

33
312
T·4

907138

大学物理

王志珪 江山 主编



4

907138

35
3/2

Tu 64

大学物理

第四册

王志珪 江山 主编

中国科学技术大学出版社

1988 · 合肥

主要编写人员

(以姓氏笔划为序)

王志珪	王言福	王国通	朱一龙	江山
汪曙光	周本莉	陈德宪	夏西平	路云峰
刘岳雄	齐传道	沈元信	吴衡坚	於定华
张遵林				

大学物理

第四册

王志珪 江山 主编

*

中国科技学术大学出版社出版

(安徽省合肥市金寨路96号)

合肥炮兵学院印刷厂印刷

安徽省新华书店发行 各地新华书店经售

*

开本 787×1092/20 印张 11.6 字数 178 千

1988年9月第1版 1988年9月第1次印刷

印数1—5000

ISBN 7-312-00076-2/O·34 定价3.20元

前 言

近年来,无论在工科院校或军事院校,对物理教材进行改革的呼声愈来愈高,要求愈来愈迫切,中心问题是如何逐步实现教材的现代化,以适应教育“三个面向”的要求,本书就是在这种新形势的推动下所作的一种努力。

按照我们的理解,教材改革必须从我国的实际出发,首先应确保国家教委制定的对本课程的基本要求的贯彻落实,根据大学物理课程的性质和要求,改革并不意味着要在教材中加进更多艰深的近代物理和理论物理内容,而主要是,根据二十世纪以来物理学的发展,尽可能地用近代的物理思想和观点来充实和整理在本课程中必须着重讲解的那些基本内容,在编写本书时,我们力图贯彻物理学的统一性思想,不囿于对这门学科传统的划分,尽可能给出一幅简明、统一、内部充满联系、生动发展的当代物理世界的图象;突出守恒定律的地位和作用,加强场和量子观念以及物理学的近代应用,其中包括在军事上的应用,使教材具备应有的时代特

征和风貌,此外,还注意避免与中学的简单重复,阐述问题考虑到已有的中学物理基础,以上也就是我们编写本书时遵循的指导思想 and 基本原则。

本书分为四册,前三册为物理学基本理论,第四册为若干专题,包括激光、红外、核能利用、半导体、光导纤维和宇宙学简介等,供各校选用。

本书是二十余所军事院校通力合作的结晶,在编写过程中,始终得到总参军训部、炮兵部和海军军校部的指导和关怀,合肥炮兵学院、蚌埠地区军校协作中心以及许多院校的领导和给予了巨大支持和鼓励,葛旭初教授为本书写了绪论,一并在志谢。

编写一套适应我国国情的、现代化的大学物理教材实非易举,不可能一蹴而就,我们希望本书成为引玉之砖,尽管我们的工作是很慎重的,在统一编写思想和编写大纲基础上写出的初稿,都经过反复讨论、修改、统稿、定稿等步序,但由于时间仓促,经验和水平有限,错误和缺点在所难免,恳请广大

教师和读者提出批评和改进意见，以便进行修订。

参加本书编写和初稿讨论的单位有：合肥炮兵学院、大连舰艇学院、空军气象学院、电子工程学院、装甲兵工程学院、海军潜艇学院、信阳陆军学院、长沙工程兵学院、昆明陆军学院、张家口通信学院、蚌埠

坦克学院、汽车管理学院、桂林陆军学院、运输工程学院、南昌陆军学院、南京炮兵学院、重庆通信学院、沈阳炮兵学院、长沙炮兵学院、国防科工委指挥技术学院、工程兵工程学院、空军高炮学院、第二炮兵指挥学院、陆军船艇学校。

编 者

• • • • •

本书第四册包括激光及其应用、热辐射与红外技术、固体能带理论和半导体、核能及其应用、广义相对论简介、宇宙学简介等专题、供各校选用。参加各章编写的有王国通、陈岩川、李承跃、夏西平、黄常恭、沈元信、王志珪，由王志珪、江山、夏西平执笔统稿，朱一龙审核了全部插图。

