

激光技术与应用

邓开发 陈 洪 编著
是度芳 陈 新

国防科技大学出版社
·长沙·

内 容 简 介

本书作者在长期的科研和教学基础上,全面系统阐明了激光测量与诊断的理论与方法,并力求把最新的科学技术进展充实到本书的内容中去。全书共分八章,内容包括激光基础知识,常用激光器,检测元件,光学 CT 技术,光谱技术,光学干涉技术及激光技术在包装印刷中的应用。

本书可作为测量专业、光电子技术专业以及包装印刷工程专业的高年级学生和研究生教学参考书,同时也可供有关科技人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

激光技术与应用/邓开发等编著. —长沙:国防科技大学出版社,2001.12
ISBN 7-81024-755-7

I. 激… II. 邓… III. 激光技术 IV. TN24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 029112 号

国防科技大学出版社出版发行
电话:(0731)4572640 邮政编码:410073
E-mail:gfkdcbs@public.cs.hn.cn
责任编辑:石少平 责任校对:张 静
新华书店总店北京发行所经销
宁乡县印刷厂印装

*

开本:787×1092 1/16 印张:23.25 字数:537 千
2002 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数:1—2000 册

*

定价:32.00 元

前 言

激光是 20 世纪 60 年代初发展起来的新型技术，它的奇异特性使其得到迅速发展和广泛的应用。

21 世纪，激光技术所形成的相关产业已成为推动社会和经济发展的动力之一。激光技术在凝聚态物理、材料物理、等离子体物理、工程热物理、化学、力学、生物和医学等科学领域，在计量、信息产业、机械、化工、动力、造船、纺织、轻工及高科技领域，都有广泛的应用；在军事上的应用也有显著的效果。

激光具有的高亮度、高单色性、高方向性等特点使其成为一种理想光源，把传统光学技术推到了一个新的阶段。利用激光在介质中传播时产生的衍射、干涉等现象（如全息干涉计量技术、光学 CT 技术、动态测量与几何测量等）或利用激光与物质的相互作用（如散射、吸收、激发、极化、混频等）产生的线性效应和非线性效应（如激光光谱技术、非线性光谱技术、吸收 CT 技术等），使光波的一个或几个特征量（振幅、频率或波长、位相、偏振状态、传播速度和传播方向）发生变化来实现介质的物性参数（包括组分、含量）、运动参数（速度、位置）、状态参数（温度）和物体形状（长度、宽度、厚度、直径、面形）等测量。

本书第一章简明扼要地介绍激光的基本原理和理论基础。第二章介绍了几种常用的典型激光器以及共性原理和设计，主要包含有氦氖激光器，二氧化碳激光器，典型的固体激光器，染料激光器及自由电子激光器。第三、四、五、六、七章介绍激光测量与诊断技术方面的内容。由于内容十分广泛，本书无法将所有的技术都包括进来，仅就基本的测量技术作一介绍。激光测量与诊断技术还在不断的发展中，我们力求把最新的发展充实到书中。光电接收器件中，介绍了 CCD、光电二极管阵列、OMA、斐索波长计、计算机控制 F-P 波长计等；在全息干涉计量中，介绍了干涉条纹的计算机处理、电视全息、电子散斑干涉等。光学 CT 技术是建立在激光断层扫描和计算机数据处理和图像显示两个高技术基础上的一项新技术，它能实现场分布测量，我们对光学 CT 技术作了全面系统的介绍。动态测量也是最近发展起来的新技术，本书以较多篇幅介绍使用 CCD 作动态测量的实例，融化最新

技术成就是本书的一大特色。第八章介绍了激光技术在印刷中的应用，较详细介绍印刷中的光理论以及新技术在这一专业领域的特殊应用，也是本书的特点之一。

本书是在我们多年来的教学和科研基础上编写而成的，参加编写工作的有是度芳教授（第一章、第五章），邓开发（第二章、第三章、第四章、第七章），陈洪（第六章），陈新（第八章），由邓开发任主编。由于编者水平与实践经验有限，必定存在错误与不当之处，敬请读者指正。

