

第十章 几种特定的激光系统

10.1 抽运和激光器的效率

图10.1表示几种有代表性的激光器的抽运-振荡过程。

抽运方式： 固态激光器和染料激光器—光（或激光）泵浦激励、
气体激光器—直流（或等离子体）放电激励、
半导体激光器—电流注入激励。

泵浦跃迁： 通过抽运使原子由基态被激发到某一激发态3。

快速无辐射弛豫： 原子从激发态3快速弛豫至激发态2（激光上能级）。

受激跃迁（激光）： 在能级2和能级1（激光下能级）之间产生激光的受激跃迁，引起频率为 ν_{21} 的光发射。

快速无辐射弛豫： 原子从激发态1快速弛豫至基态。

四能级系统与三能级系统的主要区别： 容易形成粒子布居数反转。

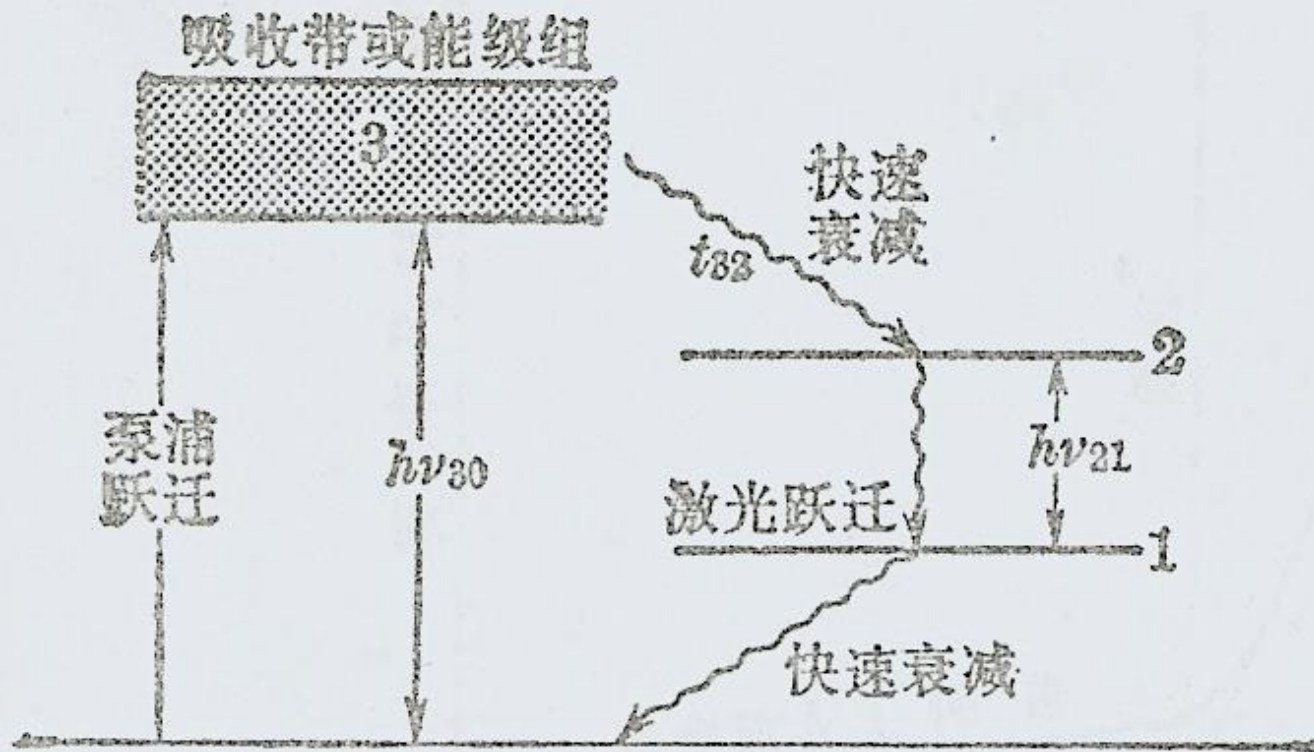


图 10.1 典型激光器的抽运-振荡过程

图10.1表示典型的激光器的抽运-振荡过程

原子的量子效率：对于上述一个循环过程，一个输出光子 $h\nu_{21}$

对应一个输入光子 $h\nu_{30}$ ，定义原子的量子效率为：

$$\eta_{atomic} = \nu_{21} / \nu_{30} \quad (10.1-1)$$

激光器的总效率： $\eta \propto \eta_{pump} \eta_{pump-quantum} (\nu_{21} / \nu_{30})$

其中： η_{pump} 抽运效率

（为使原子抽运到能级3的有效功率与总抽运功率的比值）

$\eta_{pump-quantum}$ 抽运量子效率

（由能级3向能级2跃迁的效率）。

典型激光器的总效率 η ：

由Nd³⁺:YAG固体激光器的1%到CO₂激光器的30%左右，
GaAs p-n结激光器效率接近100%

10.2 红宝石激光器

第一台激光器。

红宝石激光介质：在 Al_2O_3 晶体中掺 Cr^{3+} 离子（掺杂重量比为0.05%）。

输出波长：0.6943微米

三能级结构：如图10.2所示，激光下能级为基态

抽运方式：光泵浦（强闪光灯）使 Cr^{3+} 离子由基态1激发到激发态3（ 4F_2 能级和 4F_1 ）。

无辐射跃迁：激发态3平均寿命为 5×10^{-8} 秒，在这个时间内处于激发态3的离子弛豫到能级2上（ 2E ）

受激跃迁（激光）：能级 2E 由 $2\bar{A}$ 和 \bar{E} 两个能级组成，其间隔为29厘米 $^{-1}$ 。激光上下能级分别为能级2（ \bar{E} ）和基态1（ 4A_2 ）。

离子处于激光上能级 \bar{E} 的寿命为 $t_2 \approx 3 \times 10^{-3}$ 秒，荧光效率接近1，因此 $t_2 \approx t_{spont}$

