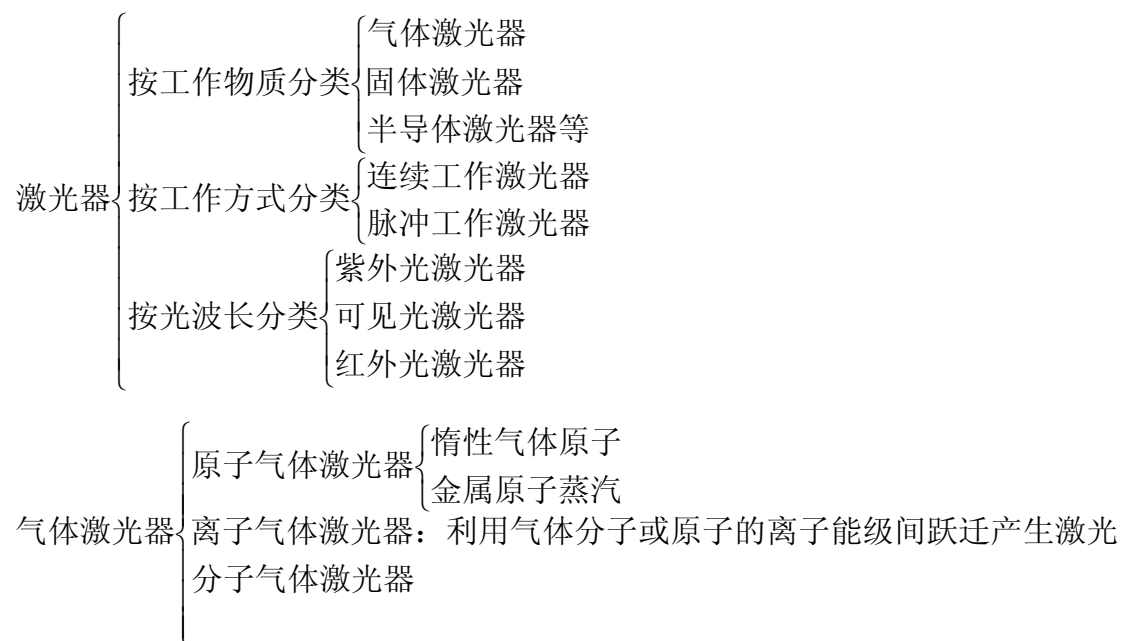


第六章 发光器件

§ 6-1 气体激光器

一、概述



1. 气体激光器

工作物质：气体或金属蒸汽

泵浦方式：通常采用气体放电泵浦，也可采用化学泵浦、热泵浦及核泵浦等

2. 固体激光器

工作物质：绝缘晶体或玻璃

泵浦方式：光泵浦激励

3. 半导体激光器

工作物质：半导体

泵浦方式：电流注入

特点：体积小、寿命长、输出功率大、效率高

应用：激光通信、光存储、光陀螺、激光打印和测距、激光雷达

二、氦氖激光器

1. 结构

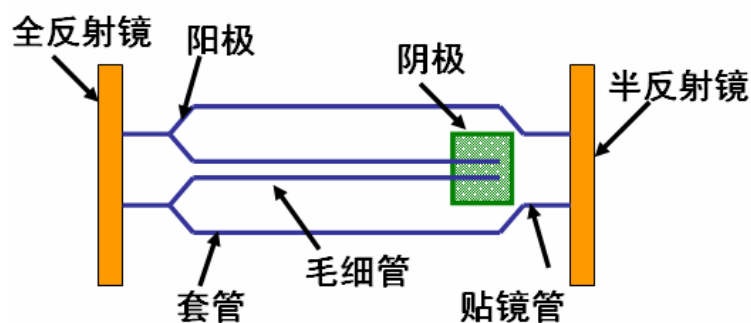


图 6.1 内腔式氦氖激光器结构图

放电管：由套管、毛细管和贴镜管组成，材料常用硬质玻璃或石英玻璃。

电极：由阴极和阳极组成。

反射镜：由全反射镜（反射率>99%）和半反半透镜（反射率≈98%）组成。

2. 发光机理

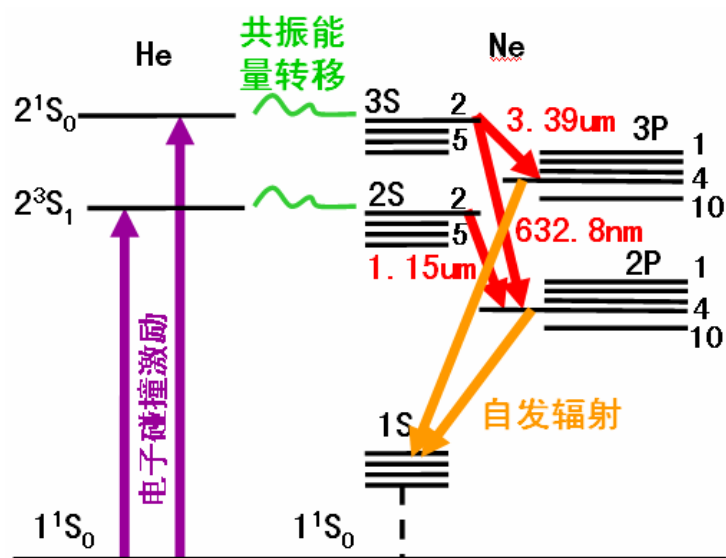


图 6.2 He 原子和 Ne 原子的能级示意图