在编写过程中得到了学院领导的大力支持和科技处的资助，得到了学院制版中心的同事，以及刘会平、潘金虎、张新峰等同志的帮助，我们在此表示衷心的感谢。

编者

2001年5月于株洲工学院

目 录

第一章 激光基础

§ 1-1 概述	(1)
§ 1-2 光学谐振腔	(9)
§ 1-2-1 光学谐振腔的稳定条件	(9)
§ 1-2-2 激光的纵模	(11)
§ 1-2-3 激光的横模	(13)
§ 1-2-4 对称共焦腔的光束特性	(15)
§ 1-2-5 高斯光束经薄透镜的变换和聚焦	(18)
§ 1-2-6 衍射损耗	(19)
§ 1-3 介质的增长与饱和	(20)
§ 1-3-1 速率方程	(20)
§ 1-3-2 增益及其在均匀介质中的饱和	(21)
§ 1-4 激光器的稳态工作特性	(24)
§ 1-4-1 激光形成的阈值条件	(24)
§ 1-4-2 连续激光器的稳定状态和工作特性	(25)
§ 1-4-3 激光的线宽	(28)
§ 1-5 弛豫振荡	(29)
§ 1-5-1 弛豫振荡	(29)
§ 1-5-2 调 Q 激光器的工作原理	(31)
§ 1-5-3 调 Q 技术	(32)
§ 1-5-4 激光器的锁模	(33)

第二章 激光光源

§ 2-1 氦氖激光器	(37)
§ 2-1-1 氦氖激光器的工作原理	(37)
§ 2-1-2 氦氖激光器的工作特性与输出特性	(40)
§ 2-1-3 氦-氖激光器的结构	(48)
§ 2-2 二氧化碳激光器	(49)
§ 2-2-1 二氧化碳激光器的工作原理	(49)
§ 2-2-2 普通二氧化碳激光器的工作特性与输出特性	(58)

§ 2-2-3 高功率二氧化碳激光器·····	(66)
§ 2-3 典型固体激光器·····	(71)
§ 2-3-1 中小功率固体激光器·····	(71)
§ 2-3-2 高功率固体激光器·····	(73)
§ 2-3-3 板条状固体激光器·····	(75)
§ 2-3-4 新型固体激光器简介·····	(78)
§ 2-4 染料激光器·····	(85)
§ 2-4-1 概述·····	(85)
§ 2-4-2 染料激光产生的原理·····	(85)
§ 2-4-3 染料激光器的种类及泵浦方式·····	(87)
§ 2-4-4 染料激光器的波长调谐·····	(92)
§ 2-4-5 设计染料激光器应考虑的几个问题·····	(95)
§ 2-5 自由电子激光器·····	(96)
§ 2-5-1 概述·····	(96)
§ 2-5-2 自由电子激光产生的原理·····	(97)
§ 2-5-3 自由电子激光器的主要组成部分及其类型·····	(100)
参考文献·····	(108)

第三章 光学仪器与检测器件

§ 3-1 常用光谱仪器·····	(109)
§ 3-1-1 常用光谱仪的基本组成和特性·····	(109)
§ 3-1-2 单色仪·····	(111)
§ 3-2 干涉光谱仪·····	(112)
§ 3-2-1 法布里(Fabry)—珀罗(Perot)干涉仪·····	(112)
§ 3-2-2 马赫—珍特干涉仪·····	(116)
§ 3-2-3 斐索(Fizeau)干涉仪·····	(119)
§ 3-2-4 傅里叶变换光谱仪·····	(121)
§ 3-3 光电探测及器件·····	(124)
§ 3-3-1 光电倍增管·····	(124)
§ 3-3-2 半导体光电探测器·····	(130)
§ 3-3-3 电荷耦合器件(CCD)·····	(134)
§ 3-3-4 光电二极管成像器件·····	(140)
§ 3-3-5 光学多通道分析器(OMA)·····	(141)
参考文献·····	(142)

第四章 全息干涉测量技术

§ 4-1 全息照相术·····	(144)
§ 4-1-1 同轴全息·····	(145)

