

# 激光原理与全息技术

主编 龚勇清 何兴道



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 激光原理与全息技术

主 编 龚勇清 何兴道  
副主编 万生鹏 方利华  
罗宁宁 李 禾 郑初华

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书以激光原理、激光技术、激光器件为基础,并系统阐述了激光全息技术的基础理论和基本知识,同时对其在全息图复制、全息云纹干涉技术、光折变晶体的全息存储以及二元光学与光刻技术等方面的应用做了广泛的介绍。

本书共分11章,第1章~第4章主要介绍激光的基本原理、激光技术与器件。第5章~第7章是光全息学的原理、体积全息图、彩虹全息及全息图的复制。第8章~第10章为主要应用部分,包括高温云纹干涉技术、光折变晶体全息存储、二元光学与光刻技术等方面的内容。第11章为激光全息技术的基本实验。

本书可作为光电信息工程专业和电子科学与技术专业的本科教材,亦可作为光学工程专业的研究生教材以及大专院校相关专业师生的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

※

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100048)  
天利华印刷装订有限公司印刷  
新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 13½ 字数 304 千字  
2010年8月第1版第1次印刷 印数 1—4000册 定价 23.00元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422  
发行传真:(010)68411535

发行邮购:(010)68414474  
发行业务:(010)68472764

# 前 言

自激光器问世至今已近半个世纪,激光与计算机被人们并称为 20 世纪的重大研究成果。近 50 年来,激光发展十分迅速,并已在人民生活各领域产生了不可磨灭的影响。介绍并普及激光知识,对于推动我国知识创新、科技创新的进程,提高我国人民的高新技术水平都是非常重要的。激光不仅仅是一门科学,而且是一种实实在在的能推动生产力发展、提高综合国力、加强国防、改善人民生活的重要产业之一。

激光器的发明出人意料地引出了光学中的另一支灿烂“鲜花”,这就是全息技术。当人们观看到色彩绚丽、栩栩如生的全息图像时,无不对激光全息技术的魅力表示惊讶。全息技术在科学技术上的应用也扩展到实时全息干涉自动测量、光学图像实时处理、光存储、光计算、光显示等方面的新技术应用领域。全息技术作为光学中一门新兴的交叉学科,它的迅速发展和广泛应用,日益引起科技工作者的重视,也必将在高科技发展中产生深远的影响。

本书是作者 20 多年来在光学工程专业从事激光全息技术教学、实验和科研的基础上编写的。本书的参考学时数为 64 学时(含实验)。全书共分 11 章,第 1 章~第 4 章主要介绍激光的基本原理、激光技术与器件。第 5 章~第 7 章是光全息学的原理、体积全息图、彩虹全息及全息图的复制。第 8 章~第 10 章主要为应用部分,包括高温云纹干涉技术、光折变晶体全息存储、二元光学与光刻技术等方面的内容。第 11 章为激光全息技术的基本实验。

本书的第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 5 章、第 7 章由龚勇清编写,第 4 章由万生鹏编写,第 6 章由何兴道编写,第 8 章、第 9 章、第 10 章和第 11 章分别由李禾、方利华、罗宁宁和郑初华编写。颜丽华和徐冉冉为本书编辑了大量的公式和图。

由于作者水平有限,加之编写时间偏紧,书中难免存在缺点和不妥之处,希望读者批评指正。

编者

2010 年 6 月

# 目 录

第 1 章 激光的基本原理 .....	1
1.1 激光器的设想和实现 .....	1
1.1.1 爱因斯坦的受激辐射概念 .....	1
1.1.2 微波激射器的发明 .....	1
1.1.3 梅曼与世界第一支激光器 .....	2
1.1.4 氦氖激光器的诞生 .....	3
1.2 激光的基本概念与特性 .....	3
1.2.1 激光的基本概念 .....	3
1.2.2 激光的特点 .....	4
1.2.3 光与物质的相互作用 .....	6
1.3 激光振荡的基本原理和基本条件 .....	8
1.3.1 激光器的基本结构 .....	8
1.3.2 激光振荡原理 .....	8
1.3.3 激光纵模振荡与横模振荡 .....	9
1.3.4 辐射与物质相互作用的定量分析 .....	10
1.4 辐射与物质相互作用的定量分析 .....	12
1.4.1 光谱线的加宽与线型函数 .....	12
1.4.2 光谱线的自然加宽、碰撞加宽和多普勒加宽 .....	13
1.4.3 光谱线的均匀加宽、非均匀加宽和综合加宽 .....	14
第 2 章 光学谐振腔 .....	17
2.1 光在介质中的放大 .....	17
2.1.1 光子态与光子简并度 .....	17
2.1.2 实现光放大的条件 .....	18
2.1.3 实现抽运的几种方法 .....	18
2.1.4 多能级系统 .....	19
2.1.5 光的自激振荡 .....	21
2.2 激光模式与谐振腔的限模 .....	23
2.2.1 驻波和纵模 .....	23
2.2.2 谐振腔的限模作用 .....	24
2.2.3 光学谐振腔的损耗和 $Q$ 值 .....	25
2.2.4 光学谐振腔各种损耗的计算 .....	26
2.3 光学谐振腔 .....	28

