	21	2.3.7 光纤放大器在光纤宽带模拟传输系统应用 中的考虑	106
2.1.3 光接收	25	2.3.8 小结	108
2.1.4 光纤通信系统	28	2.4 光纤光栅	108
2.1.5 光放大器	36	2.4.1 光纤光栅滤波器	109
2.1.6 光纤数字传输网	40	2.4.2 光纤布拉格光栅	110
2.1.7 光复用	46	2.4.3 光纤光栅的研究分析方法	111
2.1.8 光纤用户网	49	2.4.4 光纤光栅调谐技术	119
2.1.9 光交换	52	2.4.5 光纤光栅的研制	120
2.1.10 空间光通信	53	2.4.6 光纤光栅的应用	124
2.1.11 大气光通信	68	2.5 激光全息技术	127
2.1.12 水下激光通信	69	2.5.1 全息图分类	127
2.2 无源光耦合器件	69	2.5.2 菲涅耳全息图	128
2.2.1 光耦合器的一般技术参数	70	2.5.3 像面全息图	129
2.2.2 熔融拉锥型光纤耦合器	71	2.5.4 傅里叶变换全息图	129
2.2.3 波导型光耦合器	78	2.5.5 位相全息图	130
2.2.4 耦合器的应用及前景展望	80	2.5.6 体积全息图	130
2.3 光纤放大器	81	2.5.7 偏振全息	130
2.3.1 光纤放大器基本理论	81	2.5.8 计算全息	131
2.3.2 光纤放大器的类型及设计考虑	86	2.5.9 全息光学元件	131
2.3.3 光纤放大器增益谱形及其对光纤传输系统 的影响	89	2.5.10 彩虹全息	132
2.3.4 DWDM 系统中光纤放大器增益均衡的 实现	93		

2.5.11 体视全息、合成全息与印刷全息	132	2.7.4 非相干光信息处理	149
2.5.12 彩色全息	133	2.7.5 阿贝-波特实验和频率域处理	149
2.5.13 全息显微术	133	2.7.6 空间光调制	150
2.5.14 全息干涉计量	133	2.7.7 图像相减	151
2.6 光计算	134	2.7.8 图像特征识别	151
2.6.1 模拟光计算	134	2.7.9 综合孔径雷达	151
2.6.2 矩阵处理器	134	2.7.10 白光信息处理	152
2.6.3 数字光计算	135	2.7.11 光学假彩色编码	152
2.6.4 光学编码与逻辑	136	2.7.12 光学小波变换	153
2.6.5 二进制光逻辑器件	136	2.8 光存储	153
2.6.6 光存储器	138	2.8.1 只读存储光盘	154
2.6.7 光学互联	139	2.8.2 磁光盘	154
2.6.8 光学神经网络	139	2.8.3 相变光盘	155
2.6.9 量子光计算	139	2.8.4 持续光谱烧孔存储	158
2.7 光学图像处理	140	2.8.5 双光子光学存储	159
2.7.1 图像处理的基本步骤	141	2.8.6 光全息存储	160
2.7.2 图像噪声抑制	141	2.8.7 关联存储	162
2.7.3 相干光学信息处理	149	2.8.8 近场光存储	162

第三章 生物医学光子技术

3.1 光对生物组织的作用	168	3.3.7 组织光学	196
3.1.1 生物体的超弱发光	168	3.3.8 皮肤光学	197
3.1.2 非相干光子的生物作用	170	3.4 光在生物组织中的传输理论	204
3.1.3 激光光子的生物作用	174	3.4.1 光辐射量	204
3.2 光子生物技术	180	3.4.2 激光辐射疗法剂量学	206
3.2.1 激光辐照诱变育种	180	3.4.3 玻尔兹曼传输方程	210
3.2.2 激光细胞融合技术	180	3.4.4 漫射理论	213
3.2.3 激光导入外源基因	181	3.5 光在生物组织中传输的蒙特卡罗模拟	218
3.2.4 激光切割染色体	181	3.5.1 蒙特卡罗模拟	218
3.2.5 激光流式细胞计	181	3.5.2 MC方法的必要性	219
3.2.6 激光荧光漂白恢复技术	183	3.5.3 光的随机传输过程与跟踪步骤	220
3.2.7 激光多普勒显微术	183	3.5.4 汪和杰克斯(Wang & Jacques)的MC解	223
3.2.8 光学近场扫描显微术	185	3.6 生物组织的光学成像技术	225
3.2.9 医用红外热像技术	186	3.6.1 光学功能成像	225
3.2.10 光镊技术	186	3.6.2 光学层析成像	226
3.3 生物组织的光学模型	190	3.6.3 频域技术成像	228
3.3.1 生物组织结构特点	190	3.6.4 时间分辨成像	229
3.3.2 生物组织的均匀性与非均匀性	191	3.6.5 超声调制光学成像	230
3.3.3 生物组织离散散射液体模型	191	3.6.6 光声扫描成像	231
3.3.4 光学性质基本参数	192	3.6.7 多光子显微成像	231
3.3.5 光学性质参数的其他描述	194		
3.3.6 组织散射特性的夫琅禾费衍射描述	194		