§ 4-1-2 离轴全息	(146)
§ 4-1-3 光源	(148)
§ 4-1-4 记录介质	(148)
§ 4-2 全息干涉计量基本方法	(149)
§ 4-2-1 双曝光法	(150)
§ 4-2-2 实时法	(151)
§ 4-2-3 时间平均干涉法	(152)
§ 4-2-4 双波长法	(153)
§ 4-3 漫射体全息干涉计量	(157)
§ 4-4 透射体全息干涉计量	(159)
§ 4-5 粒子场全息干涉计量	(163)
§ 4-5-1 粒子场同轴全息术	(164)
§ 4-5-2 粒子场离轴全息术	(169)
§ 4-6 干涉条纹的计算机处理和电子散斑干涉	(170)
§ 4-6-1 干涉及相关条纹图像处理系统	(171)
§ 4-6-2 ESPI	(173)
§ 4-7 相移全息干涉计量	(177)
§ 4-7-1 测量原理	(178)
§ 4-7-2 实验方法	(179)
参考文献	(180)

第五章 光学 CT 技术

§ 5-1 层面分析的历史发展	(183)
§ 5-2 光学 CT 基本理论	(185)
§ 5-3 激光层面扫描测量技术	(186)
§ 5-3-1 相位测量	(186)
§ 5-3-2 吸收测量	(192)
§ 5-3-3 发射测量	(194)
§ 5-4 计算机重建图像算法 I——变换方法	(195)
§ 5-4-1 雷当反变换的算符表示	(195)
§ 5-4-2 卷积反投影算符	(197)
§ 5-4-3 卷积函数的选择	(199)
§ 5-4-4 内插函数的选择	(203)
§ 5-4-5 影响空间分辨率的若干因素	(205)
§ 5-4-6 平行束的其它变换方法	(208)
§ 5-5 计算机重建图像算法 II——级数展开法	(209)
§ 5-5-1 级数展开法的基本概念	(209)
§ 5-5-2 生成函数的选择	(210)

§ 5-5-3 超定方程求解法	(212)
§ 5-5-4 代数重建法(ART)	(214)
§ 5-5-5 联合代数重建法(SART)	(217)
§ 5-6 光学 CT 的图像显示	(221)
§ 5-7 光学 CT 的应用举例	(222)
§ 5-7-1 光束偏转法重建气流二维温度场	(223)
§ 5-7-2 吸收法测量重建超声喷射气流密度场	(223)
§ 5-7-3 发射测量重建气体密度场	(225)
参考文献	(227)

第六章 激光光谱技术

§ 6-1 激光喇曼光谱技术	(231)
§ 6-1-1 前言	(231)
§ 6-1-2 基本原理	(231)
§ 6-1-3 喇曼光谱实验方法	(234)
§ 6-1-4 喇曼光谱技术具体应用	(236)
§ 6-2 激光感生荧光光谱技术	(241)
§ 6-2-1 基本原理	(241)
§ 6-2-2 激光感生荧光光谱实验系统	(244)
§ 6-2-3 激光感生荧光技术的应用	(244)
§ 6-3 激光光声光谱	(249)
§ 6-3-1 基本原理	(250)
§ 6-3-2 激光光声光谱的特点	(250)
§ 6-3-3 光声光谱的实验技术	(251)
§ 6-3-4 激光光声光谱的应用	(252)
§ 6-4 布里渊散射技术	(257)
§ 6-4-1 布里渊散射的基本原理	(258)
§ 6-4-2 布里渊散射实验技术	(258)
§ 6-4-3 应用	(260)
参考文献	(261)

第七章 动态测量和几何量的测量

§ 7-1 动态测量概念	(263)
§ 7-2 测量系统的动态特性	(264)
§ 7-2-1 动态特性概念	(264)
§ 7-2-2 一阶系统的动态特性	(266)
§ 7-3 细丝直径测量	(267)
§ 7-4 物体长度和宽度的测量	(270)

§ 7-4-1	脉冲计数法测长	(270)
§ 7-4-2	CCD 测量长度	(271)
§ 7-4-3	物体宽度测量和边带控制	(271)
§ 7-4-4	激光干涉测长仪	(272)
§ 7-5	物体厚度测量	(275)
§ 7-5-1	物体厚度测量原理	(275)
§ 7-5-2	JGC-H 激光测厚仪	(276)
§ 7-6	物体面检测	(278)
§ 7-6-1	激光反射检测	(278)
§ 7-6-2	CCD 摄像检测	(280)
§ 7-6-3	透射激光检测	(280)
§ 7-7	激光测距	(282)
§ 7-7-1	激光大气传输和测程问题	(282)
§ 7-7-2	相位法测距	(283)
§ 7-7-3	脉冲法测距	(285)
参考文献		(286)

