

# 激 光 原 理

北京大学物理系激光专业 合编  
广东省七〇一研究所三室

1976年5月

## 说 明

本教材供激光专业本科和短训班学员使用，也可供从事激光工作的有关人员参考。共分八章，前五章介绍激光的基本原理；后三章介绍激光器件。有关的调Q、倍频和锁模技术在第六章中结合固体激光器介绍，稳频技术在第七章中结合气体激光器介绍。另编写了四个附录，介绍了学习本教材时所需的一些基础知识和部分较为深入的内容，供学员参考。

教材中所列举的器件性能指标，我们尽量采用收集到的国内资料；并避免采用在实际工作中意义不大的极端条件下的指标。望读者注意。

教材中第一章、附录B和附录C的全部内容以及第三章部份内容由广东省七〇一所三室同志负责编写，其余部分由北大激光专业负责编写。由于我们水平有限，错误和不妥之处一定不少，切望批评指正。

# 目 录

第一章 激光概述.....	1
§ 1.1 准备知识 .....	1
§ 1.2 激光的形成 .....	11
§ 1.3 激光的特性 .....	15
§ 1.3.1 激光的方向性和高亮度 .....	15
§ 1.3.2 激光的单色性和时间相干性 .....	17
§ 1.3.3 激光的空间相干性 .....	22
第二章 光学谐振腔.....	28
§ 2.1 光学谐振腔的稳定条件 .....	28
§ 2.2 激光的纵模 .....	33
§ 2.3 激光的横模 .....	40
§ 2.4 共焦腔中的光束特性 .....	45
§ 2.4.1 高斯光束 (一).....	45
§ 2.4.2 共焦腔中的高斯光束 .....	50
§ 2.4.3 高斯光束 (二).....	51
§ 2.5 非共焦腔中的光束特性 .....	52
§ 2.5.1 对称型非共焦腔中的光束特性 .....	53
§ 2.5.2 不对称非共焦腔中的光束特性 .....	54
§ 2.6 高斯光束通过薄透镜时的变换 聚焦和准直 .....	56
§ 2.7 衍射损耗 .....	63
第三章 光的吸收和发射.....	69
§ 3.1 热辐射 .....	69
§ 3.2 光的自发发射、受激吸收和受激发射 .....	73
§ 3.2.1 光的自发发射 .....	73
§ 3.2.2 光的受激吸收和受激发射 .....	75
§ 3.2.3 自发发射、受激吸收和受激发射的关系 .....	76
§ 3.3 光谱线的宽度 .....	79
§ 3.3.1 光谱线、线型和宽度 .....	79
§ 3.3.2 光谱线的自然增宽 .....	82
§ 3.3.3 光谱线的碰撞增宽 .....	86
§ 3.3.4 光谱线的多普勒增宽 .....	87
§ 3.3.5 均匀增宽和非均匀增宽 .....	89
第四章 介质对光的增益作用.....	91

§ 4.1	介质中激发态的粒子数 .....	91
§ 4.2	光在介质中的增益 .....	99
§ 4.2.1	介质的增益系数 .....	99
§ 4.2.2	介质中的增益饱和 .....	102
第五章	激光器基本工作原理 .....	107
§ 5.1	激光形成的阈值条件 .....	107
§ 5.2	连续运转激光器中稳定状态的建立和工作特性 .....	111
§ 5.2.1	均匀增宽谱线稳定态激光器的工作特性 .....	112
§ 5.2.2	非均匀增宽谱线稳定态激光器的工作特性 .....	114
§ 5.3	连续运转激光器的输出功率和最佳透过率 .....	116
§ 5.4	脉冲激光器的尖峰脉冲 .....	119
§ 5.5	激光的线宽 .....	121
§ 5.6	有源谐振腔的纵模频率——频率牵引效应 .....	127
第六章	固体激光器 .....	131
§ 6.1	固体激光工作物质 .....	132
§ 6.2	光源和聚光、冷却系统 .....	139
§ 6.2.1	固体激光器用光源 .....	139
§ 6.2.2	固体激光器的聚光、冷却和滤光系统 .....	144
§ 6.3	阈值和效率 .....	147
§ 6.4	红宝石激光器 .....	152
§ 6.5	钕玻璃激光器 .....	156
§ 6.6	掺钕钷铝石榴石 ( $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ ) 激光器 .....	159
§ 6.7	调Q技术 .....	162
§ 6.7.1	调Q激光器的速率方程 .....	163
§ 6.7.2	转镜调Q技术 .....	167
§ 6.7.3	声光调Q技术 .....	170
§ 6.7.4	染料调Q技术 .....	172
§ 6.7.5	电光调Q技术 .....	174
§ 6.8	倍频技术 .....	180
§ 6.9	锁模技术 .....	191
第七章	气体激光器 .....	199
§ 7.1	氩氦激光器 .....	202
§ 7.1.1	氩氦激光器的工作原理和特性 .....	202
§ 7.1.2	氩氦激光器的输出功率 .....	217
§ 7.1.3	氩氦激光器的稳频 .....	225
§ 7.2	二氧化碳激光器 .....	236
§ 7.2.1	二氧化碳激光器概述 .....	236
§ 7.2.2	二氧化碳激光器工作原理 .....	237
§ 7.2.3	二氧化碳激光器输出特性和设计考虑 .....	243