$$\text{发射波长} \begin{cases} 3S_2 \rightarrow 2P_4, \lambda_1 = 0.6328\mu\text{m} \\ 2S_2 \rightarrow 2P_4, \lambda_2 = 1.152\mu\text{m} \\ 3S_2 \rightarrow 3P_4, \lambda_3 = 3.39\mu\text{m} \end{cases}$$

3. 放电参量对输出功率的影响

(1) 放电电流

输出功率并不随放电电流增加而单调上升，存在一最佳放电电流 I_m ，其数值与放电毛细管内径 d 之比约为一常数。

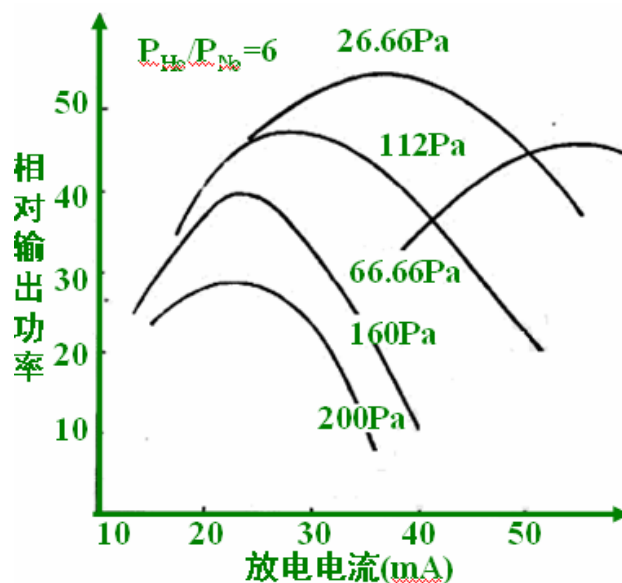


图 6.3 输出功率与放电电流的关系

(2) 总气压

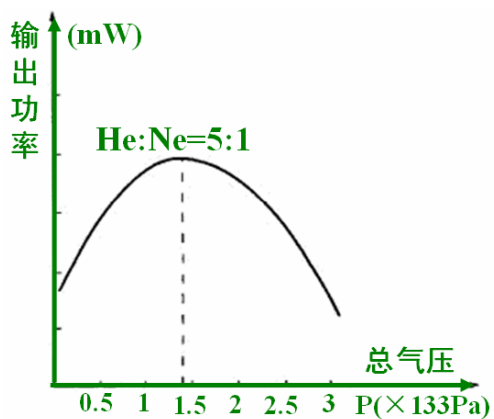
也存在一个最佳总气压，压强值与毛细管内径 d 的乘积为常数。

$$pd=400\sim 480(\text{Pa}\cdot\text{mm}) \quad d<3\text{mm}$$

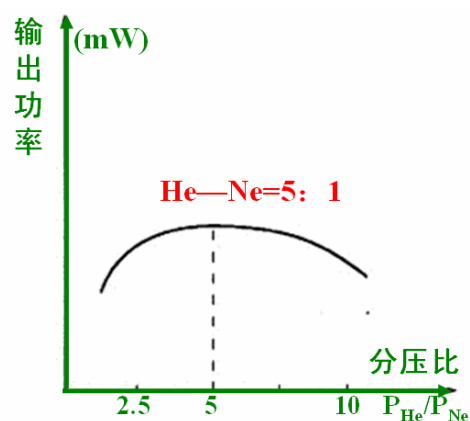
$$pd=533(\text{Pa}\cdot\text{mm}) \quad d>4\text{mm}$$

