

现代光学技术丛书

XIANDAI JIGUANG GONGCHENG
YINGYONG JISHU

现代激光工程 应用技术

◎ 朱林泉 牛晋川 朱苏磊 薛忠晋 著

本书
特色

1. 激光快速成形技术的最新进展;
2. 激光无线通信技术的进一步探索;
3. 激光应用具有的 latest 技术及特点;
4. 激光核聚变、激光驱雾和引雷等军事应用内容。



国防工业出版社

National Defense Industry Press

TN24
226
1-

现代光学技术丛书

现代激光工程应用技术

朱林泉 牛晋川 朱苏磊 薛忠晋 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书介绍了具有现代特征的几项激光应用技术,包括激光在军事技术中的应用,激光在医学中的应用,空间激光通信,激光快速成形,激光显示技术,激光引雷、驱雾、核聚变,以及激光加工技术等;此外,也对激光辐射原理、激光器件和激光技术作了必要介绍。

本书内容具有较鲜明的特色,涉及激光工程应用的各个领域,具有现代性、军工特色和跨学科的综合性。跨学科选择素材的目的是为了增加读者群的数量,各章相对独立的结构和内容又可随读者自行取舍。

本书适合于激光应用技术领域的工程技术人员使用,也可以作为相关专业的本科及研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代激光工程应用技术/朱林泉等著. —北京:国防工业出版社,2008.7

(现代光学技术丛书)

ISBN 978-7-118-05830-7

I. 现... II. 朱... III. 激光技术 IV. TN24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 098006 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

北京诚信伟业印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 15¼ 字数 374 千字

2008 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 33.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前 言

20 世纪 60 年代,激光器的诞生标志着量子光学由学术走向技术,使传统光学、近代光学进入现代光学和光子学的新世纪。激光器的发明是 20 世纪最重大的成就之一,被认为是继原子能、半导体、计算机之后的又一重大发明。计算机延伸了人的大脑,而激光延伸了人的五官,激光是探索自然奥秘的超级“探针”,激光开始了光学领域一场新的革命。

从另一方面来说,激光技术与其他各学科紧密相关,它是一门最不吝啬的科学,在人类科技发展的大系统中扮演着“支撑”的角色,成为推进其他高新技术发展的“助推器”,也是促进国民经济增长的“刺激剂”。激光技术在其他各学科中的支撑作用形成了领域广袤、内容丰富的激光应用技术,半个世纪以来,国内外激光应用技术取得了飞速发展,形成鲜明的时代性和跨学科的综合性的。

激光应用技术的迅速发展使得相关著作和教材的更新明显滞后。目前,国内已有的著作和教材有的出版较早,有的则是侧重在某一方面的应用,使读者不能对激光应用技术有较全面的了解。因此,出版符合时代性和跨学科综合性的著作和教材势在必行。

本书内容同国内同类书籍相比具有较鲜明的特色,其现代性、军工特色和跨学科的综合性在书中体现得清晰可见。

一是现代性,书中介绍的激光应用技术具有“新”的特点。科学技术的迅速发展不仅促进了经济的繁荣和社会的进步,而且丰富和发展了各门学科,科学技术之间的交叉融合迅速产生了科学技术新的聚集,激光应用的新领域几乎都是交叉学科,是在各单元技术的发展基础上应运而生,因此具有鲜明的时代特征。

二是军工特色,除了“激光在军事技术中的应用”一章外,激光快速成形技术、激光无线通信、激光显示等内容无一不是突出了它们的军事应用。还选用了激光引雷、驱雾和激光核聚变等内容,突出了“现代”和“军工”特色。

三是跨学科的综合性的,本书跨学科地选择素材,可以增加读者群的数量,各章相对独立的结构和内容又可随读者自行取舍。

本书主要内容是我们相关科研成果和学术成果的归纳和总结,如第 4 章激光在医学中的应用、第 6 章激光快速成形技术、第 7 章激光显示技术以及第 8 章激光材料加工等的某些内容都有研究课题做支撑,其中大部分实现了技术的转化,有的获得了省部级的科技进步奖。在此,作者向课题组的所有同事表示诚挚的感谢,他们卓有成效的研究工作为本书的撰写奠定了基础,同时,他们有些学术成果也被本书作为重要文献加以引用。需要说明的是,尽管本书有一些科学研究基础,但限于著者知识的深度和广度,对激光应用方面

