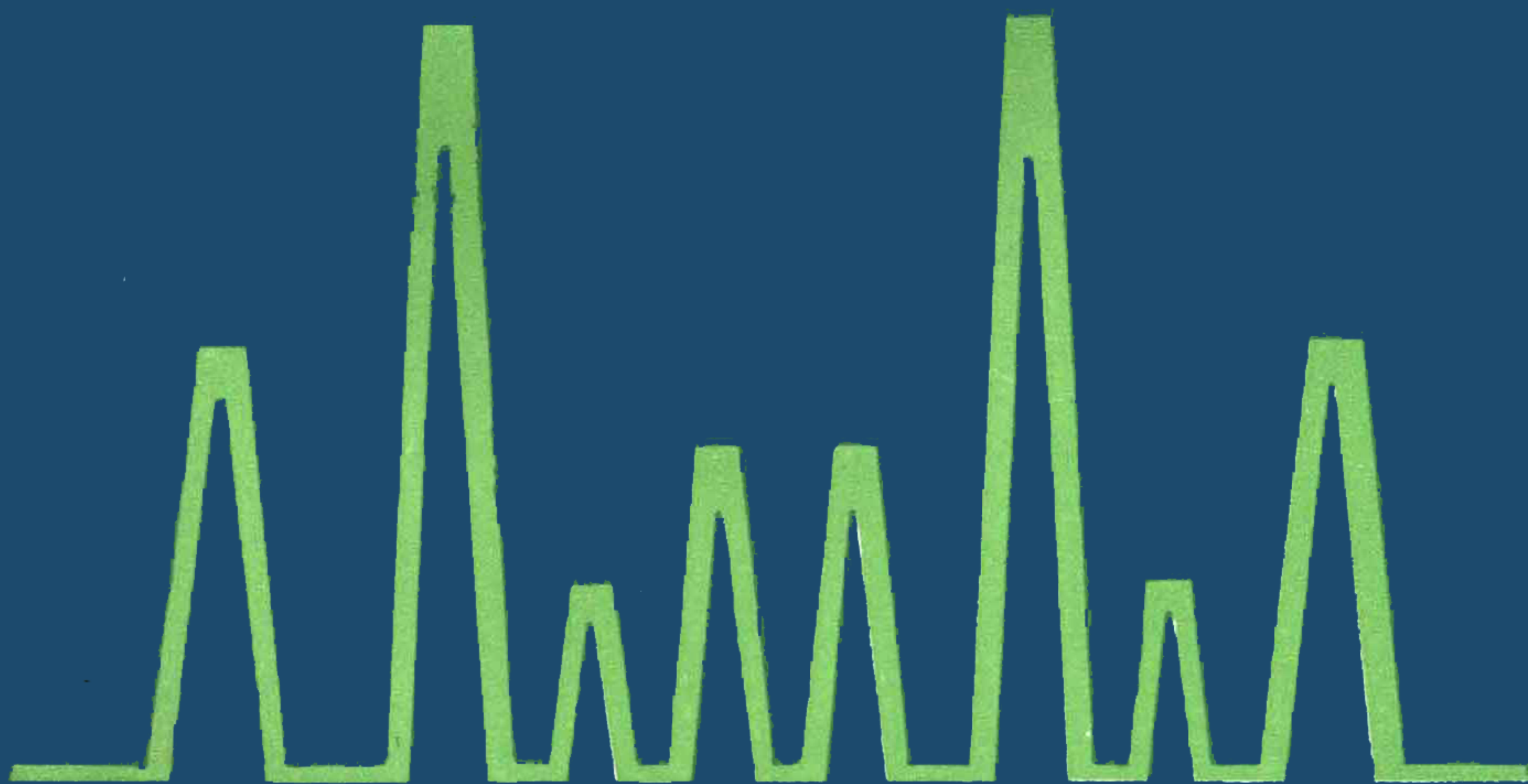


# 激光实验 原理和方法

屠钦澧 张自襄 主编



北京工业学院出版社

# 激光实验原理和方法

屠钦澧 张自襄 主编

北京工业学院出版社

## 内 容 简 介

本书是激光实验课教材，内容包括：激光的基本概念、激光参数测量的基本原理和方法、一些关键的仪器和设备、31个专题实验项目。这些激光实验是长春光机学院和北京工业学院的激光专业，多年来教学经验的总结，因而较为适合本国实际情况，便于实现，有一定实用价值。

本教材力图保持与《激光原理》《激光器件与技术》等教材的一致性，又不失为一门独立完整的实验课指导教材。在原理阐述上力求深入浅出而重在指导实验，以加强学生在实验方法和技能方面的培养。