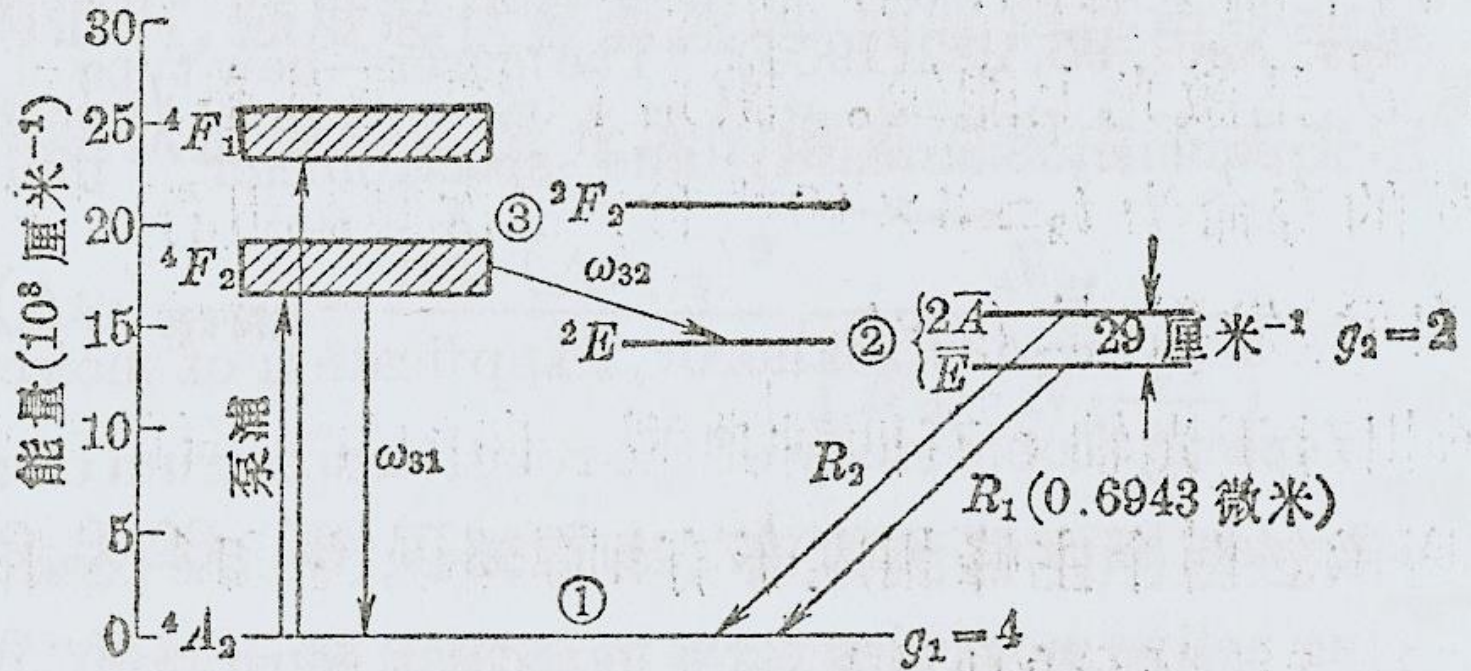


图10.2 红宝石激光器运转的能级

激光波长附近的吸收系数 $\alpha_{12}(\nu)$:

$$\alpha_{12}(\nu) = (N_1 \frac{g_2}{g_1} - N_2) \sigma_{12}(\nu)$$

其中 $\sigma_{12}(\nu)$ 为吸收截面。

由(9.3-15)式 $P_e = \Delta N_t h\nu V_m W_i$

和 $W_{12}(\nu) \propto \frac{g(\nu)}{t_{spont}} I_\nu \propto \sigma_{12}(\nu)$ ($\sigma_{12}(\nu)$ 为与 I_ν 无关的部分)

可见较大的吸收截面有利于激光振荡。

激光跃迁中心处的吸收截面： $\sigma_{12}(\nu) \approx 1.22 \times 10^{-20}$ 厘米²。

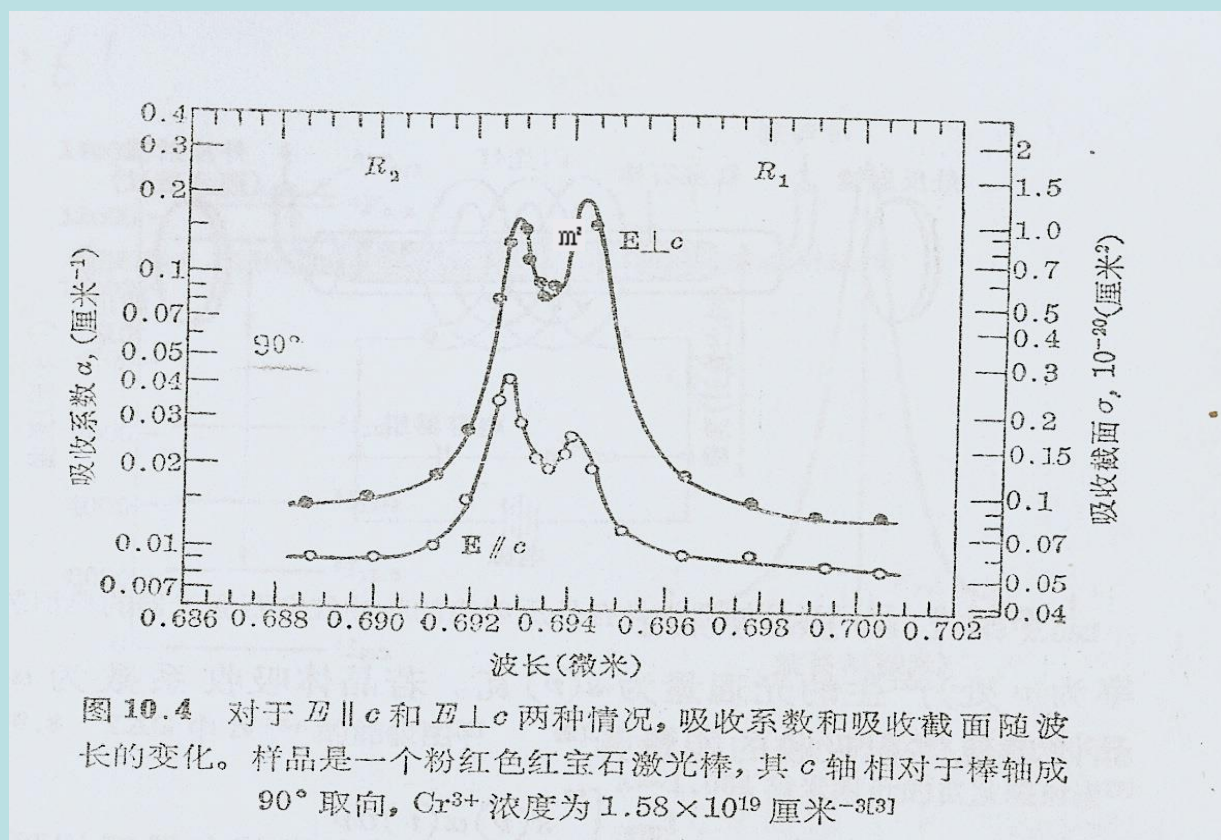


图10.4 对于 $E \parallel c$ 和 $E \perp c$ 两种情况，吸收系数和吸收截面随波长的变化

红宝石激光的发射过程:

红宝石晶体在光泵激励下，处于基态 4A_2 的铬离子吸收光能后，跃迁到激发态 4F_1 和 4F_2 上。处于激发态能级 4F_1 和 4F_2 上的铬离子极不稳定，由于晶体内部晶格振动，很快向能级 2E 跃迁，并将一部分能量转移给其周围的晶格。由于能级 2E 是具有寿命为 $t_2 \approx 3 \times 10^{-3}$ 秒的亚稳态，所以极易在能级 2E 上得以积聚。在铬离子从能级 2E 回到基态 4A_2 时，便产生了中心波长为 **0.6943** 微米 (R_1) 和 **0.6929** 微米 (R_2) 的荧光，其中 R_1 的强度比 R_2 强。