责任编辑 朱一龙

目 录

第二十一章 激光及其应用	(1)
§ 21-1 光和物质的相互作用	(1)
一 受激吸收 (1) 二 受激辐射 (3) 三 自发辐射 (4)	
四 受激吸收、受激辐射和自发辐射的关系 (6)	
五 粒子数反转 (7) 六 光的放大 (8)	
§ 21-2 粒子数反转的实现及光振荡	(10)
一 粒子数反转的实现 (10) 二 光振荡与光学谐振腔 (12)	
三 光振荡的阈值条件 (15)	
§ 21-3 激光的模式	(17)
一 纵模 (18) 二 横模 (20)	
§ 21-4 激光器	(23)
一 红宝石激光器 (23) 二 掺钕钇铝石榴石 ($\text{Nd}^{+3} : \text{YAG}$) 激光器 (25)	
三 He-Ne 激光器 (26) 四 氩离子激光器 (30) 五 二氧化碳激光器 (32)	
§ 21-5 激光的性质与应用	(34)
一 激光的性质 (34) 二 激光的应用 (35)	
§ 21-6 全息照相	(39)
一 全息照相的基本过程 (39) 二 全息照相的主要特点 (40)	
三 全息照相的基本原理 (40) 四 全息照相的应用 (45)	
第二十二章 热辐射与红外技术	(48)
§ 22-1 红外辐射度量学基础	(48)
一 基本辐射量 (49) 二 朗伯辐射源及朗伯余弦定律 (52)	
§ 22-2 热辐射的基本定律	(54)
一 黑体辐射的基本定律 (54) 二 基尔霍夫定律 (56)	

三	黑体辐射定律的推论 (57)	四	实际物体的热辐射 (58)	
五	红外辐射源 (61)			
§ 22-3	红外辐射的传输			(63)
一	辐射在传输媒质中的衰减 (63)	二	红外辐射在大气中的传输 (64)	
三	红外辐射在凝聚态媒质中的传播 (70)			
§ 22-4	红外探测器			(70)
一	红外探测器的特性参数 (70)	二	红外探测器的种类 (73)	
三	红外成像器件 (76)			
§ 22-5	红外技术的应用			(79)
一	利用红外技术检测温度 (80)	二	红外遥感技术 (81)	
三	红外技术在军事上的应用 (82)			
四	红外技术在工农业生产中的应用 (83)			
第二十三章	固体能带理论和半导体			(86)
§ 23-1	晶态固体			(86)
一	物质的态 (86)	二	晶态固体 (87)	
三	晶体的结合力 (88)			
§ 23-2	晶体中的电子状态 — 能带理论			(91)
一	周期性势场 (91)	二	金属中的自由电子模型 (93)	
三	能级密度 (95)			
*	四 费米-狄拉克分布 (98)	五	周期势场中电子的运动 (99)	
§ 23-3	导体 绝缘体 半导体			(103)
§ 23-4	本征半导体与杂质半导体			(107)
§ 23-5	载流子性质			(110)
一	电子和空穴的统计分布 (110)	二	电导率 (112)	
三	霍耳效应 (113)	四	有效质量 (114)	
§ 23-6	半导体的基本性质及应用			(115)
一	电导率的温度效应与光电导效应 (115)	二	温差电效应 (117)	
§ 23-7	p-n 结			(118)
一	p-n 结的整流作用 (119)	二	p-n 结的光电效应 (121)	
三	晶体三极管及其放大作用 (122)			
第二十四章	核能及其应用			(124)

§ 24-1	核反应.....	(124)
	一 核反应(124) 二 核反应过程中的守恒定律(126)	
§ 24-2	重核的裂变及其应用.....	(127)
	一 重核的裂变(127) 二 裂变的链式反应(131)	
	三 裂变链式反应的控制(132) 四 原子弹(133) 五 核反应堆(137)	
§ 24-3	轻核的聚变及其应用.....	(140)
	一 轻核的聚变(140) 二 恒星的能源(142) 三 氢弹(143)	
	四 聚变反应的控制(145)	
§ 24-4	射线对物质的作用.....	(147)
	一 α 射线对物质的作用(147) 二 β 射线对物质的作用(148)	
	三 γ 射线对物质的作用(149)	
§ 24-5	射线对人体的影响及其防护.....	(151)
	一 射线对人体的影响(151) 二 辐射剂量(153)	
	三 辐射的生物效应(154) 四 辐射的防护(155)	
§ 24-6	放射现象的应用.....	(158)
	一 示踪原子的应用(158) 二 放射性衰变规律的应用(159)	
	三 射线的直接应用(159)	
第二十五章 广义相对论简介.....		(160)
§ 25-1	等价原理.....	(160)
	一 引力质量和惯性质量(160) 二 等价原理(161)	
	三 局域惯性系(162)	
§ 25-2	弯曲的时空.....	(164)
	一 四维时空(164) 二 光线在引力场中的弯曲(164)	
	三 弯曲的时空(165) 四 光线在太阳引力场中的弯曲(166)	
§ 25-3	时空度规.....	(168)
	一 非欧几何(168) 二 时空度规(172) 三 短程线(174)	
§ 25-4	爱因斯坦引力场方程.....	(175)
	一 引力场方程(175) 二 史瓦西度规(176)	
	三 引力场中的时空度量(180) 四 引力红移(180)	

