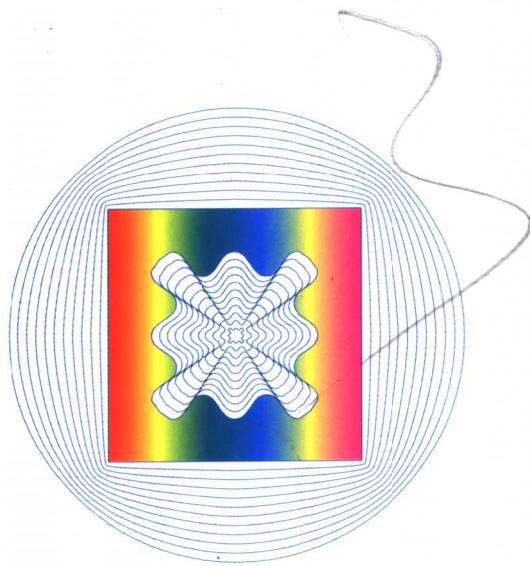


21世纪高等院校规划教材

激光应用技术

朱若谷 主编 陈本永 郭斌 副主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

21 世纪高等院校规划教材

激光应用技术

朱若谷 主编

陈本永 郭斌 副主编

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书系统地阐述了激光的基础知识及其应用。全书共 9 章,内容主要涉及:辐射的基本概念,激光器的基本工作原理,激光束的特征,激光调制与偏转技术,激光频率稳定技术,激光在精密计量中的应用,激光在军事和民用工业中的应用,激光在医药、食品、卫生和环境保护中的应用,激光在物理、生化等科学研究中的应用等内容。

图书在版编目(CIP)数据

激光应用技术 / 朱若谷主编. —北京:国防工业出版社,2006.1

21 世纪高等院校规划教材

ISBN 7-118-04269-2

I. 激... II. 朱... III. 激光技术—高等学校—教材 IV. TN24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 148916 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)

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 12 $\frac{3}{4}$ 290 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—4000 册 定价:20.00 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

通过对微波受激光量子放大器的理论和实验研究, Javan、Bennett 和 Heriotl 等人于 1960 年在贝尔实验室制成第一台红宝石可见光激光器。

迄今为止, 激光的理论和技術, 尤其是各种实验和应用装置及技術, 涉及基于激光原理建立的新工程和各类物理量的测量, 发展异常迅速。激光极优良的相干性大大地提高了干涉仪的测量范围和精度, 并且使获得的信号便于自动处理和用于生产过程的控制。在大地测绘和军用部门, 应用激光良好的方向性、高亮度、高能量密度的特点作准直、大距离测量、模拟军事演习乃至制造新型激光武器。激光内蕴的特性使它在微量元素分析、同位素分离、核聚变、光化学、光通信、光学加工、光学检测、光全息和光信息处理等近代科学技术领域中发挥越来越大的作用。而且随着技术的完善, 激光与人们的日常生活也越来越广泛地联系起来, 如激光通信、激光打印、图像电话、激光唱片、激光录像盘, 以及形形色色的激光诊断和治疗机等。在这些应用中, 还可能应用了某些激光未曾被了解的机制, 主要是激光辐射对生物细胞、遗传因子的生化作用。

尽管激光已经在纯科学研究和应用科学技术中起着高新技术的作用, 但与其他学科比较, 它的发展历史毕竟是短暂的, 还有许多问题要解决, 包括: 新型激光器件和应用装置的设计制造; 涉及现有原理的应用、新原理的探讨及大量的制造工艺和结构问题。渐趋完善的半导体激光器及其应用就是解决上述问题的很好典范, 它在器件的工作效率、稳定性、可靠性和使用寿命等方面都有明显的改进, 同时提供多种适合于应用的波长可调光束。

本书较系统地、简要地阐述了激光基础知识, 应用技術方面着重介绍主要的调制、偏转和稳频等技術中涉及的原理、方法, 最后适当地列举一些有代表性的激光应用的例子, 目的是帮助读者进一步整理和消化已学过的知识。

本书希望为从事计量工作的研究和技术人员对激光的系统了解提供实质性的帮助。同时本书并不要求读者具有很深厚的数学、物理基础, 可以使更多的对激光感兴趣的读者比较系统、全面地掌握基础知识, 从而使激光——实质上就是一种从物质中通过受激激发产生并定向发送出的能量束——被更多的人了解、重视并应用到各自从事的部门中, 让它更好地造福于人类。

本书出版得到国家自然科学基金项目(No:59775087、69773043、50275138)、教育部科学技术研究重点项目(No:02063)、国家质检总局项目(No: Y00-A01)及浙江理工大学系列课程建设项目(No:111333A3254702)等的经费资助,借此机会表示最诚挚的感谢。在本书编写过程中,姜坤参加了资料的整理、打印工作,国防工业出版社江洪湖编辑给予大力支持和帮助,在此深表谢意。

