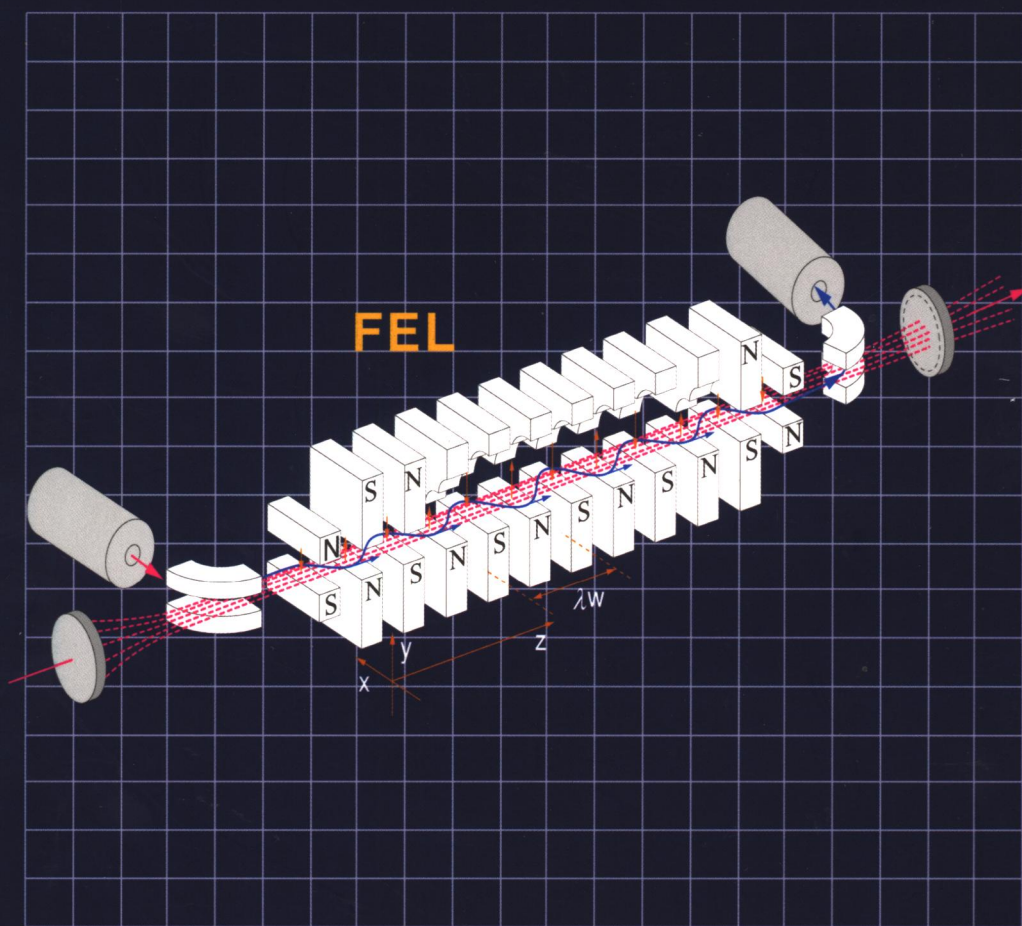


OHM 大学理工系列

激光工程

〔日〕中井贞雄 编著



科学出版社

OHM社

134

7/12/4
Z66



OHM 大学理工系列

激光工程

〔日〕 中井贞雄 编著
熊 纓 译
熊玉贤 校

科学出版社 OHM 社

2002

图字:01-2002-0308 号

Original Japanese edition

Shinsedai Kougaku Series; Laser Kougaku

Edited by Sadao Nakai

Copyright © 1999 by Sadao Nakai

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese language edition is co-published by Ohmsha, Ltd. and Science Press

Copyright © 2002

All rights reserved

本书中文版版权为科学出版社和 OHM 社所共有

新世代工学シリーズ

レーザー工学

中井貞雄 オーム社 1999

图书在版编目(CIP)数据

激光工程/(日)中井貞雄编著;熊纓译. —北京:科学出版社,2002

(OHM 大学理工系列)

ISBN 7-03-010039-5

I. 激… II. ①中…②熊… III. 激光技术-教材 IV. TN24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 004858 号

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社 OHM 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

2002 年 2 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2002 年 2 月第一次印刷 印张: 11 1/2