2.3.1	光学谐振腔的类型和结构	28
2.3.2	光学谐振腔的稳定条件	30
2.3.3	谐振腔的特征光束	34
2.3.4	多镜腔的稳定性	35
2.3.5	共焦腔的行波场与模体积	37
2.4	横模选择	38
<b>第3章</b>	<b>激光器的的工作原理</b>	<b>41</b>
3.1	振荡阈值	41
3.1.1	激光振荡的阈值条件	41
3.1.2	烧孔现象	43
3.1.3	兰姆凹陷	44
3.2	纵模模式竞争	44
3.2.1	均匀加宽的模式竞争	44
3.2.2	空间烧孔现象	45
3.3	单模激光器的线宽极限	46
3.4	激光器的频率牵引效应	47
3.4.1	模牵引效应	47
3.4.2	纵模选择	48
3.5	脉冲激光器的工作原理	50
3.5.1	脉冲激光器工作方式	50
3.5.2	调Q激光器	50
3.5.3	调Q的方法	51
3.6	锁模激光器	53
3.7	氦氖激光器的稳频	54
<b>第4章</b>	<b>典型激光器件</b>	<b>56</b>
4.1	气体激光器	56
4.1.1	氦氖激光器	56
4.1.2	离子激光器	59
4.1.3	分子激光器	61
4.2	固体激光器	63
4.2.1	红宝石激光器	63
4.2.2	其他常用的固体激光器	66
4.3	半导体激光器	67
4.4	其他激光器	69
<b>第5章</b>	<b>激光全息学原理</b>	<b>71</b>
5.1	概述	71
5.1.1	全息术的发明及应用	71
5.1.2	全息照相与普通照相的区别	72
5.1.3	全息照相的特点	73

5.2	全息照相的基本原理	74
5.2.1	参考光为平面光波的全息照相	74
5.2.2	参考光为球面光波的全息照相	75
5.3	全息图的类型	77
5.3.1	按物体与记录介质的位置关系分类	77
5.3.2	按记录介质分类	78
5.3.3	按被照物体的种类分类	79
5.4	全息记录介质	79
5.4.1	基本物理量的概念	79
5.4.2	卤化银乳胶	82
5.4.3	重铬酸盐明胶	85
5.4.4	光致抗蚀剂	87
5.4.5	光折变材料	88
5.4.6	其他全息记录材料	91
<b>第6章</b>	<b>体积全息图</b>	<b>93</b>
6.1	体积全息图的几何分析	93
6.1.1	体积全息图与平面全息图的区别	93
6.1.2	透射体积全息图	94
6.1.3	反射全息图	95
6.2	体积全息图的衍射效率	96
6.2.1	透射体积全息图衍射效率	96
6.2.2	反射体全息图的衍射效率	97
6.3	反射全息图的记录与再现	98
6.3.1	非涅耳型反射全息图	98
6.3.2	像面全息图	99
6.3.3	多重记录的反射全息图	101
6.4	体积全息图再现像的像质	102
6.4.1	厚银盐干板	102
6.4.2	重铬酸盐明胶	102
<b>第7章</b>	<b>彩虹全息及全息图的复制</b>	<b>103</b>
7.1	概述	103
7.1.1	彩虹全息	103
7.1.2	彩虹全息的发展	103
7.2	二步彩虹全息	104
7.2.1	二步彩虹全息的原理和方法	104
7.2.2	二步彩虹全息的像质分析	105
7.3	一步彩虹全息	107
7.3.1	一步彩虹全息的原理和方法	107
7.3.2	像散彩虹全息	108