本教材主要用作高等院校光电子技术、应用光学、应用物理等专业本科生教材，也可供研究生及从事激光技术的科技人员参考。

### 激光实验原理和方法

屠钦澧 张自襄 主编



北京工业学院出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

清河东升印刷厂印刷



787×1092毫米 32开本 14.125印张 315千字

1988年6月第一版 1988年6月第一次印刷

ISBN7-81013-006-4/TB·2

印数：1—4,000册

定价：2.30元

# 前 言

本书是原兵器工业部教材编审委员会的统编教材之一。

本书分为两篇，第一篇介绍了激光的基本概念和激光参数测量的基本原理与方法以及一些关键的仪器设备；第二篇叙述31个专题实验项目，每个项目都包括有实验原理、内容和方法。通过这些实验，使学生加深对激光的基本概念和理论的理解，培养学生实际工作和独立解决问题的能力。

《激光实验原理和方法》涉及知识面广，由于对每一个实验的原理都做了深入浅出的叙述，所以它的适用范围较宽，除了可作为光电子技术、应用光学、应用物理等专业的本科生教材外，亦可做为其它专业的本科生和研究生的激光原理与实验等课程教材，或供从事激光技术的科技人员参考。本教材全部内容的学时数约为八十学时。

参加本书编写工作的有（以书写内容的先后为序）：

徐荣甫、梁柱、张自襄、李迺吉、明万林、刘屹、屠钦澧、李树元、王法义、钟景昌、梁柱云、刘宏发、丁陟高、刘英同、王喜祥、郝淑英、梁作亮、王惠文、承华珍、马俊芝。

哈尔滨工业大学马祖光教授、王雨三副教授对书稿进行了主审。经哈尔滨工业大学、天津大学、吉林大学、北京工业学院、长春光机学院参加的教材审稿会上正式审定。本书的责任编委是北京工业学院的徐荣甫副教授和长春光机学院的马俊芝副教授。长春光机学院的沈柯教授、北京工业学院的魏光辉教授、吉林大学的费浩生副教授等提出了宝贵的修改意见，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免有不妥之处，望读者批评指正。

编者 1987.6

# 目 录

## 第一篇 激光实验基础知识

### 第一章 激光原理概述

- §1.1-1 发射及吸收····· ( 2 )
- §1.1-2 激光产生的基本原理····· ( 8 )
- §1.1-3 腔和模····· ( 31 )
- §1.1-4 激光的基本特性及应用特点····· ( 47 )

### 第二章 激光参量的一般测量方法

- §1.2-1 激光能量和连续输出激光功率的测量····· ( 50 )
- §1.2-2 激光峰值功率的测量····· ( 68 )
- §1.2-3 激光发散角的测量····· ( 77 )
- §1.2-4 激光纵、横模观测····· ( 82 )
- §1.2-5 频率稳定性的测量····· ( 91 )
- §1.2-6 激光器的噪声及其测量概述····· ( 96 )

### 第三章 激光调整及主要检测仪器

- §1.3-1 激光实验常用调整仪器····· ( 99 )
- §1.3-2 激光检测精密仪器····· ( 103 )
- §1.3-3 激光实验常用光谱仪器····· ( 120 )

## 第二篇 激光实验

- 实验 1 氦-氖放电管荧光光谱及其增益特性的测量 ( 130 )
- 实验 2 氦-氖激光器内部参数的测量····· ( 140 )
- 实验 3 氦-氖激光器纵、横模的测量分析····· ( 147 )
- 实验 4 高斯光束的参数测量及透镜变换····· ( 155 )

实验 5	氦-氖激光器最佳放电条件的选择.....	( 166 )
实验 6	二氧化碳激光器的选支与标定.....	( 179 )
实验 7	横向电激励二氧化碳激光器的测试.....	( 189 )
实验 8	红宝石发射光谱的观测.....	( 197 )
实验 9	激光工作物质 (红宝石、钕玻璃、若丹明B) 的吸收光谱测量.....	( 203 )
实验10	固体激光材料荧光寿命的测量.....	( 213 )
实验11	激光晶体光学质量的测试.....	( 220 )
实验12	$\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 脉冲激光器的装调和最佳输出耦 合的选取.....	( 226 )
实验13	半导体激光器的发射光谱测量.....	( 239 )
实验14	半导体激光器主要参数的测定.....	( 254 )
实验15	染料激光器的调谐与特性测试.....	( 266 )
实验16	光学双稳态.....	( 283 )
实验17	电光调制及语音传递实验.....	( 293 )
实验18	电光Q 开关技术.....	( 305 )
实验19	染料调Q 激光器的输出特性.....	( 313 )
实验20	$\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 脉冲激光器腔空技术倒.....	( 324 )
实验21	声光偏转和声光调制.....	( 335 )
实验22	连续 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器声光调Q.....	( 347 )
实验23	连续 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器主动锁模.....	( 356 )
实验24	固体激光器的选模.....	( 363 )
实验25	固体激光放大器.....	( 374 )
实验26	固体激光倍频和三倍频.....	( 385 )
实验27	激光器的无源腔稳频方法及频率稳定性的 测量.....	( 395 )
实验28	横向塞曼稳频激光器原理实验.....	( 405 )