最后衷心希望广大读者对本书提出宝贵意见,对书中不妥之处敬请斧正。

朱若谷

目 录

第1篇 激光基础

第1章 辐射的基本概念	1
1.1 概述	1
1.2 辐射与物质的相互作用	3
1.2.1 辐射现象	3
1.2.2 线型及线型加宽机制	4
1.2.3 增益介质的饱和现象	8
1.3 总结	11
1.3.1 高能级粒子的寿命 τ 的测量方法	11
1.3.2 吸收截面 σ 的测量方法	12
思考练习题	13
第2章 激光器的基本工作原理	14
2.1 概述	14
2.2 泵浦过程	14
2.2.1 光泵浦过程	14
2.2.2 电泵浦过程	15
2.3 激光器分类及常用激光器	16
2.3.1 激光器的分类法	16
2.3.2 常用激光器的介绍	16
2.4 激光模式和被动光学谐振腔	19
2.4.1 激光模式	19
2.4.2 被动光学谐振腔	21
2.5 速率方程讨论氦-氖激光器	31
2.5.1 阈值粒子数密度反转和临界泵浦速率	32
2.5.2 四能级激光器的输出功率	32
2.5.3 四能级激光器的工作物质条件	33
2.5.4 最佳输出功率	33
2.6 激光工作物质对谐振腔模频率的影响	34
2.6.1 限制激光单色性的因素	34
2.6.2 工作物质引起的模牵引	35
思考练习题	39
第3章 激光束的特征	41

3.1	概述	41
3.2	相干性	41
3.2.1	多色场的复数表示	41
3.2.2	解析函数表示场量的特点	42
3.2.3	表征电磁场重要特征的空间和时间相干度	43
3.2.4	空间相干度和时间相干度的测量	44
3.2.5	相干时间与单色性	45
3.2.6	典型氦-氖激光器的相干性	47
3.3	光束的方向性	47
3.4	光束亮度	48
3.5	高斯光束分析激光	49
3.5.1	激光束的高斯光束表示	49
3.5.2	高斯光束在自由空间的传播规律	50
3.5.3	高斯光束的扩束和聚焦	52
3.5.4	高斯光束的基模匹配	57
3.5.5	q 参数讨论高斯光束传播	59
	思考练习题	62

第 2 篇 应用激光技术基础

第 4 章	激光调制与偏转技术	63
4.1	概述	63
4.2	晶体的电光效应	63
4.2.1	晶体的光学性质表示方法——光学示性图	63
4.2.2	晶片的正交和平行偏振光干涉	69
4.2.3	晶体的一次电光效应	70
4.3	声光效应	78
4.3.1	拉曼-奈斯衍射	78
4.3.2	行波和驻波声波的拉曼-奈斯衍射	81
4.3.3	布拉格衍射	82
4.3.4	衡量声光介质质量的参数	84
4.4	晶体的磁光效应和磁光调制	86
4.5	声光调制和偏转原理	87
4.5.1	声光调制器	87
4.5.2	声光偏转器	89
4.6	电光调制器和偏转器	92
4.6.1	电光调制器	92
4.6.2	电光效应数字式偏转器——离散角偏转器	94
4.6.3	连续偏转器	95
4.7	几种典型的激光调制器件	97

4.7.1	用于外差检测 CO ₂ 激光测距仪声光调制器	97
4.7.2	DC-3DJG 型激光测距仪电光调制器	99
	思考练习题	103
第5章	激光频率稳定技术	104
5.1	概述	104
5.1.1	频率稳定度	104
5.1.2	频率再现(重复)性	105
5.2	频率变化原因和简单的稳频措施	105
5.2.1	频率变化原因	105
5.2.2	简单的稳频措施	106
5.3	常用的稳频方法	107
5.3.1	拉姆下陷稳频法	107
5.3.2	饱和吸收法	108
5.3.3	塞曼效应法	109
5.3.4	干涉腔法	111
	思考练习题	111

第3篇 激光应用

第6章	激光在精密计量中的应用	112
6.1	概述	112
6.2	激光在几何量计量中的应用	113
6.2.1	激光干涉计量示例	113
6.2.2	激光衍射测量和应用示例	114
6.2.3	双频激光干涉仪	125
6.2.4	高精度动态光电显微镜	128
6.2.5	全息干涉计量法	131
6.2.6	双 Fabry-Perot 干涉术与引力波探测	135
	思考练习题	136
第7章	激光在军事和民用工业中的应用	138
7.1	概述	138
7.2	半导体激光测距仪	140
7.2.1	光速不变时间测距	141
7.2.2	相位测距法	142
7.2.3	自动数字测相	143
7.3	激光陀螺	147
7.3.1	激光陀螺的工作原理	147
7.3.2	激光陀螺的关键问题及解决措施	149
第8章	激光在医药、食品、卫生和环境保护中的应用	151
8.1	概述	151

