

# 光子技术

GUANGZI JISHU

谢树森 雷仕湛 主编

# 光子技术

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, 人们对光子推动现代科学技术和生产发展的潜力有了进一步的了解, 使得光子技术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、非线性光子技术以及关键的光子技术基本术语。

本书可供从事光子技术研究开发的科技人员和管理人员, 高等院校的理工科学生和教师阅读。

### 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 7-03-013275-0

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: 姚平采 陈菊华 姜淑华 / 责任校对: 宋玲玲

责任印制: 白羽 / 封面设计: 朱平

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: 787×1096 1/16

2004年9月第一次印刷 印张: 51

印数: 1—1 500 字数: 1 209 000

定价: 125.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈科印〉)

## 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，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、光子显示技术以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，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。近年来生物医学光学与光子学的迅速崛起，令人瞩目，并因此引发生物医学光子学（biomedophotonics）。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并行性；光子的传播速度又比电子快许多。所以，用光子做信息传递载体，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。

本书的编者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”在本专著中亦给出了较为清晰和系统的阐述。我希望本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

## 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，这就是光子技术，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。光子学在光频波段（频率从 $10^{13}\text{Hz}$ 到 $10^{16}\text{Hz}$ ），电子学则在射频波段（ $<10^8\text{Hz}$ ）以下。量变将引起质变，在光频波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。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倍受重视，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，而且还处于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，这是他对光子学技术、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。在此我们表示感谢。

谢树森 雷仕湛

2003 年 12 月

# 目 录

序言

前言

第一章 概论 .....	1
1.1 光子学及其技术的发展 .....	1
1.1.1 光子学的内涵 .....	1
1.1.2 光子学与电子学 .....	3
1.1.3 光子学技术的发展及其意义 .....	5
1.2 光子学的重要分支学科及其研究内容 .....	6
1.2.1 基础光子学 .....	6
1.2.2 信息光子学及技术 .....	8
1.2.3 生物医学光子学及技术 .....	11
1.2.4 光子学器件 .....	12
1.2.5 集成光子学及技术 .....	13
参考文献 .....	16
第二章 信息光子技术 .....	17
2.1 光通信 .....	17
2.1.1 光纤通信 .....	17
2.1.2 光发射 .....	25
2.1.3 光接收 .....	29
2.1.4 光纤通信系统 .....	32
2.1.5 光放大器 .....	41
2.1.6 光纤数字传输网 .....	46
2.1.7 光复用 .....	53
2.1.8 光纤用户网 .....	56
2.1.9 光交换 .....	60
2.1.10 空间光通信 .....	61
2.1.11 大气光通信 .....	67
2.1.12 水下激光通信 .....	68
2.2 无源光耦合器件 .....	69
2.2.1 光耦合器的一般技术参数 .....	69
2.2.2 熔融拉锥型光纤耦合器 .....	71
2.2.3 波导型光耦合器 .....	77
2.2.4 耦合器的应用及前景展望 .....	79
2.3 光纤放大器 .....	81
2.3.1 光纤放大器基本理论 .....	81



2.3.2	光纤放大器的类型及设计考虑	86
2.3.3	光纤放大器增益谱形及其对光纤传输系统的影响	91
2.3.4	DWDM 系统中光纤放大器增益均衡的实现	95
2.3.5	掺铒光纤放大器在光纤传输系统中的噪声考虑	102
2.3.6	光纤放大器干线传输系统中若干问题分析	106
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	111
2.3.8	小结	113
2.4	光纤光栅	114
2.4.1	光纤光栅滤波器	115
2.4.2	光纤布拉格光栅	115
2.4.3	光纤光栅的研究分析方法	117
2.4.4	光纤光栅调谐技术	126
2.4.5	光纤光栅的研制	127
2.4.6	光纤光栅的应用	133
2.5	激光全息技术	136
2.5.1	全息图分类	136
2.5.2	菲涅耳全息图	138
2.5.3	像面全息图	138
2.5.4	傅里叶变换全息图	139
2.5.5	位相全息图	139
2.5.6	体积全息图	140
2.5.7	偏振全息	140
2.5.8	计算全息	141
2.5.9	全息光学元件	141
2.5.10	彩虹全息	142
2.5.11	体视全息、合成全息与印刷全息	142
2.5.12	彩色全息	143
2.5.13	全息显微术	143
2.5.14	全息干涉计量	143
2.6	光计算	144
2.6.1	模拟光计算	144
2.6.2	矩阵处理器	145
2.6.3	数字光计算	146
2.6.4	光学编码与逻辑	146
2.6.5	二进制光逻辑器件	147
2.6.6	光存储器	149
2.6.7	光学互联	150
2.6.8	光学神经网络	151
2.6.9	量子光计算	151
2.7	光学图像处理	152
2.7.1	图像处理的基本步骤	152