实验29	全介质反射膜的制备.....	( 415 )
实验30	受激喇曼散射实验.....	( 426 )
实验31	相干反斯托克斯喇曼散射及应用.....	( 437 )

# 第一篇 激光实验基础知识

本教材的目的旨在讲解有关激光实验的原理和方法，这将涉及到激光原理、用精密仪器去测量激光参数、对测量结果进行数据处理等多方面的知识和技能。本篇介绍通用的基础知识和有关技术资料。其中第一章阐述有关激光的基本原理，较为系统地介绍实验中涉及的基本概念和定义。第二章系统地介绍激光器输出特性（外部参量）的一般测量方法，为扩展读者的知识面，本章将介绍输出特性的各种可能测量方法。第三章列举激光实验中所用的某些关键仪器并简要分析其工作原理、结构及性能，以帮助读者正确使用和购置必备的关键器材。

## 第一章 激光原理概述

激光，是本世纪继原子能和半导体之后，在六十年代初迅速发展起来的又一项重大的新技术。激光的出现标志着人们掌握和利用光波进入了一个新的阶段。在光学领域内，由于以往普通光源的单色亮度很低，很多重要的应用都受到限制。普通光源发射的光波亮度之所以很低，主要是由于普通光源发射的光是来源于原子或分子的自发辐射。自发辐射光波的方向、频率及位相等都是很不确定、分散的。而原子（或分子）的受激发射光波，其方向、频率和位相等都是相同的。故利用原子或分子的受激辐射完全有可能大大提高光源的单色亮度，使光源在单色亮度上产生一个飞跃。

1958年，美国的Schawlow和Townes首先从理论上阐明了利用原子的受激辐射实现光频相干电磁辐射（高单色亮度光）的可能性及技术途径。1960年，美国的Maiman首先在实验室中用红宝石晶体获得了高单色亮度光——激光。此后，激光器件和技术获得了突飞猛进的发展，相继出现了各种固体激光器、气体激光器、半导体激光器、染料激光器、化学激光器及自由电子激光器等各种类型的器件。激光波长覆盖了紫外、可见、红外等光谱范围。因此，激光的出现，不仅从根本上突破了以往普通光源单色亮度很低的缺陷，赋予了古老的光学技术以新的强大生命力。而且，激光的出现把无线电技术与光学技术相互沟通了起来，使无线电技术与光学技术相互渗透、相互补充，开辟了一系列无线电和光学应用的新领域。

## §1.1-1 发射及吸收

激光，定义为由受激发射的光放大产生的辐射。故欲准确地理解激光两字的涵义，必须首先了解何谓受激发射和自发发射。

### 一、自发发射（自发辐射）

1. **原子或分子的自发发射过程** 原子或分子的能量状态只能取分立的数值，能量最低的状态称为基态，能量比基态高的状态称为激发态。我们来研究一个二能级系统。如图1.1-1所示，能级1表示基态，能级2是激发态，分别用 $E_1$ 和 $E_2$ 代表它们各自的状态。假设某原子起初位于能级2，因为 $E_2 > E_1$ ，处于激发态 $E_2$ 的原子是不稳定的，即使没有任何