第八章 激光在印刷出版工业中的应用

§ 8-1	印刷中的色彩特性	(288)
§ 8-1-1	颜色的基本概念	(288)
§ 8-1-2	彩色的特征	(288)
§ 8-1-3	色彩的合成	(290)
§ 8-1-4	彩色印刷过程中色彩的传递	(292)
§ 8-2	彩色印刷中的加网技术	(293)
§ 8-3	激光在胶印制版中的应用	(295)
§ 8-3-1	激光在电子分色机方面的应用	(295)
§ 8-3-2	滚筒式机械扫描电子分色机	(300)
§ 8-3-3	激光照排系统	(304)
§ 8-3-4	激光雕刻凸版和凹版	(307)
§ 8-3-5	激光雕刻机的实例	(310)
§ 8-3-6	激光直接制版的 PS 版	(313)
§ 8-4	激光在轻印系统的应用	(319)
§ 8-4-1	概述	(319)
§ 8-4-2	气体激光器作记录光源的激光印字机	(321)
§ 8-4-3	采用半导体激光器作记录光源的激光印字机	(324)
§ 8-4-4	彩色激光印字机	(329)
§ 8-5	激光在全息图像印刷方面的应用	(330)
§ 8-5-1	概述	(330)

§ 8-5-2 全皂照相原理和全息照片	(332)
§ 8-5-3 全息印刷	(335)
§ 8-6 激光在电子出版方面的应用	(338)
§ 8-6-1 概述	(338)
§ 8-6-2 光存技术的发展	(338)
§ 8-6-3 激光光盘采用的激光器	(342)
§ 8-6-4 激光光盘的结构和种类	(343)
§ 8-6-5 激光光盘的写/读工作原理	(346)
§ 8-7 激光在印刷工业上其他方面的应用	(352)
§ 8-7-1 对润湿液进行测量和控制	(352)
§ 8-7-2 对印刷纸张计数	(353)
§ 8-7-3 对油墨进行干燥	(354)
§ 8-7-4 激光在条形码方面的应用	(354)
§ 8-7-5 制作高精度锯缝模切版。	(358)
参考文献	(359)

第一章 激光基础

§ 1-1 概述

一、激光发展史

激光(Laser),即受激辐射产生的光放大(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)。第一台红宝石激光器是由美国青年科学家 T. H. Maiman 于 1960 年 7 月在休斯顿实验室研制成功。

第一台红宝石激光器的研制成功,包含了许多科学家的研究成果,主要有:

(1)受激辐射理论

受激辐射理论是激光产生的物理基础,由爱因斯坦于 1916 年计算黑体辐射时提出并发表。

(2)粒子数反转

1946 年瑞士科学家布洛赫发表了观察到的核磁共振时的负吸收现象(发射)。次年荷兰青年科学家布隆姆贝根解释了上述吸收现象为粒子数反转。

(3)光泵

法国物理学家卡斯特勒于 1949 年提出用光辐照来改变能级粒子数集居——光泵技术,用于钠原子的塞曼支能级之间的粒子数集居数反转。

(4)微波量子放大器(梅塞)

微波量子放大器工作原理由美国马里兰大学青年教授戈伯格 1952 年首先提出。微波量子放大器使粒子数反转,利用受激发射使电磁波相干放大。

微波量子放大器原理更完整的描述和实验上的实现是美国物理学家汤斯和其助手于 1953 年完成的。

氨分子作为激活物质,激活的氨分子束通过非均匀磁场使高能态分子与低能态分子分开,进入谐振腔,产生受激发射。

同期苏联科学家普洛霍洛夫和巴索夫也发明了微波量子放大器。汤斯、普洛霍洛夫、巴索夫于 1964 年共获诺贝尔物理学奖。

(5)关于光子梅塞的建议

汤斯制成微波量子放大器后,即考虑将此用于光子梅塞(近红外,可见光)。他与其妹夫肖洛合作,从理论上、结构上研究了光子梅塞的可能性,并于 1958 年春发表了研究成果,提出了:

(a)将梅塞技术扩展到红外和可见区的可能性。

(b)用下一步干涉仪(开腔)替代闭腔。

(c)振荡条件。

(d)激活介质——铯、氩(无氩生成)和光泵,引起了许多科学家的兴趣。

其它一些科学家的工作:

(1)第一台激光器——红宝石固体激光器

1960年7月第一台红宝石固体激光器研制成功。在第一台激光器研制成功后不到半年,美国IBM公司两位年青科学家索洛(布隆姆贝根在哈佛大学的研究生)和史蒂文森(汤斯的研究生)研制成功了氟化钙掺铈激光器。

(2)He-Ne 激光器

阿里、贾范(汤斯的博士研究生)得益于肖洛应用 F-P 谐振腔的消息,于1960年12月12日研制成功了 He-Ne 激光器(1.15 μm),632.8nm 激光器是1962年实现运转的。

二、光子的模式与模密度

激光是如何产生的?如何得到稳定的激光输出?下面先讲解基本原理。

光子的量子描述:

能量:

$$E = h\nu = \frac{hc}{2\pi n} |k| \quad (1-1)$$

动量:

$$p = \hbar k \quad |k| = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi n\nu}{c} \quad (1-2)$$

偏振:

σ 和 $\sigma_1\sigma_2$ 两种偏振。

只要给定 k 和 σ ,则光子的方向、动量、能量、偏振态都定了。据此则有:
光场能量密度:

$$\rho(\nu) = N_0 h\nu \quad (1-3)$$

其中, N_0 为单位体积中平均光子数。

介质中光能:

$$I = \frac{\rho c}{h} = \frac{N_0 h\nu}{n} \quad (1-4)$$

量子理论首先是从推导黑体辐射导出的。现研究一下空腔中电磁场分布。自由空间中,电磁场的状态是可以任意存在的。

空腔中电磁场,受到腔壁的限制,只能存在一系列特定的状态。每一种状态与电磁场一定的空间分布、振荡频率、传播方向、偏振方向相对应,称为空腔的模式或波型。

下面研究模式和模数(暂不考虑偏振)。

1. 一维问题

如图 1-1-1 所示,平面电磁波在相距为 d 的两大镜面中沿垂直镜面的方向来回反射,形成驻波,镜面处为波节,只有满足下式之波才能存在。

$$d = q \frac{\lambda}{2}, \quad q = 1, 2, 3 \dots$$

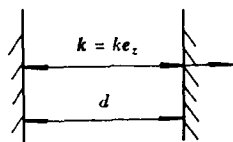


图 1-1-1

$$\lambda = \frac{2d}{q} \quad \text{或} \quad \nu = q \frac{c}{2nd} \quad (1-5)$$

用 k 来表示共振条件

$$k = q \frac{\pi}{d}, \quad q = 1, 2, 3 \dots$$

由光子的量子理论,光子能量、动量都有一个不确定值,即 k 亦有一个不确定值,就一维问题来讲,不确定值: $\Delta k = \frac{\pi}{d}$

2. 三维问题

如图 1-1-2,矩形腔尺寸为 $2a \times 2a \times d$, 由于入射波与反射波的干涉,腔内形成各种稳定的驻波模。

波矢在长方腔内的三个分量为:

$$\left. \begin{aligned} k_x &= k \cos \alpha_1 \\ k_y &= k \cos \alpha_2 \\ k_z &= k \cos \alpha_3 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{cases} k_x = l \frac{\pi}{2a} & l = 1, 2, 3 \dots \\ k_y = m \frac{\pi}{2a} & m = 1, 2, 3 \dots \\ k_z = q \frac{\pi}{d} & q = 1, 2, 3 \dots \end{cases}$$