3.6.8 生物医学成像科学技术新进展	234	3.7.10 激光牙科	273
3.7 激光医学技术	246	3.8 视觉光子技术与波前工程	273
3.7.1 激光医学	246	3.8.1 眼波像差测量技术	274
3.7.2 光活检	247	3.8.2 高阶像差对人眼光学质量的影响	276
3.7.3 光动力学疗法	248	3.8.3 人眼高阶像差对主观视功能的影响	278
3.7.4 低强度激光照射疗法	261	3.8.4 个性化人眼高阶像差矫正方法	280
3.7.5 激光外科与激光消融技术	262	3.9 经络的光学研究	282
3.7.6 光子美容技术	266	3.9.1 人体经络光学特性研究	282
3.7.7 激光治疗胸心血管病	269	3.9.2 经络研究与现代光学	283
3.7.8 激光眼屈光矫正术	271	3.9.3 经络光学研究与开拓	284
3.7.9 激光生物组织焊接	272		

第四章 激光单元技术

4.1 Q 开关技术	294	4.3.4 用电子学方法压缩脉冲宽度	313
4.1.1 Q 开关激光器的输出功率和能量	294	4.3.5 用切割脉冲方法产生窄宽度激光脉冲	313
4.1.2 Q 开关激光器输出的光脉冲宽度	295	4.3.6 光脉冲整形技术	314
4.1.3 Q 开关的参数	295	4.3.7 激光焦斑光强均匀化技术	327
4.1.4 转镜 Q 开关	296	4.3.8 阿秒相干光脉冲产生	349
4.1.5 泡克耳斯盒 Q 开关	297	4.4 激光脉冲宽度测量	350
4.1.6 克尔盒 Q 开关	298	4.4.1 用条纹照相机测量	350
4.1.7 声光 Q 开关	299	4.4.2 自相关测量法	351
4.1.8 染料 Q 开关	299	4.4.3 双光子荧光测量法	351
4.1.9 色心晶体 Q 开关	300	4.4.4 二次谐波测量法	352
4.1.10 受激布里渊散射 Q 开关	300	4.4.5 利用半导体表面二次谐波测量	352
4.1.11 薄膜 Q 开关	301	4.4.6 双光子吸收自相关测量	353
4.1.12 自聚焦被动 Q 开关	301	4.4.7 三阶自相关函数测量法	353
4.1.13 脉冲传输 (PTM) Q 开关	301	4.4.8 用快速扫描自相关器测量	353
4.1.14 各种 Q 开关的性能对比	302	4.5 激光频率稳定技术	354
4.2 锁模	302	4.5.1 激光频率稳定性参数	354
4.2.1 能获得的极限脉冲宽度	302	4.5.2 频率稳定度的统计处理	355
4.2.2 锁模的失谐	303	4.5.3 频率稳定度的测量	355
4.2.3 自锁模	303	4.5.4 原子谱线中心稳频法	356
4.2.4 主动锁模	303	4.5.5 分子吸收线稳频法	356
4.2.5 被动锁模	306	4.5.6 利用塞曼分裂稳频法	357
4.2.6 碰撞锁模	310	4.5.7 利用纵向塞曼拍频曲线稳频法	357
4.2.7 同步抽运锁模	311	4.5.8 被动腔稳频法	358
4.2.8 注入锁模	311	4.5.9 色散稳频法	358
4.2.9 相干叠加脉冲锁模	311	4.5.10 双光束干涉稳频法	358
4.3 脉冲压缩	311	4.5.11 偏振稳频法	358
4.3.1 在腔内放棱镜压缩脉冲宽度	312	4.5.12 偏频锁定稳频	358
4.3.2 用光纤压缩光脉冲宽度	312	4.5.13 双频锁相稳频	359
4.3.3 利用受激布里渊散射压缩脉冲宽度	313		