2.7.2	图像噪声抑制 .....	152
2.7.3	相干光学信息处理 .....	162
2.7.4	非相干光信息处理 .....	162
2.7.5	阿贝-波特实验和频率域处理 .....	163
2.7.6	空间光调制 .....	163
2.7.7	图像相减 .....	164
2.7.8	图像特征识别 .....	164
2.7.9	综合孔径雷达 .....	165
2.7.10	白光信息处理 .....	166
2.7.11	光学假彩色编码 .....	166
2.7.12	光学小波变换 .....	167
2.8	光存储 .....	167
2.8.1	只读存储光盘 .....	168
2.8.2	磁光盘 (MO) .....	169
2.8.3	相变光盘 .....	170
2.8.4	持续光谱烧孔存储 (PSHB) .....	171
2.8.5	双光子光学存储 .....	171
2.8.6	光全息存储 .....	172
2.8.7	关联存储 .....	175
2.8.8	近场光存储 .....	175
2.9	遥感技术 .....	176
2.9.1	遥感技术应用 .....	176
2.9.2	遥感技术系统的结构、功能及应用波段 .....	177
2.9.3	遥感平台 .....	178
2.9.4	遥感传感器 .....	179
2.9.5	摄影型传感器 .....	180
2.9.6	扫描方式的传感器 .....	181
2.9.7	侧视雷达成像 .....	182
2.9.8	遥感图像目视判读方法 .....	183
2.9.9	遥感信息增强技术 .....	183
2.9.10	全球定位系统 (GPS) .....	184
	参考文献 .....	185
<b>第三章</b>	<b>生物医学光子技术</b> .....	<b>187</b>
3.1	光对生物组织的作用 .....	187
3.1.1	生物体的超弱发光 .....	187
3.1.2	非相干光子的生物作用 .....	189
3.1.3	激光光子的生物作用 .....	194
3.2	光子生物技术 .....	201
3.2.1	激光辐照诱变育种 .....	201
3.2.2	激光细胞融合技术 .....	202
3.2.3	激光导入外源基因 .....	202

3.2.4	激光切割染色体	203
3.2.5	激光流式细胞计	203
3.2.6	激光荧光漂白恢复技术	204
3.2.7	激光扫描共焦显微镜	205
3.2.8	激光多普勒显微镜	206
3.2.9	光学近场扫描显微镜	207
3.2.10	医用红外热像技术	209
3.2.11	光镊技术	210
3.3	生物组织的光学模型	214
3.3.1	生物组织结构特点	214
3.3.2	生物组织的均匀性与非均匀性	215
3.3.3	生物组织离散散射液体模型	215
3.3.4	光学性质基本参数	217
3.3.5	光学性质参数的其他描述	218
3.3.6	组织散射特性的夫琅和费衍射描述	219
3.3.7	组织光学	221
3.3.8	皮肤光学	222
3.4	光在生物组织中的传输理论	230
3.4.1	光辐射量	231
3.4.2	激光辐射疗法剂量学	232
3.4.3	玻耳兹曼传输方程	237
3.4.4	漫射理论	241
3.5	光在生物组织中传输的蒙特卡罗模拟	246
3.5.1	蒙特卡罗模拟	247
3.5.2	MC方法的必要性	247
3.5.3	光的随机传输过程与跟踪步骤	248
3.5.4	汪和杰克斯(Wang & Jacques)的MC解决方案	252
3.6	生物组织的光学成像技术	254
3.6.1	光学功能成像	254
3.6.2	光学层析成像	256
3.6.3	光学显微功能成像	258
3.6.4	频域技术成像	259
3.6.5	时间分辨成像	260
3.6.6	激光散斑成像	262
3.6.7	超声调制光学成像	262
3.7	激光医学技术	263
3.7.1	激光医学	263
3.7.2	光动力诊断和治疗	264
3.7.3	光活检	266
3.7.4	低强度激光照射疗法	268
3.7.5	激光外科	268