印数: 1—5 000 字数: 185 000

定 价: 22.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

丛书序

主编 樱井良文

现在,很多大学正在进行院系调整以及学科、专业的重组,以研究生培养为重点,引入学期制,采用新的课程体系授课,特别是由于学期制教学计划的引入,使得原来分册编写的教材很难在一个学期的教学中消化。因此,各学校对“易教”、“易学”教材的需求越来越迫切。

本系列是面向通信、信息,电子、材料,电力、能源,以及系统、控制等多学科领域的新型教学参考系列。系列中的各册均由活跃在相应学科领域第一线的教授任主编,由年轻有为的学者执笔,内容丰富、精炼,有利于对学科基础的理解。设计版面时着意为学生留出了写笔记的空间,是一种可以兼作笔记,风格别致的教学参考书。

希望肩负新世纪工程技术领域发展重任的青年读者们,通过本教程系列的学习,建立扎实的学科基础,在实践中充分发挥自己的应用能力。

OHM 大学理工系列编辑委员会

主 编

樱井良文 大阪工业大学校长
大阪大学名誉教授

副主编

西川祐一 大阪工业大学信息科学部学部长
京都大学名誉教授

编委(按姓氏笔画顺序)

广濑全孝	广岛大学教授	井口征士	大阪大学教授
木村磐根	大阪工业大学教授 京都大学名誉教授	仁田旦三	东京大学教授
白井良明	大阪大学教授	西原 浩	大阪大学教授
池田克夫	京都大学教授	滨川圭弘	立命馆大学副校长 大阪大学名誉教授

前言

我们生活的世界是充满阳光的。洒向地球的阳光不但会带来刮风、降雨等自然现象,还哺育着地球上的万物生灵。光将巨大的能量从太阳带给地球的同时,会给地球上的物质、生命带来微妙的或者强烈的变化,可以说,光是这个世界的万物万象之源。那么,光究竟是什么呢?

激光是一种最单纯的光,具有干涉性、单色性、直线传播性、聚焦性、共振性以及非线性等光学特征。从各个原子、分子的量子状态角度看,激光是一个微观世界;从受激辐射发射出的具有一定波长和相位的强电磁波来看,激光又可以说是人们能够感受到的宏观世界。

正是由于激光的不同于其它光源的“显著特性”,使得以前根本无法实施的物理化学方法以及生物、医疗、工程学和产业技术等领域的新方法得以开发,并进一步被实用化。比如,利用单色性进行分光,利用飞秒(fs, $1\text{fs}=10^{-15}\text{s}$)级的超短脉冲进行高速现象的时间分解检测,利用干涉性进行精密计量,利用聚焦后产生的几千摄氏度到几万摄氏度的高温进行各种激光加工,还有对生物体的无伤害式诊断等等,这些技术已广泛、深入地渗透到理化、工程、产业技术、医疗等各个领域,并正在普及推广。激光技术本身作为一门新技术,其惊人的发展速度令人注目。有人预言,21世纪将是光的时代。继1960年第一台激光器出现以后,激光技术不断得到发展,它必将在通信、信息处理、计量、工业加工、土木建筑、能源、生物、医疗等广阔的领域带来一场革命性的变革。

本书作为一种新型工科教育的尝试,更注重应用,在讲述应用技术的结构形式上,尽量从基本概念、物理现象入手,以便读者更容易理解。也就是说,用身边的现象来加深对抽象的基础理论和相关物理知识的理解。我们知道,好奇心和兴趣是学习新生事物的最大原动力,新型理科教育的改革就是基于这一基本思路,并提前走了一步。现在再把它运用到工科教育上。

书中各章节的执笔者均是工作在激光工程及相关领域的专家,他们长年从事大学工科教育,更是熟悉学生的兴趣和问题意识的教育专家。《激光工程》这本书涉及了从基础的量子电磁光学理论到广泛的产业技术应用等内容,讲授形式上可分两个单元一学期授完。书中有关的专业用语注重习惯用法,尽量做到全书统一。

我们希望读者通过本书的学习,能够提高科学、技术意识,扩大视野,与此同时,更希望有识之士能够切实意识到:在激光出现 40 年后,面对已来临的被誉为“光的时代”的 21 世纪,人们将如何去充实激光以及激光技术的基础知识,开拓独立的、富有个性的思维,去驾驭以“光”为中心的 21 世纪新社会。