(3) 氦与氖分压比

通常取 He—Ne=5: 1



(a) 输出功率与总气压的关系



(b) 输出功率与氦氖分压比的关系

图 6.4 氦氖激光器管内压强对输出功率的影响

4. 激光器输出功率

$$P_{\text{总}} = 4.7Td^2 \left[\frac{6 \times 10^{-4}l}{2\delta + Td} - 1 \right] \quad (6.1)$$

最佳透过率: $T_m = \sqrt{G\delta} - \delta$

最大输出功率: $P_{\text{出max}} = I_s [\sqrt{G} - \sqrt{\delta}]^2$

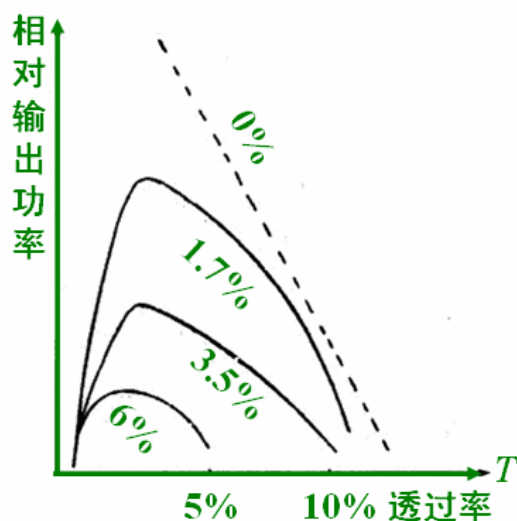


图 6.5 氦氖激光器输出功率与透过率关系曲线

三、二氧化碳激光器

特点: 输出功率大、能量转换效率高, 输出波长 $10.6 \mu\text{m}$, 处于大气窗口

应用: 激光加工、医疗、大气通信及军事领域

1. 工作原理

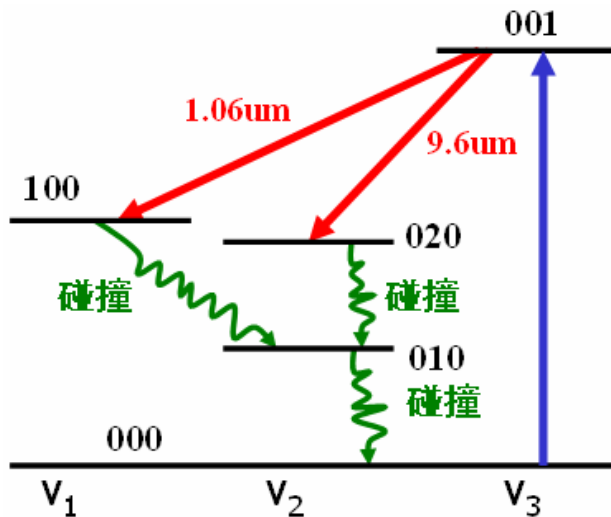


图 6.6 CO_2 和 N_2 分子基态电子能级的几个与激光产生有关的振动能级

2. 工作特性

(1) 量子效率

$$\eta = \frac{\text{激光辐射能量}}{\text{激励能量}} = \frac{h\nu}{E_2} \quad (6.2)$$