8.1.1	激光在生物学中的应用	151
8.1.2	激光在医学中的应用	151
8.2	激光光谱分析	152
8.2.1	基本概念	152
8.2.2	典型色散元件	154
8.2.3	现代激光光谱术	156
8.3	激光雷达	160
第9章	激光在物理、生化等科学研究中的应用	163
9.1	概述	163
9.2	激光制冷	165
9.2.1	热力学基本概念	165
9.2.2	激光制冷原理	169
9.2.3	激光制冷技术	170
9.2.4	激光制冷的应用	176
9.3	扫描光学隧道显微术	179
9.3.1	集光式 PSTM	180
9.3.2	照明式 PSTM	181
9.3.3	PSTM 在光子晶体结构研究中的应用	182
附录 A	推导普朗克辐射公式	184
附录 B	张量	186
附录 C	稳频时的调制与输出	188
附录 D	光学简史	190
附录 E	单位制和量纲	192
参考文献		196

第 1 篇 激光基础

第 1 章 辐射的基本概念

1.1 概 述

人类感觉到光是因为它产生视觉感受到的客观存在。最早的发光体是自然界中存在的太阳、燃烧物和发射荧光的矿物质或生物体,发光现象还可以包括闪电,这些都是自然界中发生的、视觉器官感受到的自然现象。

翻开光学发展史,我们知道在 17 世纪后半叶,以牛顿为代表的物理学家提出朴素的光微粒学说,他认为光的本质是由众多的、微小的、经典方式运动粒子组成。然而,同时代的惠更斯却认为光是以确定方式在空间传播的波动过程。这两种假设都能解释当时已经观察到的某些光学现象,但对另一些光学现象又都暴露出各自假设的不足和缺陷。

到 19 世纪下半叶,通过众多物理学家的实验研究,人们对电磁现象有了比较充分的认识,最后由麦克斯韦总结出一组能高度反映电磁现象的方程组及波动方程,我们用波动方程可以推导出电磁波在真空中的传播速度恰好等于从实验中获得的光在真空中的传播速度,即

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (1-1)$$

式中: c_0 是真空中的光速,新的米定义就是建立在它的基础上的,其值为 299792458m/s ; ϵ_0 为真空介电常数; μ_0 为真空磁导率。

下述例 1 从量纲和已知的 ϵ_0 、 μ_0 值推导出电磁波在真空中的传播速度为 $1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$,很明显,考虑到测量误差的影响,测量值和理论分析推导值是相等的。

例 1 已知真空介电常数 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{12} \text{F/m}$,真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 。试分别由量纲法和数值法计算电磁波在真空中的传播速度,要求精确到小数点后三位数。

解 根据电容表示式 $C = \frac{Q}{U}$ 可知,电容的量纲为 $[Q] \cdot [U]^{-1}$,而利用感应电势表示式 $E = L \frac{\partial I}{\partial t}$ 可知,电感的量纲为 $[U] \cdot [t]^2 \cdot [Q]^{-1}$,则 $\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}$ 的量纲为

$$\left(\frac{[Q] \cdot [U]^{-1} \cdot [U] \cdot [t]^2 \cdot [Q]^{-1}}{[L]^2} \right)^{-\frac{1}{2}} = [L] \cdot [t]^{-1}$$

它就是速度的量纲,代入已知值推导出电磁波在真空中的传播速度为 $2.998 \times 10^8 \text{m/s}$ (精确到小数后三位)。从此,人们普遍认为光是以光频率振动并沿波矢方向传播的电磁波。已

知的情况表明,光的电磁理论能比较圆满地解释光的反射、折射、干涉、衍射、偏振及双折射等与光的传播特性有关的一系列重要现象,但是在涉及光的发生和光与物质相互作用现象(如黑体辐射、原子线状光谱等)的规律时,经典的光波动理论又遇到困难。为了克服这些困难,普朗克在1900年提出电磁辐射源的能量量子化假设,正是这种假设奠定了近代物理学的基础。所谓能量量子化假设,就是把连续的辐射能量概念更新为不连续的一个个光量子或光子辐射能量概念。单个光子的能量 $E = h\nu$, 其中 h 为普朗克常数,它等于 $6.62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$; ν 为电磁波辐射频率。德布罗意关于物质波的假说把波动性和微粒性有机地联系起来,它的真实性也被后来的许多实验所证实。例如,观察电子束通过金属薄膜时产生的衍射现象可以确定电子束的波长,从而证明了电子束的波动性。实际上,不但运动电子构成的电子束具有此种衍射效应,其他一定质量和速度构成的粒子束都表现出衍射这种波动性。可以说,不仅仅光具有波动、微粒二象性,一切习惯概念上的实物也同样有这两种性质,这是客观物质共有的属性。可以用德布罗意公式表示这种二象性,即

$$p = mv = \frac{h}{\lambda} \quad (1-2)$$

式中: p 为微观粒子动量; m 和 v 分别是该粒子的质量和运动速度; h 为普朗克常数; λ 为德布罗意物质波的波长。例2和例3就是典型的验证物质波假设的例子。