4.5.14 Pund-Drever 稳频技术	359	4.9.1 激光调幅	392
4.6 选模	359	4.9.2 激光调频	392
4.6.1 选横模方法	360	4.9.3 激光调相	392
4.6.2 选纵模方法	361	4.9.4 直接调制	393
4.6.3 选单频方法	363	4.9.5 电光调制	393
4.7 激光放大技术	364	4.9.6 声光调制	393
4.7.1 激光放大器速率方程	364	4.9.7 磁光调制	395
4.7.2 矩形脉冲激光放大器的功率增益	365	4.9.8 吸收调制	395
4.7.3 矩形脉冲激光放大器的能量增益	365	4.10 光电子元件	395
4.7.4 洛伦兹形脉冲激光放大器的功率增益	366	4.10.1 调制器	395
4.7.5 再生放大	366	4.10.2 扫描器	402
4.7.6 多通路光放大	367	4.10.3 波长变换器	403
4.7.7 自注入再生放大	367	4.10.4 激光束聚焦透镜	404
4.7.8 啁啾脉冲放大	367	4.10.5 光开关	404
4.7.9 光放大器	368	4.10.6 移相器	412
4.7.10 光再生脉冲放大器	369	4.10.7 空间滤波器	414
4.7.11 超短光脉冲放大器	369	4.10.8 软边光阑	421
4.7.12 脉冲光纤放大器	370	4.10.9 光学隔离器	421
4.7.13 光抽运固体激光放大器噪声因数	370	4.10.10 磁光隔离器	422
4.7.14 放大器光束质量	370	4.10.11 全息光学元件	423
4.7.15 放大器引入的非线性效应	372	4.10.12 编码光栅	424
4.7.16 激光束传输	373	4.10.13 光纤光栅	424
4.7.17 激光取样技术	380	4.10.14 光强度衰减器	429
4.7.18 引起飞秒激光放大脉冲展宽因素	381	4.10.15 光电探测器	429
4.7.19 光栅对脉冲展宽器和压缩器	382	4.10.16 激光雷达	435
4.8 激光光谱技术	383	4.10.17 时间滤波器	438
4.8.1 激光发射光谱	383	4.10.18 频率鉴别器	438
4.8.2 激光荧光光谱	384	4.10.19 电光偏转器	438
4.8.3 激光吸收光谱	384	4.10.20 光束堆积器	439
4.8.4 激光偏振光谱	385	4.11 光电材料	440
4.8.5 激光分子双共振光谱	386	4.11.1 光电探测材料	440
4.8.6 光热偏转光谱	387	4.11.2 光电存储材料	442
4.8.7 激光感生荧光光谱	387	4.11.3 光电显示材料	444
4.8.8 激光光电流光谱	387	4.11.4 光电转换材料	447
4.8.9 激光声光光谱	388	4.11.5 光学功能材料	449
4.8.10 相干反斯托克斯拉曼光谱	388	4.12 激光能量测量	462
4.8.11 激光皮秒光谱	389	4.12.1 直接量热法测量能量	463
4.8.12 量子拍光谱	390	4.12.2 热电法测量能量	463
4.8.13 激光波长的测量	390	4.12.3 光电法测量能量	464
4.8.14 利用光电流效应测定分子激光器的选支 激光波长	391	4.12.4 光化学法测量能量	464
4.8.15 激光大气衰减	391	4.12.5 光压法测量能量	465
4.9 激光调制技术	391	4.12.6 激光能量精密测量技术	466
		4.12.7 其他方法	466

4.12.8 几种常用测量仪器	467	4.14 其他参数测量	471
4.13 激光波长的测量	467	4.14.1 光束质量因子 M^2 测量	471
4.13.1 摄谱法测量波长	467	4.14.2 介质非线性折射率测量	471
4.13.2 F-P 标准具测量波长	468	4.14.3 脉冲时间波形精密测量技术	472
4.13.3 压力扫描 F-P 干涉仪测量波长	468	4.14.4 谱宽测量技术	473
4.13.4 迈克耳孙干涉仪测量波长	468	4.14.5 强激光脉冲波前畸变精密测量技术 ...	473
4.13.5 多波长激光波长的测量	469	4.14.6 强激光光束空间分布精密测量技术 ...	474
4.13.6 激光谱线宽度测量	469	4.14.7 光学元件检测	477
4.13.7 软 X 波段谱仪定标	470		