§ 7.2.4 其它类型二氧化碳激光器	246
§ 7.3 氩离子激光器	250
§ 7.4 氮分子激光器	257
§ 7.5 氮镉离子激光器	259
第八章 半导体激光器	262
§ 8.1 引言	262
§ 8.2 砷化镓结型激光器的制作	265
§ 8.2.1 对 GaAs 单晶材料的要求和衬底的制备	265
§ 8.2.2 P-N 结的形成	267
§ 8.2.3 欧姆接触的形成	268
§ 8.2.4 谐振腔的形成及激光管的封装	269
§ 8.3 半导体激光器原理	269
§ 8.3.1 半导体的能带结构及载流子的统计分布	269
§ 8.3.2 P-N 结的单向导电性和 P-N 结的能带结构	273
§ 8.3.3 半导体受激发射条件	276
§ 8.3.4 阈值条件和结型激光器的阈值电流密度	278
§ 8.4 砷化镓结型激光器特性	281
§ 8.4.1 阈值性质	281
§ 8.4.2 功率输出和转换效率	285
§ 8.4.3 光谱性质	288
§ 8.4.4 光束的空间分布	291
§ 8.4.5 激光器的温升和热阻	292
§ 8.4.6 激光器的损伤和老化	293
§ 8.5 GaAs-Ga <sub>1-x</sub> Al <sub>x</sub> As 异质结激光器	294
§ 8.5.1 能带结构和载流子与光波的限制作用	294
§ 8.5.2 单异质结激光器	297
§ 8.5.3 室温连续工作的双异质结激光器	297
§ 8.5.4 条形激光器的模式	303
§ 8.5.5 双异质结激光器室温连续工作的寿命问题	306
§ 8.6 其他类型的半导体激光器	308
§ 8.6.1 外腔式 GaAs 结型激光器	308
§ 8.6.2 分布反馈式半导体激光器	309
§ 8.6.3 可调谐半导体激光器	311
§ 8.6.4 电子束激励的半导体激光器	313
附录 A 波动光学简述	316
§ A.1 光的波动性	316
§ A.2 光的偏振	317
§ A.3 光在透明介质表面的反射和透射	319
§ A.4 光的干涉	323

§ A.5	薄膜干涉 (多层介质高反射膜)	327
§ A.6	光的衍射	336
§ A.7	光在晶体中的传播	340
附录 B	原子和分子的能级	351
§ B.1	氢原子的能级 原子的电子壳层结构	351
§ B.2	氦原子的能级	367
§ B.3	氖原子的能级	370
§ B.4	二原子分子的振动光谱	372
§ B.5	二原子分子的转动和振转光谱	377
§ B.6	二原子分子的电子态	384
§ B.7	二氧化碳分子的振动和转动能级	387
附录 C	傅里叶级数和傅里叶积分	392
§ C.1	三角函数形式的傅里叶级数	392
§ C.2	三角函数形式的傅里叶积分	398
§ C.3	虚指数函数形式的傅里叶级数和傅里叶积分	400
附录 D	高斯光束	403
§ D.1	自由空间中的高斯光束	403
§ D.2	共焦腔中的高斯光束	407
§ D.3	高斯光束通过薄透镜时的变换	411

# 第一章 激光概述

激光器是六十年代初期出现的一种新的光源。近年来，我国激光技术有了很大的发展。目前国内常用的激光器主要有以下几种：

## 一、固体激光器：

- (1) 红宝石激光器，
- (2) 掺钕钇铝石榴石 ( $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ ) 激光器，
- (3) 钕玻璃激光器；

## 二、气体激光器：

- (1) 氦氖 ( $\text{He-Ne}$ ) 激光器，
- (2) 氩离子 ( $\text{Ar}^+$ ) 激光器，
- (3) 二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ ) 激光器；

## 三、半导体激光器：

砷化镓 ( $\text{GaAs}$ ) 激光器。

至于一些使用面较窄或尚处于研制阶段的激光器，种类还有很多，这里不一一列举了。

激光就是从激光器射出的光。它具有亮度高以及方向性、单色性和相干性好等特性。这些特性是普通光源发出的光所达不到的。

本章主要介绍激光的形成及其特性。希望通过本章的概括介绍，能使大家对激光有初步的了解，大体上掌握各章节的内容在整个学习过程中所占的地位，分清主次，抓住重点。

在谈到激光以前，我们首先介绍一些与此有关的准备知识。

## § 1.1 准备知识

本节主要介绍光和原子的一些基础知识，为后面两节学习作准备。内容包括：光的波粒二象性；原子的能级，辐射跃迁和无辐射跃迁；光的自发发射，受激吸收和受激发射；玻耳兹曼分布律；粒子数反转分布和光在增益介质中的增益等。

### 一、光的波粒二象性

光的一个基本性质，就是同时具有波动性和微粒性，即具有波粒二象性。一般地说，在光的干涉和衍射等现象中，光的波动性较明显，这时往往把光看作是由一列一列的光波组成的；而在原子发射或吸收光等现象中，光的微粒性较明显，往往把光看作是由一个一个的光子组成的。

下面分别扼要介绍光波和光子这两个基本概念。

### (1) 光波<sup>①</sup>

我们知道，光是一种电磁波。波就是振动在空间的传播。对于电磁波来说，振动着的是空间里的电场和磁场，可以分别用矢量  $\mathbf{E}$  和  $\mathbf{B}$  来描述。 $\mathbf{E}$  和  $\mathbf{B}$  的振动方向都与电磁波的传播方向相垂直。就是说，电磁波是一种横波。参看图 1.1—1。