当光泵浦足够强，被激发到亚稳态上的铬离子获得大量积累，一旦达到粒子数反转后，便可能产生受激放大。

10.3 掺钕钇铝石榴石 (Nd³⁺:YAG) 激光器

最常用的激光器之一。

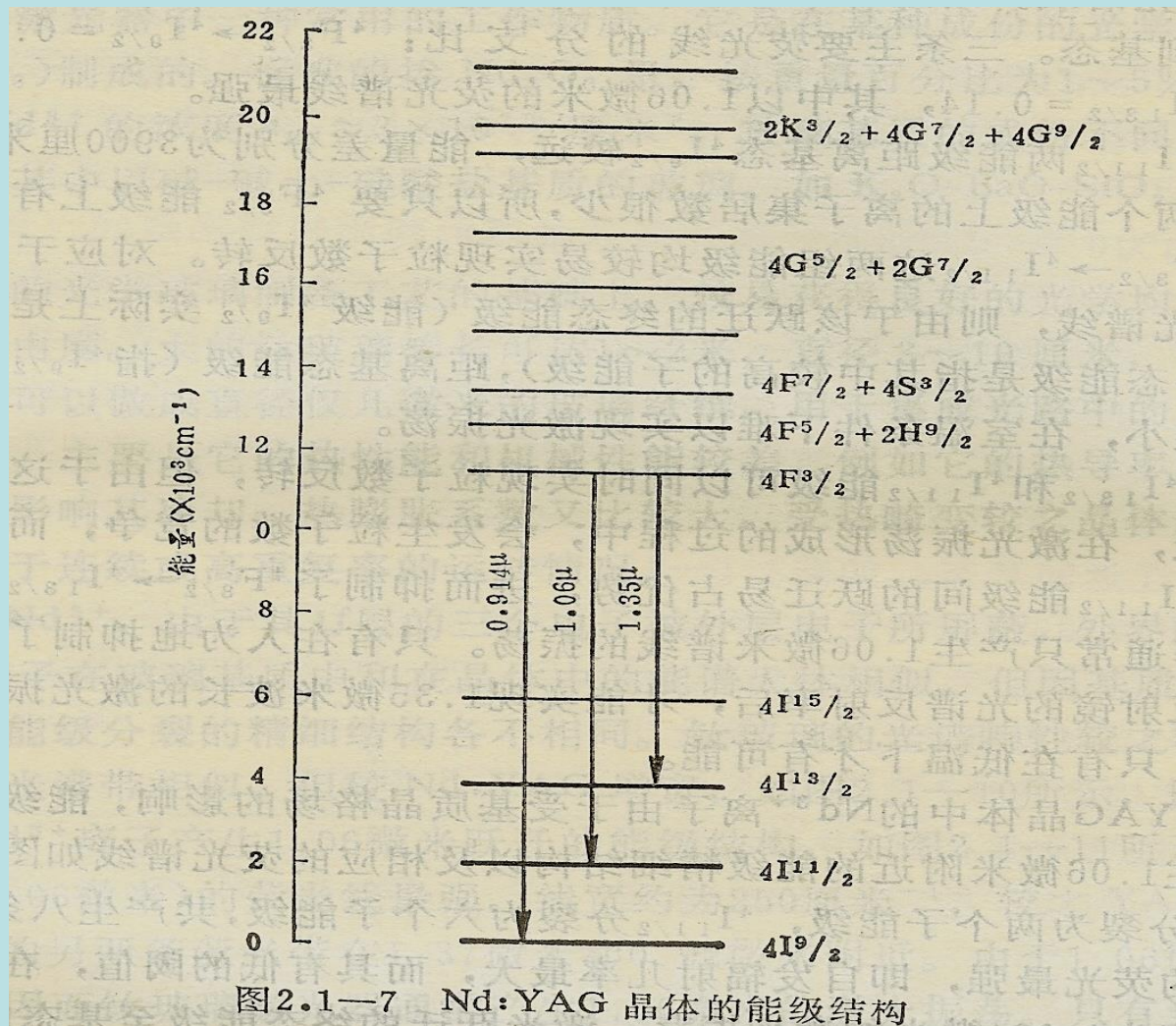


图10.8 YAG中的Nd³⁺能级图

Nd³⁺:YAG激光介质: 在 (YAG=Y₃Al₅O₁₂) 晶体中掺Nd³⁺离子。

输出波长: 1.0641微米

四能级结构: 如图10.8所示, 激光下能级为 E_2 , 不是基态, E_2 高于基态2111厘米⁻¹, 室温下处于 E_2 能级的粒子数比基态低 $\exp(-E_2/kT) \approx e^{-10}$ 倍, 可以忽略不计, 于是有 $N_{2t} \approx \Delta N_t$ 。
具有这种特性的激光器被称作四能级激光器。

抽运方式: 光泵浦 (强闪光灯) 使Nd³⁺离子由基态 $^4I_{9/2}$ 激发到激发态3($^4F_{5/2}$ 和 $^2H_{9/2}$ 及更高的能级)。
抽运的吸收发生在13000和25000厘米⁻¹之间的吸收带内, 如图10.A。

无辐射跃迁：激发态**3**寿命极短，迅速弛豫到能级**2**上（亚稳态 ${}^4F_{3/2}$ ）

受激跃迁（激光）：激光上下能级分别为能级**2**（ ${}^4F_{3/2}$ ）和能级**1**（ ${}^4I_{11/2}$ ）。

离子处于激光上能级 ${}^4F_{3/2}$ 的寿命为 $t_{spont} \approx 5.5 \times 10^{-4}$ 秒（ $t_2 \approx t_{spont}$ ）。

该激光上下能级之间的自发辐射光谱如图**10.9**所示。

室温下谱线线宽为 $\Delta\nu \approx 6$ 厘米⁻¹。

激光跃迁中心处的吸收截面： $\sigma_{12}(\nu) \approx 9 \times 10^{-19}$ 厘米²。

比红宝石的 $\sigma_{12}(\nu) \approx 1.22 \times 10^{-20}$ 厘米²大近两个数量级，因此对给定的

反转粒子数**Nd³⁺:YAG**的增益常数比红宝石大**75**倍，因而振荡阈值

（指阈值输入能量或阈值反转粒子数密度）显著降低。

$$\text{(由(9.3-12)式的 } \gamma_0 = \Delta N_0 \frac{\lambda^2}{8\pi n^2 t_{spont}} g(\nu) \propto \Delta N_0 \sigma_{12}(\nu) \text{)}$$

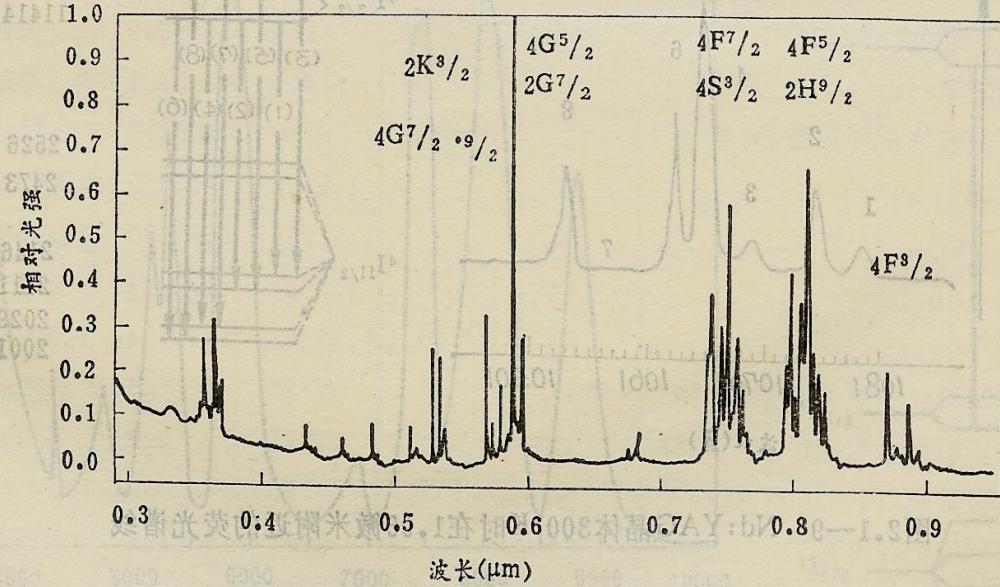


图2.1—8 Nd:YAG晶体在300°K时的吸收光谱

图10. A Nd³⁺:YAG晶体在300°K时的吸收光谱

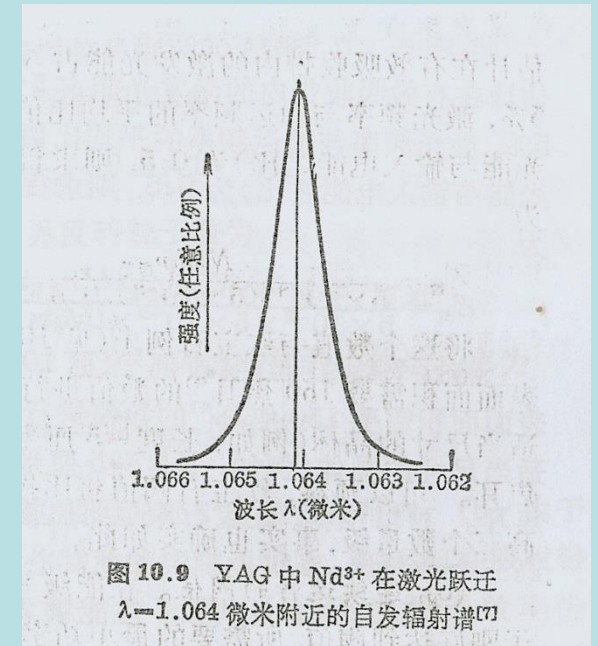


图10.9 YAG中Nd³⁺在激光跃迁λ=1.064微米附近的自发辐射谱^[7]