更多的内容实难做到广收博览、面面俱到,书中难免存在不足之处,恳请专家和读者不吝指正。

在本书撰写过程中还参考了有价值的外文文献,包括期刊论文和学位论文等。这些论文所具有的坚实宽广的基础理论和专门知识,使作者在引用中受益匪浅,在这里对这些文献的作者表示诚挚的感谢。

最后,对在本书出版中给予评审、推荐的各位专家和编辑所做的辛勤工作和对我们的支持表示衷心的感谢。

朱林泉
2008年6月

目 录

第 1 章 激光与激光器	1
1.1 激光的特性	2
1.2 激光辐射原理	4
1.2.1 跃迁和辐射	4
1.2.2 激光器的基本构成	5
1.2.3 激活粒子的能级系统	6
1.2.4 激光输出模式	7
1.3 激光器的类型	9
1.3.1 气体激光器	9
1.3.2 固体激光器	12
1.3.3 染料激光器	15
1.3.4 半导体激光器	17
1.3.5 光纤激光器	24
第 2 章 激光技术	28
2.1 激光辐射的调制	28
2.1.1 激光辐射调制的原理	28
2.1.2 电光调制	32
2.1.3 声光调制	36
2.1.4 磁光调制	40
2.1.5 直接调制	43
2.2 激光锁模技术	45
2.3 激光器的稳频	46
2.4 非线性光学	47
2.4.1 倍频效应(二次光学谐波效应)	48
2.4.2 光学混频	50
2.4.3 光学参量放大	51
2.4.4 光学参量振荡	52
2.4.5 自聚焦现象	53
第 3 章 激光在军事技术中的应用	54
3.1 激光测距	54

3.1.1	激光测距的优点	54
3.1.2	激光测距的分类	55
3.1.3	激光脉冲测距	55
3.1.4	连续波测距	57
3.1.5	对空高炮激光测距机	60
3.2	激光雷达	60
3.2.1	激光雷达的优点	60
3.2.2	激光雷达的功能	61
3.2.3	激光多普勒测速	62
3.2.4	四象限光电探测器和光电位置传感器	65
3.2.5	电荷耦合器件	71
3.2.6	其他激光雷达	74
3.3	激光制导和导航	74
3.3.1	制导控制系统分类	75
3.3.2	GPS/INS 复合制导	77
3.3.3	北斗星导航定位系统	78
3.3.4	激光制导	79
3.3.5	激光制导武器现状	81
3.3.6	使用制导技术的无人战斗平台	84
3.4	光电对抗	85
3.4.1	光电对抗概论	85
3.4.2	光电侦察告警技术	87
3.4.3	光电干扰技术	92
3.4.4	高能激光防空武器	94
第 4 章	激光在医学中的应用	96
4.1	激光与生物体的相互作用	96
4.1.1	生物体的光学特性	96
4.1.2	激光对生物体的作用	98
4.2	激光临床治疗	99
4.2.1	激光治疗的种类	99
4.2.2	激光眼科治疗	99
4.2.3	皮肤科及整形外科激光治疗	101
4.2.4	光化学治疗	103
4.3	激光在生物体检测及诊断中的应用	104
4.3.1	激光生物体光谱测量及诊断	104
4.3.2	激光断层摄影	105
4.3.3	激光显微镜	107
4.3.4	视网膜检测中的自适应光学技术	108

4.3.5	人眼视力 CCD 测量技术	110
4.4	医用激光装置	112
4.5	医用光纤	113
4.5.1	实心光纤	114
4.5.2	空心光纤	115
4.5.3	成像光纤束(内窥镜)	116
4.6	国内外激光医疗技术的现状	117
第 5 章	激光通信	120
5.1	光通信发展的历史	120
5.2	信号调制、传输和接收	121
5.2.1	信号取样、编码和调制	121
5.2.2	光通信的激光光源	122
5.2.3	传输和接收	129
5.3	光纤通信	131
5.3.1	光纤通信系统的分类	132
5.3.2	光纤通信系统的基本组成	133
5.3.3	光纤传输技术	134
5.3.4	多路通信	137
5.4	无线激光通信	141
5.4.1	微波通信与无线激光通信	141
5.4.2	无线激光通信的基本原理	143
5.4.3	空间无线激光通信进展	146
5.4.4	激光水下通信	149
第 6 章	激光快速成形技术	151
6.1	激光快速成形技术概述	151
6.1.1	激光快速成形技术的基本原理	151
6.1.2	激光快速成形技术的优点	152
6.1.3	激光快速成形技术的应用	152
6.1.4	激光快速成形技术的现状和发展方向	153
6.2	激光快速成形技术的工艺方法	155
6.2.1	立体印刷	155
6.2.2	分层实体制造	155
6.2.3	选择性激光烧结	156
6.3	振镜扫描激光烧结快速成形系统	156
6.3.1	折叠腔 CO ₂ 激光器	157
6.3.2	激光二极管指向器	157
6.3.3	振镜(检流计扫描器)	158