例2 试求速度 $v = 5 \times 10^8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的 α 粒子束波长,(其中 α 粒子的质量为 $m_\alpha = 4 \times 1.67 \times 10^{-24} \text{ g}$)。

解 由德布罗意公式(1-2)得出波长为

$$\lambda = \frac{h}{m_\alpha v} = \frac{6.62 \times 10^{-27}}{4 \times 1.67 \times 10^{-24} \times 5 \times 10^8} = 1.98 \times 10^{-12} (\text{cm})$$

例3 电子束通过铝箔衍射,实验测量出第一级光谱($K_0 = 1$) 偏转角(2φ) 为 2° , 且已知铝的晶格常数为 $4.05 \times 10^{-8} \text{ cm}$, 试求电子速度。

解 由布拉格衍射公式

$$2d \sin \varphi = K_0 \lambda$$

式中: d 为晶格常数; φ 为衍射角; K_0 是衍射光谱级, λ 为电子束波长。结合式(1-2)可得出(其中电子质量 $m_e = 9.11 \times 10^{-28} \text{ g}$)

$$V = \frac{K_0 h}{m_e} \cdot \frac{1}{2d \sin \varphi} = 5.14 \times 10^7 (\text{m/s})$$

综上所述,光具有波动和粒子(量子)二象性,但到目前为止还缺少进一步的、更清晰的形象,或者说缺乏物质结构形象,人们还只是依从能量、动量或者波长、频率、相位的角度去观察、研究它。

尽管如此,在20世纪30年代前后确立的量子电动力学应用于光学研究取得重要成果,用它能正确地描述电磁辐射场与原子体系相互作用时发生的三种过程,即自发辐射、受激辐射和受激吸收过程,并能给出有关可测参数的定量描述。因为量子电动力学不属于本书讨论范畴,所以后面仅提出现有的结论,直接在它的基础上作进一步讨论。

最后应指出,尽管激光是近代物理学的重大发现,它的理论基础有一定的深度和难度,但产生激光的物理机制可以概括为产生激光的工作物质在入射电磁辐射或其他形式能源激励(俗称“激活”)下产生受激辐射,再通过光学谐振腔(关于光学谐振腔,以后将会

更详细地讨论它) 结构把它放大到足以克服损耗引起的衰减,从而输出激光。如果这一过程连续不断地进行,那么输出的就是连续波激光;若是仅仅在某一时间间隔内完成这一过程,则输出的是脉冲激光。

激光及其应用技术的产生和发展,不仅引起整个应用光学技术新的进步,而且证实了一些早先无法验证的光学理论,并促进光学理论的发展。因为激光辐射提供一种具有优良单色性、方向性、相干性和强亮度、高能量的光束,并利用发展的技术使它进一步具有可调制、调制、偏转等性能,从而人们对激光越来越重视。

1.2 辐射与物质的相互作用

1.2.1 辐射现象

在自然界中,普遍存在自发辐射和辐射吸收现象,例如天然放射性同位素、荧光物质、高温等离子体等都能自发辐射出一定波长范围内的电磁波,而物体的热辐射特性更是普遍地存在于宇宙中;当光波通过传光介质时,光能的损耗就是由辐射吸收现象引起的。至于受激辐射,一般是在特定的条件下才能实现的有规则的辐射现象。下面对三种辐射与物质相互作用时产生的物理现象,即自发辐射、受激辐射和受激吸收过程,作更详细的讨论。

1.2.1.1 自发辐射

对自发辐射的定义涉及原子的跃迁,要了解原子的跃迁首先应该了解原子结构。氢原子是最简单的原子,但它已具备原子结构的主要概念,即:(1) 原子是由原子核和围绕着原子核旋转的核外电子构成;(2) 原子核主要由核内质子和中子构成;(3) 原子的性质主要由核外电子的数目和运动状态决定。比较复杂的问题就是如何确定核外电子的运动状态,一般情况下,这类问题可以用量子力学或量子电动力学求解,但这不是本书要讨论的问题。读者仅需要了解,决定性的电子处于特定的轨道中以某种既有自转同时又有围绕着原子核转动的方式运动着,这种运动方式非常类似于太阳系中地球的自转和绕太阳公转或月球相对于地球既有自转又有公转的运动。另外原子的能级主要由电子轨道离原子核距离决定,以绕地球旋转的人造卫星为例,送入的轨道离地球越远,则发射人造卫星的能量越大。对原子也一样,电子轨道离原子核越远,原子的能级也就越高,称原子处于高能态,这个原子越不稳定,反之亦然。具有上述原子结构和能级的最基本概念以后,就可以进一步理解自发辐射、受激辐射及受激吸收现象了。