图10.9 YAG中Nd³⁺在1.064微米附近的自发辐射光谱

举例：Nd³⁺:YAG激光器的阈值

已知下列参数： $l=20$ 厘米（腔长）

$L=4\%$ （单程损耗）

$t_c \approx l/Lc = 1.6 \times 10^{-8}$ 秒（谐振腔光子寿命）

$n=1.5$

$\lambda=1.064$ 微米

$t_{spont} = 5.5 \times 10^{-4}$ 秒（自发辐射寿命）

$\Delta\nu \approx 6$ 厘米⁻¹（谱线线宽）

将上述数据代入(9.1-16)式，可得：

$$N_{2t} \approx \Delta N_t = \frac{8\pi n^2 t_{spont} \Delta\nu}{\lambda^2 c t_c} \approx 1.03 \times 10^{15} \text{ 厘米}^{-3}$$

考虑影响激光效率的几个因素：

激发光能在有效吸收带内的比例 **5%**

晶体实际吸收光能的比率 **5%**

激光频率与抽运频率的平均比值 **50%**

泵浦闪光灯的电能转换成光能的效率**50%**

总的效率约为 **$0.05 \times 0.05 \times 0.5 \times 0.5 \approx 0.6\%$**

则闪光灯的阈值能量为

$$E_{lamp} = N_{2t} h \nu_{laser} / 0.006 \approx \mathbf{0.31} \text{焦耳/厘米}^3$$

可见，远远低于红宝石的**150焦耳/厘米²**（对 $l = 10$ 厘米）。

因此，**较低的阈值使得Nd³⁺:YAG晶体也容易实现连续（CW）运转。**

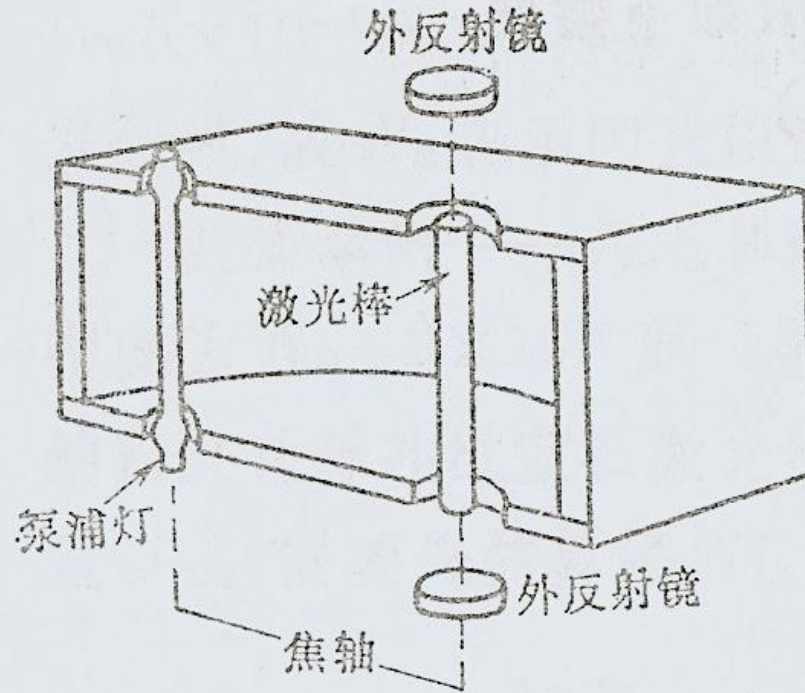


图 10.10 连续固体激光器的典型装置，利用椭圆柱面聚光腔将灯光会聚到激光棒上

图10.10 利用椭圆柱面聚光腔将灯光会聚到激光棒上

10.4 钕玻璃激光器

钕玻璃激光器和Nd³⁺:YAG激光器类似，

主要区别：

在玻璃内掺Nd³⁺离子，由于玻璃的无定型结构所造成每个Nd³⁺离子的周围环境不同，使自发辐射光谱加宽（ $\Delta\nu \approx 200$ 厘米⁻¹，而Nd³⁺:YAG的 $\Delta\nu \approx 6$ 厘米⁻¹）。

这使得钕玻璃激光的阈值反转粒子数增加

$$\left(N_{2t} \approx \Delta N_t = \frac{8\pi n^2 t_{spont} \Delta\nu}{\lambda^2 c t_c} \approx 9 \times 10^{15} \text{ 厘米}^{-3}; \right.$$

而Nd³⁺:YAG的 $N_{2t} \approx 1.03 \times 10^{15} \text{ 厘米}^{-3}$)

钕玻璃激光器的特点：

由于相对晶体来说，玻璃较容易被制成大块材料，因此钕玻璃激光器经常被应用于大功率激光器。

10.5 氦-氖 (He-Ne) 激光器

是第一台连续激光器，也是第一台气体激光器。

激光介质：在激光管内填充**1.0毫米汞高的He**原子和**0.1毫米汞高的Ne**原子混合气体。

输出波长：0.6328微米

抽运方式：通过在**1.0毫米汞高的He**和**0.1毫米汞高的Ne**的气体放电。

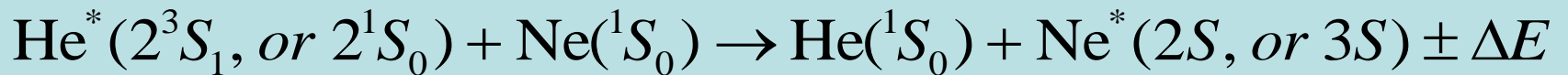
气体放电：通常情况下，气体是很好的绝缘体，当激光管电压增加到某一值时，导电电流会突然增大，气体从绝缘体变成导体（电击穿），形成所谓的气体放电。

这种气体放电有：辉光放电、弧光放电、脉冲放电等。

气体激光器大多是利用这些放电形式来激励气体使之产生激光。

激发机理:

放电中的高能电子将**He**原子激发到激发态上，这些受激原子向基态正常级联跃迁的过程中，许多原子聚集在长寿命的亚稳态 2^3S 和 2^1S 上（其寿命分别为 10^{-4} 秒和 5×10^{-6} 秒）。**He**原子的这两个亚稳态的能量与**Ne**原子的 $2S$ 和 $3S$ 能级的能量几乎相同，所以当激发态的 **He***(2^3S 、 2^1S)和基态的**Ne**发生碰撞时，**He***(2^3S 、 2^1S)的能量就转移到**Ne**使其激发到**Ne***($2S$ 、 $3S$)。能量的微小差别可以由原子碰撞后动能的变化予以补偿。