6.3.4	动态聚焦模块	159
6.4	激光二极管能量源 SLS RP 系统	161
6.4.1	LD 的光束特性	161
6.4.2	LD 光束的准直扩束技术	162
6.4.3	影响 LD 激光焦斑直径的因素	163
6.4.4	LD 激光焦斑功率密度和扫描速度分析	163
6.5	线扫描激光烧结快速成形系统	164
6.5.1	光学扩束器	164
6.5.2	光束变形和线束变长模块	167
6.6	高功率激光二极管阵列 SLS RPT 系统	169
6.6.1	高功率半导体激光器阵列	170
6.6.2	微柱面透镜阵列准直技术	170
6.7	反求工程与快速成形集成技术	171
6.7.1	反求工程概述	171
6.7.2	数据提取方法	172
6.7.3	RE 与 RPT 集成技术举例	175
6.8	金属零件激光直接快速成形技术及其应用	176
6.8.1	国外技术现状	177
6.8.2	国内技术现状	177
第 7 章	激光显示技术	179
7.1	色度学基础	180
7.1.1	颜色视觉	180
7.1.2	颜色匹配	181
7.1.3	CIE 标准色度系统	182
7.2	激光光源	188
7.2.1	激光光源的色度学优势	188
7.2.2	激光光源的特点	190
7.3	投影式激光显示技术	193
7.3.1	投影式 LDT 分类	193
7.3.2	LDT 中三基色激光的功率匹配	194
7.4	扫描式激光显示技术	195
7.4.1	扫描技术	196
7.4.2	双振镜二维扫描光栅的特征参数	200
7.4.3	混色技术	201
7.4.4	光强的声光调制和非线性校正	202
7.5	激光显示技术在军事上的应用	204
7.5.1	导弹防御系统激光显示模拟训练	204

7.5.2 靶场测试激光扫描技术	205
第8章 激光材料加工	207
8.1 激光加工用激光器	207
8.1.1 CO ₂ 激光器	207
8.1.2 YAG 激光器	208
8.1.3 激光加工用其他激光器	209
8.2 激光加工中的基本光学现象	212
8.2.1 激光模式与光子特性	212
8.2.2 光在金属表面的反射和吸收	214
8.2.3 单透镜聚焦	217
8.3 激光材料加工技术	218
8.3.1 激光打孔、切割与焊接	218
8.3.2 激光法制备纳米粉材料	225
第9章 激光引雷、驱雾和激光核聚变	227
9.1 激光引雷和驱雾	227
9.1.1 雷电的危害	227
9.1.2 常规防雷电	228
9.1.3 非常规防雷电	228
9.1.4 激光驱雾	229
9.2 激光核聚变	230
9.2.1 受控核聚变——能源家属中的新成员	230
9.2.2 磁约束核聚变(托卡马克)	231
9.2.3 激光约束(惯性约束)核聚变	231
参考文献	234

第1章 激光与激光器

激光在我国最初称为“莱塞”，即英语“Laser”的译音，而“Laser”是“light amplification by stimulated emission of radiation”的缩写，意思是“辐射的受激发射光放大”。20世纪60年代初，根据钱学森院士的建议，“Laser”被改称为“激光”或“激光器”。

世界上第一台激光器是美国科学家梅曼(T.H.Maiman)于1960年研究成功的。此前，许多著名科学家的卓越研究成就已经成为激光理论的主要物理基础或激光器的主要技术基础。光与物质之间的共振作用是激光器发光的物理基础。1900年，普朗克提出量子化假设，成功地解释了黑体辐射的实验规律。1913年波尔又利用量子化假设，成功地解释了氢原子光谱的实验规律。在此基础上，于1917年爱因斯坦首次提出了受激辐射的概念，40年后，这个概念在激光技术中得到了广泛的应用。

汤斯(C.Townes)和肖洛(A.Schawlow)对激光器谐振腔的结构作了卓有成效的研究。直到现在，即使激光器的种类已经很多，但汤斯和肖洛的构思仍是各类激光器的基本结构。有文献认为尽管世界上第一台激光器不是汤斯和肖洛研制出来的，但是他们所提出的基本概念和构想却被公认是对激光领域划时代的贡献。