外界光信号的作用，也将自发地跃迁到基态 $E_1$ 上去。跃迁时辐射出一个光子(图中(a))，光子的能量为

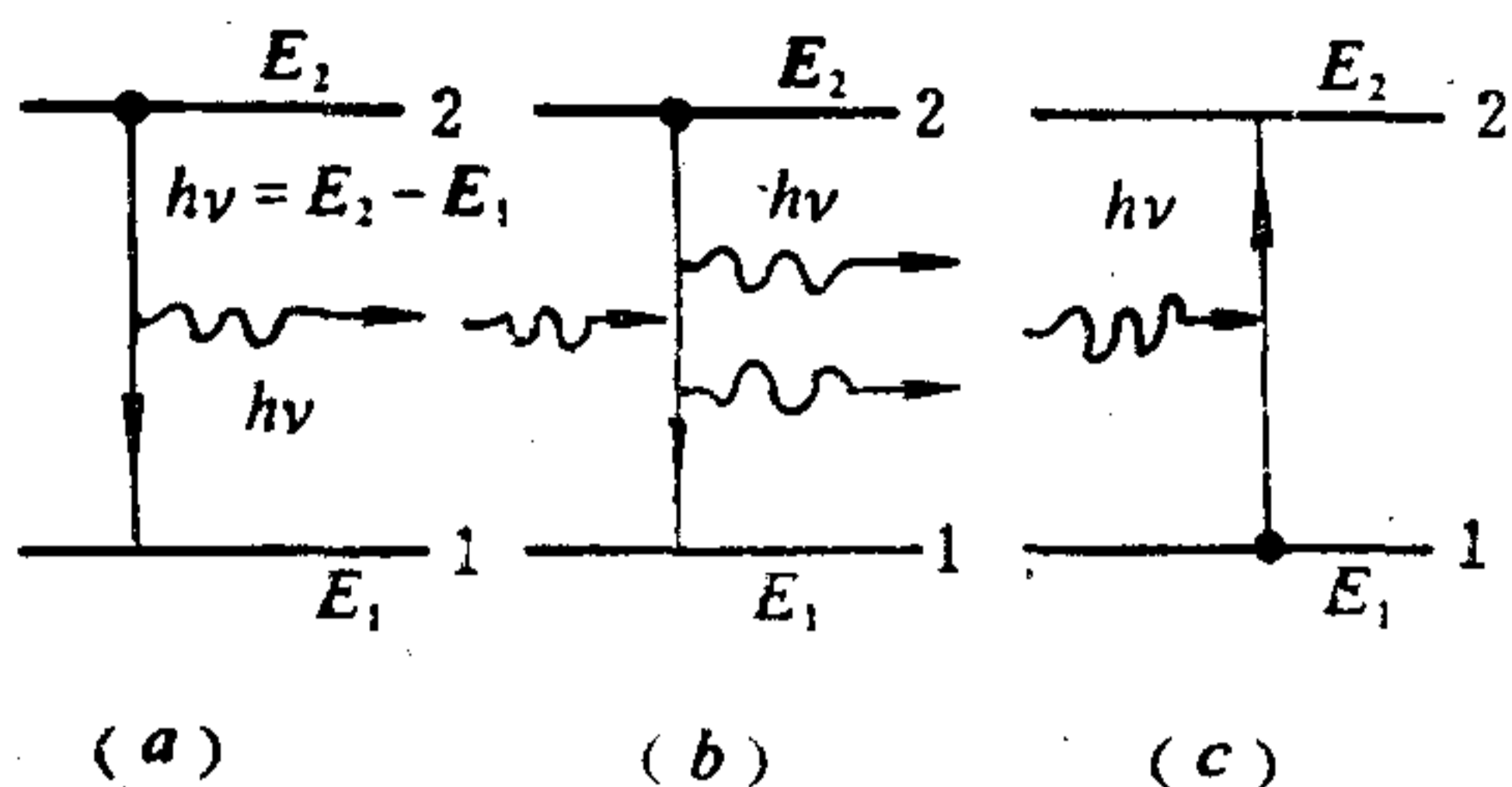


图1.1-1 三种跃迁过程的说明

(a) 自发辐射；(b) 受激辐射；(c) 吸收

$$h\nu_{21} = E_2 - E_1 \quad (1.1-1)$$

式中， $h$ 是普朗克常数； $\nu_{21}$ 是跃迁产生的光波频率。

处于激发态上的原子，在没有外界光信号作用下，自发地跃迁到低能态时产生的光辐射，称之为自发辐射。原子的自发辐射过程完全是一种随机过程。

原子或分子也可以无辐射跃迁方式从能量高的 $E_2$ 态跃迁到基态 $E_1$ 。这时能量( $E_2 - E_1$ )并不是以光辐射的形式释放出来，而是以其它形式(如变为原子的热运动等)释放出来。

当然，并不是在任意两个原子能级之间都可以产生以上两种跃迁的。这只有在满足跃迁选择定则的两个能级之间才可能发生。

**2. 自发跃迁几率** 对于单个原子的自发发射，在时间上是不确定的。但如果考察一个原子数目很大的体系，对大量原子的统计平均，则单位时间内从高能态自发跃迁到低能态上的原子数目是可以完全确定的。设在 $E_2$ 能级上单位体积之内有 $N_2$ 个原子，则在单位时间内，由于自发辐射， $N_2$