1917年,爱因斯坦计算气体平衡中有关物理量时发现自发辐射,它是指处于高能态的原子无规则地跃迁到低能级成为低能态原子时,以光子能量等于两能级能量差的形式向周围空间辐射电磁波。设原子高能级为 E_2 ,低能级为 E_1 ,则有^[1~3]

$$\nu = \frac{(E_2 - E_1)}{h} \quad (1-3)$$

式中: ν 为辐射电磁波的频率; h 前已说明为普朗克常数(注意后面本书相同符号,意义相同的不再重复说明)。式(1-3) 首先由普朗克提出。

自发辐射概率 A 定义为在 t 时刻,单位体积内处于高能态的 N_2 个原子,经过 dt 时间间隔有 dN_2 个跃迁到低能级 E_1 ,而且变化率与 N_2 成正比,该比率常数就是自发辐射概

率,即

$$(dN_2/dt)_{sp} = -AN_2 \quad (1-4)$$

式中:下标 sp 表示“自发”;负号表示 N_2 随时间减少; A 为爱因斯坦自发辐射系数。应用量子力学,由 A 进一步给出自发辐射寿命为

$$\tau_{sp} = 1/A = \frac{3\epsilon_0\lambda^3 \cdot h}{16\pi^3\eta |\mu|^2} \quad (1-5)$$

式中: η 为介质折射率; $|\mu|$ 为工作物质原子的电偶极矩大小,它相当于电子电荷 e 与该电荷离原子核距离 r 的乘积。

1.2.1.2 受激辐射

受激辐射与自发辐射的区别在于,它必须在外界辐射光子能量 $h\nu = E_2 - E_1$ 的电磁波激励下,才会使工作物质的原子产生相同光子能量的辐射。换句话说,如果没有外来电磁波的激励,工作物质产生这种辐射的可能性是极小的,对它可以定义受激辐射跃迁概率 W_{21} 为

$$(dN_2/dt)_{st} = -W_{21}N_2 \quad (1-6)$$

式中:下标 st 表示“受激”; W_{21} 指由高能级 2 向低能级 1 的受激辐射跃迁概率,它的量纲为 $[t]^{-1}$ 。尽管式(1-4)与式(1-6)形式上完全相同,但 W_{21} 和 A 代表两种不同的过程,所以物理概念是有区别的,这种区别表现在 W_{21} 除了跟原子本身性质有关以外,还与入射电磁波的强度有关,对平面波入射有

$$W_{21} = \sigma_{21} \cdot F \quad (1-7)$$

式中: F 为入射波光子流, $F = I/h\nu$, 其中 I 为辐射强度,所以光子流类似于电流,它表示单位时间流过入射波束单位横截面的光子数; σ_{21} 为受激辐射截面,量纲为 $[L]^2$,以后会更详细地讨论它。

1.2.1.3 受激吸收

在产生受激辐射前,首先要经历受激引起的吸收过程。原子只有吸收相应的光子以后,才能从稳定的低能态跃迁成为不稳定的高能态原子。这跟必须掌握必要的基础知识以后,才能进入更高层次的知识领域一样,原子要成为高能态的原子必须吸收必要的光子能量。这时,主要讨论单位体积处于低能级的原子的变化率,由它定义吸收概率 W_{12} 为

$$(dN_1/dt)_{ab} = -W_{12}N_1 \quad (1-8)$$

式中:下标 ab 表示“吸收”; W_{12} 为由低能级 E_1 向高能级 E_2 的受激吸收跃迁概率,它的量纲也为 $[t]^{-1}$ 。同样有

$$W_{12} = \sigma_{12} \cdot F \quad (1-9)$$

式中: σ_{12} 为吸收截面,它仅与原子性质有关。

通过以上叙述,我们已知道,电磁波与物质相互作用时会发生的三种基本过程,即自发辐射、受激辐射和受激吸收过程。

1.2.2 线型及线型加宽机制

线型是讨论激光时遇到的另一个最基本的概念。从光谱学的概念出发,线型指原子辐射电磁波的波谱形状,或者是辐射强度与频率的关系。但较为确切地说,原子的线型乃是

表示由量子力学给出的与电磁波辐射频率有关的概率分布函数,它表示产生或吸收某种光子的可能性,它与具体的辐射过程(自发辐射、受激辐射和受激吸收)无关。图 1-1 所示为典型的原子线型 $g(\nu)$ 。