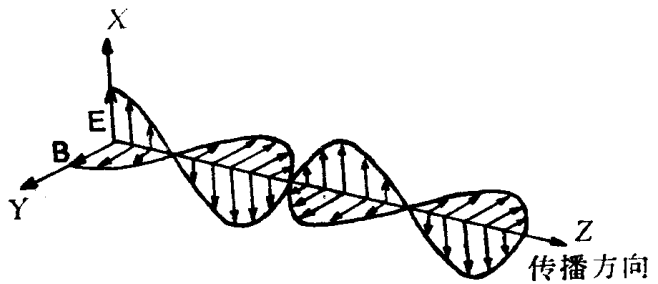


图1.1—1 电磁波

在一般的光学现象中，起主要作用的是光的电矢量  $\mathbf{E}$ 。今后一般只考虑  $\mathbf{E}$ 。

下面分别介绍光波的一些基础知识。

#### 1. 线偏振光：

设光波沿着  $Z$  轴方向传播，则光的电矢量  $\mathbf{E}$  的振动方向必在与  $Z$  轴垂直的  $XY$  平面上，换句话说， $\mathbf{E}$  的振动方向在  $XY$  平面上取向可以是任意的。

电矢量  $\mathbf{E}$  沿着单一方向振动的光称为线偏振光。一般地说，沿着  $Z$  轴方向传播的光，可能包括许许多多的成分，它们的电矢量  $\mathbf{E}$  的振动方向都在与  $Z$  轴垂直的  $XY$  平面上，但其取向各不相同。根据矢量分解法，电矢量  $\mathbf{E}$  的振动方向在  $XY$  平面上的任何一种线偏振光，总可以分解为下述两种线偏振光，其中一种光的电矢量沿着  $X$  轴方向振动，另一种光的电矢量沿着  $Y$  轴方向振动。如图 1.1—2 所示。显然，这两种线偏振光都沿着  $Z$  轴方向传播，但它们的电矢量振动方向是互相垂直的。

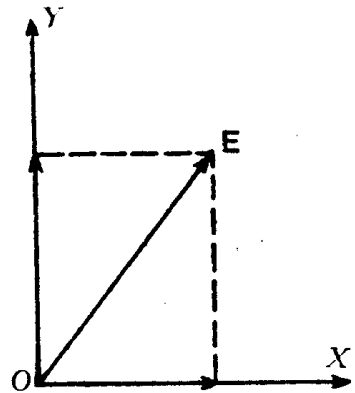


图1.1—2 电矢量  $\mathbf{E}$  的分解

#### 2. 光速、频率和波长的关系：

首先讨论光在真空中传播。

已知光在真空中传播的速度  $c$  是固定不变的。

$$c = 2.997925 \times 10^{10} \text{ 厘米/秒}^{\text{②}}$$

这就是说，光的电矢量  $\mathbf{E}$  的振动在真空中以速度  $c$  向前传播。

在一秒的时间内所完成的振动次数，称为频率  $\nu$ ，单位是赫（等于 1/秒）；而完成一次振动所需要的时间，称为周期  $T$ ，单位是秒。 $\nu$  和  $T$  的关系是：

$$\nu = \frac{1}{T}$$

当时间增加  $T$  的整数倍时，空间同一点处电矢量  $\mathbf{E}$  的振动重复到原来的状态，参看图 1.1—3 中时间增加  $T$  或  $2T$  时在  $Z$  轴上同一点的电矢量  $\mathbf{E}$ 。

振动在一个周期的时间内向前传播的距离，等于波长，将光在真空中的波长记为  $\lambda$ 。在同一个时刻，相隔波长  $\lambda$  整数倍的两点具有相同的振动状态。在图 1.1—3 中， $Z$  轴上两

① 参看附录 A。

② 本讲义中给出的基本物理常数，引自王竹溪：“基本物理常数的概况及其在物理学中的作用”，见《物理》第 2 卷第 2 期，第 100—105 页，1973 年 5 月。