中井贞雄

目 录

第 1 章 激光产生的基本原理	1
1.1 原子、分子和能级	1
1.1.1 原子的能级	1
1.1.2 分子的能级	2
1.2 光的吸收和释放	4
1.3 反转分布和光放大	8
1.3.1 反转分布	8
1.3.2 光放大	10
1.4 光学谐振腔	12
1.4.1 光学谐振腔的种类	13
1.4.2 光学谐振腔的稳定性	14
1.4.3 横模和纵模	15
1.4.4 谐振腔的损耗和 Q 值	17
1.5 激光发生器	18
练习题	20
 第 2 章 典型激光器	 21
2.1 激光器的基本结构	21
2.2 气体激光器	24
2.2.1 放电激励形成反转分布	24
2.2.2 氦-氖激光器	25
2.2.3 二氧化碳激光器	26
2.2.4 准分子激光器	28
2.2.5 氩离子激光器	29
2.3 液体激光器	30
2.3.1 染料激光器的激发机理	31
2.3.2 染料激光器的主要类型	33
2.4 固体激光器	34
2.4.1 固体激光器概述	34
2.4.2 一般固体激光器	36

2.4.3	新型固体激光器	37
2.4.4	高功率固体激光器	40
2.5	自由电子激光器	41
2.5.1	自由电子激光器概述	41
2.5.2	自发辐射光的形成机理	43
2.5.3	受激辐射光的形成机理	44
2.5.4	FEL的主要类型	47
2.5.5	螺旋摆动器和平面摆动器的电子 运动关系	48
2.5.6	FEL的研究现状	50
2.6	半导体激光器	50
2.6.1	LD的基本结构	50
2.6.2	LD的基本特性	51
2.6.3	LD激光的产生机理	52
2.6.4	高性能LD的主要类型	54
2.7	X射线激光器	55
2.7.1	X射线激光器概述	55
2.7.2	等离子体X射线激光的产生机理	56
2.7.3	X射线激光器的研究进展	59
	练习题	61

第3章 激光的性质 63

3.1	电磁波的种类及其属性	63
3.1.1	长波长的电磁波——电波	63
3.1.2	短波长的电磁波——光	64
3.1.3	更短波长的电磁波——放射线	65
3.2	谱线及相干性	65
3.2.1	单色光和谱线	65
3.2.2	自然光和激光的区别——相干性	67
3.2.3	相干性及谱线的测定——干涉 仪法	68
3.2.4	时间相干性和空间相干性	69
3.2.5	自然光可否转变为激光	70
3.3	激光的偏振性	70

3.3.1	光遵从的法则——麦克斯韦方程	70
3.3.2	光是横波	71
3.3.3	偏振光	71
3.4	激光的折射和反射	73
3.4.1	激光的折射	73
3.4.2	激光的反射	74
3.4.3	相速度和群速度	75
3.5	激光的衍射	76
3.5.1	夫琅和费衍射	77
3.5.2	艾里衍射	78
3.5.3	激光的聚焦	79
3.6	激光束的特点	79
3.6.1	超稳定的光	79
3.6.2	超短脉冲的光	79
3.6.3	超高强度的光	80
	练习题	81
第 4 章	激光与物质的相互作用	83
4.1	激光在物质中的传播	83
4.1.1	激光在物质中的传播和吸收	83
4.1.2	激光的散射	85
4.2	激光探测技术	87
4.2.1	激光的捕捉	87
4.2.2	热电探测器	88
4.2.3	光电探测器	89
4.2.4	整流式探测器	92
4.2.5	激光的图像测量	92
4.2.6	超短光脉冲的测量	93
4.3	激光在光学晶体中的传播现象	94
4.3.1	改变激光颜色	94
4.3.2	偏振光、旋光、双折射	94
4.3.3	非线性光学现象	95
4.3.4	波长变换的原理	95
4.3.5	倍频光的产生	97
4.3.6	相位匹配	97

4.4	高强度激光的物质加热和蒸发	99
4.4.1	连续式激光器和脉冲式激光器 ...	99
4.4.2	激光加热的机理	100
4.4.3	激光热蒸发	101
4.4.4	光化学效应激光蒸发	102
4.4.5	应用领域	103
4.5	激光诱导化学过程	104
4.5.1	什么是激光诱导化学过程	104
4.5.2	激光波长和解离能的关系	105
4.5.3	激光切断分子	106
4.5.4	激光引起的多光子吸收	108
4.5.5	液体、固体的光化学反应	108
	练习题	109