下面进一步讨论线型加宽机制。如果原子的每个能级都是确定的常数,那么根据普朗克公式,原子线型 $g(\nu)$ 只能是 δ 函数,即 $\delta(\nu - \nu_0)$,其中 $\nu_0 = (E_2 - E_1)/h$ 。而 δ 函数的定义为

$$\delta(\nu - \nu_0) = \begin{cases} 1 & \nu = \nu_0 \\ 0 & \nu \neq \nu_0 \end{cases}$$

实际上,由于存在各种物理效应会使原子线型加宽,它成为一条在频率范围 $\Delta\nu$ 内,概率不为零的分布曲线代表的函数,我们把这种物理效应统称为线型加宽机制。下面具体讨论主要的加宽机制,讨论它有助于了解激光产生的原因和激光单色性或频率特性的由来。

1.2.2.1 均匀加宽

当对原子线型的加宽作用在频率范围内处处均等,而且对多原子构成的原子体系的加宽也都按照对个别原子相同方式加宽时,此种加宽作用称作均匀加宽。通常均匀加宽包括自然加宽和碰撞加宽。

1. 自然加宽

可以用量子力学中海森堡测不准关系讨论自然加宽。如图 1-2 所示,由于实际原子能级不是确定的常数,而是服从测不准关系在 ΔE 内变动,即

$$E + \frac{\Delta E}{2} > E > E - \frac{\Delta E}{2}$$

$$\Delta E \cdot \tau \geq \frac{h}{2\pi} \quad (1-10)$$

式中: τ 为原子处于能级 E 状态的平均寿命。

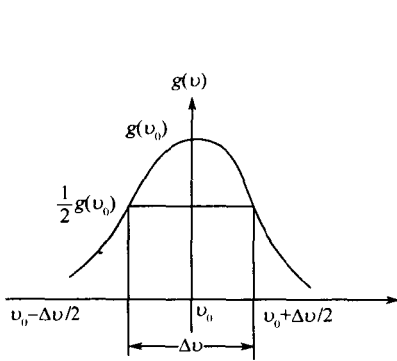


图 1-1 典型的原子线型

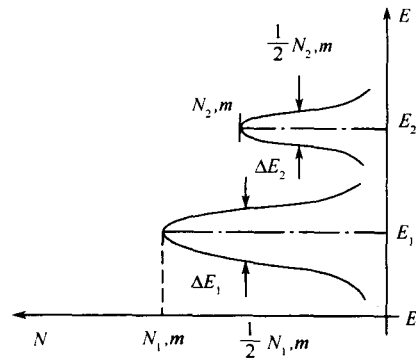


图 1-2 由海森堡测不准关系给出的原子能级示意图

由式(1-10)可以推出原子的自然加宽为

$$\Delta\nu_N = \nu_2 - \nu_1 = \frac{(E_2 + \Delta E_2/2) - (E_1 - \Delta E_1/2)}{h}$$

$$\frac{(E_2 - \Delta E_2/2) - (E_1 + \Delta E_1/2)}{h} = \frac{1}{h}(\Delta E_2 + \Delta E_1) \geq \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \right) \quad (1-11)$$

式中:下标 N 表示“自然”的意思。

例4 已知氖原子从 $3s_2(E_2)$ 能级跃迁到 $2p_4(E_1)$ 能级, 辐射波长 $\lambda_{21} = 632.8\text{nm}$ 的红光, 并经实测, $3s_2$ 原子态的寿命为 $\tau_2 \approx 2.0 \times 10^{-8}\text{s}$, $2p_4$ 原子态的寿命为 $\tau_1 \approx 2.0 \times 10^{-8}\text{s}$, 求自然加宽 $\Delta\nu_N$ 。

$$\Delta\nu_N = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{2.0 \times 10^{-8}} + \frac{1}{2.0 \times 10^{-8}} \right) \approx 1.5 \times 10^7 (\text{Hz}) = 15 (\text{MHz})$$