在世界上第一台红宝石激光器问世不久，1960年年底，由工作在贝尔实验室的贾范发明了世界上第一台氦-氖(He-Ne)激光器，并且在其影响下产生出一系列气体激光器。此后，1962年出现了半导体激光器；1964年发明了第一台CO₂激光器；1965年发明了第一台YAG激光器；1968年开始发展高功率CO₂激光器；1971年出现了第一台商用1kWCO₂激光器。高功率激光器的研制成功，为激光应用技术的迅速发展创造了必不可少的前提条件。

我国第一台红宝石固体激光装置，是1961年在中国科学院长春物理光学精度机械研究所(简称长春光机所)成功运行的；第一台气体激光装置(He-Ne激光器)1963年也是在该所成功运行的。其后在该所相继研制成功了砷化镓半导体激光器、氟化钙激光器、钕玻璃激光器、转镜Q开关激光器等。长春光机所不愧为我国激光技术的摇篮，这与王大珩等老一辈光学专家的奠基性工作是分不开的。

虽然爱因斯坦在1917年就预言了受激辐射的存在，但在一般热平衡情况下，物质的受激辐射总是被受激吸收所掩盖，未能在实验中观察到。直至1960年，第一台红宝石激光器才面世，它标志了激光技术的诞生。从此激光技术的发展十分迅速，现已在几百种工作物质中实现了光放大或制成了激光器。激光的出现是对传统光源的一次革命，它应用于工业、农业、军事、交通、科研以至日常生活等几乎所有的国民经济领域。它大大丰富了传统光学的内容，并发展形成了数门、乃至数十门新型的边缘科学。

激光器的诞生标志着量子光学由学术走向技术，使传统光学、近代光学进入现代光学和光子学的新世纪。激光器的发明是20世纪最重大的成就之一，被认为是继原子能、半导体、计算机之后的又一重大发明。计算机延伸了人的大脑，而激光延伸了人的五官，激光是探索自然奥秘的超级“探针”，激光开始了光学领域一场新的革命。

随着激光技术的发展，各种科学与技术领域也纷纷应用激光并形成一系列新的交叉学科

和应用技术领域,包括信息光电子技术、激光医疗与光子生物学、激光加工、激光检测与计量、激光全息技术、激光光谱分析技术、激光(测污)雷达、激光化学、非线性光学、超快光子学、激光可控核聚变、激光武器等。自1964年以来到2005年,由于激光及其应用的创造性贡献,而先后获得诺贝尔物理学奖的科学家共有10人。

激光的应用进入了国民经济各部门、科学研究和军事领域。激光作为信息传递的手段,在光通信、光信息处理和存储、机器人视觉等方面得到广泛应用;激光作为一种能量的形式,在光改变物质的属性或对物质进行加工处理方面发挥着重要作用;激光对人类物质文明和精神文明方面的贡献也是不胜枚举;在科学研究中,利用激光本身的性质来探索和理解物质的结构和运动规律,激光在航天技术的研究中也扮演了一种支撑技术的角色。激光在军事领域的应用已经改变并将继续改变世界上局部战争的格局。

1.1 激光的特性

概括地说,激光有四大特性:高亮度、高方向性、高单色性和高相干性。它们之间不是互相独立的,而是互有联系。激光所具有的上述优异特性是普通光源望尘莫及的。

1. 激光的高亮度

光源的亮度 B 定义为光源单位发光表面 S 沿给定方向上单位立体角 Ω 内发出的光功率 P 的大小,即

$$B = \frac{P}{S\Omega} \quad (1.1)$$

式中: B 的单位为 $\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ 。

普通光源所发出的光是连续的,并且在 4π 立体角内传播,能量十分分散,所以亮度不高。如太阳光的亮度值约为 $2 \times 10^3 \text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$,而气体激光器的亮度值为 $10^8 \text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$,固体激光器的亮度更高,可达 $10^{11} \text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ 。这是由于激光器的光束截面面积 S 和立体发散角 Ω 都很小的缘故。

不仅如此,具有很高亮度的激光束经透镜聚焦后,能在焦点处产生数千摄氏度乃至上万摄氏度的高温,这就使其可能对几乎所有的材料进行加工。

2. 激光的高方向性

激光的高方向性主要指其光束的发散角小。光束的立体发散角为

$$\Omega = \theta^2 \approx \left(2.44 \frac{\lambda}{D}\right)^2 \quad (1.2)$$

式中: θ 为平面发散角; λ 为激光波长; D 为光束截面直径。

一般工业用高功率激光器输出光束的发散角为毫弧度(mrad)量级。

激光束的发散角主要是在激光器输出孔径处产生的衍射造成的,它还与振荡模式、腔长、工作物质等有关。基横模的发散角最小,横模的阶次越高,发散角越大。因此,适当的选横模技术,使激光器工作在基横模状态是有利于改善激光的方向性的。谐振腔越长,方向性越好。在各类激光器中,气体激光器的方向性最好,固体激光器次之,半导体激光器最差。