第五章 激 光 器

5.1 固体激光器	483	5.2.10 金属蒸气激光器	670
5.1.1 工作物质	483	5.2.11 毛细管放电抽运软 X 射线激光器	676
5.1.2 固体工作物质的热透镜	513	5.3 自由电子激光器	685
5.1.3 固体激光器工作物质热负载	513	5.3.1 相对论电子束产生辐射的基本效应	685
5.1.4 闪光灯抽运固体激光器	513	5.3.2 自由电子产生辐射的条件	686
5.1.5 二极管抽运固体激光器	528	5.3.3 单摆方程	686
5.1.6 太阳光抽运固体激光器	535	5.3.4 电子束	686
5.1.7 流动固体激光器	536	5.3.5 摆动器	687
5.1.8 蓝绿光固体激光器	536	5.3.6 自由电子在线极化摆动器中的运动	688
5.1.9 腔内倍频固体激光器	536	5.3.7 电子在圆极化摆动器内的运动	688
5.1.10 可调谐固体激光器	537	5.3.8 粒子数反转	688
5.1.11 Nd:YAG 激光器	543	5.3.9 激光器输出波长	689
5.1.12 钕玻璃激光器	551	5.3.10 康普顿自由电子激光器	689
5.1.13 红宝石激光器	568	5.3.11 切连科夫自由电子激光器	689
5.1.14 Nd:YLF 晶体激光器	574	5.3.12 Smith Purcell 自由电子激光器	690
5.1.15 色心激光器	580	5.3.13 拉曼自由电子激光器	690
5.1.16 其他玻璃激光器	583	5.3.14 非线性自由电子激光器	691
5.1.17 其他晶体激光器	585	5.3.15 沟道自由电子激光器	691
5.1.18 光参量振荡器 (OPO)	592	5.4 半导体激光器	692
5.1.19 薄片激光器	603	5.4.1 工作物质	692
5.1.20 上转换激光器	604	5.4.2 半导体激光器的粒子数反转	693
5.2 气体激光器	605	5.4.3 阈值振荡电流	693
5.2.1 亚稳态	605	5.4.4 抽运方式	694
5.2.2 气体放电中亚稳态的激发机理	606	5.4.5 共振腔	694
5.2.3 氦氖激光器	607	5.4.6 激光器致冷方法	695
5.2.4 二氧化碳分子激光器	615	5.4.7 欧姆接触	695
5.2.5 准分子激光器	644	5.4.8 输出功率	695
5.2.6 一氧化碳分子气体激光器	659	5.4.9 激光频谱	696
5.2.7 氮分子激光器	662	5.4.10 极大波长调谐范围	696
5.2.8 水蒸气激光器	665	5.4.11 激光频率稳定性	696
5.2.9 氩离子激光器	666	5.4.12 输出噪声	697