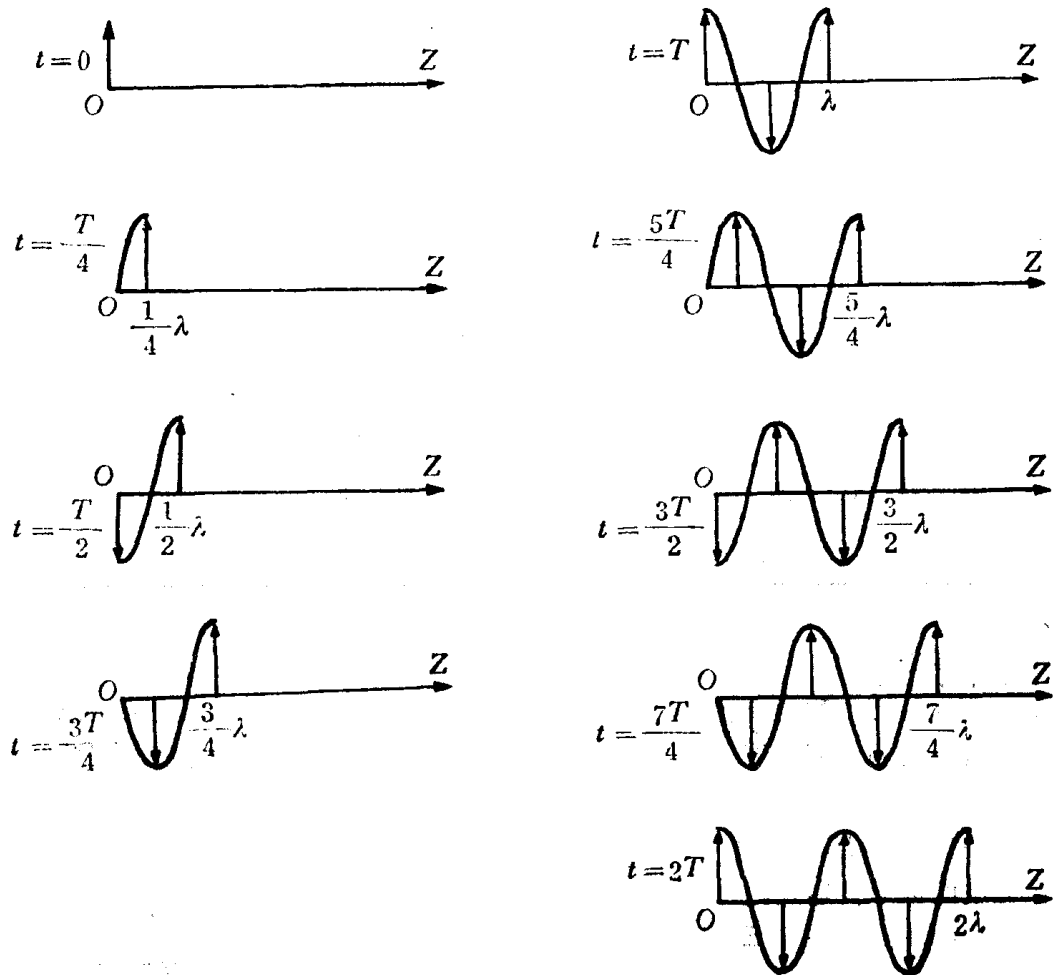


图1.1-3 光波的传播

个相邻的波峰（或两个相邻的波谷）之间的距离都等于波长  $\lambda$ 。

通过上面的讨论，可以得出：光在真空中传播时，其波长  $\lambda$  与其频率  $\nu$  的乘积等于其速度  $c$ 。即

$$\lambda\nu = c. \quad (1.1-1)$$

其次讨论光在折射率为  $n$  的介质中传播。

光在真空中或介质中传播时其频率  $\nu$  保持不变，但光在介质中的传播速度却变为  $c/n$ ，故光在介质中的波长变为  $\lambda/n$ 。

### 3. 红外辐射、可见光和紫外辐射：

电磁波按其波长的长短为序，大体上可分为无线电波、微波、红外辐射、可见光、紫外辐射、X射线、 $\gamma$ 射线等。其中的红外辐射、可见光和紫外辐射，通常统称为光，其波长  $\lambda$  ①的范围见下表。

① 今后常把光在真空中（或折射率  $n \sim 1$  的气体中）的波长  $\lambda$  简称为光的波长  $\lambda$ 。

光谱区	波长 $\lambda$ 的大致范围	
红外辐射	1000—0.76微米	
可见光	红	0.76—0.63微米
	橙	0.63—0.60微米
	黄	0.60—0.57微米
	绿	0.57—0.50微米
	青	0.50—0.45微米
	蓝	0.45—0.43微米
	紫	0.43—0.40微米
紫外辐射	0.40微米 (即4000埃) —50埃	

注：1 埃 (或  $\text{A}$ ) =  $10^{-4}$  微米 =  $10^{-8}$  厘米

#### 1. 单色平面光波:

具有单一频率的光,称为单色光。(严格地说,包括激光在内的一切光束,总不会是完全单色的,总有一定的频率宽度。这个频率宽度越窄,就说它的单色性越好。因此,单色光实际上只是一个近似概念。)

下面讨论在真空中沿着  $Z$  轴方向传播的线偏振的单色光波的数学表达式。

参看图1.1-4。因电矢量  $E$  只沿着  $X$  轴方向振动,所以可简单地用  $E$  来表示。

设从时间  $t = 0$  开始,  $Z$  轴上  $O$  点处的电矢量  $E$  随着时间  $t$  按余弦规律作简谐振动。即

$$E = A \cos 2\pi\nu t,$$

式中,  $A$  是振幅,即电矢量绝对值的最大值,  $\nu$  是频率,二者均为常量。

因光波在真空中以速度  $c$  沿着  $Z$  轴向前传

播,所以从时间  $t = \frac{Z_1}{c}$  开始,  $Z$  轴上  $Z_1$  点处的电矢量  $E$  也随着时间  $t$  按余弦规律作简谐振动。即

$$E = A \cos 2\pi\nu \left( t - \frac{Z_1}{c} \right).$$

这就是说,  $Z$  轴上  $Z_1$  点处和  $O$  点处的电矢量  $E$  随着时间  $t$  的变化规律是类似的,只是  $Z_1$  点处电矢量  $E$  开始振动的的时间比  $O$  点处电矢量  $E$  开始振动的的时间推迟  $\frac{Z_1}{c}$  罢了。

对  $Z$  轴上任一点  $Z$  处,显然,其电矢量  $E$  随时间  $t$  的变化规律应为:

$$E = A \cos 2\pi\nu \left( t - \frac{Z}{c} \right),$$

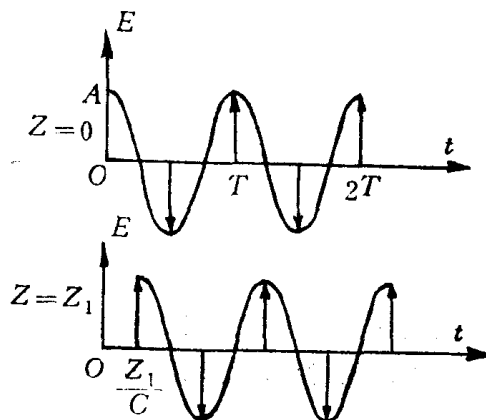


图 1.1-4

把 (1.1-1) 式代入到上式中去, 得出:

$$E = A \cos 2\pi\left(\nu t - \frac{Z}{\lambda}\right) \quad (1.1-2)$$

上式表示, 光的电矢量  $E$  是时间  $t$  和坐标  $Z$  的函数。即时间  $t$  与坐标  $Z$  均为自变量, 而振幅  $A$ , 频率  $\nu$  和波长  $\lambda$  均为常量。上式就是在真空中沿着  $Z$  轴方向传播的线偏振的单色光波的数学表达式。