激光的高方向性使其能有效地传输较长的距离,同时还能保证聚焦后得到极高的功率密度;另外,高方向性可获得高的横向空间相干性。

M^2 是一个与发散角有关的、可以作为光束质量有用度量的几何因子,它定义为

$$M^2 = \pi \omega_0 \theta / \lambda \quad (1.3)$$

式中: ω_0 为激光束的束腰半径; θ 为平面发散角; λ 为激光波长。

3. 激光的高单色性

单色性常用 $\Delta\nu/\nu$ 或 $\Delta\lambda/\lambda$ 来表征,其中 ν 和 λ 分别为辐射波的中心频率和波长, $\Delta\nu$ 、 $\Delta\lambda$ 是谱线的宽度。原有单色性最好的光源是氪⁸⁶灯,其值为 10^{-6} 量级。而稳频激光器的单色性可达 $10^{-10} \sim 10^{-13}$ 量级,要比原有单色性最好的氪⁸⁶高几百万倍至几千万倍。

目前,单色性能最好的激光器是单纵模稳频气体激光器,如氦氖激光器,它的线宽可小至几赫。激光器的单色性还与振荡模式数及激光工作物质有关,多纵模激光器的单色性显然比单纵模激光器要差,固体激光器的单色性比气体激光器差,半导体激光器的单色性最差。使用选模技术和稳频技术对改善激光器的单色性能有重要意义。

激光的高单色性,即带宽小,在光通信中可减小色散,增大中继距离并提高通信容量;在激光显示技术中,它表征为光源的高饱和度。另外,高单色性可获得高的时间相干性。

4. 激光的高相干性

激光的相干性是在光的波动理论基础上描述光波各个部分的相位关系的,由于激光中每个光子的运动状态(频率、相位、偏振态、传播方向)都相同,因此是极好的相干光源,它的相干性能比普通光源要强得多,一般称激光为相干光,普通光为非相干光。相干性有时间相干性与空间相干性之分。

(1) 时间相干性。时间相干性是描述沿光束传播方向上各点的相位关系的。光源的时间相干性(或称纵向空间相干性)与单色性相联系。光源的谱线宽度 $\Delta\nu$ 越窄,相干时间 t_c 就越长,相干长度越长。相干长度为

$$L = ct_c = \frac{c}{\Delta\nu} \quad (1.4)$$

式中: c 为光速。

激光的谱线宽度非常窄,故它的时间相干性比普通光源要好得多。红宝石激光的相干长度为 8000mm, He-Ne 激光长度为 1.5×10^{11} mm, 而原有相干性最好的氪⁸⁶灯仅为 800mm。

(2) 空间相干性。空间相干性是描述垂直于光束传播方向的波面上各点之间的相位关系的,因此这里的空间相干性,主要是指横向空间相干性,它与光源的方向性相联系。对于普通光源来说,它所发出的光分属众多的模式,只有在一定空间范围中的光子才是相干的。因此,可以使用相干面积来描述光的空间相干性。相干面积为

$$S = \left(\frac{\Delta\lambda}{\theta} \right)^2 \quad (1.5)$$

对于激光来说,只有属于同一个横模模式的光子才是空间相干的,因此,激光的空间相干性由激光器的横模结构所决定。如果激光器是单横模,则它是完全空间相干的;如果激光器是多横模,则它的空间相干性能变差。此外,在叙述激光的方向性时,提到单(基)横模的方向性最好,横模阶次越高方向性越差,这表明激光的方向性越好,它的空间相干性程度就越高。

激光的相干性有很多重要应用,如使用激光干涉仪进行检测,比普通干涉仪速度快、精度高。用激光作为全息照相的光源,也是利用它的相干性能好的特点。

1.2 激光辐射原理

1.2.1 跃迁和辐射

玻尔在解释氢原子光谱实验规律时,将经典的理论与普朗克的能量量子化概念结合在一起,认为原子中的电子可以在一些特定的轨道上运动,处于定态,具有一定的能量。这样一来,每种原子就有一系列的与不同定态对应的能级,各能级间的能量不连续。当原子从某一能级吸收能量或释放能量,变成另一能级时,就称它产生了跃迁。