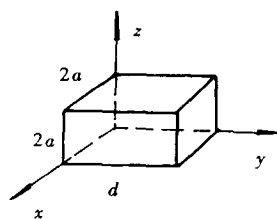


图 1-1-2

(1-6)

k 在 x 轴、 y 轴、 z 轴方向上的不确定值分别为:

$$\begin{aligned} \Delta k_x &= \frac{\pi}{2a}, \Delta k_y = \frac{\pi}{2a}, \Delta k_z = \frac{\pi}{d} \\ k^2 &= k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \\ \left(\frac{2}{\lambda} \right)^2 &= \frac{l^2 + m^2}{4a^2} + \frac{q^2}{d^2} \\ \nu &= \frac{c}{2n} \left(\frac{l^2 + m^2}{4a^2} + \frac{q^2}{d^2} \right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (1-7)$$

一组 (l, m, q) 值与电磁波一个确定的频率相对应,与一个确定的波矢相对应,亦即对应一个独立的波型(暂不考虑偏振)。求出 (l, m, q) 值的数目,就可得到空腔内独立的驻波模数。

波矢空间 (k_x, k_y, k_z) 如图 1-1-3 所示,三个轴之单位分别为 $\Delta k_x, \Delta k_y, \Delta k_z$, 把整个 k 空间划分为 $(\Delta k_x, \Delta k_y, \Delta k_z)$ 为基元之小格——相格,各种可能的 $(l \frac{\pi}{2a}, m \frac{\pi}{2a}, q \frac{\pi}{d})$ 的点——格点。各个格点与腔内存在的驻波一一对应。坐标原点到各个格点的矢量即为各种可能的 k 矢量。所以振动频率从 $0 \sim \nu$ 范围内的驻波数也就是 k 值从 $0 \sim \frac{2\pi n \nu}{c}$ 所对应的格点数。按量子力学的观点,每个光子应属于一个相格,但无法确定其在相格的位置。光子可按相格分类,属于同一相格又有相同偏振方向的光子属于同一模式,同一模式的光子数称为光子简并度。

$$\text{格点数} = \frac{\frac{1}{8} \cdot \frac{4}{3} \pi k^3}{\Delta k_x \Delta k_y \Delta k_z} = \frac{\frac{1}{8} \cdot \frac{4}{3} \pi \left(\frac{2\pi n \nu}{c} \right)^3}{\frac{\pi^3}{4a^2 d}} = \frac{4\pi n^3 \nu^3}{3c^3} V \quad (1-8)$$

其中, V 为矩形腔体积。

考虑有三个偏振态, 则腔内模数为

$$N_\nu = \frac{8\pi n^3 \nu^3}{3c^3} V \quad (1-9)$$

模密度 $p(\nu)$ 即单位体积单位频率间隔内的模数为

$$p(\nu) = \frac{1}{\nu} \frac{dN_\nu}{d\nu} = \frac{8\pi n^3 \lambda^2}{c^3} \quad (1-10)$$

空腔中的一个模表示一个具有确定偏振方向、确定传播方向和确定频率的电磁驻波, 一个模就是一个简谐振动的形式。

例: $\Delta\nu = 1000\text{MHz} = 10^9\text{Hz}$ 微波: $\nu = 3 \times 10^9$, $N_\nu \approx 1$

$$V = 10^{-4}\text{m}^3$$

$$\text{光: } \nu = 10^{15}, N_\nu \approx 10^{11}$$

注: (1) 对一维问题, 上述关系不成立, 因为球退化为线, 不管 k 值如何, 只要 Δk 相同, 线段内包含的格点数相同。一维腔内模数很少。

激光腔是一维问题, 模少有利。

(2) 普朗克公式:

$$\rho(\lambda) = \frac{8\pi\nu^2 n^3}{c^3} h\nu \left[\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (1-11)$$

式中, $\rho(\nu)$ 为能量密度, $p(\nu)$ 为光子能量, $\bar{n}$ 为光子简并度。

$\rho(\nu) = p(\nu) \cdot h\nu \cdot \bar{n}$, 在电磁场普遍运用!