的减少速率与 $E_2$ 上的原子数密度 $N_2$ 成正比，若引入比例系数 $A_{21}$ ，则有

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{sp} = -A_{21} N_2 \quad (1.1-2)$$

式中“ $-$ ”号表示 $N_2$ 是减少的。比例系数 $A_{21}$ 称为自发辐射爱因斯坦系数。可见， $A_{21}$ 为单位时间内产生自发跃迁的原子数密度与 $E_2$ 上的总原子数密度 $N_2$ 之比。因此 $A_{21}$ 代表着每个原子在单位时间内从 $E_2$ 至 $E_1$ 能级的自发跃迁（自发辐射）几率。

积分(1.1-2)式可得：

$$N_2 = N_2^0 \exp(-A_{21}t) = N_2^0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right) \quad (1.1-3)$$

式中 $N_2^0$ 是刚发生自发辐射时 $E_2$ 能级上的初始原子数。式中 $\tau_s$ 为

$$\tau_s = \frac{1}{A_{21}} \quad (1.1-4)$$

称 $\tau_s$ 为能级 $E_2$ 的自发发射寿命。其物理意义是经过 $\tau_s$ 的时间后， $E_2$ 能级上的原子数密度 $N_2$ 减少到初始值 $N_2^0$ 的 $1/e$ 倍。 $\tau_s$ 越大，表明原子在 $E_2$ 能级上的逗留时间越长。 $\tau_s \approx \infty$ ，即 $A_{21} \approx 0$ 的能级称为稳态， $\tau_s$ 较长的能态称作亚稳态。

**3. 自发辐射的重要特点** 由于 $A_{21}$ 完全由原子系统的两特定能级 $E_2$ 、 $E_1$ 的特性所确定，与外界信号无关。因此，对一定的原子特定能级而言， $A_{21}$ 是一个确定值。而各个原子在自发跃迁过程中是彼此无关的。因此，不同原子产生的自发辐射光的发射方向、位相、偏振状态等彼此之间都没有确定的关系。

## 二、受激发射（受激辐射）

处于激发态 $E_2$ 上的原子，在频率为 $\nu_{21}$ 的外界光信号作用下，从 $E_2$ 能级跃迁到 $E_1$ 能级上，在跃迁过程中，原子辐射出的光子能量为 $h\nu_{21}$ ，此光子与外界光信号光子处于同一状态。这一发射过程称为受激发射过程。如图1.1-1(b)所示。

同样，若原子系统处于 $E_2$ 能级上的原子数密度为 $N_2$ ，在频率为 $\nu_{21}$ 的外界光信号的作用下，单位时间内从 $E_2$ 能级跃迁到 $E_1$ 能级的原子数密度与 $N_2$ 成正比，写作

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{e_1} = -W_{21}N_2 \quad (1.1-5)$$

称 $W_{21}$ 为受激发射几率。与 $A_{21}$ 一样， $W_{21}$ 也有1/秒的量纲。然而，与 $A_{21}$ 不同的是， $W_{21}$ 不仅与原子特定能级跃迁机构的性质有关，而且还与入射光信号的强度有关，即：

$$W_{21} = B_{21}\rho(\nu_{21}) \quad (1.1-6)$$

式中 $\rho(\nu_{21})$ 是频率为 $\nu_{21}$ 的入射光波的光能密度，比例系数 $B_{21}$ 为爱因斯坦受激发射系数。

由于受激发射所产生的光子与外界作用光信号的光子处于同一状态。因此，所产生的受激发射光子与外界作用光信号光子具有同传播方向、同振荡频率、同偏振方向及同位相的性质。

## 三、受激吸收

如图1.1-1(c)所示，处于低能级 $E_1$ 上的原子，在一频率恰等于 $(E_2 - E_1)/h$ 的外界光信号作用下，能从外界光信号中吸收一份能量( $h\nu_{21}$ )后跃迁到激发态 $E_2$ 上去，这种过

程称之为受激吸收过程。

类似于(1.1-5)式,若定义 $W_{12}$ 为受激吸收几率,则有:

$$\frac{dN_2}{dt} = W_{12}N_1 \quad (1.1-7)$$

式中 $N_1$ 是单位体积内原子的数目,类似于(1.1-6)式,我们还可进一步写出

$$W_{12} = B_{12}\rho(\nu_{21}) \quad (1.1-8)$$

式中, $B_{12}$ 称之为爱因斯坦受激吸收系数,由此可见,受激吸收几率不仅与 $B_{12}$ 有关,还与外界光信号光能密度 $\rho(\nu_{21})$ 的大小有关。