凡是吸收能量后从低能级到高能级的跃迁称为吸收跃迁,释放能量后从高能级到低能级的跃迁称为辐射跃迁。跃迁时所吸收或释放的能量一定等于发生跃迁的两个能级之间的能量差。如果吸收或辐射的能量都是光能,则此关系可表示为

$$E_2 - E_1 = h\nu \quad (1.6)$$

式中: E_2 、 E_1 分别为两个能级的能量; $h\nu$ 为吸收或释放的光子的能量。

爱因斯坦从辐射与原子相互作用的量子论观点出发提出,这个相互作用包括原子的自发辐射跃迁、受激辐射跃迁和受激吸收跃迁三种过程。在激光器的发光过程中,始终伴随着这三个跃迁过程。下面分别叙述这三个跃迁过程。

(1) 自发辐射跃迁。处于高能级 E_2 的原子自发地向低能级 E_1 跃迁,并发射出一个频率 $\nu = (E_2 - E_1)/h$ 的光子的过程称为自发辐射跃迁,如图 1.1 所示。

(2) 受激吸收跃迁。处于低能级 E_1 上的一个原子在频率 $\nu = (E_2 - E_1)/h$ 的辐射场作用下,吸收一个光子后向高能级 E_2 跃迁的过程称为受激吸收跃迁,如图 1.2 所示。

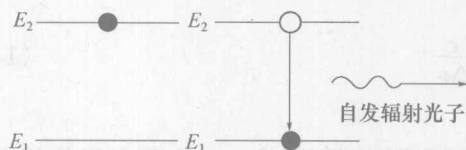


图 1.1 自发辐射跃迁

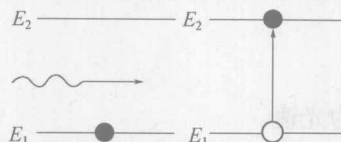


图 1.2 受激吸收跃迁

(3) 受激辐射跃迁。处于高能 E_2 上的原子在频率 $\nu = (E_2 - E_1)/h$ 的辐射场激励作用下,或在频率为 $\nu = (E_2 - E_1)/h$ 的光子诱发下,向低能级 E_1 跃迁并辐射出一个与激励辐射场光子或诱发光子的状态(包括频率、运动方向、偏振方向、相位等)完全相同的光子的过程称为受激辐射跃迁,如图 1.3 所示。

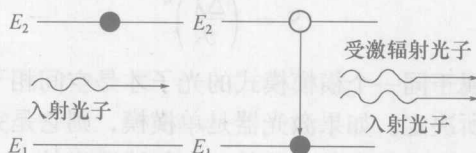


图 1.3 受激辐射跃迁

在受激辐射跃迁的过程中,一个诱发光子可以使处在上能级上的发光粒子产生一个与该光子状态完全相同的光子,这两个光子又可以去诱发其他发光粒子,产生更多状态相同的光

子。这样,在一个入射光子的作用下,可引起大量发光粒子产生受激辐射,并产生大量运动状态相同的光子,这种现象称为受激辐射光放大。由于受激辐射产生的光子都属于同一光子态,因此它们是相干的。

通常,受激辐射与受激吸收两种跃迁过程是同时存在的,前者使光子数增加,后者使光子数减少。当一束光通过发光物质后,究竟是光强增大还是减弱,要看这两种跃迁过程哪个占优势。在正常条件下,即常温条件以及对发光物质无激发的情况下,发光粒子处于下能级 E_1 的粒子数密度 N_1 大于处在上能级 E_2 的粒子数密度 N_2 。此时,当有频率 $\nu = (E_2 - E_1)/h$ 的一束光通过发光物质时,受激吸收将大于受激辐射,故光强减弱。如果采取诸如用光照、放电等方法从外界不断地向发光物质输入能量,把处在下能级的发光粒子激发到上能级上去,便可使上能级 E_2 的粒子数密度超过下能级 E_1 的粒子数密度,称这种状态为粒子数反转。

只要使发光物质处在粒子数反转的状态,受激辐射就会大于受激吸收。当频率为 ν 的光束通过发光物质,光强就会得到放大。即便没有入射光,只要发光物质中有一个频率合适的光子存在,便可像连锁反应一样,迅速产生大量相同光子态的光子,形成激光,这就是激光振荡器(简称激光器)的基本原理。由此可见,形成粒子数反转是产生激光或激光放大的必要条件,为了形成粒子数反转,须要对发光物质输入能量,称这一过程为激励、抽运或泵浦。