7.3.3	彩虹全息的应用	110
7.4	基于多角度再现的分层次一步彩虹全息	111
7.4.1	改进的一步彩虹全息记录方法	111
7.4.2	多重记录、分层次的实现	112
7.4.3	实现多重记录分层次的途径	113
7.4.4	光路参数设计与结果	114
7.5	全息图的复制	114
7.5.1	概述	114
7.5.2	激光复制	115
7.5.3	模压全息复制技术	116
<b>第8章</b>	<b>激光全息云纹干涉</b>	<b>120</b>
8.1	全息云纹干涉法的研究与发展	120
8.1.1	全息云纹干涉法的特点	121
8.1.2	微云纹干涉技术在新世纪的展望	121
8.1.3	云纹干涉技术在航空科技上的发展	122
8.2	全息云纹干涉法测试原理	122
8.2.1	全息云纹干涉法原理	122
8.2.2	云纹干涉法的实验设备	127
8.3	试件准备及零厚光栅的制备	127
8.3.1	试件研磨与抛光	128
8.3.2	试件栅的制作	128
8.4	合金材料的弹性模量和泊松比的测量	131
8.4.1	云纹干涉法测定合金材料的弹性模量和泊松比	131
8.4.2	合金材料的弹性模量和泊松比的测试	132
8.4.3	数据分析与误差分析	134
8.5	平面应变 $K_{IC}$ 法	137
8.5.1	断裂韧性的测试实验原理	137
8.5.2	金属材料平面应变断裂韧度 $K_{IC}$ 试验法	138
8.6	激光散斑干涉技术	143
8.6.1	散斑技术及其发展	143
8.6.2	散斑干涉原理	143
8.6.3	散斑干涉的记录与应用	144
<b>第9章</b>	<b>光折变晶体的全息存储</b>	<b>146</b>
9.1	信息与光学信息存储	146
9.1.1	信息与信息存储	146
9.1.2	光信息存储	146
9.1.3	光折变晶体全息存储的一般特点	147
9.1.4	光信息存储技术简介	149
9.2	全息存储系统	150



9.2.1	体积全息存储原理	150
9.2.2	体全息存储系统的单元器件	151
9.3	光折变全息存储的复用技术	153
9.3.1	体光栅的角度选择性	153
9.3.2	光折变全息存储的复用技术	155
<b>第10章</b>	<b>二元光学与光刻技术</b>	<b>157</b>
10.1	DMD在衍射光学元件制作上的应用	157
10.1.1	DMD的工作原理	157
10.1.2	光刻制作工艺概述	160
10.2	光刻工艺	161
10.2.1	基片预处理	161
10.2.2	涂胶	162
10.2.3	蚀刻与去胶	163
10.3	一种二元光学元件阵列微芯模的工艺设计	164
10.3.1	二元光学器件的制作方法	164
10.3.2	DMD工作原理	165
10.3.3	DMD实验	165
<b>第11章</b>	<b>激光全息技术的基本实验</b>	<b>169</b>
11.1	全息照相的一般装置	169
11.1.1	防震平台	169
11.1.2	常用光学元件	170
11.2	全息技术基本实验	171
实验一	漫反射体全息照相	171
实验二	反射全息图	174
实验三	一步彩虹全息	177
实验四	全息光栅的拍摄与复制	179
实验五	光栅光谱仪实验	182
实验六	氦氛激光器系列实验	187
实验七	光纤信息综合实验	193
实验八	全息存储	200
<b>参考文献</b>		<b>204</b>

# 第 1 章 激光的基本原理

自激光问世至今已有近 50 年了,有人将激光与计算机并称为 20 世纪的重大研究成果。40 多年来,激光发展十分迅速,激光器件已经形成了数千亿美元的全球产业,并已在人民生活各领域产生了不可磨灭的影响。介绍当代激光的主要成就,更广泛更深入地普及激光知识,对于推动我国知识创新、科技创新的进程,加速各行业现代化步伐,提高我国人民的高新技术水平都是极其重要的。激光不仅仅是一门科学,而且是一种实实在在的能推动生产力发展、提高综合国力、加强国防、改善人民生活的重要产业之一。

本章介绍激光的发展史、基本概念、参数、特点、种类、重要技术及激光产业等,试图描述激光大家庭的概况。激光在各行各业的应用,包括激光在光电信息技术、材料加工、生物医学和生命科学、激光检测、军事安全、环保监测、文体展示、光通信和邮政等领域的应用,难以一览无遗,但任何一个成功的运用,都是综合应用当代各种科学技术的结果,而不仅仅是应用激光就能做到的,但正是由于采用了激光,才使这些应用产生了巨大的经济效益和社会效应。

## 1.1 激光器的设想和实现

激光科学是 20 世纪以后发展起来的一门新兴科学技术。它是现代物理学的一项重大成果,是量子理论、无线电电子学、微波波谱学以及固体物理学的综合产物,也是科学与技术、理论与实践紧密结合的灿烂成果。激光科学从它的孕育到初创和发展,凝聚了众多科学家的创造智慧。现代光学就是指 20 世纪 60 年代激光出现以后光学的新进展,其中包括激光科学、量子光学、激光光谱学、非线性光学、全息技术、信息光学等方面。