五 雷达回波延迟 (182)	
§ 25-5 引力坍缩与黑洞.....	(183)
一 引力坍缩 (183) 二 黑洞 (184)	
§ 25-6 引力波.....	(187)
第二十六章 宇宙学简介	(191)
§ 26-1 宇宙的膨胀.....	(192)
§ 26-2 宇宙膨胀动力学.....	(197)
一 宇宙膨胀动力学 (197) 二 宇宙的平均质量密度 (200)	
§ 26-3 相对论宇宙学.....	(201)
一 牛顿的绝对时空观与相对论时空观 (201)	
二 罗伯逊-沃克尔度规 (202) 三 $R(t)$ 的动力学 (204)	
§ 26-4 宇宙的年龄和范围.....	(205)
一 宇宙的年龄 (205) 二 天体的年龄 (206) 三 宇宙的范围 (208)	
§ 26-5 宇宙的演化.....	(208)
一 宇宙的演化 (208) 二 真空的相变 (210) 三 微波背景辐射 (211)	
四 氦的丰度 (216)	
§ 26-6 引力与量子.....	(217)

第二十一章 激光及其应用

激光是二十世纪六十年代发展起来的一门新兴科学。自1960年美国梅曼制成第一台红宝石激光器以来，激光技术的发展极其迅速，不仅引起了现代光学技术的巨大发展，而且已成功地应用在现代工业、农业、医学、通信、国防技术以及科学研究领域。激光在短短二十余年内能有如此巨大的发展是和它的优异特性分不开的。

激光与普通光相比有以下三个特点：（1）方向性好。激光基本上是沿着某一方向作直线传播的，它的发散角很小，通常是在 10^{-6} sr量级的立体角内；（2）相干性好。一个单色性好的气体激光器输出激光的相干长度可达几十千米，普通光与它无法相比；（3）亮度高。脉冲激光可在十分细窄的光束中和在很短的时间内将能量输出，所以功率大，目前有的激光器脉冲输出功率已达兆瓦量级，因而激光器的输出亮度比普通光源的亮度要高百万倍乃至数十亿倍。

激光的特点

§ 21-1 光和物质的相互作用

爱因斯坦在关于光的辐射理论中，提出了光和物质相互作用的三种形式，即受激吸收、受激辐射和自发辐射。

一 受激吸收

由玻耳兹曼分布律可知，在正常状态下，原子系统内处于低

能级 E_1 的原子数总是大于处于高能级 E_2 的原子数。当低能级 E_1 原子受频率为 ν 的辐射场激发, 若吸收的光子能量满足能级关系式 $h\nu = E_2 - E_1$ 时, 原子就从能级为 E_1 的态跃迁到 E_2 态, 这过程称为原子的受激吸收, 如图 21-1 所示。

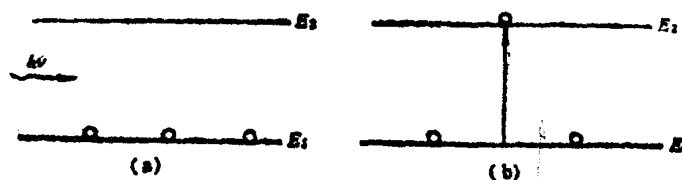


图 21-1 受激吸收

受激吸收跃迁几率

原子的受激吸收跃迁用受激吸收跃迁几率 W_{12} 描述。设在时刻 t , 能级为 E_1 的原子数密度为 n_1 , 辐射场的光谱辐射能密度为 w_ν , 则在时间 dt 内, 单位体积中由 E_1 能级因吸收光子而跃迁到 E_2 能级的原子数 dn_{12} 与 w_ν 、 n_1 及 dt 成正比, 即