3.7.6	激光美容与光子嫩肤 .....	269
3.7.7	激光治疗胸心血管病 .....	271
3.7.8	激光眼屈光矫正术 .....	273
3.7.9	激光生物组织焊接 .....	275
3.7.10	激光牙科 .....	275
3.7.11	医用 YAG 激光器与医用激光器辅助装置 .....	276
	参考文献 .....	277
<b>第四章</b>	<b>激光单元技术 .....</b>	<b>279</b>
4.1	Q 开关技术 .....	279
4.1.1	Q 开关激光器的输出功率和能量 .....	279
4.1.2	Q 开关激光器输出的光脉冲宽度 .....	280
4.1.3	Q 开关的参数 .....	280
4.1.4	转镜 Q 开关 .....	281
4.1.5	泡克耳斯盒 Q 开关 .....	283
4.1.6	克尔盒 Q 开关 .....	284
4.1.7	声光 Q 开关 .....	285
4.1.8	染料 Q 开关 .....	285
4.1.9	色心晶体 Q 开关 .....	286
4.1.10	受激布里渊散射 Q 开关 .....	286
4.1.11	薄膜 Q 开关 .....	287
4.1.12	自聚焦被动 Q 开关 .....	287
4.1.13	脉冲传输 (PTM) Q 开关 .....	287
4.1.14	各种 Q 开关的性能对比 .....	288
4.2	锁模 .....	288
4.2.1	能获得的极限脉冲宽度 .....	289
4.2.2	锁模的失谐 .....	289
4.2.3	自锁模 .....	290
4.2.4	主动锁模 .....	290
4.2.5	被动锁模 .....	293
4.2.6	碰撞锁模 .....	297
4.2.7	同步抽运锁模 .....	298
4.2.8	注入锁模 .....	299
4.2.9	相干叠加脉冲锁模 .....	299
4.3	脉冲压缩 .....	299
4.3.1	在腔内放棱镜压缩脉冲宽度 .....	300
4.3.2	用光纤压缩光脉冲宽度 .....	300
4.3.3	利用受激布里渊散射压缩脉冲宽度 .....	300
4.3.4	用电子学方法压缩脉冲宽度 .....	301
4.3.5	用切割脉冲方法产生窄宽度激光脉冲 .....	301
4.3.6	光脉冲整形技术 .....	302
4.3.7	激光焦斑光强均匀化技术 .....	307

4.3.8 阿秒相干光脉冲产生 .....	309
4.4 激光脉冲宽度测量 .....	310
4.4.1 用条纹照相机测量 .....	310
4.4.2 自相关测量法 .....	311
4.4.3 双光子荧光测量法 .....	312
4.4.4 二次谐波测量法 .....	312
4.4.5 利用半导体表面二次谐波测量 .....	313
4.4.6 双光子吸收自相关测量 .....	313
4.4.7 三阶自相关函数测量法 .....	314
4.4.8 用快速扫描自相关器测量 .....	314
4.5 激光频率稳定技术 .....	315
4.5.1 激光频率稳定性参数 .....	315
4.5.2 频率稳定度的统计处理 .....	316
4.5.3 频率稳定度的测量 .....	316
4.5.4 原子谱线中心稳频法 .....	317
4.5.5 分子吸收线稳频法 .....	317
4.5.6 利用塞曼分裂稳频法 .....	318
4.5.7 利用纵向塞曼拍频曲线稳频法 .....	319
4.5.8 被动腔稳频法 .....	319
4.5.9 色散稳频法 .....	319
4.5.10 双光束干涉稳频法 .....	320
4.5.11 偏振稳频法 .....	320
4.5.12 偏频锁定稳频 .....	320
4.5.13 双频锁相稳频 .....	320
4.5.14 Pound-Drever 稳频技术 .....	321
4.6 选模 .....	321
4.6.1 选横模方法 .....	321
4.6.2 选纵模方法 .....	323
4.6.3 选单频方法 .....	325
4.7 激光放大技术 .....	326
4.7.1 激光放大器速率方程 .....	326
4.7.2 矩形脉冲激光放大器的功率增益 .....	327
4.7.3 矩形脉冲激光放大器的能量增益 .....	328
4.7.4 洛伦兹形脉冲激光放大器的功率增益 .....	329
4.7.5 再生放大 .....	329
4.7.6 多通路光放大 .....	330
4.7.7 自注入再生放大 .....	330
4.7.8 啁啾脉冲放大 .....	331
4.7.9 光放大器 .....	332
4.7.10 光再生脉冲放大器 .....	332
4.7.11 超短光脉冲放大器 .....	333