### 1.1.1 爱因斯坦的受激辐射概念

爱因斯坦早在 1916 年就奠定了激光的理论基础。不过,爱因斯坦并没有想到利用受激辐射来实现光的放大。直到 1933 年,在研究反常色散问题时才触及到光的放大。

1946 年,瑞士科学家布洛赫(F. Block)在斯坦福大学研究核磁感应,实验中他和他的合作者观察到了粒子数反转的信号。布洛赫并没有把这一新现象联系到粒子集居数问题,更没有想到要利用这一现象来实现粒子数反转。1949 年,法国物理学家卡斯特勒(A. Kastler)发展了光泵方法。所谓光泵,实际上就是利用光辐射改变原子能级集居数的一种方法。为此他获得了 1971 年诺贝尔物理学奖。

### 1.1.2 微波激射器的发明

汤斯(C. H. Townes)1939 年在加州理工学院获得博士学位后进入贝尔实验室。他设

想如果将介质置于谐振腔内,利用振荡和反馈,信号就可以放大。汤斯把他的研究组成员召集起来,开始按他的新方案进行工作。这个组的成员有博士后齐格尔(H. J. Zeiger)和博士生戈登(J. P. Gordon)。后来齐格尔离开哥伦比亚,由中国学生王天眷接替。汤斯选择氨分子作为激活介质,这是因为他从理论上预见到,氨分子的锥形结构中有一对能级可以实现受激辐射,跃迁频率为23870MHz。从1951年开始,汤斯小组历经两年的试验,花费了数十万美元。1953年的一天,汤斯正在出席波谱学会议,戈登急切地奔入会议室,大声呼叫道:“它运转了。”这就是第一台“微波激射放大器”。英文名为“Microwave Amplification by Stimulated Emission Radiation”,简称MASER(脉塞)。1958年,许多物理学家活跃在分子束微波波谱学和微波激射器的领域里,他们自然会想到,既然微波可以量子放大,为什么不能推广到可见光,实现光的放大?

最先发表激光器的详细方案是汤斯和肖洛(A. L. Schawlow)。1957年他们开始考虑“红外和可见光激射器”的可能性。肖洛和汤斯的论文《红外区和光学激射器》1958年12月在《物理评论》上发表后,引起强烈反响。这是激光史上有重要意义的历史文献。在肖洛和汤斯的理论的指导下,许多实验室开始研究如何实现光学激射器,纷纷致力于寻找合适的材料和方法。汤斯和他的小组也在用钾进行实验。在贝尔实验室,肖洛开始研究把红宝石当作工作介质的激光器,他认为:“在气体中所做到的任何事情,在固体中都能做得更好。”但是他误以为红宝石的R线(红谱线)不适于产生激光。肖洛没有做成红宝石激光器,却启示梅曼做出了第一支激光器。

### 1.1.3 梅曼与世界第一支激光器

梅曼(Theodore Harold Maiman)是美国休斯研究实验室量子电子部年轻的负责人。他于1955年在斯坦福大学获博士学位,研究的正是微波波谱学。梅曼能在红宝石激光器首先作出突破,并非偶然,因为他已有用红宝石进行微波激射器的多年经验,他预感到红宝石作为激光器的可能性,这种材料具有相当多的优点,例如能级结构比较简单、机械强度高、体积小、无需低温冷却等。他重新测量了红宝石的量子荧光效率,竟然意外发现其荧光效率达到75%。通过计算,他还认识到最重要的是要有高色温(大约5000K)的激励光源,于是决定利用氙(Xe)灯。他把红宝石棒插在具有螺旋状结构的氙灯管中,红宝石棒直径大约为1cm,长为2cm,红宝石两端真空蒸镀银膜,银膜中部留一小孔,让光逸出,如图1-1所示。就这样,梅曼经过9个月的奋斗,花了5万美元,在1960年5月做出了第一台激光器。梅曼后来在《纽约时报》上宣布了这一消息,并将论文寄到英国的《自然》杂志去发表。第二年,《物理评论》发表了他的详细论文。

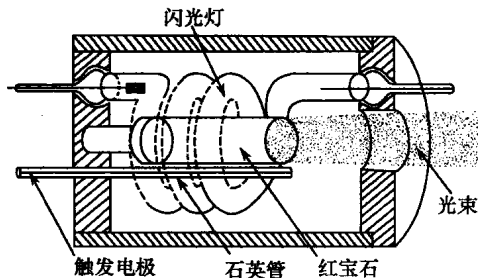


图1-1 红宝石激光器

### 1.1.4 氦氖激光器的诞生

氦氖激光器是20世纪60年代至80年代广泛使用的一种激光器。它是紧接着固体激光器出现的一种以气体为工作介质的激光器。它的诞生首先应归功于多年对气体能级进行测试分析的实验和理论工作者。汤斯的另一名研究生是来自伊朗的贾万(A. Javan), 1954年他以微波波谱学的研究获博士学位后, 就留在哥伦比亚大学任教。贾万的基本思路是利用气体放电来实现粒子数反转, 他认为这要比光泵方法更有效, 因为这是气体而不是固体。1959年贝尔实验室的英国学者桑德尔斯(J. H. Sanders)和贾万同时发表了用电子碰撞激发原子的理论。不过, 贾万考虑得更深入、更具体, 他在分析了各种碰撞情况后, 提出可以由两种原子的混合气体来实现粒子数反转, 并且推荐了氦-汞和氦-氖两种方案。