#### 四、爱因斯坦关系式

系数 $A_{21}$ 、 $B_{12}$ 、 $B_{21}$ 统称为爱因斯坦系数,它们都是由原子的特定能级 $E_2$ 、 $E_1$ 的特性所决定的。因此三者之间存在着内在的联系。

设一个原子系统的两特定能级为 $E_2$ 、 $E_1$  ( $E_2 > E_1$ ),两能级的简并度分别为 $g_2$ 、 $g_1$ 。若原子系统处于温度为 $T$ 的热平衡状态, $E_2$ 、 $E_1$ 能级的原子占有数密度分别为 $N_2$ 、 $N_1$ ,则原子系统从辐射场中吸收能量后,在单位时间内从 $E_1$ 能级跃迁到 $E_2$ 能级的原子数为

$$\Delta N_{12} = B_{12}\rho(\nu_{12})N_1 \quad (1.1-9)$$

其中 $\rho(\nu_{12})$ 表示热平衡状态下光辐射(黑体辐射)场的能量密度。

处于 $E_2$ 上的原子,可以通过自发发射和受激发射两种途径跃迁到低能态 $E_1$ 上,单位时间内从 $E_2$ 跃迁到 $E_1$ 的原子数 $\Delta N_{21}$ 为

$$\Delta N_{21} = [A_{21} + \rho(\nu_{21})B_{21}]N_2 \quad (1.1-10)$$

由于系统处于热平衡状态，则应有关系式

$$\Delta N_{12} = \Delta N_{21}$$

即：

$$\rho(\nu_{12})B_{12}N_1 = [A_{21} + \rho(\nu_{21})B_{21}]N_2 \quad (1.1-11)$$

在热平衡条件下， $N_2$ 、 $N_1$ 按玻尔兹曼分布

$$\begin{aligned} \frac{N_2}{N_1} &= \frac{g_2}{g_1} \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right) \\ &= \frac{g_2}{g_1} \exp\left(-\frac{h\nu_{21}}{kT}\right) \end{aligned} \quad (1.1-12)$$

式中 $k$ 为玻尔兹曼常数； $g_1$ 、 $g_2$ 为能级 $E_1$ 、 $E_2$ 的简并度。

将(1.1-11)式改写为：

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\rho(\nu_{12})B_{12}}{A_{21} + B_{21}\rho(\nu_{21})} \quad (1.1-13)$$

若 $\rho(\nu_{21}) = \rho(\nu_{12})$ ，比较(1.1-13)与(1.1-13)，经整理得：

$$\rho(\nu_{21}) = \frac{A_{21}}{B_{21}} \frac{1}{\frac{B_{12}g_1}{B_{21}g_2} \exp\frac{h\nu}{kT} - 1} \quad (1.1-14)$$

在热平衡条件下，光辐射的能量密度 $\rho(\nu_{21})$ 由普朗克公式给出：

$$\rho(\nu_{21}) = \frac{8\pi h\nu_{21}^3}{c^3} \frac{1}{\exp\frac{h\nu_{21}}{kT} - 1} \quad (1.1-15)$$

式中 $c$ 为光在真空中的速度，比较(1.1-14)与(1.1-15)两式，可知：

$$B_{12}g_1 = B_{21}g_2 \quad (1.1-16)$$

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h\nu_{21}^3}{c^3} \quad (1.1-17)$$

(1.1-16)和(1.1-17)式即为著名的爱因斯坦关系式。

若 $E_2$ 、 $E_1$ 两能级的简并度相等，即 $g_2 = g_1$ ，则爱因斯坦关系式便可简化为：

$$B_{12} = B_{21} = B \quad (1.1-18)$$

$$\frac{A}{B} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \quad (1.1-19)$$

由此得出：

(1)  $A_{21}$ 、 $B_{12}$ 、 $B_{21}$ 三个爱因斯坦系数是相互关联的，它们之间存在着内在的联系，决不是相互孤立无关的。

(2) 对一定的原子系统而言，自发发射系数 $A$ 与受激发射系数 $B$ 之比为

$$\frac{A}{B} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}$$

即 $A$ 与 $B$ 之比和频率 $\nu$ 的三次方成正比。 $E_2$ 和 $E_1$ 两能级差越大， $\nu$ 越高， $A$ 与 $B$ 的比值就越大。

## §1.1-2 激光产生的基本原理

由上节分析可知，当光束通过原子(或分子)系统时，总是同时存在着受激吸收和受激发射这两个相互对立的过程，前者使入射光束的强度减弱，后者使光束强度增强。激光器就是利用受激发射使光放大而获得激光的。所以在激光器的工作物质中，需要建立这样一个工作状态，在这种状态下，光束引起的受激发射过程比起其它过程来占有支配地位，这个状态就是所谓的工作物质处于“粒子数反转分布”状态。