5.4.13 光束强度空间分布	697	5.5.20 准分子激光抽运染料激光器	727
5.4.14 振荡模	698	5.5.21 Nd^{3+} : YAG 倍频激光抽运染料激光器	728
5.4.15 退化	698	5.5.22 喷流染料激光器	728
5.4.16 使用寿命	699	5.5.23 腔倒空染料激光器	728
5.4.17 半导体激光调制	699	5.5.24 使用各种抽运源染料激光器的性能比较	728
5.4.18 蓝绿光半导体激光器	700	5.5.25 分布反馈染料激光器	730
5.4.19 中红外半导体激光器	702	5.5.26 淬灭式分布反馈染料激光器	730
5.4.20 垂直腔面发射激光器	702	5.5.27 单频连续输出染料激光器	731
5.4.21 半导体激光器列阵	702	5.5.28 锁模染料激光器	731
5.4.22 可调谐半导体激光器	703	5.5.29 腔内倍频紫外染料激光器	732
5.4.23 异质结半导体激光器	703	5.5.30 波导染料激光器	732
5.4.24 分布反馈半导体激光器	704	5.6 光纤激光器	733
5.4.25 C^3 激光器	704	5.6.1 光纤激光器的优势	734
5.4.26 折射率导引半导体激光器	704	5.6.2 光纤激光器结构	734
5.4.27 增益导引半导体激光器	705	5.6.3 激光振荡频率	736
5.4.28 量子阱半导体激光器	705	5.6.4 稀土类掺杂玻璃光纤激光器	736
5.4.29 超晶格激光器	705	5.6.5 单晶光纤激光器	736
5.4.30 量子点激光器	706	5.6.6 塑料光纤激光器	737
5.4.31 量子级联半导体激光器	706	5.6.7 双包层型光纤激光器	737
5.4.32 砷化镓半导体激光器	707	5.6.8 Q 开关光纤激光器	737
5.4.33 超短脉冲半导体激光器	707	5.6.9 光纤拉曼激光器	738
5.4.34 自聚焦半导体激光器	708	5.6.10 上转换光纤激光器	738
5.4.35 半导体激光放大器	708	5.6.11 可调谐光纤激光器	739
5.5 染料激光器	708	5.6.12 单纵模光纤激光器	739
5.5.1 工作物质	708	5.6.13 光纤放大器	743
5.5.2 激光染料分子能级图	712	5.7 化学激光器	744
5.5.3 荧光量子效率	712	5.7.1 化学反应速率	744
5.5.4 抽运	713	5.7.2 引发化学反应方法	744
5.5.5 阈值振荡粒子数反射密度	714	5.7.3 粒子之间的能量转移速率	745
5.5.6 激光器增益系数	715	5.7.4 氟化氢化学激光器	745
5.5.7 输出功率	715	5.7.5 氟化氙化学激光器	747
5.5.8 能量转换效率	716	5.7.6 氧碘化学激光器	749
5.5.9 输出激光波长	717	5.7.7 使用的非稳定腔	750
5.5.10 激光谱线宽度	719	5.8 激光器共振腔	753
5.5.11 激光波长稳定性	719	5.8.1 共振腔参数	753
5.5.12 使用寿命	720	5.8.2 共振腔的等价性	754
5.5.13 光束扩束器	720	5.8.3 共振腔的模	755
5.5.14 染料蒸气激光器	723	5.8.4 共振腔几何光学近似	757
5.5.15 薄膜染料激光器	724	5.8.5 共振腔的衍射理论	757
5.5.16 混合染料激光器	724	5.8.6 共振腔稳定区图	758
5.5.17 固态染料激光器	725	5.8.7 像散光束共振腔	761
5.5.18 氙灯抽运染料激光器	727		
5.5.19 铜蒸气激光抽运染料激光器	727		

5.8.8 偏振倒空腔	761	5.8.15 环形腔	762
5.8.9 偏振抽取腔	761	5.8.16 相位共轭腔	762
5.8.10 相位耦合腔	761	5.8.17 色散腔	763
5.8.11 注入再生放大腔	761	5.8.18 分布反馈腔	763
5.8.12 热不灵敏腔	762	5.8.19 不均匀反射率共振腔	763
5.8.13 圆锥腔	762	5.8.20 屋脊共振腔	763
5.8.14 折叠腔	762	5.8.21 衍射光栅共振腔	763

第六章 非线性光子技术

6.1 受激散射	766	6.5 光学自聚焦和自散焦	789
6.1.1 受激拉曼散射	766	6.5.1 自聚焦和自散焦的生成机理	789
6.1.2 受激布里渊散射及受激热布里渊散射	772	6.5.2 稳态自聚焦	789
6.1.3 受激瑞利散射	774	6.5.3 自聚焦阈值功率	789
6.1.4 其他受激光散射	775	6.5.4 会聚球面波入射的自聚焦焦距	790
6.2 光学谐波技术	775	6.5.5 发散球面波产生的自聚焦焦距	790
6.2.1 固态材料光学谐波技术	775	6.5.6 平面波光束的自聚焦焦距	790
6.2.2 气体谐波技术	781	6.5.7 准稳态自聚焦	790
6.3 光学相位共轭	782	6.5.8 瞬态自聚焦	791
6.3.1 四波混频相位共轭	783	6.5.9 小尺度自聚焦	792
6.3.2 受激散射相位共轭	783	6.5.10 等离子体内的自聚焦	792
6.3.3 光子回波相位共轭	783	6.5.11 影响自聚焦的因素	792
6.3.4 光学相位共轭的应用	784	6.5.12 激光热自散焦	792
6.4 光参量振荡	784	6.6 光子晶体	793
6.4.1 光参量振荡和放大基本原理	785	6.6.1 光子晶体简介	793
6.4.2 光参量振荡器的调谐性能	785	6.6.2 光子晶体的基本架构	793
6.4.3 光参量振荡器的增益	785	6.6.3 光子晶体的基本特性	794
6.4.4 单共振光参量振荡器的阈值	786	6.6.4 光子晶体的理论分析方法	794
6.4.5 单共振光参量振荡器能量转换效率	787	6.6.5 光子晶体的制作	795
6.4.6 接受角和接受带宽	787	6.6.6 光子晶体光纤	796
6.4.7 准相位匹配光参量振荡器	787	6.6.7 光子晶体的应用	797
6.4.8 同步抽运参量振荡器	788	6.6.8 光子晶体的前景	798
6.4.9 窄线宽光参量振荡器	788		