贾万最初得到的激光束是红外谱线 $1.15\mu\text{m}$ 。氦有许多谱线, 后来通用的是 $6328\text{\AA}$  ( $1\text{\AA}=0.1\text{nm}$ )。贾万和他的合作者在直径 $1.5\text{cm}$ 、长 $80\text{cm}$ 的石英管两端贴有蒸镀13层介质膜的镜片, 放在放电管中, 用射电频率进行激发。在1960年12月12日终于获得了红外辐射。1962年, 贾万转到麻省理工学院任教。实验工作由他的同事怀特(A. D. White)和里顿(Rigden)继续进行, 他们获得了 $6328\text{\AA}$ 的激光束。氦氖激光器不仅第一次实现了激光束的连续输出, 另一方面, 也证明了可以用放电方法产生激光, 只要在两种不同的工作介质中选定适当的能级, 就有可能实现光的放大, 为激光器的发展展示了多种渠道的可能性。然而, 真正为光学激射器起名叫LASER的, 却是哥伦比亚大学当博士研究生的古尔德(Gorden Gould)。1957年10月, 他取自英文“Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”(靠辐射受激发射的光放大)的首字母缩写。

## 1.2 激光的基本概念与特性

### 1.2.1 激光的基本概念

可毫不夸张地说, 激光已成为信息时代的核心。在DVD影碟机中, 在计算机的光驱中(帮助读出光盘信息), 在激光打印机中, 在通信系统中的激光二极管(LD); 还有激光切割、焊接、打标、打孔、光刻等激光加工, 医院里激光美容、整容; 在军事上, 激光制导炸弹、测量距离、跟踪目标; 甚至节日里各色激光划破夜空, 在舞厅、体育馆等公众场所, 激光显示各种图案, 五彩缤纷。

一般情况下, 普通光源(自然光或称荧光)发出的光, 光子与光子之间, 毫无关联, 即频率(或波长)、相位、偏振方向、传播方向并不一样。而在激光光束中, 所有光子都相互关联, 它们的频率、相位、偏振方向、传播方向均一致。如一支纪律严明的光子队列, 行动一致, 因而有极强的“战斗力”。

20世纪50年代末, 制造激光器提出的方案主要有:

汤斯和肖洛: 用碱金属蒸气(K和Ce)作激光物质, 金属气体放电灯作泵浦源。

贾万: 用氦氖混合气体作激光物质, 采用气体放电将He、Ne原子激发到高能级。

梅曼: 用人造红宝石晶体作激光器工作物质, 用氙灯作泵浦源。结果后者于1960年

首先获得成功,制成了世界上第一台激光器。实际上后来三种方案均获得成功,制成了碱金属激光器和 He - Ne 激光器。

1961 年,我国也研制成功了这种 He - Ne 激光器,但当时叫法很多:“莱塞”、“雷射”(中国台湾、中国香港、东南亚等一些地区和国家沿用至今)、“光受激发射放大器”、“光激光器”、“光量子放大器”、“光量子振荡器”等,不利于学术交流。1964 年 12 月,科学家钱学森给《光受激辐射》杂志写信,建议将其称作“激光”,以后统一使用激光、激光器等名称。

激光就是由受激辐射产生的光,激光光束所有光子都是相互关联的,它们的频率一致、相位一致、偏振与传播方向一致,因此,激光是单色性好、方向性好、亮度极高的光源。

## 1.2.2 激光的特点

经过了 40 多年的发展,世界上已经出现很多种类的激光器,但它们具有一些共同的特点。

### 1. 单色性好

光是一种电磁波。一个光源发射的光谱线宽度越窄,其颜色越单纯,即光源的单色性越好。

例:激光出现之前,最好的单色光源是氪灯,在  $\lambda = 6047 \text{ \AA}$  处,  $\Delta\lambda = 0.0047 \text{ \AA}$ ; 而 He - Ne 激光器的  $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ ,  $\Delta\lambda = 1 \times 10^{-7} \text{ \AA}$ 。分别比较其单色性:

$$\begin{cases} \text{Kr: } \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 7.8 \times 10^{-7} \\ \text{He - Ne: } \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 1.6 \times 10^{-11} \end{cases}$$