三、光的辐射和吸收

光的辐射和吸收以跃迁几率不等于 0 的二能系统为例说明, 如图 1-1-4 所示。

自发辐射为随机过程:

$$\begin{aligned} \frac{dN_2}{dt} &= -A_{21}N_2 \\ N_2(t) &= N_2(0)e^{-A_{21}t} \end{aligned} \quad (1-12)$$

式中, A_{21} 为自发辐射几率。

受激辐射为受迫过程:

$$\begin{aligned} \frac{dN_2}{dt} &= -W_{21}N_2 \\ W_{21} &= B_{21}\rho(\nu) \end{aligned} \quad (1-13)$$

式中, W_{21} 为受激辐射几率, B_{21} 为爱因斯坦受激辐射系数。

对受激吸收:

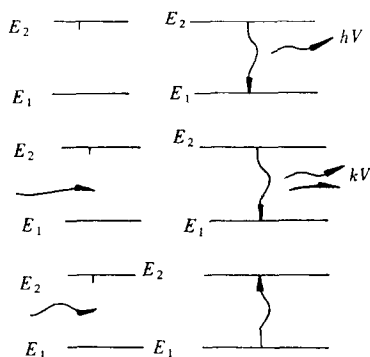


图 1-1-4

$$\begin{aligned}\frac{dN_1}{dt} &= -W_{12}N_1 \\ W_{12} &= B_{12}\rho(\nu)\end{aligned}\quad (1-14)$$

式中, W_{12} 为受激吸收几率, B_{12} 为爱因斯坦吸收系数。

热平衡态时:

$$\begin{aligned}A_{21}N_2 + W_{21}N_2 &= W_{12}N_1 \\ [A_{21} + B_{21}\rho(\nu)]N_2 &= B_{12}\rho(\nu)N_1 \\ \frac{N_1}{N_2} &= \frac{B_{12}\rho(\nu)}{A_{21} + B_{21}\rho(\nu)}\end{aligned}$$

能级服从玻耳兹曼分布

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} e^{-\frac{h\nu}{kT}} \quad (1-15)$$

$$\rho(\nu) = \frac{\frac{A_{21}}{B_{21}}}{\frac{g_1 B_{12}}{g_2 B_{21}}} \cdot \frac{1}{\exp(\frac{h\nu}{kT}) - 1}$$

与普朗克公式相比较得:

$$\begin{aligned}\frac{A_{21}}{B_{21}} &= \frac{8\pi h\nu^3 n^3}{c^3} = p(\nu)h\nu = \frac{\rho(\nu)}{n} \\ g_2 B_{21} &= g_1 B_{12} \\ \frac{W_{21}}{A_{21}} &= \bar{n} \quad (\text{光子简并度})\end{aligned}\quad (1-16)$$

由上述可得结论:

(1) 高能级向低能级跃迁时, 1) 自发辐射是随机过程向各个模发射, 模数多。2) 受激辐射光子与入射光子同模, 使该模光子增加, 模光子数增加又使受激辐射几率增加。向某一模受激辐射的几率正比于光子简并度。

(2) 当 $\bar{n} = 1$ 时, 自发辐射几率才等于受激辐射几率。

(3) 若能使辐射能量集中于少数模中, 则这些模中光子简并度可达很大数值, 受激辐射可达主导地位。

四、介质增益和集居数反转

我们讨论的是受激辐射场, 激光的特性是具有高的单色性和方向性, 因此往往把激光场简化为一特定方向分布传播的单色平面波。因此用强度 I 来替代能量密度 $\rho(\nu)$ 更合适。

单位时间内通过单位面积的单色辐射场平均能量:

$$I = \frac{c}{n}\rho$$

光子能量——单位时间内通过单位面积的光子数:

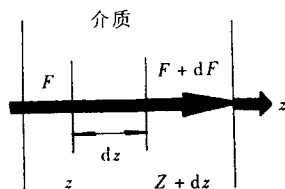


图 1-1-5

$$F = \frac{I}{h\nu} = \frac{c\rho}{nh}$$

$$W_{21} = B_{21}\rho(\nu) = B_{21} \frac{nh\nu}{c} F = \sigma_{21} F$$

$$W_{12} = B_{12}\rho(\nu) = B_{12} \frac{nh\nu}{c} F = \sigma_{12} F$$

式中, σ_{21} 受激发射截面, σ_{12} 吸收截面。

当 $g_1 = g_2$ 时, $B_{12} = B_{21}$

如图 1-1-5 所示, 强度为 I (光子能量为 F) 之入射光通过 dz 薄层后, 由于吸收使光子能量改变(减小) dF_1

$$dF_1 = -\sigma F N_1 dz$$

由于受激发射光子能量改变(增加) dF_2

$$dF_2 = \sigma F N_2 dz$$

则光子通量增加

$$dF = dF_1 + dF_2 = \sigma F (N_2 - N_1) dz$$

根据玻耳兹曼分布

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left[-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right] \quad (1-17)$$