(2) 辅助气体对输出功率的影响

CO_2 : Ne: He: Xe: H_2 =1: (1.5~2) : (6~8) : 0.5: 0.1

总气体与放电管内径关系: $pd=266(\text{Pa}\cdot\text{mm})$

(3) 温度的影响

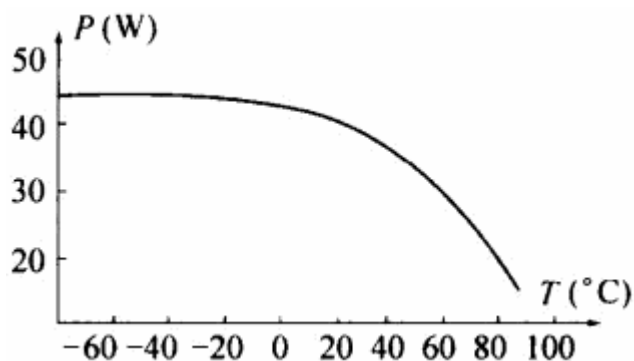


图 6.7 CO_2 激光器输出功率与管壁温度的关系曲线

(4) 激光器寿命

激光器寿命: 输出功率减弱为初始值的 $1/e$ 所对应的时间。

四、氩离子激光器

特点: 是目前可见光区域输出功率最强的激光光源 (连续工作时功率可达 100mW 左右)。

应用: 全息照相、激光光谱学、非线性光学等领域。

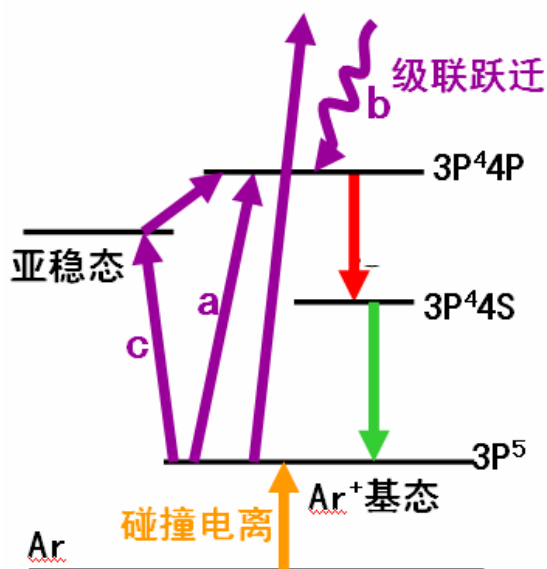


图 6.8 Ar^{3+} 离子能级图

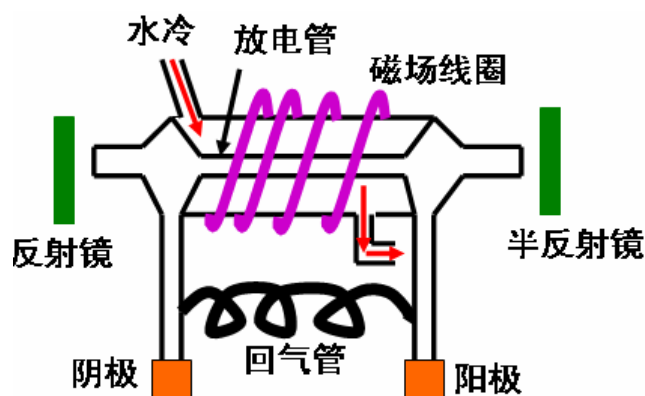


图 6.9 氩离子激光器基本结构

§ 6-2 固体激光器

一、概述

- 粒子密度： $10^{19} \sim 10^{20}/\text{cm}^3$
- 激光上能级寿命较长： $10^{-4} \sim 10^{-3}\text{s}$
- 体积小
- 采用光泵浦方式，能量转换效率较低