其对应的相干长度分别为  $0.78 \text{ m}$  (Kr) 和  $4 \times 10^4 \text{ m}$  (He - Ne)。

目前,由不同的激光物质产生的激光谱线已多达上万条,覆盖从紫外到远红外的光谱范围,可以满足不同的应用需要,有些激光器的波长还能通过各种方法调谐,能在一定的波长范围产生窄线宽激光。近年来,激光波长已扩展到软 X 射线和 X 射线波段。对一些特殊的激光器,其单色性还要好。可见,激光是世界上发光颜色最单纯的光源,其波长范围越来越宽,谱线线宽也越来越窄。

### 2. 高亮度

高亮度是激光器又一突出优点。将单位面积、单位光谱宽度、单位立体角内发出的光辐射强度定义为光源的单色亮度  $B_\lambda$ 。

$$B_\lambda = \frac{P}{\Delta S \Delta \nu \theta^2} \quad (1-1)$$

式中:  $P$  为光功率。

尽管太阳发射总功率很高,但光辐射宽度  $\Delta\nu$  很宽,发散角  $\theta$  很大,单色亮度仍很小。而激光  $\Delta\nu$ 、 $\theta$  均很小,所以其单色亮度很高,有报导的高功率激光器,  $B_\lambda$  甚至比太阳高 100 万亿倍。

### 3. 方向性好

由激光产生机理可知,在单横模运转,激光介质均匀的条件下,激光的发散角  $\theta$  仅受

衍射所限:

$$\theta = \frac{1.22\lambda}{D} \quad (1-2)$$

通常,  $\theta_{\text{气体}} < \theta_{\text{固体}} < \theta_{\text{半导体}}$ 。

例如,地球与月球的平均距离约 38 万 km,最好的激光束射达月球,直径仅几十米。借助光学手段可将激光聚焦到很小的光斑中,使其迅速而准确地目标上移动,这特别适合于光盘读取、激光印刷、激光打印、激光扫描、激光打标等。例如用双光头扫描的 Nd : YAG 激光束,聚焦在塑料、金属、玻璃、橡胶或纸张上,快则每秒可打印 600 个大小为  $1\text{mm}^2$  的字母。而要获得更小的光斑,应选用波长短、光束质量好的单横模激光器,它可使光盘存储密度更高,打印机的分辨率更好。

#### 4. 相干性好

光产生相干现象的最长时间间隔,称为相干时间  $\tau$ ,在相干时间内,光传播的最远距离叫做相干长度。

$$L_c = c \cdot \tau = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad (1-3)$$

由于激光带宽  $\Delta\lambda$  很小,相干长度  $L_c$  很长。例如,利用特制的单模稳频 He - Ne 激光器,其相干长度理论上可达  $2 \times 10^7 \text{km}$ ,由 LD 泵浦的固体激光器构成的干涉臂也可达 4km。实际上,单色性好,相干性就好,相干长度也就长。激光在通信、全息显示、测量、光谱分析、信息存储等领域获得广泛应用。

#### 5. 高功率与高能量

许多连续、准连续或脉冲激光器,均能产生很高的激光能量,甚至高达 1.8MJ,如化学激光器、CO<sub>2</sub>激光器、灯泵或 LD 泵浦固体激光器、半导体激光器的激光能量能够在许多方面满足军事、航空、工业、医学等要求。激光器在极短的时间内(如飞秒至皮秒量级),产生极高的峰值功率,如核聚变用激光器输出峰值功率达  $10^{18} \text{W}$ ,能使两氘核或一氘一氚核克服核间排斥力,实现核聚变反应。例如,随着激光超短脉冲技术的发展,人们已从锁模的掺 Ti 蓝宝石激光器中,利用脉冲放大技术获得峰值功率高达  $P = 10^{15} \text{W}$ 。又如激光在打微孔、非线性光学、激光拉曼效应技术等方面均有应用。

#### 6. 高速调制与明显的光压效应

如对半导体激光器直接进行高速调制,调制速度几万兆赫或几万兆比特,加上半导体激光器体积小、效率高、寿命长、价格低且能聚焦成很小光斑诸多特点,使之特别适合光通信、光存储、光计算及光印刷等信息领域的需要,半导体激光器已成为当代信息技术心脏。

光有动量(有光压),即光照到物体上能产生使之运动的力。20 世纪 70 年代,人们就进行了利用光辐射所产生的力来移动或抓住小粒子的实验。

生物领域:俘获活细胞、病毒、细菌等;生理应用方面的“光学镊”。

微电子领域:利用激光辐射压力清洗半导体芯片。

原子俘获研究领域:利用激光辐射压力来冷却原子或离子,使之处于近似停止状态,以制成高稳定性、高精度的时间标准(原子钟误差  $\pm 1\text{s}/150$  万年)。