2. 碰撞加宽

对产生激光的气体工作物质而言, 由构成气体的微小粒子(可以是原子、分子、电离后的离子及自由电子)之间碰撞或这些微粒与容器壁的碰撞引起相干辐射电磁波的中断, 或者说在碰撞间相干波的相位突然发生变化从而使线型加宽; 而固体中的碰撞指原子与晶格的相互作用。可以通过理论分析(此处省略)给出碰撞加宽(包括自然加宽)的线型 $g(\nu)$ 为洛伦兹线型函数, 即

$$g(\nu) = \frac{\Delta\nu_c}{2\pi} \cdot \frac{1}{(\nu - \nu_0)^2 + \left(\frac{\Delta\nu_c}{2}\right)^2} \quad (1-12)$$

$$\Delta\nu_c = \frac{1}{\pi\tau_c} \quad (1-13)$$

式中: $\Delta\nu_c$ 为碰撞加宽; τ_c 为碰撞作用的时间; ν_0 为中心频率。

由式(1-12)推出, $\nu = \nu_0$ 时, $g(\nu)$ 有极大值

$$g_{\max}(\nu_0) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{\Delta\nu_c} = 2 \cdot \tau_c$$

当 $\nu - \nu_0 = \pm \frac{\Delta\nu_c}{2}$ 时, 有

$$g\left(\nu_0 \pm \frac{\Delta\nu_c}{2}\right) = \frac{1}{\pi\Delta\nu_c} = \tau_c = \frac{1}{2} g_{\max}(\nu_0)$$

从而称 $\Delta\nu_c$ 为洛伦兹线型的二分之一定义全宽度 (Fall Width of Half Maximum FWHM)。

线型函数的另一特点是它满足归一化条件

$$\int_{-\infty}^{\infty} g(\nu) d\nu = 1 \quad (1-14)$$

它表示线型函数曲线与 ν 坐标轴包围的面积被归化为 1。读者可以作为练习证明式(1-12)满足归一化条件式(1-14)。

估算碰撞时间 τ_c (对应气体工作物质)

$$\tau_c = \frac{(MK_B T)^{1/2}}{16\sqrt{\pi}pa^2} \quad (1-15)$$

式中: p 为气体压强; a 为气体原子或分子的半径; M 为原子或分子的质量; K_B 为玻耳兹曼常数; T 为热力学温度。

例5 已知氖原子, $M = 20.1 \times 1.67 \times 10^{-24}\text{g}$, $K_B = 1.38 \times 10^{-23}\text{J} \cdot \text{K}^{-1} = 1.38 \times 10^{-16}\text{erg} \cdot \text{K}^{-1}$, $T = 300\text{K}$, $a \approx 1 \times 10^{-8}\text{cm}$, $p = 0.5\text{mmHg}$, 求碰撞加宽。

① 注: $1\text{erg} = 1 \times 10^{-7}\text{J}$, $1\text{mmHg} = 133.322\text{Pa}$ 。

解 把已知的相应数值代入式(1-15),注意单位,计算后得出 $\tau_c \approx 0.495 \times 10^{-6} \text{s}$,取近似值为 $0.5 \times 10^{-6} \text{s}$,所以碰撞加宽为 $\Delta\nu_c = \frac{1}{\pi\tau_c} \approx 0.64(\text{Hz})$ 。

1.2.2.2 非均匀加宽

非均匀加宽指由加宽机制给出的影响仅在给定的原子谐振频率区才起作用,或者说,与均匀加宽相反,它不是在整个频率区处处都有加宽影响,同时,它对多原子体系的总线型起加宽作用而并不是对个别原子线型展宽。下面讨论运动原子多普勒效应引起的加宽线型作用。

如果考虑气体分子(或原子)的运动速度,那么参照设置在分子(或原子)上的坐标系,当相对静止参考系频率为 ν 的入射电磁波与速度为 v 的运动原子相互作用时,就运动原子“观察”到的电磁波频率为

$$\nu' = \nu \cdot \left[1 \pm \left(\frac{v}{c_0} \right) \right] \quad (1-16)$$

式中: c_0 为真空中光速; v 为运动分子(或原子)的速度;负号或正号分别对应运动方向与入射电磁波传播方向相同或反向。这就是多普勒效应。多普勒效应在实际测量中已得到广泛的应用,例如可以测量运动体的速度的激光多普勒测速仪。

式(1-16)可改写成

$$\nu'_0 = \frac{\nu_0}{\left[1 \pm \left(\frac{v}{c_0} \right) \right]} \quad (1-17)$$

式中: ν_0 和 ν'_0 分别为静止和运动粒子的共振频率,它的物理意义是当分子(或原子)逆着(或顺着)电磁波传播方向运动时,其中心共振频率从 ν_0 变成 ν'_0 ,逆向时取正号,顺向时取负号,即比 ν_0 小些(或大些)的入射电磁波频率才能引起逆向(或顺向)运动分子(或原子)的共振。或者说,对受激辐射或受激吸收过程,不同运动速度的分子(或原子)选择不同的外界激发电磁波频率。进一步考虑运动分子(或原子)的与速度有关的概率密度分布函数,即麦克斯韦分布

$$P(v)dv = \left(\frac{M}{2\pi K_B T} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{Mv^2}{2K_B T}\right)dv \quad (1-18)$$