(1.1-2) 式中的  $2\pi\left(\nu t - \frac{Z}{\lambda}\right)$  称为位相。由于 (1.1-2) 式中不出现坐标  $X$  和  $Y$ , 因此与  $Z$  轴垂直的某一平面上各点均具有相同的位相, 并且具有相同的  $E$  值。上述由位相相同的各点组成的面称为波面, 波面是平面的光波称为平面光波。因此, (1.1-2) 式所表示的光波, 正是一种线偏振的单色平面光波。

实际上, 前面的图 1.1-3 也是根据 (1.1-2) 式画的。

最后谈谈光的强度  $I$ 。

单位时间内通过垂直于光传播方向的单位面积的辐射能量, 或者说, 通过垂直于光传播方向的单位面积的辐射功率, 称为光的强度  $I$ , 单位是瓦/厘米<sup>2</sup>。通常我们测量到的是光的平均功率, 所以光的强度  $I$  与相应的电矢量振幅  $A$  的平方成正比<sup>①</sup>。即

$$I \propto A^2.$$

## (2) 光子

在讨论原子发射或吸收光的时候, 往往把光看作是由一个一个光子组成的。

设光在真空中传播, 频率为  $\nu$ , 波长为  $\lambda$ , 则一个光子的能量  $\varepsilon$  和动量  $P$  的数值分别为:

$$\varepsilon = h\nu, \quad (1.1-3)$$

$$P = \frac{h}{\lambda}. \quad (1.1-4)$$

式中,  $h$  称为普朗克常数,

$$h = 6.62620 \times 10^{-27} \text{ 尔格} \cdot \text{秒}.$$

严格地说, 光子的动量应为矢量  $\mathbf{P}$ 。(1.1-4) 式中的  $P$  表示光子动量的数值, 而  $\mathbf{P}$  的方向就是光子运动的方向, 即光的传播方向。

## 二、原子的能级, 辐射跃迁和无辐射跃迁<sup>②</sup>

物质是由原子、离子或分子等微观粒子组成的。

原子由一个带正电荷的原子核和若干个带负电荷的电子组成, 原子核所带的正电荷与各个电子所带的负电荷之和在数值上是相等的, 因此整个原子是电中性的。至于不同元素的原子, 它们所具有的电子数目则是不同的。例如氢 (H) 原子具有一个电子, 氦 (He) 原子具有两个电子, 氖 (Ne) 原子具有十个电子, 氩 (Ar) 原子具有十八个电子, 等等。

① 光强的瞬时值  $I_t$  与相应的电矢量绝对值的平方成正比。即  $I_t \propto |E|^2$ 。

② 参看附录 B

原子内部少了电子则变成正离子，例如氩原子少了一个电子，就变成氩离子 ( $\text{Ar}^+$ )。反之，原子内部多了电子则变成负离子。因此整个离子总是带电荷的。

分子是由若干个原子组成的。例如氮分子 ( $\text{N}_2$ ) 是由两个氮 ( $\text{N}$ ) 原子组成的，二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ ) 分子是由两个氧 ( $\text{O}$ ) 原子和一个碳 ( $\text{C}$ ) 原子组成的。

为了便于讨论，下面以原子为例。但这些结论对于离子和分子也是适用的。

### (1) 原子的能级

一般地说，原子内部各个电子既绕着原子核作轨道运动，同时又作自旋运动，就象地球既绕着太阳公转，同时又自转那样。但是，原子内部的电子可以通过与外界交换能量而从一种运动状态改变为另一种运动状态。对于每一种运动状态来说，原子具有确定的内部能量值。原子所能具有的内部能量值，一般是不连续的。原子的每一个内部能量值，称为原子的一个能级。同一元素的原子，能级的情况是相同的。

图1.1—5中以原子的两个能级  $E_2$  和  $E_1$  为例。图中的纵坐标表示原子内部能量值的大小。习惯将能量值大的能级称为高能级，能量值小的能级称为低能级。

原子的最低能级，称为基态；如图1.1—5中的能级  $E_1$ 。在通常情况下，绝大部分的原子均处于基态。能量比基态高的其他能级，均称为激发态；如图1.1—5中的能级  $E_2$ 。

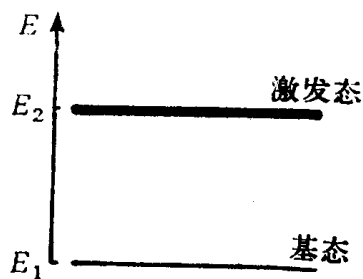


图1.1—5 原子的基态和一个激发态

### (2) 辐射跃迁

如果原子的两个能级满足一定的条件，这些条件称为辐射跃迁选择定则<sup>①</sup>，则有可能出现下述情况：

一个处于高能级  $E_2$  的原子，发射一个能量为

$$\varepsilon = h\nu = E_2 - E_1 \quad (1.1-5)$$

的光子，结果这个原子回到低能级  $E_1$ 。

反之，一个处于低能级  $E_1$  的原子，从外界吸收一个能量为

$$\varepsilon = h\nu = E_2 - E_1 \quad (1.1-6)$$

的光子，结果这个原子激发到高能级  $E_2$ 。

原子由于发射或吸收光子而从一个能级改变到另一个能级，则称为辐射跃迁。只有在原子的两个能级满足辐射跃迁选择定则的情况下，才能够在这两个能级间产生辐射跃迁。换句话说，原子发射或吸收光子，只能出现在某些特定的能级之间。