光泵浦激励又分为气体放电灯和半导体激光器激励两种方式。

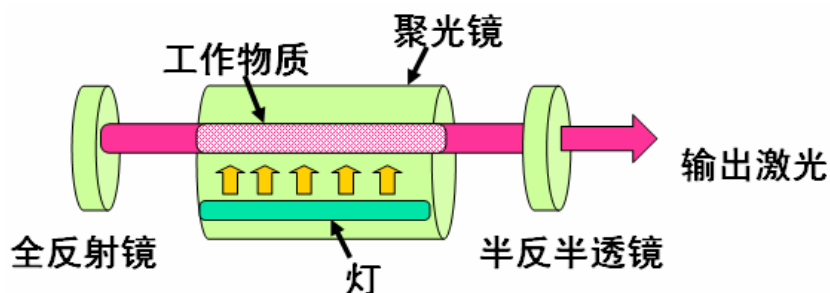


图 6.10 气体放电灯激励的固体激光器示意图

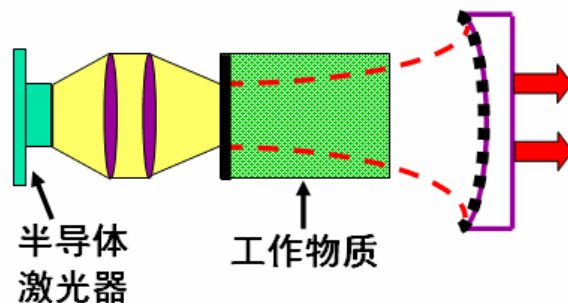


图 6.11 半导体激光器端面泵浦的固体激光器示意图

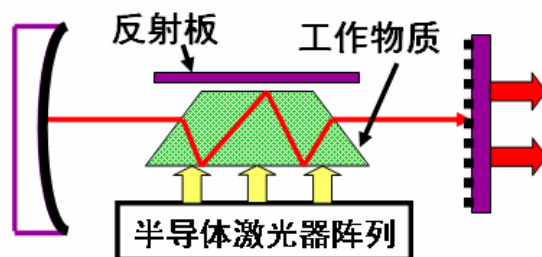


图 6.12 半导体激光器阵列侧面泵浦的固体激光器示意图

二、固体激光器工作物质

1. 物理特性的要求

- 吸收带宽，吸收系数较大
- 高荧光量子效率
- 亚稳态寿命长
- 掺杂浓度高
- 荧光谱线宽度小
- 热导率高

2. 光学质量

- 吸收系数小于 0.005cm^{-1}
- 散射损耗
- 退偏损耗

三、光源和聚光、冷却系统

1. 光源

脉冲激光器：脉冲氙灯

连续激光器：连续氙灯、碘钨灯

2. 聚光腔

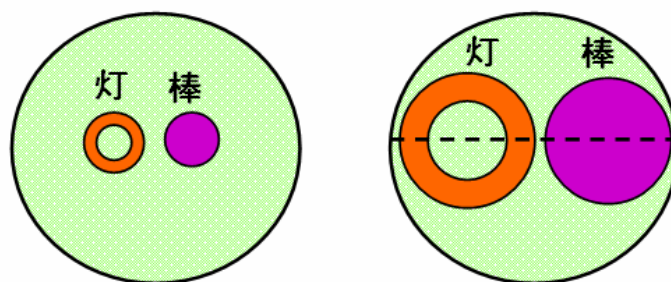


图 6.13 圆柱形聚光器



图 6.14 单椭圆柱面聚光器

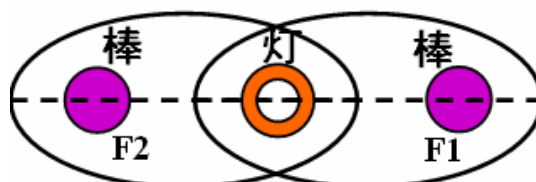


图 6.15 双椭圆柱面聚光器

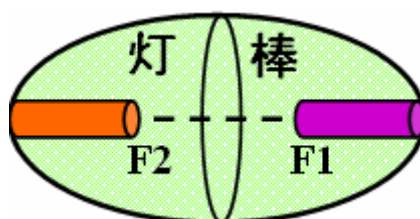


图 6.16 椭球面聚光器

3. 冷却与聚光系统

共同冷却：激光器设计为密封结构，灯、棒和聚光器共同浸泡在滤光冷却液中。