第七章 高能超短脉冲激光技术

7.1 高能超短脉冲激光系统的前端	801	7.2.2 注入主放大器的啁啾脉冲参数设计	805
7.1.1 飞秒激光振荡器	801	7.2.3 啁啾脉冲在主放大器中的放大	805
7.1.2 激光脉冲展宽器	802	7.3 高能超短脉冲激光系统的终端技术 ...	809
7.1.3 高增益预放大	803	7.3.1 压缩器设计	809
7.2 高能超短脉冲激光系统的主放大器技术	804	7.3.2 光栅尺寸所允许的最大啁啾脉冲宽度	810
7.2.1 主放大器的基本结构	804	7.3.3 光谱剪切与信噪比问题	811

7.4 高能超短脉冲激光系统的相关技术	812	7.4.4 光栅	814
7.4.1 同步技术	812	7.4.5 高功率超短脉冲的聚焦	814
7.4.2 光束控制	813	7.4.6 脉冲时间诊断技术	814
7.4.3 测量	813		

第八章 半导体光子技术

8.1 半导体发光二极管技术	820	8.2.3 激光器的阈值条件和激光增益谱	849
8.1.1 发光二极管的种类	820	8.2.4 DFB 激光器和 DBR 激光器	852
8.1.2 半导体发光二极管材料	823	8.2.5 垂直腔面发射激光器	855
8.1.3 发光二极管的器件结构	825	8.2.6 量子阱激光器	857
8.1.4 发光二极管的工作原理	828	8.2.7 半导体激光二极管的特性	861
8.1.5 超辐射发光二极管	832	8.3 半导体光电探测器技术	866
8.1.6 数码管和发光二极管组件	833	8.3.1 光电探测器的分类	867
8.1.7 发光二极管的特性	835	8.3.2 光电探测器的结构	867
8.1.8 超辐射发光二极管的器件特性	838	8.3.3 半导体材料中的光吸收	871
8.2 半导体激光技术	840	8.3.4 光电探测器的工作原理	874
8.2.1 半导体异质结构材料和特性	840	8.3.5 半导体光电探测器的性能	877
8.2.2 激光二极管的基本结构	845		

第九章 高功率激光薄膜技术

9.1 几种主要光学薄膜	885	9.2.6 多脉冲激光对光学薄膜的破坏	905
9.1.1 光学反射膜	885	9.2.7 光学薄膜中的节瘤缺陷及其在薄膜破坏中的作用	905
9.1.2 光学增透膜	886	9.3 光学薄膜沉积技术	906
9.1.3 干涉滤光片	887	9.3.1 离子束辅助沉积光学薄膜技术	906
9.1.4 光学偏振膜	888	9.3.2 离子束溅射技术沉积光学薄膜	908
9.1.5 群色散延迟补偿薄膜	889	9.3.3 电子束技术制备光学薄膜	909
9.2 激光对光学薄膜损伤的基本过程	891	9.4 光学薄膜激光破坏阈值的测量	910
9.2.1 光学薄膜的光学吸收	892	9.4.1 1-on-1 测试	911
9.2.2 多层介质膜的温度场	894	9.4.2 s-on-1 激光破坏阈值检测	912
9.2.3 雪崩击穿破坏	902	9.4.3 破坏阈值测量的 n-on-1、r-on-1 方式及薄膜的激光预处理	912
9.2.4 多光子吸收破坏	903		
9.2.5 光学薄膜的热力学破坏	904		

第十章 先进光学遥感技术

10.1 光学遥感	914	10.1.6 遥感信息增强技术	921
10.1.1 遥感技术应用	914	10.1.7 全球定位系统	922
10.1.2 遥感技术系统的结构、功能及应用波段	917	10.2 光学遥感成像	922
10.1.3 遥感平台	917	10.2.1 光学遥感成像物理基础	923
10.1.4 遥感传感器	918	10.2.2 光学成像遥感器的特性及综合性能评价	925
10.1.5 遥感图像目视判读方法	921	10.2.3 高分辨率光学成像	926