### (3) 无辐射跃迁

例如，在一个气体放电管中，处于低能级  $E_1$  的原子，通过与其他原子或自由电子相碰撞，就有可能从外界获得能量而激发到高能级  $E_2$ 。反之，处于高能级  $E_2$  的原子，通过与其他原子或管壁之类相碰撞，也有可能把能量传递给外界而回到低能级  $E_1$ 。在这一类过程中，原子只是通过与外界碰撞而改变其内部能量值，完全与吸收或发射光子无关。

如果原子只是通过与外界碰撞的过程或其他与外界进行能量交换的过程而从一个能级改

<sup>①</sup> 关于辐射跃迁选择定则，详见附录 B。

变到另一个能级，既不发射也不吸收光子，则称为无辐射跃迁。

#### (4) 激发态的平均寿命和亚稳态

处于激发态的原子总是要通过各种辐射跃迁或无辐射跃迁过程跳到比它低的能级。所以，原子在激发态只能停留有限的时间。原子在激发态停留时间的平均值称为激发态的平均寿命。原子激发态的平均寿命一般为 $10^{-7} - 10^{-9}$ 秒。

如原子的某些激发态与比它低的能级之间只能有很弱的（或没有）辐射跃迁，因而它的平均寿命很长（例如可有 $10^{-3}$ 秒或更长）；这种激发态称为亚稳态。

### 三、光的自发发射、受激吸收和受激发射

如原子的高能级  $E_2$  和低能级  $E_1$  间满足辐射跃迁选择定则，则对于大量的这种原子来说，将同时存在光的自发发射、受激吸收和受激发射三个过程。现在分别介绍如下：

#### (1) 光的自发发射

处于高能级  $E_2$  的原子总是会自发地跃迁到低能级  $E_1$  的，并且发射一个频率为  $\nu$ ，能量为

$$\varepsilon = h\nu = E_2 - E_1$$

的光子。对于大量的处于高能级  $E_2$  的原子来说，它们是各自独立地分别自发发射一个一个能量  $\varepsilon$  相同但彼此无关的光子。这相当于它们各自独立地分别自发发射一系列频率为

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

的光波，但各列光波之间的位相完全无关。各列光波可以有不同的偏振方向，并且每个粒子所发的光可以沿着所有可能的方向传播。这个过程称为光的自发发射。参看图1.1—6。

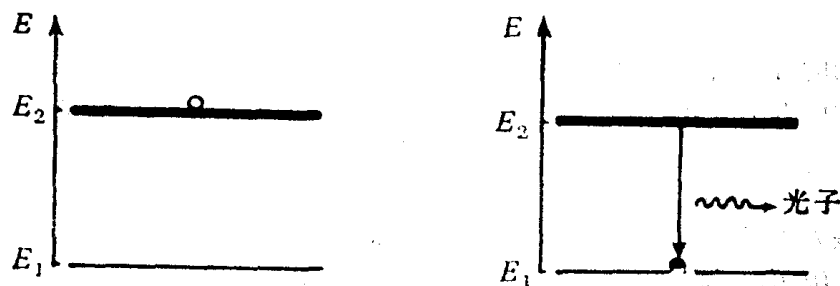


图1.1—6 光的自发发射

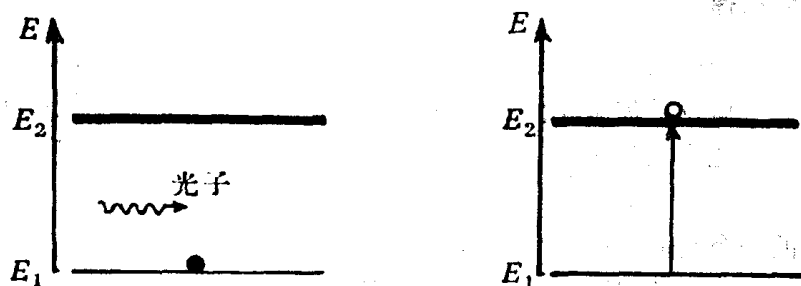


图1.1—7 光的受激吸收

### (2) 光的受激吸收

当处于低能级  $E_1$  的原子受到光子能量恰好为

$$\varepsilon = h\nu = E_2 - E_1$$

的外来入射光照射时，原子会由于受到这种入射光的刺激，吸收一个这种光子而跃迁到高能级  $E_2$ 。这个过程称为光的受激吸收，或简称为吸收。参看图1.1-7。

### (3) 光的受激发射

当处于高能级  $E_2$  的原子受到光子能量为

$$\varepsilon = h\nu = E_2 - E_1$$

的光照射时，这个原子也会在这种光的刺激下，发射一个与入射光子一模一样的光子，而跃迁到低能级  $E_1$ 。也就是受激发射的光与入射光二者的频率都是

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h},$$

而且位相、偏振方向和传播方向等都相同。这个过程称为光的受激发射。参看图1.1-8。可以看到光的受激发射起了增加入射光强度的作用。

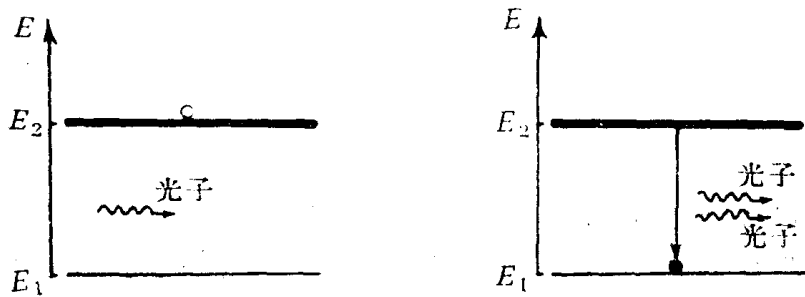


图1.1-8 光的受激发射

实际上，光的自发发射、受激吸收和受激发射这三个过程是同时存在的。在大量的同类原子中，如果其中有某些处于高能级  $E_2$  的原子分别自发发射了一些能量为

$$\varepsilon = h\nu = E_2 - E_1$$

的光子，则这些光子对于其他原子来说，就可以看作是一些外来的入射光子了。如果另外一些原子处于低能级  $E_1$ ，则有可能发生受激吸收；如果另外一些原子处于高能级  $E_2$ ，则有可能发生受激发射。这一点对于今后分析激光的形成过程是重要的。