分别冷却：灯和棒分别密封在两个玻璃管中滤光冷却，聚光器另加工通水循环孔。

红宝石激光器：自来水或硫酸铜水溶液

YAG 和钕玻璃激光器：重铬酸钾或亚硝酸钠

四、红宝石激光器

属三能级系统，阈值泵浦能量高。输出可见光，应用于动态全息、医学领域。

调 Q 红宝石激光器：输出峰值功率 10MW~50 MW、脉宽 10ns~20ns

锁模红宝石激光器：输出峰值功率 10^9 W、脉宽 10ps

1. 工作原理

基质： Al_2O_3

激活粒子： Cr^{3+} 离子

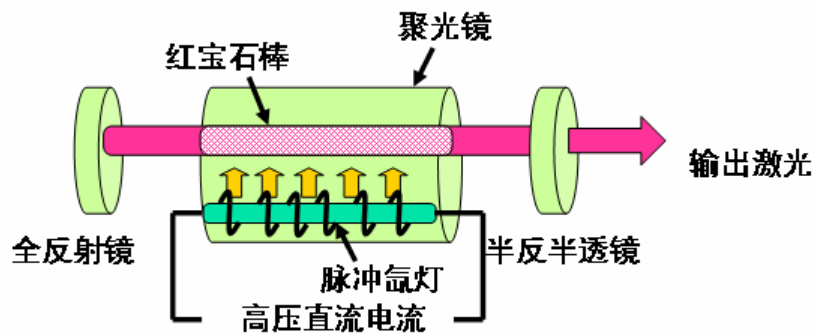
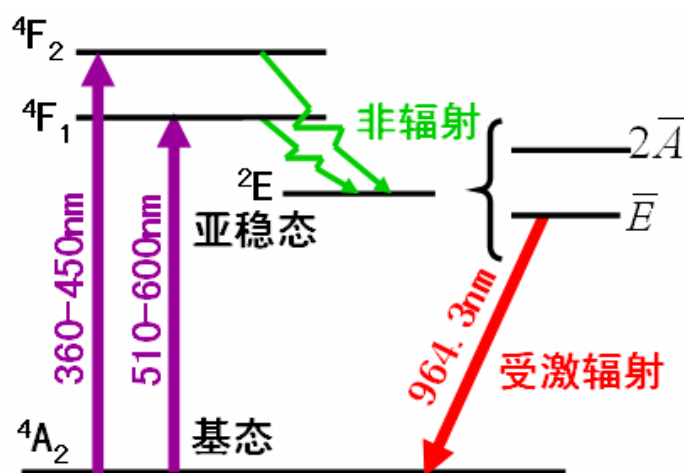


图 6.17 红宝石激光器结构图

图 6.18 红宝石中 Cr^{3+} 的能级图

2. 输出特性

(1) 时间特性

激光脉冲由很多无规则的尖峰脉冲组成，各尖峰脉冲的时间间隔约为几微秒。

(2) 光谱特性

谱线宽度 $0.01\text{nm}\sim 0.1\text{nm}$

(3) 偏振特性

晶体棒轴方向与光轴方向平行：输出激光无偏振特性

晶体棒轴方向与光轴方向夹角为 60° 或 90° 时：输出线偏振光。

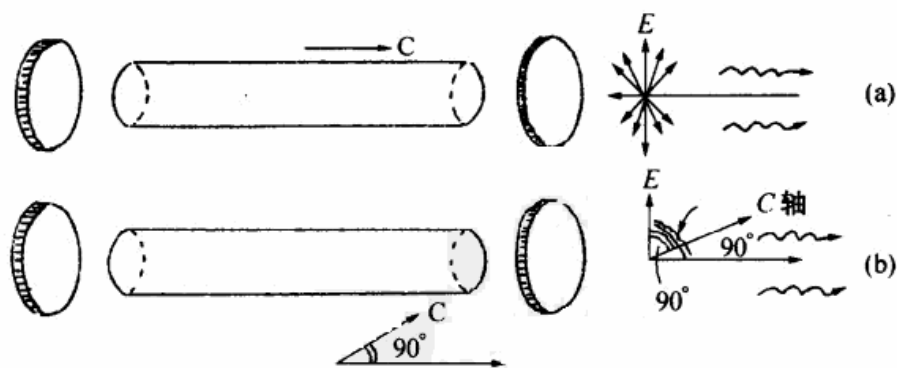


图 6.19 偏振特性

(4) 空间特性

平行平面镜腔基模光束的发散角的理论值为

$$2\theta = 2 \times \frac{1.22\lambda}{d}$$

(6.3)