$$dn_{12} = B_{12} w_\nu n_1 dt \quad (21-1)$$

式中 B_{12} 称为爱因斯坦受激吸收系数, 它由原子系统本身的性质所决定。若令

$$W_{12} = B_{12} w_\nu \quad (21-2)$$

则式 (21-1) 可表示为

$$W_{12} = \left(\frac{dn_{12}}{dt} \right) \frac{1}{n_1} \quad (21-3)$$

W_{12} 称为受激吸收跃迁几率。它表示在辐射能作用下, 单位时间内能级 E_1 上的一个原子发生受激吸收跃迁到 E_2 上的几率。于是, 单位体积内的受激吸收功率为

$$P_{12} = \frac{dn_{12}}{dt} h\nu = n_1 B_{12} w_\nu h\nu \quad (21-4)$$

二 受激辐射

处于高能级 E_2 的原子受到能量为 $h\nu = E_2 - E_1$ 的光子照射时, 原子会在这种光子的感应下从能级 E_2 向 E_1 跃迁, 并发出一个与照射光子完全相同的光子。所谓完全相同, 是指位相、频率、偏振方向和传播方向都相同。这个过程称为原子的受激辐射, 由此种过程产生的光称为激光。图21-2是受激辐射示意图。

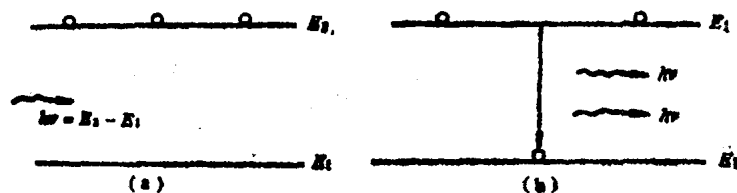


图 21-2 受激辐射

与受激吸收跃迁相似, 受激辐射可用受激辐射跃迁几率 W_{21} 受激辐射跃迁几率描述。设在光谱辐射能密度为 w_ν 的外辐射场作用下, 原子发生受激辐射。在时刻 t , E_2 能级上的原子数密度为 n_2 , 则在时间 dt 内, 单位体积中原子从高能级 E_2 跃迁到低能级 E_1 的原子数为

$$dn_{21} = B_{21} w_\nu n_2 dt \quad (20-5)$$

式中比例系数 B_{21} 称为爱因斯坦受激辐射系数。

若令

$$W_{21} = B_{21} w_\nu \quad (20-6)$$

则式 (21-5) 可表示为

$$W_{21} = \left(\frac{dn_{21}}{dt} \right) \frac{1}{n_2} \quad (20-7)$$

W_{21} 称为受激辐射跃迁几率, 若已知 W_{21} , 就可算得单位体积内受激辐射的功率为

$$P_{\text{受}} = \frac{dn_{2,1}}{dt} h\nu = n_2 B_{2,1} w_{\nu} h\nu \quad (20-8)$$

三 自发辐射

原子受激发处于高能级 E_2 的状态是不稳定的，一般只能停留 10^{-8} 秒左右，然后就会在没有任何外界影响的情况下自发地返回到低能级 E_1 ，同时辐射一个能量为 $h\nu = E_2 - E_1$ 的光子。这种现象称为自发辐射（图20-3）。

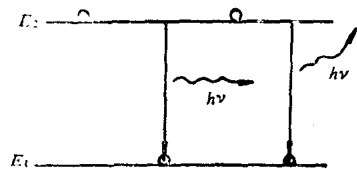


图 20-3

自发跃迁几率 在时刻 t 处于高能级 E_2 的原子数密度为 n_2 ，在时间 dt 内单位体积中有 $dn_{2,1}$ 个原子从高能级 E_2 自发跃迁到低能级 E_1 ，显然， $dn_{2,1}$ 与 n_2 、 dt 成正比，即

$$dn_{2,1} = A_{2,1} n_2 dt \quad (20-9)$$

或

$$A_{2,1} = \left(\frac{dn_{2,1}}{dt} \right) \frac{1}{n_2} \quad (20-9a)$$

式中 $A_{2,1}$ 称为自发跃迁几率，或称爱因斯坦自发辐射系数，它表示处于高能级 E_2 的一个原子在单位时间内发生自发辐射的几率。

可以证明，自发跃迁几率与原子停留在高能级的时间（平均寿命）有关。因为自发跃迁的结果总是使高能级 E_2 上的原子数密度随时间不断减少，因而跃迁数密度 $dn_{2,1}$ 就等于 $dn_2(t)$ 的负值，即