## 四、玻耳兹曼分布律

在气体管内，大量的同类气体粒子（指原子或分子等）在运动过程中，彼此会相互碰撞，并且交换能量。有些粒子被激发到高能级，而另外一些粒子则处于低能级。在达到热平衡时，这些粒子在各个能级上是按照一定的统计规律分布的。这个统计规律就是玻耳兹曼分布律。

现在考虑原子的一个高能级  $E_2$  和一个低能级  $E_1$ 。设高能级  $E_2$  是由  $g_2$  个不同的能态重合在一起组成的，即原子的  $g_2$  种不同的运动状态都具有相同的内部能量值  $E_2$ ，则  $g_2$  称为高能级  $E_2$  的统计权重（或简并度）。又设低能级  $E_1$  的统计权重为  $g_1$ 。

令单位体积中处于高能级  $E_2$  的粒子数为  $N_2$ ,  $N_2$  称为处于高能级  $E_2$  的粒子数密度, 单位是厘米<sup>-3</sup>。又令处于低能级  $E_1$  的粒子数密度为  $N_1$ , 则玻耳兹曼分布律可以写成:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} e^{-(E_2 - E_1) / kT}, \quad (1.1-7)$$

式中,  $k$  是玻耳兹曼常数,

$$k = 1.38062 \times 10^{-16} \text{ 尔格/开}。$$

$T$  是热平衡时的绝对温度<sup>①</sup>。在(1.1-7)式中,  $kT$  的乘积相当于能量。例如, 当  $T = 300$  开 (相当于室温) 时,  $kT \approx 4.14 \times 10^{-14}$  尔格。

(1.1-7) 式又可改写为:

$$\frac{N_2/g_2}{N_1/g_1} = e^{-(E_2 - E_1) / kT}, \quad (1.1-7a)$$

式中,  $N_2/g_2$  是处于高能级  $E_2$  的一个能态上的粒子数密度,  $N_1/g_1$  是处于低能级  $E_1$  的一个能态上的粒子数密度。

因  $E_2 > E_1$ , 而且  $T > 0$ , 所以热平衡时, 一般应有

$$\frac{N_2}{g_2} > \frac{N_1}{g_1}. \quad (1.1-8)$$

满足上式的粒子数分布, 通常称为粒子数正常分布。参看图 1.1-9。

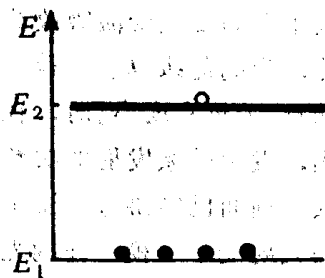


图1.1-9 粒子数正常分布 ( $g_1 = g_2$ )

## 五、粒子数反转分布和光在增益介质中的增益

### (1) 粒子数反转分布

在激光器工作物质内部, 由于外界能源的激励, 破坏了热平衡, 有可能使得处于高能级  $E_2$  的粒子数密度  $N_2$  大大增加, 结果达到

$$\frac{N_2}{g_2} > \frac{N_1}{g_1}. \quad (1.1-9)$$

式中,  $N_1$  是处于低能级  $E_1$  的粒子数密度,  $g_2$  和  $g_1$  分别是高能级  $E_2$  和低能级  $E_1$  的统计权重。满足上式的粒子数分布, 称为粒子数反转分布。参看图 1.1-10。显然, 这时在激光器工作物质内部, 就不是处于通常的热平衡状态中了。

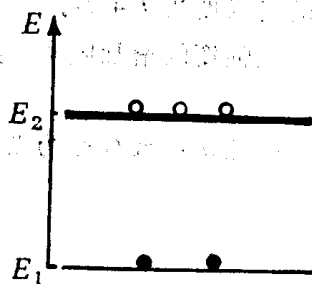


图1.1-10 粒子数反转分布 ( $g_1 = g_2$ )

① 对于同一个温度, 令绝对温度的读数为  $T$ , 单位是开 (即  $K$ ), 而摄氏温度的读数为  $t$ , 单位是度 (即  $^{\circ}C$ ), 则二者的关系为:

$$T(\text{开}) = t(\text{度}) + 273.15。$$

每一开的间隔等于每一度的间隔。例如:

$$-273.15^{\circ}C = 0 K,$$

$$0^{\circ}C = 273.15 K,$$

$$100^{\circ}C = 373.15 K。$$

必须注意: 实际情况下, 绝对温度  $T$  必大于零开, 即  $T > 0$ 。

(2) 光在增益介质中的增益  
设频率为

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

的光在激光器工作物质内部沿着  $Z$  轴方向传播。又设工作物质内部有一种粒子已在其高能级  $E_2$  和低能级  $E_1$  之间实现了粒子数反转分布，这样的工作物质通常称为增益介质。