第5章 激光的技术应用

5.1 激光通信及信息处理

5.1.1	光纤通信	111
5.1.2	激光信息处理	113
5.1.3	激光印刷	115
5.2	激光在材料加工中的应用	116
5.3	激光在化学上的应用	120
5.3.1	光化学反应	120
5.3.2	激光分离同位素	122
5.4	激光在计量学中的应用	125
5.4.1	激光计量的特点	125
5.4.2	激光干涉计量	126
5.4.3	激光环境计量(激光雷达)	127
5.4.4	激光陀螺仪	129
5.5	激光在土木、建筑中的应用	130
5.5.1	激光表面处理及剥离	131
5.5.2	激光切断及解体	132
5.5.3	激光挖掘	133
5.6	激光在医学中的应用	134
5.6.1	激光是如何被水吸收的	136
5.6.2	激光医疗器械(激光手术刀)	138
5.6.3	激光诊断及治疗	139

练习题	141
第 6 章 21 世纪的激光技术	143
6.1 探求无穷的绿色能源——激光核聚变	143
6.1.1 激光和核聚变	143
6.1.2 激光压缩点燃核聚变的原理	145
6.1.3 激光核聚变研究的现状和今后 的课题	147
6.1.4 今后的展望	150
6.2 探求宇宙的起源	150
6.2.1 开辟天文学新领域的重力波	150
6.2.2 重力波天线激光干涉仪	151
6.2.3 激光干涉仪的结构和特点	153
6.2.4 提高激光干涉仪的灵敏度	154
6.2.5 探索宇宙的奥秘	155
6.3 激光带来的产业革命	156
6.3.1 21 世纪——光的时代	156
6.3.2 激光带来的产业革命	158
6.3.3 激光和未来世界	159
练习题	160
练习题简答	161
参考文献	167

第 1 章

激光产生的基本原理

激光是 20 世纪最重要的发明之一。1960 年 6 月, Hughes 研究所(美国)的梅曼(Maiman)首先发现了世界上最早的激光。它用闪光灯激励红宝石,发出波长为 $6943\text{\AA}$ 的脉冲式的连续光。

1960 年 12 月, 嘉万(Javan)、海利特(Herriot)、贝纳特(Bennett)等人利用高频放电激励氦-氖(He-Ne)气体,可以输出波长 $1.15\mu\text{m}$ 上下几种谱线的连续光。此后,又开发出从远红外到 X 射线范围的各种激光,并广泛用于光通信、计量、记录、加工、医疗及能源开发等领域。

激光(LASER)一词是英语“Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”的字头缩写,意思是“通过受激辐射实现光放大”,现已成为世界性的学术用语及一般用语。本章将叙述激光产生的最基本原理。

1.1 原子、分子和能级

1.1.1 原子的能级

为了说明原子谱线不是连续性的,而是以各自分散的谱线发光这一事实,玻尔(N. Bohr)利用量子力学的原理提出以下两种理论:

(1) 原子内的电子沿原子核周围的轨道运转时,其轨道半径不是任意连续的数值。即电子只是沿量子化的轨道运转。此时,电子沿轨道做旋转运动的过程中并不发射光。电子的角动量 L 用下式表示:

$$L = mvr = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar \quad (1.1)$$

这里, m 是电子质量, r 是轨道半径, v 是电子速度, h 是普朗

克(Planck)常数 $\hbar = h/2\pi$ (称为狄拉克常数), $n (=1, 2, 3, \dots)$ 是主量子数。式(1.1)称为量子化条件。

原子序号为 Z , 主量子数为 n 的电子轨道半径为

$$r_n = -\frac{n^2 \hbar^2}{4\pi^2 m Z e^2} = \frac{n^2 \hbar^2}{m Z e^2} \quad (1.2)$$

能量为

$$E_n = -\frac{2\pi^2 m Z^2 e^4}{n^2 \hbar^2} \quad (1.3)$$

因此, 只要分别赋予 n 以整数 $1, 2, 3 \dots$ 等数值, 就可得出相应的量子化能量 $E_1, E_2, E_3 \dots$ 权值。

原子具有的能量是随原子的种类不同而不等的离散性数值, 可以用电子的动能和势能之和表达。电子处于 $n=1$ 轨道上时, 能量处于最低的状态, 称之为基态, 比之高的能量状态称为激发态。图 1.1 表示了原子的能量状态的大小, 称此能量状态为能级。