## 一、粒子数反转分布

我们通常把处于某个已知能级上的单位体积内的原子数叫做该能级的粒子数 (*Population*)。顾名思义,欲使系统的粒子数分布达到反转状态,必须使粒子数在高低能级上的分布数目与正常状态相比发生倒置。如图1.1-2所示。(a)图表示在正常情况下,  $N$ 个原子组成的原子团温度为  $T$  时,  $N_j/N_i$  可用统计力学中的麦克斯韦-玻尔兹曼分布表示为:

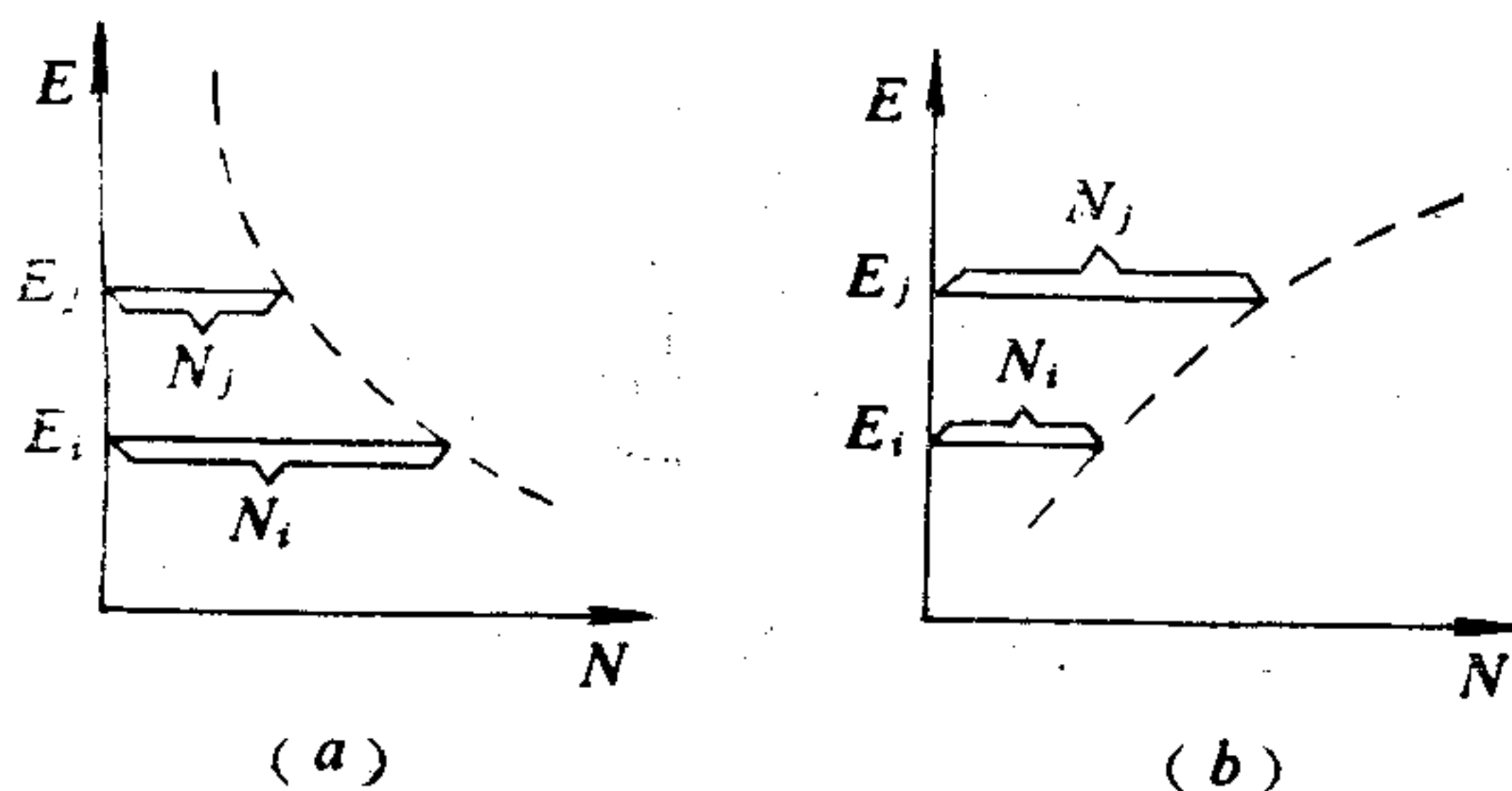


图1.1-2 粒子数的正常分布和反转分布

$$\frac{N_j}{N_i} = \frac{g_j}{g_i} \exp\left(-\frac{E_j - E_i}{kT}\right) \quad (1.1-20)$$