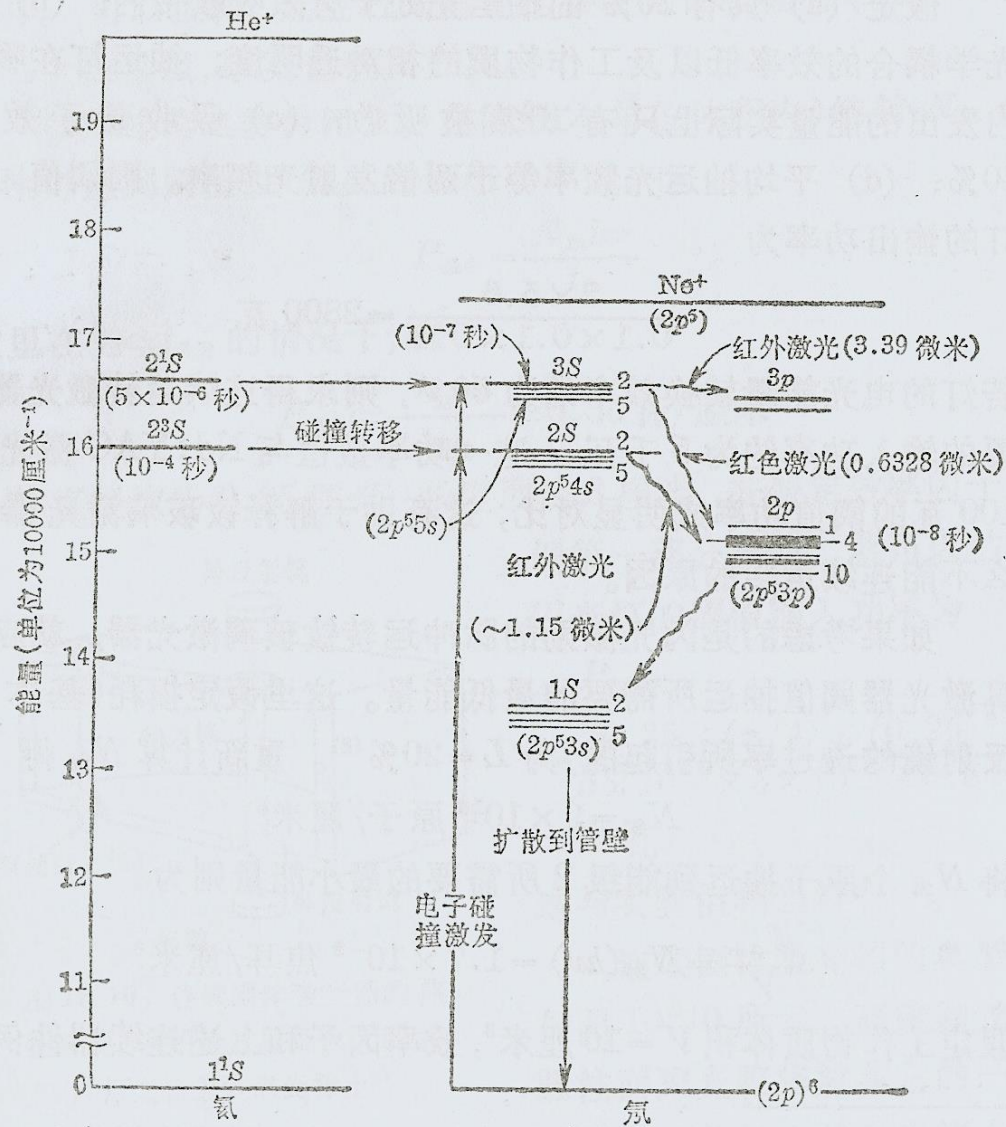


图 10.15 He-Ne 能级图。指出了红光和红外激光跃迁的主要激发过程^[11]

图10.15 He-Ne能级及激励原理图

0.6328微米的受激跃迁（激光）：激光上能级为Ne的 $3S$ 能级组中的一个能级 $3S_2$ ，激光下能级为 $2P$ 能级组中的 $2P_4$ 。即 $3S_2 \rightarrow 2P_4$ 。属于典型的四能级激光系统。

$3S_2$ 的寿命约为 10^{-7} 秒； $2P_4$ 的寿命约为 10^{-8} 秒；

因此， $3S_2 \rightarrow 2P_4$ 的跃迁满足(9.3-10)式给出的粒子数反转条件 $t_1 < t_2$ 。

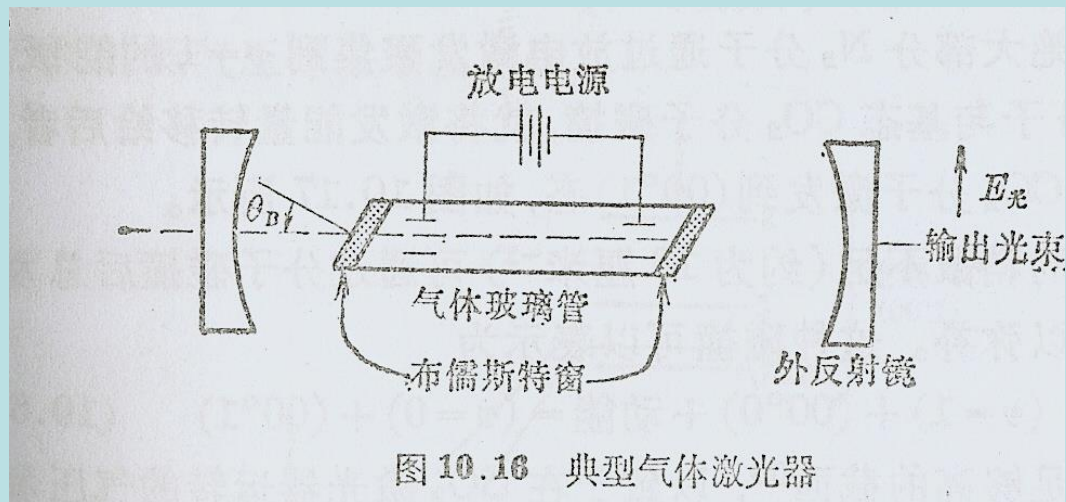


图10.16 典型的气体激光器

气体管的窗口倾斜成布儒斯特角，使得平行纸面偏振的光无反射损耗产生激光振荡，垂直于纸面偏振的光因反射损耗无法产生激光振荡。

10.6 二氧化碳（CO₂）激光器

前面所介绍的激光器输出波长均在可见区和近红外区，对应于原子或离子的电子跃迁。

CO₂激光器属于分子激光器，参与激光作用的能级是分子的内部振动能级（即组成分子的原子间的相对运动）。原子中的电子始终处于最低能态。

CO₂分子的结构和振动能级

由三个原子组成CO₂分子有三种基本振动（振动简模），如图10.18所示：

a) 分子处于静止状态

b) 原子沿原子核间的轴线对称地振动—**对称拉伸模**

c) 分子沿垂直原子核间轴线的轴作对称振动—**弯曲模**

d) 原子沿原子核间的轴线作反对称振动—**反对称拉伸模**

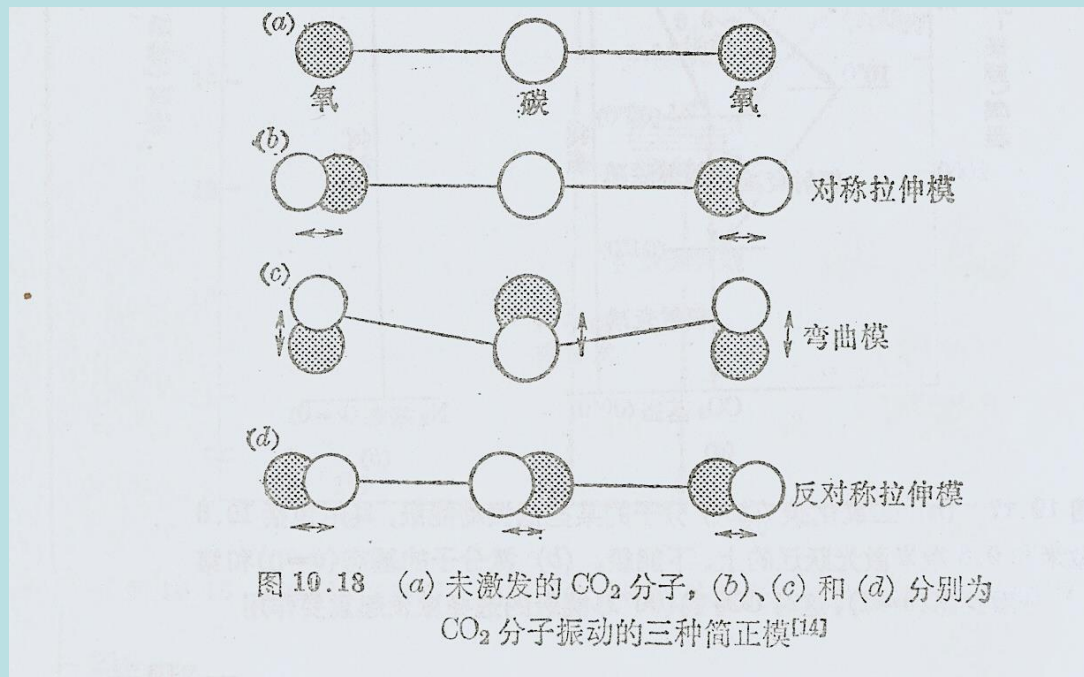


图10.18 CO₂分子有三种简征模

能级的表示:

在一级近似下可以假定，三种简征模彼此是独立的，这时 CO_2 分子的能态可以用三个整数 (v_1, v_2^l, v_3) 来描述,它们分别对应于上述三种模式的激励程度，其中 v_2^l 右上角上的 l 为角动量量子数, $l = 0$ 的能级是非简并的, $l > 0$ 的能级是二度简并的。分子的总振动能量为:

$$E(v_1, v_2, v_3) = h\nu_1(v_1 + \frac{1}{2}) + h\nu_2(v_2 + \frac{1}{2}) + h\nu_3(v_3 + \frac{1}{2}) \quad (10.6-1)$$

式中 ν_1, ν_2, ν_3 分别表示对称拉伸模、弯曲模和反对称拉伸模的频率。

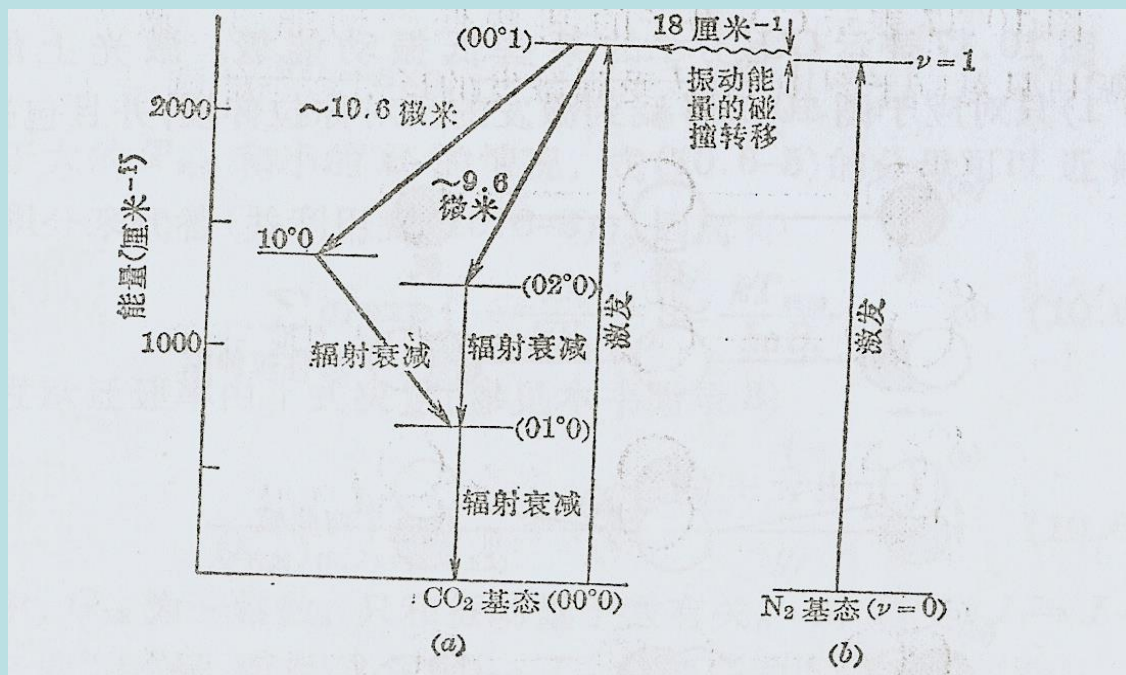


图10.17 CO_2 分子的一些低振动能级

激光介质：在激光管内填充气体CO₂以外，还有适量的N₂和He等混合气体。

输出波长：10.6微米

10.6微米的受激跃迁（激光）：在CO₂的(00°1)能级和(10°0)能级之间发生10.6微米的激光跃迁。激光上能级(00°1)的辐射寿命 t_{spont} 约为3秒，其实际寿命 t_2 由分子碰撞决定，其范围从几托气压时的10⁻³秒到大气压时的3×10⁻³秒。

在常温下，低气压（≤5托）时的激光跃迁的多普勒谱线宽度为 $\Delta\nu_D \sim 60$ 兆赫兹。

抽运方式：和He-Ne激光器类似，通过气体放电。

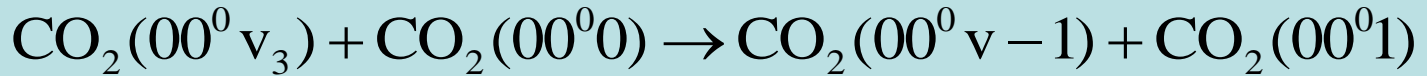
激发机理： CO_2 的气体放电激发 $(00^0 1)$ 能级有三种基本过程：

1、电子碰撞激发

慢速电子通过和 CO_2 分子碰撞直接激发其至 $(00^0 1)$ 能级；

2、串级跃迁

被放电激发至 $(00^0 v_3)$ 能级的 CO_2 分子，通过与基态 CO_2 分子碰撞逐级地弛豫到 $(00^0 1)$ 能级



3、振动能量的共振转移

N_2 和 CO_2 的振动能级非常接近，且 $\text{N}_2(v = 1)$ 的寿命较长，所以被放电激发的 N_2 分子与 CO_2 碰撞可以将其能量转移至 CO_2 使其激发至 $(00^0 1)$ 能级。

能量的微小差别可以由原子碰撞后动能的变化予以补偿。



CO₂激光器的主要优点是效率高（约**30%**）和大功率（几万瓦、**CW**运转）。

其**高效率**主要由下述原因决定：

1. 激光能级都靠近基态，且原子量子效率 ν_{21}/ν_{30} 较大（约**45%**）。
2. 大部分被放电激发的 CO₂ 分子都可以通过串级跃迁，对激发态**(00°1)**能级有贡献。
3. 大部分被放电激发的长寿命 N₂ 分子都可以通过碰撞，将其能量转移至 CO₂分子使其跃迁至激发态**(00°1)**能级。

大功率除了上述高效率和采用长的放电管外，

还由于激光下能级**(10°0)**的短寿命使得其很快回到基态获得重新激发的机会。

振-转跃迁:

由分子光谱可知, CO_2 分子的红外谱并不是一条单一的振动谱线, 而是由许多谱线组成的谱带。这是因为 CO_2 分子进行振动的同时还进行转动, 即振-转能级跃迁引起的。因此, 描述分子的振-转能级除了需要上述的振动量子数 ν 外, 还需要用转动量子数 J 。对于一给定的振动能级 i , 纯转动能级能量为:

$$\frac{E_{iJ}}{hc} = B_i J(J+1) + DJ^2(J+1)^2 \quad (10.6-3)$$

式中 B_i 为第 i 个振动能级的转动常数, $D \ll B_i$ 为分子的光谱常数。

CO_2 分子在 10.6 微米的激光跃迁的振-转能级如图 10.19 所示。

$P(J)$ 支跃迁: $J \rightarrow J+1$ 的跃迁

$R(J)$ 支跃迁: $J \rightarrow J-1$ 的跃迁

$Q(J)$ 支跃迁: $J \rightarrow J$ 的跃迁

(由选择定则知, Σ 电子态时 $Q(J)$ 为禁戒跃迁)