$$dn_2(t) = -dn_{2,1} = -A_{2,1} n_2(t) dt$$

或写成

$$\frac{dn_2(t)}{n_2(t)} = -A_{2,1} dt \quad (21-10)$$

对上式积分, 可得

$$n_2(t) = n_{20} e^{-A_{21}t} \quad (21-11)$$

式中 n_{20} 为 $t=0$ 时高能级 E_2 上的原子数密度, $n_2(t)$ 为任一时刻 t 能级 E_2 上的原子数密度, 可见能级 E_2 上的原子数密度随时间按指数律减小 (图 21-4)。

我们通常将能级 E_2 上的原子数减至起始值 n_{20} 的 $1/e$ 时所经历的时间称为原子在 E_2 能级上的平均寿命 τ , 由此可得

$$\tau = \frac{1}{A_{21}} \quad (21-12)$$

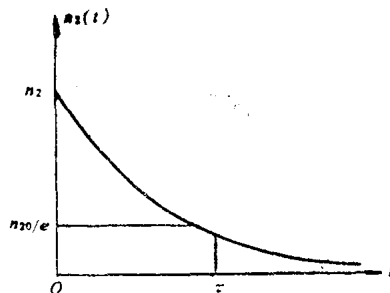


图 21-4

即平均寿命 τ 等于自发跃迁几率的倒数, 平均寿命愈长的原子, 原子在能级上的平均寿命其自发跃迁几率愈小, 表 21-1 给出了几种原子处于某一能级的平均寿命。

表 21-1

某些原子能级的平均寿命

原子能级	H(2p)	H(3p)	He(2 ² s)	He(2 ¹ s)	Ne(3s ₂)	Ne(2p ₁)
$\tau(s)$	0.16×10^{-8}	0.54×10^{-8}	10^{-4}	5×10^{-8}	$(1 \sim 2) \times 10^{-8}$	2×10^{-8}

当自发辐射几率已知时, 就可求得发光物体单位体积内发出的光功率, 因为每一光子的能量为 $h\nu$, 若某时刻激发态原子的数密度为 n_2 , 则单位体积内自发辐射的光功率为

自发辐射的光功率

$$P_{\text{自}} = \frac{dn_{21}}{dt} h\nu = n_2 A_{21} h\nu \quad (21-13)$$

自发辐射是一种只与原子本身性质有关、与辐射场的 w , 无关的自发过程, 在自发辐射中, 各个光子的发射方向和初位相都不相同, 此外, 由于发光物体中大量原子所处的激发态也各不相同, 故发射光子的频率也不同, 这就是普通光源的发光机理。

总结以上讨论, 可将原子和辐射场三种相互作用归纳为下表,

表 21-2

原子和辐射场的三种作用

跃迁类型	跃迁几率	功率(单位体积)
受激吸收	$W_{12} = B_{12} w_\nu = \left(\frac{dn_{12}}{dt} \right) \frac{1}{n_1}$	吸收功率 $= n_1 B_{12} w_\nu h\nu$
受激辐射	$W_{21} = B_{21} w_\nu = \left(\frac{dn_{21}}{dt} \right) \frac{1}{n_2}$	辐射功率 $= n_2 B_{21} w_\nu h\nu$
自发辐射	$A_{21} = \left(\frac{dn_{21}}{dt} \right) \frac{1}{n_2}$	辐射功率 $= n_2 A_{21} h\nu$

四 受激吸收、受激辐射和自发辐射的关系

上面讨论了光和物质相互作用的三种过程，它们虽然含义不同，但都属于光辐射过程，因而必存在内在联系。爱因斯坦从热平衡状态下的辐射过程导出了受激吸收系数 B_{12} 、受激辐射系数 B_{21} 和自发辐射系数 A_{21} 之间的联系。

在热平衡状态下，原子系统的总能量守恒，也就是说，单位体积、单位时间内原子系统辐射的能量应等于吸收的能量，因此有

$$n_2 B_{21} w_\nu h\nu + n_2 A_{21} h\nu = n_1 B_{12} w_\nu h\nu$$

或

$$n_2 B_{21} w_\nu + n_2 A_{21} = n_1 B_{12} w_\nu \quad (21-14)$$

由此得到

$$w_\nu = \frac{A_{21}}{B_{12}} = \frac{1}{(n_1/n_2) - (B_{21}/B_{12})} \quad (21-15)$$