只要  $T > 0$ ,  $E_j > E_i$ , 则  $N_j < N_i$ 。(b)图表示了粒子数实现反转分布的情况。

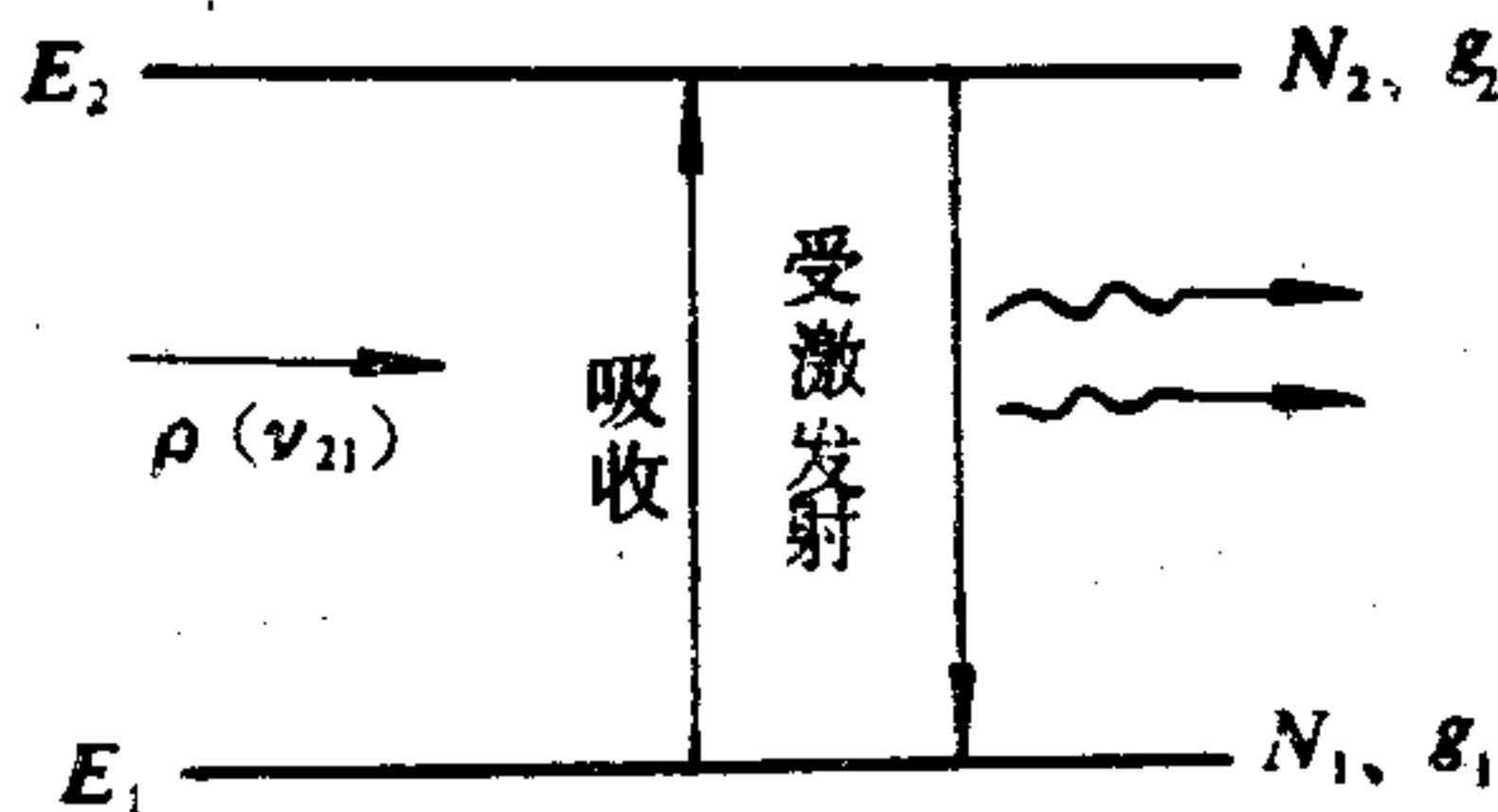


图1.1-3 两能级的受激发射与吸收

为简单起见,我们来讨论工作物质的两个能级  $E_2$  和  $E_1$ ,