但由测不准关系:

$$\Delta t \cdot \Delta\nu \approx 1 \quad (1-4)$$

不可能制成频谱很窄同时又输出很窄脉冲的激光器。

### 1.2.3 光与物质的相互作用

#### 1. 原子理论的基本假设

(1)原子定态假设:一切物质都是由原子构成的。原子系统只能处于一系列不连续的能量状态。在原子核周围,电子的运行轨道是不连续的,原子处于能量不变的稳定状态,称作原子的定态。对应原子能量最低的状态称为基态。

如果原子处在外层轨道上的电子从外部获得一定的能量,则电子就会跳到更外层的轨道运动。原子的能量增大,此时原子称作处于激发态的原子。

(2)频率条件:原子从一个定态  $E_1$  跃迁到另一个定态  $E_2$ , 频率  $\nu$  由下式决定:

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (1-5)$$

一种单色光对应一种原子间跃迁产生的光子,  $h\nu$  是一个光子的能量。

辐射场与物质的相互作用,特别是共振相互作用,为激光器的问世和发展奠定了物理基础。当入射电磁波的频率和介质的共振频率一致时,将会产生共振吸收(或增益),激光产生以及光与物质相互作用都会涉及场与介质的这种共振作用。

#### 2. 受激吸收

设原子的两个能级为  $E_1$  和  $E_2$ , 并且  $E_2 > E_1$ , 如果有能量满足式(1-5)的光子照射时,原子就有可能吸收此光子的能量,从低能级的  $E_1$  态,跃迁到高能级的  $E_2$  状态。这种原子吸收光子,从低能级跃到高能级的过程称为原子的受激吸收过程(图 1-2(a))。

#### 3. 自发辐射

原子受激发后处于高能级的状态是不稳定的,一般只能停留  $10^{-8}$  s 量级,它又会在没有外界影响的情况下,自发地返回到低能级状态;同时向外辐射一个能量为  $h\nu = E_2 - E_1$  的光子,这个过程称为原子的自发辐射过程。自发辐射是随机过程,辐射的各个光子发射方向和初相位都不相同,各原子的辐射彼此无关,因而自发辐射的光是不相干的(图 1-2(b))。

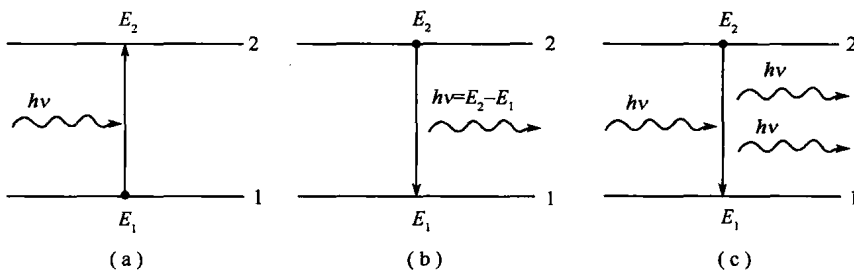


图 1-2 受激吸收、自发辐射和受激辐射

#### 4. 受激辐射和光放大

处在激发态能级上的原子,如果在它发生自发辐射之前,受到外来能量为  $h\nu$  并满足式(1-5)的光子的激励作用,就有可能从高能态向低能态跃迁,同时辐射出一个与外来光子同频率、同相位、同方向、甚至同偏振态的光子,这一过程称为原子的受激辐射(图 1-2(c))。

如果一个入射光子引发受激辐射而增加一个光子,这两个光子继续引发受激辐射又增添两个光子,以后四个光子又增值为八个光子……这样下去,在一个入射光子的作用下,原子系统可能获得大量状态特征完全相同的光子,这一现象通称为光放大,即入射光得到了放大。因此,受激辐射过程致使原子系统辐射出与入射光同频率、同相位、同传播方向、同偏振态的大量光子,即全同光子。受激辐射引起光放大正是激光产生机理中一个重要的基本概念。

### 5. 粒子数反转

从上述自发辐射和受激辐射的讨论中可以看到,普通光源的发光机理是自发辐射占统治地位。然而,激光器的发光却主要是原子的受激辐射。那么,怎样才能在一个原子系统中造成受激辐射占主导地位而使其发出激光来呢?