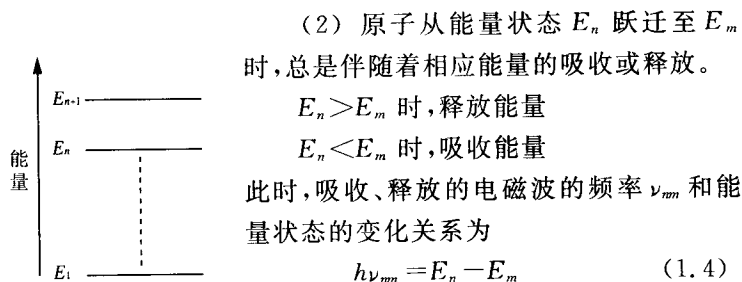


图 1.1 原子的能级 称之为玻尔受激条件。

1.1.2 分子的能级^[1]

随着原子序号 Z 的增大, 原子变得复杂化, 被电子充满的能级数增多。分子的情况比原子更复杂, 在复数的原子核场中运动的电子, 其势能不是单一的, 所以能级数增多。另外, 如同原子中的能量被量子化一样, 与原子核相关的振动能和转动能也被量子化。受激的分子跃迁的机会增多, 因此往往呈现出带状谱线。

分子的内能由以下四部分能量构成, 它们分别是: 最外层的电子状态决定的电子能 E_e , 分子内的原子核的振动状态决定的振动能 E_v , 分子的转动运动决定的转动能 E_r 以及转换能 E_t 。可用下式表示:

$$E_{\text{total}} = E_e + E_v + E_r + E_t \quad (1.5)$$

式(1.5)中最后一项 E_t , 在讨论整个分子体热运动的性质时更重要, 这里可以省略。在处理分子能级间的跃迁, 以及因此而释放或

吸收光子的谱线时,必须考虑以下三种跃迁:

① 转动跃迁:只在转动能级间的跃迁(电子及振动状态一定);

② 振动-转动跃迁:振动能级间的跃迁(转动状态同时变化,电子状态一定);

③ 电子跃迁:电子状态间的跃迁(振动及转动状态同时变化)。

这里,我们来看一下分子具有的各能量的相对大小。处于原子核间距的分子的基态能量最小,最稳定。因此,电子状态的能量 E_e 是氢原子基态能量的 2 倍,即

$$E_e \approx \frac{me^4}{\hbar^2} \quad (1.6)$$

这里, e 是电子电荷的绝对值。

振动能级的能量为

$$E_v = h\nu \left(v + \frac{1}{2} \right) \quad (v=0, 1, 2, \dots) \quad (1.7)$$

这里, ν 是频率, v 是振动量子数。又可写为

$$E_v = \sqrt{\frac{m}{M}} E_e \quad (1.8)$$

这里, M 是质子质量,由于 $m/M \approx 1/2000$,所以 E_v 约为 E_e 的几十分之一。

下面,再计算一下转动能 E_r 。质量为 M 的粒子绕半径 a_0 做圆周运动时,其惯性矩为 $I = Ma_0^2$ 。如果旋转的角速度为 ω ,则线速度为 $v = a_0\omega$,动量 $p = Mv$ 。该粒子的动能可表示为

$$E = \frac{p^2}{2M} = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (1.9)$$

若角动量定义为 $J = pa_0$,则 $E = J^2/2I$ 。这里,根据德布罗意的物质波公式 $p = h/\lambda$ 和 $2\pi a_0 = n\lambda$,得出 $p = nh/2\pi a_0$,则上式可写为

$$E = \frac{n^2 \hbar^2}{2Ma_0^2} \quad (1.10)$$

因为玻尔半径 $a_0 \approx \hbar^2/me^2$,代入式(1.10)即可计算转动能:

$$E_r \approx \frac{\hbar^2}{Ma_0^2} = \frac{m}{M} E_e \quad (1.11)$$

看得出,比 E_v 小一个数量级。

如果粗略表示这三种分子能量,则有

$$E_e: 1 \sim 10 \text{ eV} \approx 10^4 \sim 10^5 \text{ cm}^{-1}$$

$$E_v: 0.01 \sim 0.1 \text{ eV} \approx 10^2 \sim 10^3 \text{ cm}^{-1}$$

$$E_r: 0.001 \sim 0.01 \text{ eV} \approx 10 \sim 10^2 \text{ cm}^{-1}$$

随着温度的上升,分子开始做旋转运动并同时产生振动。分子的平均动能是 kT (k 是玻尔兹曼常量, T 是热力学温度), 所以常温 ($T=300\text{K}$) 时的 kT 值为

$$kT = 1.38 \times 10^{-23} \times 300 \text{ J} = 2.5 \times 10^3 \text{ J/mol} = 200 \text{ cm}^{-1} \quad (1.12)$$