为了便于讨论，令  $g_1 = g_2$ ，则 (1.1-9) 式可简化为：

$$N_2 > N_1. \quad (1.1-9a)$$

§ 3.2 中将指出，当  $g_1 = g_2$  时，能量为

$$\varepsilon = h\nu = E_2 - E_1$$

的入射光子碰到处于高能级  $E_2$  的粒子因而发生受激发射的几率，正好等于光子碰到处于低能级  $E_1$  的粒子因而发生受激吸收的几率（几率即可能性）。因此，当高能级  $E_2$  的粒子数密度  $N_2$  大于低能级  $E_1$  的粒子数密度  $N_1$  时，在入射光传播的同一段距离内，发生受激发射的次数应多于发生受激吸收的次数。前面已经讲过，发生一次受激发射就增加一个与入射光子一模一样的光子，而发生一次受激吸收就减少一个入射光子。由此可见，在这种情况下，光在激光器工作物质内部将越走越强。参看图 1.1-11。

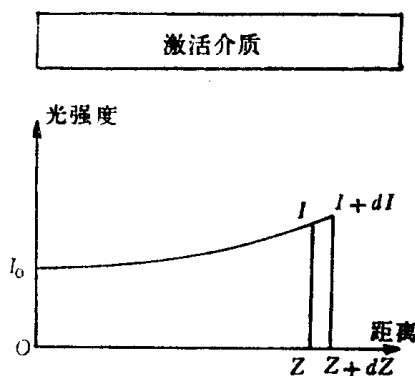


图 1.1-11

令工作物质内部距离为 0 处的光强度为  $I_0$ ，距离为  $Z$  处的光强度为  $I$ ，距离为  $z+dz$  处的光强度为  $I+dl$ 。

光强度的增加值  $dl$  与距离的增加值  $dz$  成正比，同时也与光强度  $I$  成正比。即

$$dl = G I dz, \quad (1.1-10)$$

式中的比例系数  $G$  称为光的增益系数。(1.1-10) 式可改写为：

$$G = \frac{dl}{I dz},$$

由此可以看出，增益系数  $G$  相当于光沿着  $Z$  轴方向传播时，在单位距离内所增加的光强度百分比。其单位是厘米<sup>-1</sup>。

假定增益系数  $G$  不随着光强度  $I$  变化（实际上，只有当  $I$  很小时，这一假定才能够近似地成立）。对 (1.1-10) 式作积分计算，

$$\int_{I_0}^I \frac{dl}{I} = G \int_0^z dz,$$

由此得出：

$$I = I_0 e^{GZ}. \quad (1.1-11)$$

这就是说，频率  $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$  的光在激光器工作物质内部传播时，其强度  $I$  将随着距离  $Z$  的



增加而增加。显然，这是因为在能级  $E_2$  和能级  $E_1$  间已实现粒子数反转分布的缘故。

## § 1.2 激光的形成

本节以红宝石激光器为例，概括地介绍激光器的基本结构，激光的形成条件及其形成过程。

### 一、激光器的基本结构

一般的激光器都必须具备三个基本部分：工作物质、谐振腔和激励能源。

下面以红宝石激光器为例。图1.2—1是一种红宝石激光器的基本结构示意图。

#### (1) 工作物质

红宝石激光器的工作物质是一根淡红色的红宝石晶体棒。晶体的基质是  $Al_2O_3$ ，掺入重量百分比约为 0.05% 的  $Cr^{3+}$ 。晶体中形成激光的是铬离子  $Cr^{3+}$ （即一个铬原子失去三个外围电子而形成的正离子）。晶体对红光的折射率  $n \approx 1.76$ 。①

晶体棒的轴线与晶体的光轴方向一般成 60 度、72 度或 90 度。棒的两个端面严格平行，与棒轴垂直，并且抛光。

#### (2) 谐振腔

在工作物质的两端，各放上一块反射镜，两个反射镜面要调整到严格平行，并与晶体棒的轴线垂直。这两块反射镜就构成谐振腔。

从镜面反射的光强度与入射到镜面的光强度的比值，称为反射率。即

$$\text{反射率} = \frac{\text{从镜面反射的光强度}}{\text{入射到镜面的光强度}}$$

因此反射率总是在 0 到 1 之间的。

谐振腔的一块反射镜是全反射镜，其反射率  $r_1 \approx 1$ ；另一块反射镜是部分反射镜，其反射率  $r_2 < 1$ 。激光就是从部分反射镜一端输出的。

这两块反射镜面镀有多层介质膜。应当指出，其反射率  $r_1$  和  $r_2$  都是对激光波长而言的。

#### (3) 激励能源

红宝石激光器工作物质中的铬离子，是被脉冲氙灯的光照射后才发光的。因此，脉冲氙

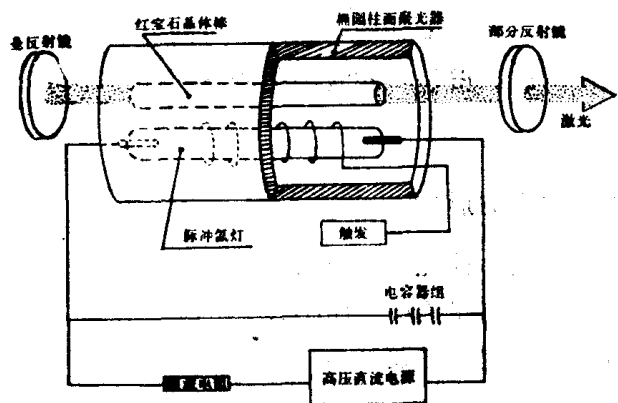


图1.2—1 红宝石激光器的基本结构

① 红宝石晶体是负单轴晶体。对于红光来说，其寻常光折射率  $n_o = 1.764$ ，其非常光折射率  $n_e = 1.756$ 。