式中:各符号的意义前面已经说明。

求解式(1-17)和式(1-18)得出多普勒加宽线型为

$$g(\nu) = \frac{c_0}{\nu_0} \left(\frac{M}{2\pi K_B T} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{Mc_0^2}{2K_B T} \cdot \left(\frac{\nu_0 - \nu}{\nu_0} \right)^2\right] \quad (1-19)$$

由于表示形式为高斯函数,所以习惯上又称多普勒线型为高斯线型,它的半峰值全宽度(FWHM)为

$$\Delta\nu_D = 2\nu_0 \left(\frac{2K_B T}{Mc_0^2} \ln 2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-20)$$

便于计算起见,也可表示为

$$\Delta\nu_D = 2\nu_0 \left(\frac{2RT}{Gc_0^2} \ln 2 \right)^{\frac{1}{2}} = 7.16 \cdot (T/G)^{\frac{1}{2}} \cdot \nu_0 \cdot 10^{-7} \quad (1-21)$$

式中: $R = K_B \cdot N_A = 8.31 \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$,称为气体常数; $G = M \cdot N_0$,为气体分子(或原

子)的相对分子质量(或相对原子质量)。其中 N_A 是阿伏加德罗常数,它等于 $6.026 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$ 。

例6 已知氖(Ne)原子的相对原子质量 $G = 20$,绝对温度 $T = 300\text{K}$ 。求对应谱线 $\lambda_0 = 632.8\text{nm}$ 的多普勒加宽 $\Delta\nu_D$ 。

解

$$\nu_0 = \frac{c_0}{\lambda_0} = \frac{3 \times 10^{10}}{0.6328 \times 10^{-4}} = 4.7 \times 10^{14} (\text{Hz})$$

$$\Delta\nu_D = 7.16 \times \sqrt{\frac{300}{20}} \times 4.7 \times 10^{14} \times 10^{-7} =$$

$$1.3 \times 10^9 (\text{Hz}) = 1.3 \times 10^3 (\text{MHz})$$

最后需说明,在大多数实际应用的激光工作物质中,总的加宽效应往往是多种加宽机制综合的结果,这时,总的加宽线型由各种可能的加宽线型作卷积运算给出。例如已知某工作物质激励时存在两加宽机制,即加宽线型 $g_1(\nu)$ 和 $g_2(\nu)$,那么,两种加宽的综合结果为

$$g(\nu) = g_1(\nu) * g_2(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} g_1(\nu' - \nu) g_2(\nu') d\nu' \quad (1-22)$$

式中: * 号表示数学卷积运算,即以上积分表示。

1.2.3 增益介质的饱和现象

饱和现象是自然界中普遍存在的非线性现象之一,例如饱和溶液、材料的极限强度及紧张或长期工作后的疲乏现象等。它们都表现出一种渐趋极限的过程。在这一节中讨论产生激光的工作物质,又称增益介质的饱和现象。讨论的方法是用简单的二能级系统代表增益介质,建立起粒子数密度和粒子数密度随时间变化率,即速率方程的过程并求解,从理论上分析饱和现象的产生和导出表达式。

如图1-3所示,当入射光的强度为 I ,频率为 ν 时,原子体系中处于低能级 E_1 处的粒子数密度为 N_1 ,处于高能级 E_2 处的粒子数密度为 N_2 ,为方便起见,只考虑均匀加宽,并设总的粒子数密度 N_t 不随时间变化,则对变量 N_1 和 N_2 可写出如下两个方程:

$$\frac{dN_2}{dt} = -W(N_2 - N_1) - \frac{N_2}{\tau} \quad (1-23)$$

$$N_1 + N_2 = N_t$$

式中: $W = W_{12} = W_{21}$; $\frac{1}{\tau} = \frac{2}{\tau_{sp}} + \frac{1}{\tau_{nr}}$ 。

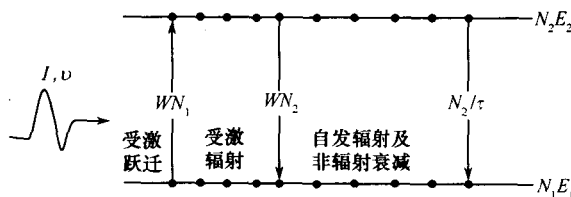


图1-3 两能级原子系统与强度 I , 频率 ν 的入射电磁波相互作用示意图

其中: τ_{nr} 为非辐射衰减寿命,它指由高能态的粒子变成低能态粒子时,并没有辐射光子,而是把能量转化为周围分子(或原子)的平动、振动或转动形式能量。在气体中,这种非辐射跃迁是由非弹性碰撞引起的;而在固体中,它是由原子与晶格振动的相互作用引起的。