该值虽然超过了分子转动能的上限, 但仅处于振动激发能下限稍上的位置。因此常温时的分子一边做热运动(转换运动), 一边做旋转运动, 而几乎不产生振动激发。相反, 电子激发需要的能量更高, 所以, 常温下的大部分分子处于基底电子状态。

1.2 光的吸收和释放

为了说明物质对光的吸收与释放, 我们以能级状态分别为 E_m 、 E_n 的二能级物质为例, 如图 1.2 所示。这里, E_m 、 E_n 分别表示原子、分子或离子等粒子的下能级(基级)和上能级(激发级)的能量状态。

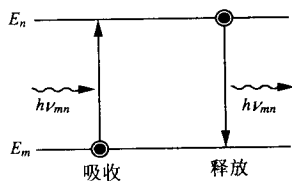


图 1.2 光的吸收和释放

如果粒子获取外部能量从 E_m 激发至 E_n , 即使不受外部的任何刺激, 处于激发能级的原子、分子等都会自发地跃迁到基态, 此时释放出相当于能量

为两能级之差、频率为 ν_{mn} 的光子, 如式(1.4)所示。此过程称为自发辐射(spontaneous emission)。

在 $t=0$ 时, 假设 E_n 能级上有 N_n 个原子, 那么, 单位时间内发生自发辐射的原子数如下式所示:

$$-\frac{dN_n}{dt} = A_{mn} N_n = \frac{N_n}{(t_{sp})_{mn}} \quad (1.13)$$

这里, A_{mn} 是处于 E_n 能级的原子下跃迁至 E_m 的自发辐射概率, $(t_{sp})_{mn} = A_{mn}^{-1}$ 是粒子滞留在 E_n 能级的时间, 称为自发辐射寿命。自发辐射必定是从能量高的状态向能量低的状态跃迁的过程, 反之不成立。

下面, 以自发辐射 ν_{mn} 等频率的光照射原子, 如图 1.2 所示。原子吸收光子能量后, 从能态 E_m 跃迁至 E_n 。此时, 照射的光能被

吸收,因此称之为**受激吸收**或简称吸收。

若处于激发态 E_n 的原子在自发辐射之前,受到相当于两个能级间频率为 ν_{nm} 的外来光子的作用,则会受激并沿入射光方向辐射出光子。称之为**受激辐射**(induced emission)。这种受激辐射在激光器的工作过程中非常重要。

假设单位频率的入射光的能量密度为 $\rho\nu$, E_m 的原子密度为 N_m , E_n 的原子密度为 N_n 。那么,从能级 E_n 跃迁至 E_m 的迁移率与 $\rho\nu$ 呈线性关系,如下式:

$$\left. \begin{aligned} \text{受激吸收迁移率} &= N_m \rho\nu B_{nm} \\ \text{受激辐射迁移率} &= N_n \rho\nu B_{mn} \end{aligned} \right\} \quad (1.14)$$

这里, B_{nm} 是比例常数,又称爱因斯坦(Einstein)受激吸收系数, $\rho\nu B_{nm}$ 是受激吸收率。 B_{mn} 是爱因斯坦受激辐射系数。

处于热平衡状态的原子体系中,每秒产生的受激吸收、自发辐射、受激辐射的次数,即从 n 向 m 的下跃迁概率与从 m 向 n 的上跃迁概率必定相等。

$$N_n \rho\nu B_{nm} + N_n A_{nn} = N_m \rho\nu B_{mn} \quad (1.15)$$

这里, A_{nn} 是处于能级 E_n 的粒子因自发辐射而跃迁至能级 E_m 的概率,又称自发辐射跃迁概率。

由式(1.15),得

$$\rho\nu = \frac{A_{nn}}{(N_m/N_n)B_{mn} - B_{nm}} \quad (1.16)$$

若原子体系处于温度为 T 的热平衡状态下,那么,占据各能级 E_n 和 E_m 上的原子数 N_n 和 N_m 之比可按玻尔兹曼分布规律给出:

$$\frac{N_n}{N_m} = \exp\left(-\frac{h\nu_{nm}}{kT}\right) = \exp\left(-\frac{E_n - E_m}{kT}\right) \quad (1.17)$$