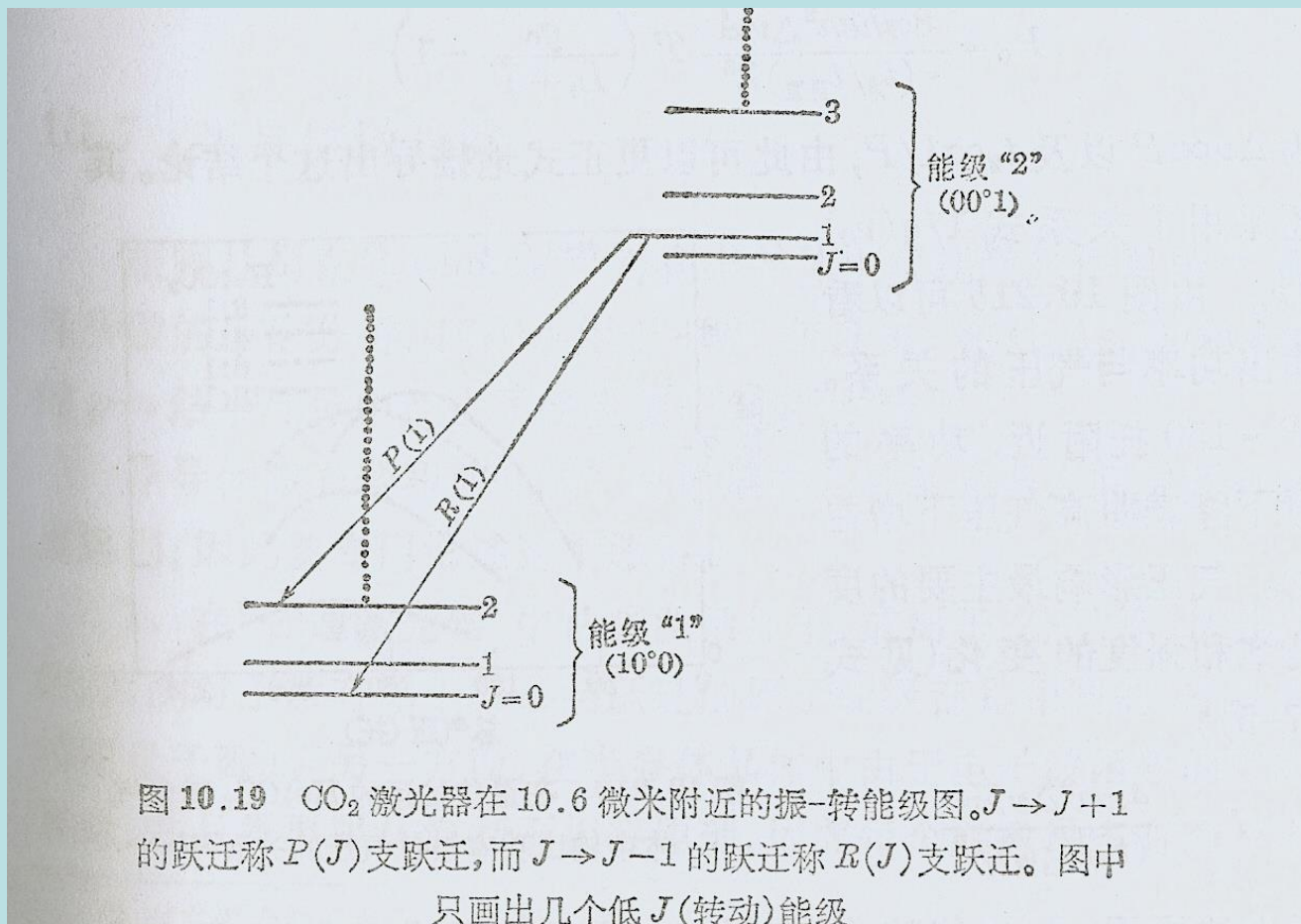


图10. 19 CO₂分子在10. 6微米附近的振-转能级

10.8 有机染料激光器

染料分子的能级、吸收和发射

图10.37给出了一种典型的有机染料（Rhodamine 6G）分子的能级示意图。

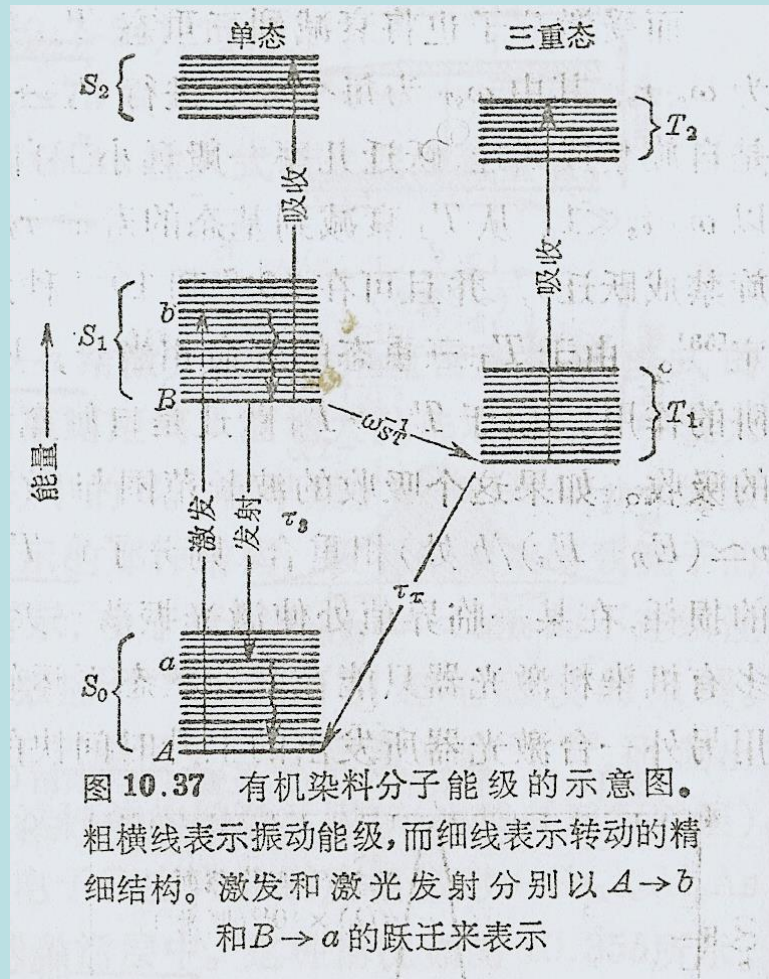


图 10.37 有机染料分子能级的示意图。
粗横线表示振动能级，而细线表示转动的精细结构。激发和激光发射分别以 $A \rightarrow b$ 和 $B \rightarrow a$ 的跃迁来表示

图10.37

基态: S_0

单重激发态: S_1 , S_2 (总自旋为零 $S = 0$, 因而为单重态($2S + 1 = 1$))

三重激发态: T_1 , T_2 (总自旋为 $S = 1$, 因而为三重态($2S + 1 = 3$))

电子态上的振动-转动能级: 每个电子能级上都有一组振动-转动能级。

电子能级能量间隔约为 10^4 厘米 $^{-1}$, 振动能量间隔约为 10^3 厘米 $^{-1}$, 转动能级能量间隔约为 10 厘米 $^{-1}$ 。由于和溶剂分子的碰撞加宽了这些转动能级, 导致整个吸收带上的吸收是连续的。