1.2.2 激光器的基本构成

通常的激光器都是由三部分组成的,即激光工作物质、泵浦源和光学谐振腔。

(1) 激光工作物质。为了形成稳定的激光,首先必须要有能够形成粒子数反转的发光粒子,称之为激活粒子。它们可以是分子、原子、离子或电子-空穴对。这些激活粒子有些可以独立存在,有些则必须依附于某些材料中。为激活粒子提供寄存场所的材料称为基质,它们可以是气体、固体或液体。基质与激活粒子统称为激光工作物质。

(2) 泵浦源。为了形成粒子数反转,须要对激光工作物质进行激励,完成这一任务的是泵浦源。不同的激光工作物质往往采取不同的泵浦源。例如,固体激光器一般是用普通光源(如氙灯)作泵浦源,对激光工作物质进行光照又称光泵。对于气体激光工作物质,常常是将它们密封在细玻璃管内,两端加电压,通过放电的方法来进行激励;另外,还有碰撞转移和化学反应等激励方式。

(3) 谐振腔。仅仅使激光工作物质处于粒子数反转状态,虽可获得激光,但它的寿命很短,强度也不会太高,并且光波模式多、方向性很差,这样的激光几乎没有什么实用价值。为了得到稳定持续、有一定功率的高质量激光输出,激光器还必须有一个光学谐振腔。它由放置在激光工作物质两边的两个反射镜组成,其中一个是全反射镜;另一个作为输出镜用,是部分反射、部分透射的半反射镜。光学谐振腔的作用主要有以下两个方面:

① 产生与维持激光振荡。光在粒子数反转的激光工作物质中传播时得到放大,由于有光学谐振腔的存在,一方面在它提供的光学正反馈作用下,腔内光子数因不断往返通过激光工作物质而被放大;另一方面由于谐振腔存在各种损耗(如输出损耗、衍射损耗、吸收与散射损耗等),腔内光子数又不断减少。当放大与衰减互相抵消时,就可以形成稳定的光振荡,输出功率稳定的激光。

② 改善输出激光的质量。由于激光束的特性与谐振腔的结构有着不可分割的联系,因此,可以通过改变腔参数的方法达到控制光束特性的目的,如提高激光的方向性、单色性、输出功率等。

1.2.3 激活粒子的能级系统

产生激光的必要条件是实现粒子数反转,而为了实现粒子数反转就必须要有适合的能级系统的激活粒子。在这些激活粒子的能级系统中,首先必须要有激光上能级和激光下能级,除此之外,往往还需有一些与产生激光有关的其他能级。常用激光器的激活粒子能级系统大致可分成两大类:三能级系统与四能级系统。

1. 三能级系统

图 1.4 是两种三能级系统的示意图。其中图 1.4 (a) 中的 E_1 为基态,作为激光下能级,泵浦源将激活粒子从 E_1 能级抽运到 E_3 能级, E_3 能级的寿命很短,激活粒子很快地经非辐射跃迁方式到达 E_2 能级。非辐射跃迁,是指不发射光子的跃迁,它是通过释放其他形式的能量(如热能)而完成的。 E_2 能级的寿命比 E_3 要长得得多,称为亚稳态,并作为激光上能级。只要抽运速率达到一定程度,就可以实现 E_2 与 E_1 两个能级之间的粒子数反转,为受激辐射创造了条件。例如,固体激光器中的红宝石激光器激活粒子——铬离子就属于这类能级系统。

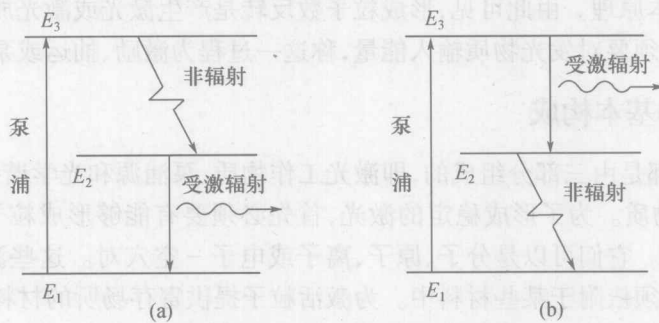


图 1.4 三能级系统

图 1.4(b) 中的 E_1 也是基态,但它不作为激光下能级,而是以 E_3 和 E_2 分别作为激光的上、下能级。在这种三能级系统里, E_3 的寿命比 E_2 要长, E_2 能级在热平衡条件下基本上是空的。因此,只要抽运一些粒子到达 E_3 能级,就很容易实现粒子数反转,经受激辐射后到达 E_2 的粒子可迅速通过非辐射跃迁的方式回到基态 E_1 。例如,气体激光器中的氩离子激光器的激活粒子——氩离子就属于此类能级系统。