将式(1.17)代入式(1.16),得

$$\rho\nu = \frac{A_{nn}}{B_{mn} \exp(h\nu_{nm}/kT) - B_{nm}} \quad (1.18)$$

原子体系处于温度为 T 的黑体辐射场和热平衡时,热平衡的辐射密度 $\rho\nu$ 可由普朗克辐射公式给出:

$$\rho\nu = \frac{8\pi h \nu_{nm}^3}{c^3} \frac{1}{\exp(h\nu_{nm}/kT) - 1} \quad (1.19)$$

这里, c 是真空中光速。对比式(1.18)和式(1.19),可知:

$$\begin{aligned} B_{nm} &= B_{mn} \\ A_{nn} &= B_{nn} \frac{8\pi h \nu_{nm}^3}{c^3} \end{aligned} \quad (1.20)$$

显然,式(1.20)即为人们熟知的爱因斯坦关系式。处于黑体辐射和热平衡的原子体系的一对能级,其自发辐射与受激辐射的跃迁概率之比 R 为:

$$R = \frac{N_n A_{nm}}{N_g \rho \nu B_{nm}} = \frac{8\pi h \nu_{nm}^3}{\rho \nu c^3} = \exp\left(-\frac{h\nu_{nm}}{kT}\right) - 1 \quad (1.21)$$

自发辐射所释放的光谱线不是严格的单色光(即单一频率),而是具有一定的频率宽度。自发辐射谱线展宽的原因之一是产生自发辐射的能级寿命 τ 是有限的。 τ 用自发辐射的跃迁概率 A_{nm} 的倒数表示:

$$\tau = \frac{1}{A_{nm}} \quad (1.22)$$

我们把激发态的自发光辐射问题作为衰减振子问题来考虑。辐射光的电场分量是衰减的正弦函数 $\exp(-\sigma t/2 + i\sigma\omega_0 t/2)$ 。该正弦函数的傅里叶变换为 $i/(\omega_0 - \omega + i\sigma/2)$,与自发辐射的谱线强度 $1/\{(\omega - \omega_0)^2 + (\sigma/2)^2\}$ 成正比。这种谱线强度曲线称为洛伦兹型曲线(Lorentzian)。假如洛伦兹型函数的半幅线宽(full width at half-maximums, FWHM)为 $\Delta\nu$,则

$$\Delta\nu = \frac{\sigma}{2\pi} = \frac{1}{\pi\tau} \quad (1.23)$$

自发辐射的光强分布与频率的关系用线型函数 $g(\nu)$ 表示,根据式 $1/\{(\omega - \omega_0)^2 + (\sigma/2)^2\}$,并将式(1.23)代入 $\int_{-\infty}^{+\infty} g(\nu) d\nu = 1$ 中,整理后得到归一化的洛伦兹线型函数^[2]:

$$g(\nu) = \frac{\Delta\nu}{2\pi\{(\nu - \nu_0)^2 + (\Delta\nu/2)^2\}} \quad (1.24)$$

这里, ν 为频率, ν_0 为谱线中心的频率, $\Delta\nu$ 称为自然线宽。洛伦兹型谱线如图1.3所示,下摆较宽。这是因为物质内的各原子的响

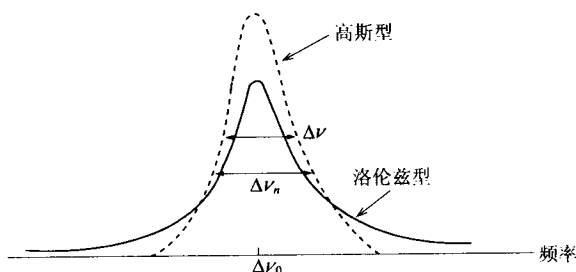


图 1.3 相等半幅线宽下,自发辐射的均匀加宽(洛伦兹型)和多普勒效应的非均匀加宽(高斯型)