根据粒子数密度按能量分布的玻耳兹曼分布律，有

$$\frac{n_2}{n_1} = e^{-(E_2 - E_1)/kT} = e^{-h\nu/kT} \quad (21-16)$$

又根据普朗克黑体辐射公式（第三册式17-8），光谱辐射能密度 w_ν 为

$$w_v = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (21-17)$$

将式(20-15)代入式(20-14), 得

$$w_v = \frac{A_{21}}{B_{12}} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - \frac{B_{21}}{B_{12}}}$$

将上式与式(21-17)比较, 得到

$$B_{21} = B_{12} = B$$

$$\frac{A_{21}}{B_{12}} = \frac{A_{21}}{B} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \quad (21-18)$$

三个爱因斯坦系数之间的关系

这就是热平衡条件下三个系数之间的关系, 它是理解激光原理最重要的公式。

五 粒子数反转

在光和原子系统相互作用时, 总是同时存在着受激吸收、受激辐射和自发辐射三种过程。在不同的实际过程中, 这三种过程所占比重并不相同。由式(21-8)和(21-13)可得受激辐射功率 $P_{\text{受}}$ 与自发辐射功率 $P_{\text{自}}$ 之比为

$$\frac{P_{\text{受}}}{P_{\text{自}}} = \frac{n_2 B w_v h\nu}{n_2 A_{21} h\nu} = \frac{B w_v}{A_{21}} \quad (21-19)$$

将式(21-18)及(21-17)代入, 得

$$\frac{P_{\text{受}}}{P_{\text{自}}} = \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (21-20)$$

例如, 对于普通光源, 在 $T=3000\text{K}$ 时用频率 $\nu=6\times 10^{14}\text{Hz}$ (相当于波长 $\lambda=5000\text{\AA}$) 的光照射, 则 $P_{\text{受}}$ 与 $P_{\text{自}}$ 之比为

$$\frac{P_{\text{受}}}{P_{\text{自}}} = \frac{1}{e^{1.0} - 1} \sim 5 \times 10^{-5}$$

即受激辐射只有自发辐射万分之一量级。可见在普通光源中主要是自发辐射引起的发光过程，发出的光是杂乱的、无规则的非相干光。欲使受激辐射占主导地位，只有大大提高 ω_ν ，才有可能使比值 $P_{\text{受}}/P_{\text{自}}$ 大于1。

再从受激吸收与受激辐射比较，单位时间单位体积内受激吸收的光子数为 $n_1\omega_\nu B$ ，受激辐射的光子数为 $n_2\omega_\nu B$ ，它们之比为

$$\frac{n_2\omega_\nu B}{n_1\omega_\nu B} = \frac{n_2}{n_1} \quad (21-21)$$

在通常情况下，原子系统处于热平衡状态，低能级 E_1 上的原子数 n_1 总大于高能级 E_2 上的原子数 n_2 ，也就是说，受激吸收过程总大于受激辐射过程，这样光在穿过原子系统时就会越来越弱（图21-5a），不可能有稳定的受激辐射。

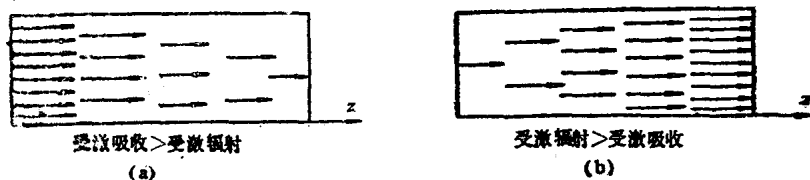


图 21-5

粒子数反转的意义

但是，如果能调整原子在能级上的分布，使高能级上的原子数 n_2 超过低能级上的原子数 n_1 ，那么，在相同时间内，受激辐射的光子数就超过受激吸收的光子数，整个发光过程就以受激辐射为主，这样的光在穿过原子系统时就会越来越强（图21-5b），从而获得激光的输出。这种高能级粒子数超过低能级粒子数的分布称为粒子数反转。

六 光的放大

在实现粒子数反转的情况下，受激辐射的光子数越来越多，这一过程称为光的放大。下面就来讨论光在工作物质中的放大过