2. 四能级系统

图 1.5 是两种四能级系统的示意图。其中图 1.5(a) 中的 E_1 是基态,泵浦源将激活粒子从基态抽运到 E_4 能级, E_4 能级的寿命很短,立即通过非辐射跃迁的方式到达 E_3 能级。 E_3 能级的寿命较长,是亚稳态,做激光上能级用。 E_2 能级的寿命很短,热平衡时基本上是空的,做激光下能级用。 E_2 能级上的粒子主要也是通过非辐射跃迁回到基态。这种能级系统也很容易实现粒子数反转。例如,固体激光器中的钕玻璃激光器以及掺钕钇铝石榴石激光器(YAG)中的激活粒子——钕离子便属于这类能级系统。

图 1.5(b) 中的 E_1 也是基态, E_4 和 E_3 分别为激光的上、下能级, E_2 能级是 E_3 与 E_1 之间的一个中间能级。 E_3 能级的寿命很短,当受激辐射的粒子由 E_4 能级到达 E_3 能级后,很快会通过非辐射跃迁跳到 E_2 能级,并再通过非辐射跃迁回到基态。只要泵浦源将基态粒子抽运到 E_4 能级,很容易就可以实现 E_4 与 E_3 能级间的粒子数反转。例如,气体激光器中氦氖激

光器的激活粒子——氦原子与二氧化碳激光器中的激活粒子——二氧化碳分子都是属于这类四能级系统。

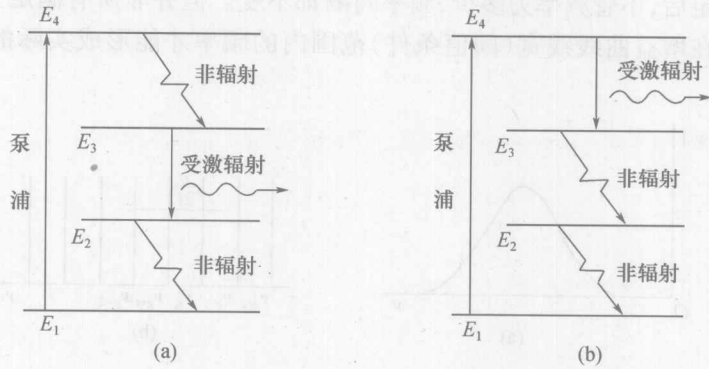


图 1.5 四能级系统

1.2.4 激光输出模式

激光器的输出有时是由许多独立的频率分量所组成,这些独立频率分量便称为模式。准确地讲,它是指能在腔内存在的、稳定的光波基本形式。稳定包含下列含义:

- (1) 有确定的频率;
- (2) 振幅在空间的相对分布是确定的、不随时间而改变;
- (3) 相位在空间的相对分布是确定的、不随时间而改变。

振荡模式常用 $TEM_{m,n,q}$ 来表示, m, n, q 可分别取 $0, 1, 2, \dots$ 整数。一组确定的 m, n, q 对应于一种模式,其中 m 和 n 表征该模式在垂直于腔轴的平面内的振幅分布情况,称横模阶数。在直角坐标系中, m 和 n 的数值分别是该模式在 x 轴和 y 轴上的节点数;在柱坐标系中, m, n 分别为径向和旋转角 θ 向的节点数, q 表示该模式在光腔轴向形成的驻波节点数目,称纵模阶数。 m, n, q 三者共同决定该模式的振荡频率。如在矩形腔中,设矩形腔 x 轴, y 轴, z 轴方向长度(长、宽、高)分别为 a, b, c ,则相应振荡频率为

$$\nu = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{q}{c}\right)^2}$$

1. 纵模

在一个谐振腔中,并非所有频率的电磁波都能产生振荡,只有频率满足一定共振条件的光波才能在腔内的来回反射中形成稳定分布和获得最大强度。这个共振条件就是相长干涉条件,即往返一次相位变化 $\Delta\varphi$ 为 2π 整数倍,即

$$\Delta\varphi = \frac{2n\pi}{\lambda} 2L = q2\pi \quad (q = 0, 1, 2, \dots)$$

从而

$$\nu_q = \frac{c}{2nL} q \quad (1.7)$$

式中: n 为腔内折射率; q 为纵模的阶数,由于 $\lambda \ll L$,故 q 一般很大; ν_q 为 q 阶纵模的振荡频率,相邻两纵模间的频率间隔为