4.7.12	脉冲光纤放大器 .....	333
4.7.13	光抽运固体激光放大器噪声因数 .....	334
4.7.14	引起飞秒激光放大脉冲展宽因素 .....	334
4.7.15	光栅对脉冲展宽器和压缩器 .....	335
4.8	激光光谱技术 .....	337
4.8.1	激光发射光谱 .....	337
4.8.2	激光荧光光谱 .....	337
4.8.3	激光吸收光谱 .....	338
4.8.4	激光偏振光谱 .....	339
4.8.5	激光分子双共振光谱 .....	340
4.8.6	光热偏转光谱 .....	341
4.8.7	激光感生荧光光谱 .....	341
4.8.8	激光光电流光谱 .....	342
4.8.9	激光声光光谱 .....	342
4.8.10	相干反斯托克斯拉曼光谱 .....	343
4.8.11	激光皮秒光谱 .....	343
4.8.12	量子拍光谱 .....	344
4.8.13	激光波长的测量 .....	345
4.8.14	利用光电流效应测定分子激光器的选支激光波长 .....	345
4.8.15	激光大气衰减 .....	346
4.9	激光调制技术 .....	346
4.9.1	激光调幅 .....	347
4.9.2	激光调频 .....	347
4.9.3	激光调相 .....	348
4.9.4	直接调制 .....	348
4.9.5	电光调制 .....	348
4.9.6	声光调制 .....	349
4.9.7	磁光调制 .....	350
4.9.8	吸收调制 .....	351
4.10	光电子元件 .....	351
4.10.1	调制器 .....	351
4.10.2	扫描器 .....	356
4.10.3	波长变换器 .....	358
4.10.4	激光束聚焦透镜 .....	358
4.10.5	光开关 .....	359
4.10.6	移相器 .....	361
4.10.7	空间滤波器 .....	363
4.10.8	软边光阑 .....	363
4.10.9	光学隔离器 .....	364
4.10.10	磁光隔离器 .....	364
4.10.11	全息光学元件 .....	365

4.10.12	编码光栅	366
4.10.13	光纤光栅	366
4.10.14	光强度衰减器	372
4.10.15	光电探测器	373
4.10.16	激光雷达	379
4.10.17	时间滤波器	383
4.10.18	频率鉴别器	383
4.10.19	电光偏转器	384
4.10.20	光束堆积器	385
4.11	光电材料	385
4.11.1	光电探测材料	385
4.11.2	光电存储材料	388
4.11.3	光电显示材料	390
4.11.4	光电转换材料	394
4.11.5	光学功能材料	396
4.12	激光能量测量	408
4.12.1	直接量热法测量能量	408
4.12.2	热电法测量能量	409
4.12.3	光电法测量能量	409
4.12.4	光化学法测量能量	410
4.12.5	光压法测量能量	411
4.12.6	其他方法	411
4.12.7	几种常用测量仪器	412
4.13	激光波长的测量	412
4.13.1	摄谱法测量波长	412
4.13.2	F-P 标准具测量波长	413
4.13.3	压力扫描 F-P 干涉仪测量波长	413
4.13.4	迈克耳孙干涉仪测量波长	413
4.13.5	多波长激光波长的测量	414
4.13.6	激光谱线宽度测量	414
4.13.7	软 X 波段谱仪定标	415
4.14	其他参数测量	416
4.14.1	光束质量因子 $M^2$ 测量	416
4.14.2	介质非线性折射率测量	417
	参考文献	418
	<b>第五章 激光器</b>	419
5.1	固体激光器	419
5.1.1	工作物质	419
5.1.2	固体工作物质的热透镜	426
5.1.3	固体激光器工作物质热负载	427
5.1.4	闪光灯抽运固体激光器	427