图10.38若丹明6G的单态吸收和荧光光谱。

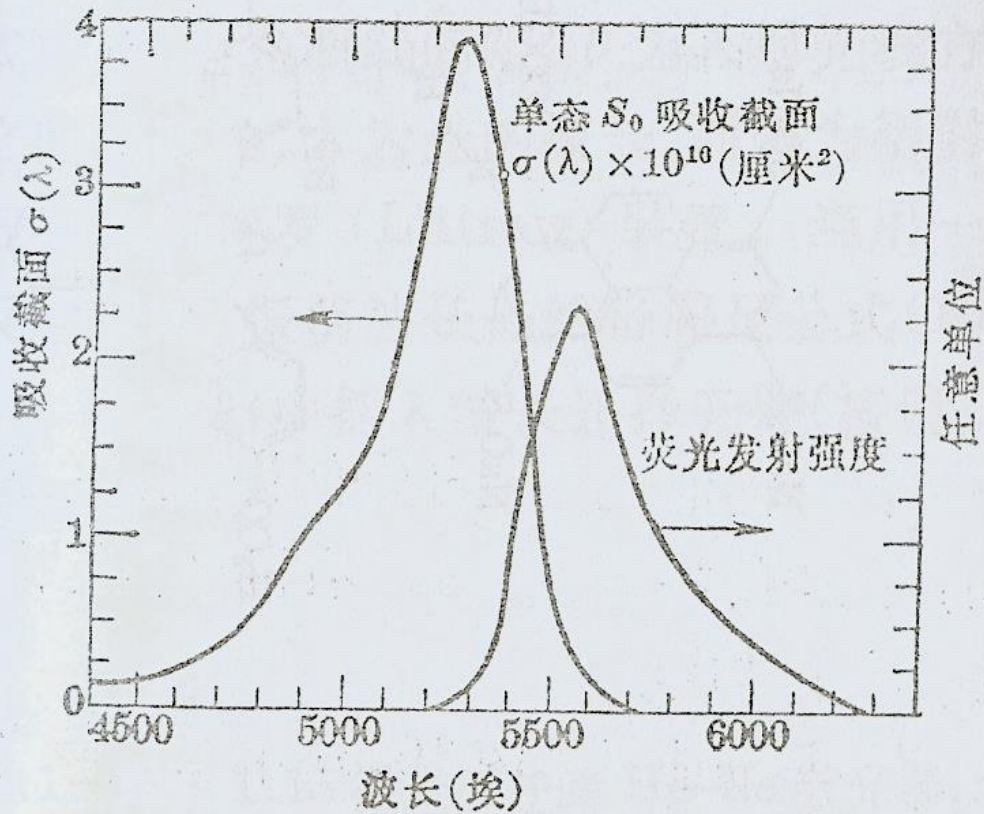


图 10.38 若丹明 (Rhodamine) 6G 的单态吸收和荧光光谱, 曲线是由 10^{-4} 克分子浓度的染料乙醇溶液测得的^[53]

图10.38若丹明6G的单态吸收和荧光光谱

激光的四能级系统

能级1: A , 能级2: b , 能级3: B , 能级4: a

跃迁过程: $A \rightarrow b \rightarrow B \rightarrow a \rightarrow A$

泵浦抽运: $S_0(\nu = 0, J = 0) + h\nu_{pump} \rightarrow S_1(\nu = n, J = m)$

无辐射弛豫: $S_1(\nu = n, J = m) \rightarrow S_1(\nu = 0, J = 0) + \Delta E$

发光 (激光) : $S_1(\nu = 0, J = 0) \rightarrow S_0(\nu = n, J = m) + h\nu$
发射频率 $\nu = (E_B - E_a)/h$

无辐射弛豫: $S_0(\nu = n, J = m) \rightarrow S_0(\nu = 0, J = 0) + \Delta E$

三重态的陷阱作用和解决方法

系际交叉：激发态分子也可以通过系际交叉弛豫到三重态 T_1 ，此过程是自旋禁戒跃迁，所以跃迁几率较小（相对自发辐射几率 τ_s^{-1} ），约为 $\omega_{ST}\tau_s$ 。

三重态的陷阱作用：由于三重态 T_1 的寿命 τ_T 较长（可长到 10^{-3} 秒），分子容易在 T_1 态上积累并产生 $T_1 \rightarrow T_2$ 吸收跃迁，增加激光损耗，并降低可重新激发的粒子数。脉冲运转。

克服三重态的方法：

在染料溶液中加入三重态淬灭剂，缩短态 T_1 的寿命。

采用短脉冲激光泵浦：在 T_1 态积累之前完成激光振荡。

泵浦方式

激光泵浦：比如使用Q开关纳秒Nd:YAG激光器的倍频光(532nm)或三倍频光(355nm)。

闪光灯泵浦：可获得脉冲能量高，调谐光谱范围宽（330-970nm）的激光。缺点是需要添加淬灭剂。

调谐方法

有光栅、棱镜等调谐方式,其中光栅调谐是最常使用的一种调谐方法。如图10.B所示，谐振腔一端的反射镜用平面光栅来代替。通过转动光栅既可以从染料的增益分布中选出单个波长，并使之沿腔轴方向反射回去形成激光振荡。

光栅方程： $2d \sin \alpha = m\lambda$

m 为衍射级次， d 为光栅常数， α 为入射角， λ 为激光波长。

光栅的缺点是插入损耗大，达10-30%。

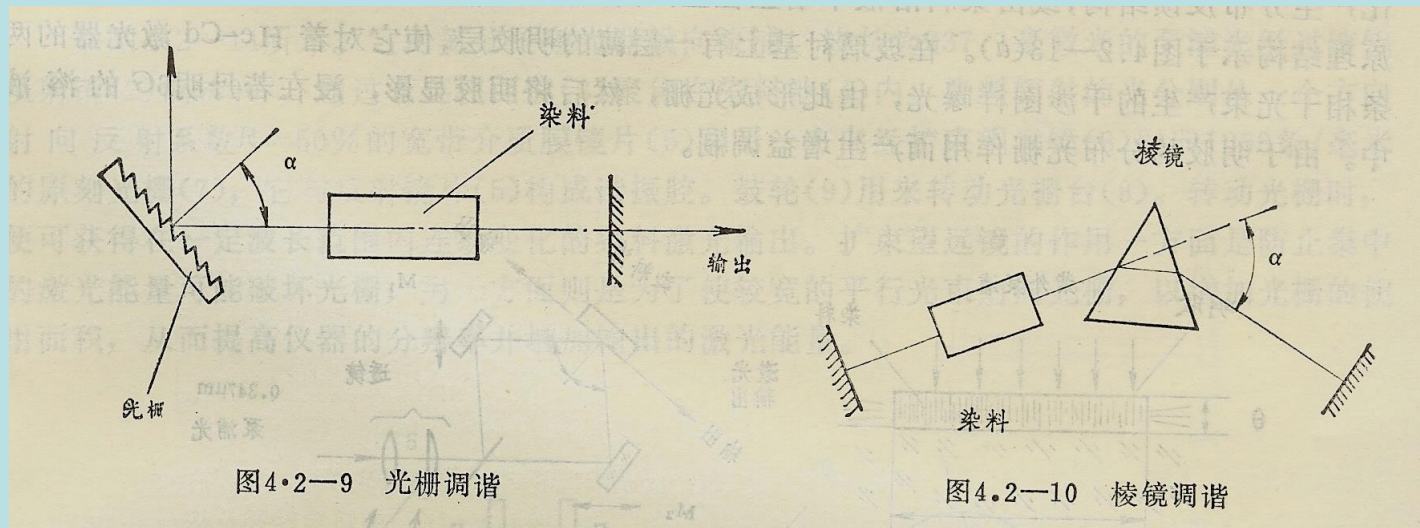


图10.B 光栅、棱镜调谐方式

染料激光器的优点:

波长调谐: 染料在可见光区域内有较宽波长的发光, 因此可以通过光栅等代替谐振腔一个反射镜, 进行波长调谐。

较大的增益系数: 由于激活粒子密度大, 可以获得较大的增益系数, 输出功率可与固体激光器相比。

激光介质均匀性好: 激光工作物质使用液体, 因此具有好的光学均匀性。
价格便宜。

缺点: 使用寿命短 (光致化学分解等原因)。需经常更换染料。