受激辐射的发生当然有个跃迁概率的问题。

为了使受激辐射持续进行,必须使处于  $E_2$  状态的原子数目多于处于  $E_1$  状态的原子数目,这种状态叫做粒子数反转,亦称粒子数布居反转。下面进行具体分析。

#### 1) 受激吸收与受激辐射的关系

1916 至 1917 年,爱因斯坦从辐射场与物质相互作用的量子论观点出发,提出相互作用应包含原子的自发辐射跃迁、受激吸收和受激辐射跃迁三种过程,并给出了三种过程跃迁系数的定量关系。就构成激光器的物理思想而言,辐射场与物质相互作用的三种过程,是激光器利用的三种基本物理机制。

在光与物质原子相互作用时,受激吸收、自发辐射和受激辐射往往是同时存在的。爱因斯坦从理论上证明,在两个能级之间,受激吸收跃迁和受激辐射跃迁具有相同的概率。受激吸收过程使入射光子数减少,而受激辐射过程则使入射光子数得到放大。哪一个过程占优势,则由原子系统中处于低能态的原子和处于高能态的原子的多少来决定。

当  $N_1 > N_2$  时,总的效果是光被吸收;而当  $N_1 < N_2$  时,总的效果是光的放大(图 1-3)。

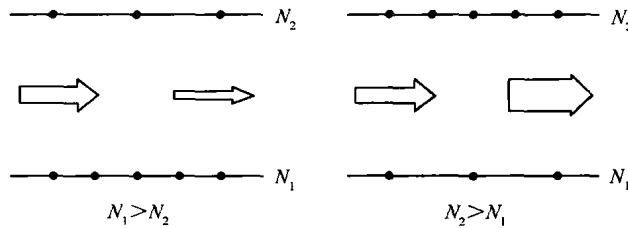


图 1-3 光的吸收与放大

#### 2) 粒子数按玻耳兹曼定律分布

热力学与统计理论讨论了粒子按能量值的分布问题,玻耳兹曼从理论上给出了系统达到平衡态时粒子按能量分布的规律。

$$N_i = A e^{-E_i/kT} \quad (1-6)$$

温度( $T$ )一定时,系统中能级低( $E_i$  较小)的粒子数总是多于能级高( $E_i$  较大)的粒子数。显然,在通常的热平衡情况下,  $N_1 > N_2$ , 如图 1-4 所示。

#### 3) 粒子数布居反转

那么,要使受激辐射占据主导地位,应该设法改变原子系统所处于热平衡时的分布,



使处于高能级的原子数超过处于低能级的原子数,即实现粒子数分布反转。

为了实现“粒子数反转状态”,必须从外界向系统输入能量,使系统中尽可能多的粒子吸收能量后从低能级跃迁到高能级上去,称这个过程为“激励”或“泵浦”过程,俗称“光泵”。激励的方法一般有光激励、气体放电激励、化学激励甚至核能激励等。例如,红宝石激光器采用的是光激励,氦氖激光器采用的是电激励,而染料激光器使用的是化学激励。

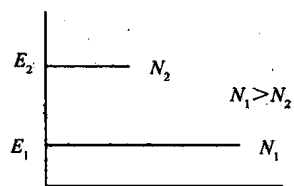


图 1-4 热平衡状态

## 1.3 激光振荡的基本原理和基本条件

### 1.3.1 激光器的基本结构

激光器的含义实际上是“受激辐射光振荡器”。激光器有各种类型,结构各不相同,但在原理上大体相同,以最常用的 He - Ne 激光器为例,其构成如图 1-5、图 1-6 所示。

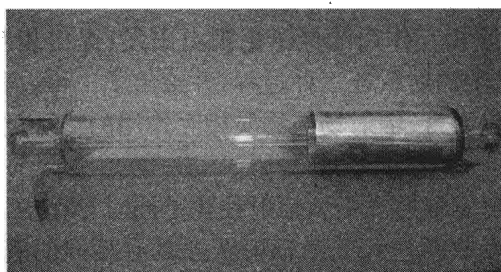


图 1-5 氦氖激光器实物图

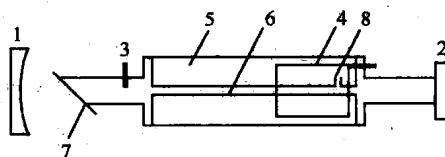


图 1-6 氦氖激光器

- 1—全反射镜; 2—输出镜; 3—阳极;
- 4—阴极; 5—储气室; 6—毛细管;
- 7—布儒斯特窗; 8—储气室与毛细管通道。

工作物质——可获得粒子数反转的激光物质。

光学谐振腔——由一组反射镜构成。

激励电源——用于激励原子系统的泵浦源。

### 1.3.2 激光振荡原理

在实现了粒子数反转的工作物质内(如采用光激励或电激励),可以使受激辐射占主导地位,但是最先引发受激辐射的光子却是由自发辐射产生的,而自发辐射是随机的。因此,受激辐射实现的光放大,从整体上看也是随机的、无规则的,这就需要增加一系列的装置。

#### 1. 光学谐振腔

在工作物质两端安置两面相互平行的反射镜,因而在两镜间就构成一个光学谐振腔,其中一面是全反射镜,另一面是部分反射镜。

在向各个方向发射的光子中,除沿轴向传播的光子外,都很快离开谐振腔,只有沿轴向的光可不断得到放大,在腔内往返形成振荡。因而在激光管中,步调整齐的光被连续不