5.1.5	二极管抽运固体激光器 .....	436
5.1.6	太阳光抽运固体激光器 .....	444
5.1.7	流动固体激光器 .....	444
5.1.8	蓝绿光固体激光器 .....	444
5.1.9	腔内倍频固体激光器 .....	445
5.1.10	可调谐固体激光器 .....	445
5.1.11	Nd:YAG 激光器 .....	453
5.1.12	钕玻璃激光器 .....	462
5.1.13	红宝石激光器 .....	479
5.1.14	色心激光器 .....	486
5.1.15	其他玻璃激光器 .....	491
5.1.16	其他晶体激光器 .....	493
5.1.17	光参量振荡器 (OPO) .....	501
5.1.18	薄片激光器 .....	514
5.1.19	上转换激光器 .....	515
5.2	气体激光器 .....	516
5.2.1	亚稳态 .....	517
5.2.2	气体放电中亚稳态的激发机理 .....	518
5.2.3	氢氟激光器 .....	518
5.2.4	二氧化碳 (CO <sub>2</sub> ) 分子激光器 .....	529
5.2.5	准分子激光器 .....	563
5.2.6	一氧化碳 (CO) 分子气体激光器 .....	580
5.2.7	氮分子激光器 .....	584
5.2.8	水蒸气激光器 .....	587
5.2.9	氩离子激光器 .....	588
5.2.10	金属蒸气激光器 .....	593
5.2.11	毛细管放电抽运软 X 射线激光器 .....	600
5.3	自由电子激光器 .....	611
5.3.1	相对论电子束产生辐射的基本效应 .....	611
5.3.2	自由电子产生辐射的条件 .....	612
5.3.3	单摆方程 .....	612
5.3.4	电子束 .....	612
5.3.5	摆动器 .....	613
5.3.6	自由电子在线极化摆动器中的运动 .....	614
5.3.7	电子在圆极化摆动器内的运动 .....	614
5.3.8	粒子数反转 .....	615
5.3.9	激光器输出波长 .....	615
5.3.10	康普顿自由电子激光器 .....	615
5.3.11	切伦科夫自由电子激光器 .....	616
5.3.12	Smith-Purcell 自由电子激光器 .....	616
5.3.13	拉曼自由电子激光器 .....	617



5.3.14 非线性自由电子激光器 .....	618
5.3.15 沟道自由电子激光器 .....	618
5.4 半导体激光器 .....	619
5.4.1 工作物质 .....	619
5.4.2 半导体激光器的粒子数反转 .....	620
5.4.3 阈值振荡电流 .....	620
5.4.4 抽运方式 .....	621
5.4.5 共振腔 .....	622
5.4.6 激光器致冷方法 .....	622
5.4.7 欧姆接触 .....	623
5.4.8 增益系数 .....	623
5.4.9 激光器效率 .....	624
5.4.10 输出功率 .....	625
5.4.11 激光频谱 .....	625
5.4.12 极大波长调谐范围 .....	625
5.4.13 激光频率稳定性 .....	626
5.4.14 输出噪声 .....	626
5.4.15 光束强度空间分布 .....	627
5.4.16 振荡模 .....	627
5.4.17 退化 .....	628
5.4.18 使用寿命 .....	628
5.4.19 半导体激光调制 .....	629
5.4.20 蓝绿光半导体激光器 .....	630
5.4.21 中红外半导体激光器 .....	632
5.4.22 垂直腔面发射激光器 .....	632
5.4.23 半导体激光器列阵 .....	632
5.4.24 可调谐半导体激光器 .....	633
5.4.25 异质结半导体激光器 .....	633
5.4.26 分布反馈半导体激光器 .....	634
5.4.27 $C^3$ 激光器 .....	634
5.4.28 折射率导引半导体激光器 .....	635
5.4.29 增益导引半导体激光器 .....	635
5.4.30 量子阱半导体激光器 .....	636
5.4.31 超晶格激光器 .....	636
5.4.32 量子点激光器 .....	637
5.4.33 量子级联半导体激光器 .....	637
5.4.34 砷化镓半导体激光器 .....	638
5.4.35 超短脉冲半导体激光器 .....	638
5.4.36 自聚焦半导体激光器 .....	639
5.4.37 半导体激光放大器 .....	639
5.5 染料激光器 .....	639