所以,

$$E_2 > E_1, N_2 < N_1, dF < 0$$

由此可得结论, 热平衡状态下, 总是吸收入射光, 不会产生光放大。若采取某种方式获得 $N_2 > N_1$ 的非平衡状态就会产生光放大, 则此系统称为增益介质。此状态称为粒子数(集居数)反转。

要实现光放大, 就必须存在增益介质, 产生粒子数反转。

增益系数是光通过单位长度增益介质后增加的相对光强:

$$\frac{dF}{F dz} = \sigma (N_2 - N_1) \quad (1-18)$$

由 $F = \frac{1}{h\nu}$ 得:

$$\frac{dF}{F} = \frac{dI}{I}$$

$$G = \frac{dI}{I dz} = \sigma (N_2 - N_1) > 0 \quad (N_2 > N_1)$$

$$I = I_0 e^{Gz} \quad (1-19)$$

其中, I_0 是 $z=0$ 处初始光强。

五、激光的获得

根据上述, 产生受激介质辐射的条件为:

- (1) 必须存在增益介质——工作物质。
- (2) 必须产生集居数反转——激活介质、激励源。
- (3) 必须存在光子谐振腔。

根据 $I = I_0 e^{G\alpha}$, 原则上讲不论自发辐射 I_0 多弱, 只要通过激活介质的长度足够长, 总可以得到一定强度的激光, 实际上激光介质的长度总是有一定的限度, 因此, (1) 必须采用谐振腔——光在两个反射镜(腔)之间来回反射, 形成自激振荡器。(2) 要求只对少数几个模提供放大的作用, 因而光放大器不采用三维腔(闭腔), 而采用一维腔(开腔)。如图 1-1-6 所示。

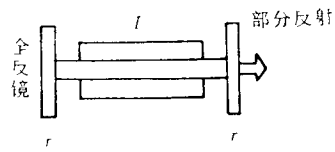


图 1-1-6

激光在谐振腔中来回反射有损耗, 要求增益大于损耗。

一个来回后的光强:

$$I = r_1 r_2 I_0 e^{2GL} > I_0$$

如考虑已吸收:

$$I = r_1 r_2 I_0 e^{2(G-\alpha)L} > I_0$$

$G > \alpha$ 为增益条件。

激光是采用激光器来获得的, 激光器由三个部分组成:

(1) 工作物质。(2) 激励源(光激励(光泵), 电激励, 碰撞激励)。(3) 谐振腔。

六、激光特性

1. 激光的方向性

从激光器的部分反射镜一端射出的激光光束基本上是沿着与镜面垂直的方向传播的, 即激光光束的发散角 2θ 是很小的, 除了半导体激光器以外, 一般激光器输出的激光光束发散角 2θ 的数量级为毫弧度。但激光光束是在空间传播的, 引入立体角 Ω 。

如图 1-1-7 所示, 以 O 点为球心, 则面积为 S 的一块球面对 O 点所张得立体角 Ω , 等于这块面积 S 与球半径 R 的平方之比。即

$$\Omega = \frac{S}{R^2}$$

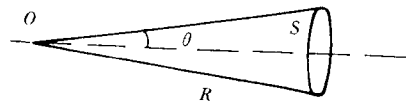


图 1-1-7

因此, 整个球面对球心所张的立体角

$$\Omega = \frac{4\pi R^2}{R^2} = 4\pi$$

而半顶角很小的圆锥的立体角

$$\Omega = \frac{\pi(\theta R)^2}{R^2} = \pi\theta^2$$

当 $\theta = 10^{-3}$ 弧度时, $\Omega = \pi \times 10^{-6}$ 。

这就是说, 一般的激光器只是向着数量级为 10^{-6} 的立体角的范围内输出激光光束。这与普通光源朝着空间中各个可能的方向发光的情况很不相同。因此, 激光的方向性比普通光源发出的光好得多。