3. 红宝石激光器的选模

利用在腔内插入可饱和吸收染料盒实现选模，该染料特点：吸收系数随光强增加而下降。

五、掺钕钇铝石榴石（Nd³⁺：YAG）激光器

属四能级系统，具有较低的泵浦阈值功率。

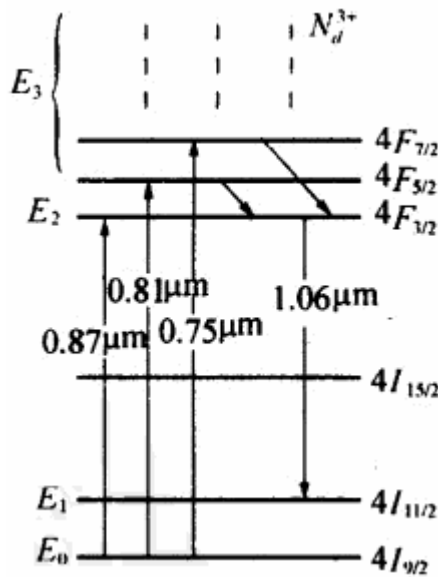


图 6.20 YAG 能级图

表 6—1 红宝石、Nd³⁺：YAG和钕玻璃激光器性能参数比较

参数	单位	红宝石	Nd:YAG	钕玻璃
激光波长	Å	6943	10 641	10 623
光子能量	J	2.86×10^{-19}	1.86×10^{-19}	1.86×10^{-19}
受激发射截面	cm^{-2}	2.5×10^{-20}	88×10^{-20}	3.03×10^{-20}
自发发射寿命	μs	3000	240	300
掺杂浓度	cm^{-3}	1.58×10^{19}	1.38×10^{20}	2.83×10^{20}
	% (重量)	0.05	0.75	3.1
荧光 linewidth	Å	5.5	4.0	260
	GHz	330	120	7 500
热导率(300K)	$\text{Wcm}^{-1}\text{K}^{-1}$	0.42	0.14	0.012
反转粒子数(每厘米 1%增益)	cm^{-3}	4×10^{17} $+ 7.6 \times 10^{18}^*$	1.1×10^{18}	3.3×10^{17}
储能(每厘米 1%增益)	J/cm^3	0.115 $+ 2.18^*$	0.002	0.060
增益系数(储能 1J)	cm^{-1}	0.087	4.73	0.160

六、调 Q 激光器原理

1. 以 Q 值突变的方法产生巨脉冲

调Q的目的：获得高峰值功率、窄脉宽（ 10^{-9}s ）的激光输出。

谐振腔 Q 值的定义：

$$Q = 2\pi\nu \frac{\text{腔内存储的激光能量}}{\text{每秒损失的激光能量}} = \frac{2\pi\eta L}{\delta\lambda} \quad (6.4)$$

2. 调 Q 激光器的基本原理

调 Q 的原理：通过调节腔内损耗率 δ 来控制 Q 值。激光器刚开始工作时，Q 值低，阈值高，不易起振，可在高能级（亚稳态能级）上积累大量粒子；随后调节 Q 值突然增大，在腔内快速建立振荡，可在极短时间内将存储在上能级的能量突然释放转变成光能量脉冲（巨脉冲）输出。

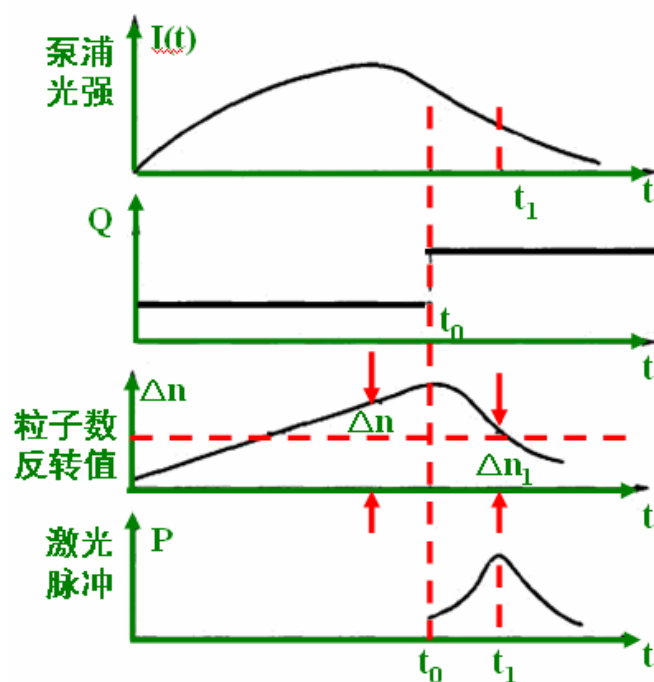


图 6.21 Q 值变化引起窄脉冲产生示意图

Q 值改变速度太慢对激光输出的影响:

- (1) 使亚稳态上粒子数反转下降变慢, 延长前沿时间, 导致脉冲宽度变窄, 输出功率下降。
- (2) 若 Q 值变化时间大于激光脉冲建立时间, 会导致多脉冲激光输出。

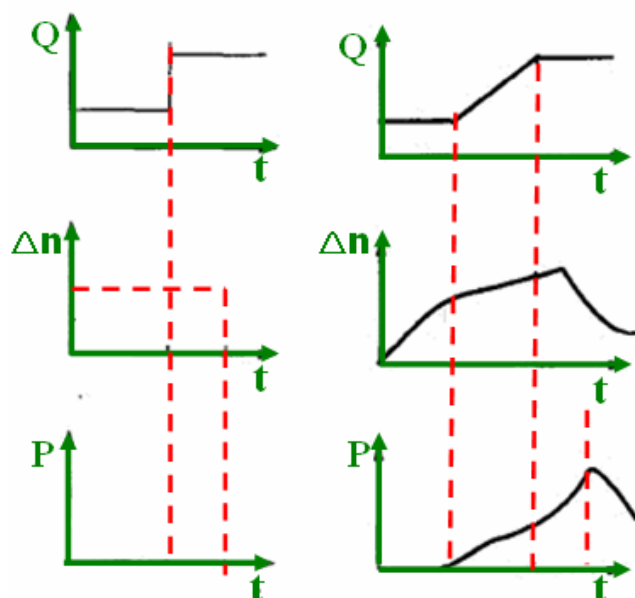


图 6.22 Q 值变化速度对脉冲宽度的影响

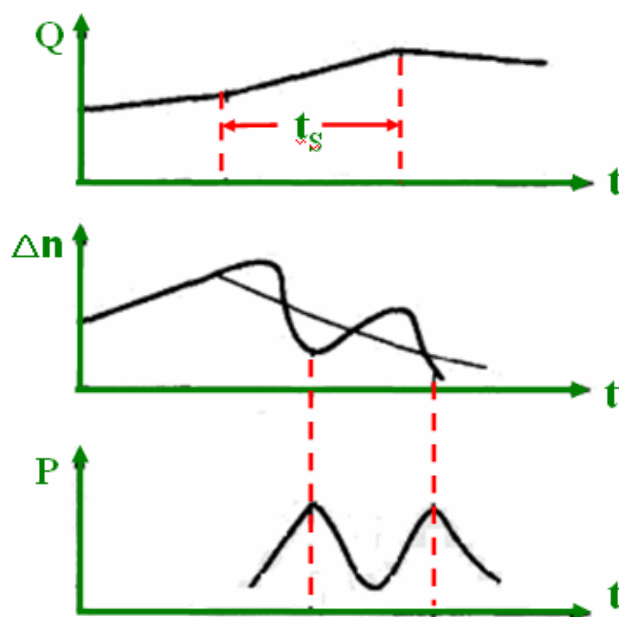


图 6.23 Q 值变化太慢导致两个以上脉冲的产生

3. 调 Q 技术举例

(1) 转镜调 Q 技术

将腔的全反射镜装在高速电动机的转轴上，该转轴垂直于腔轴。当反射镜转到与部分反射镜平行时，Q 值很大；当反射镜转到其它位置时，腔损耗增大使得 Q 值减小。

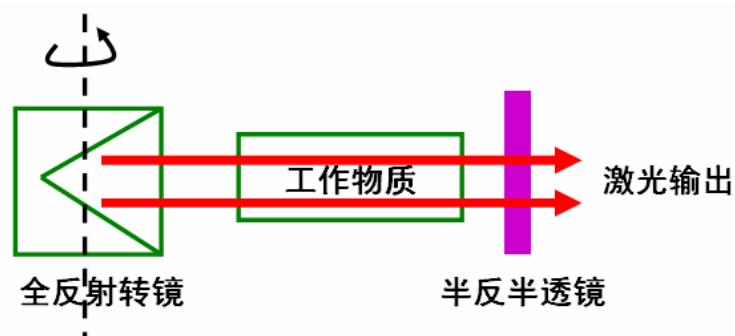


图 6.24 转镜调 Q 开关原理图

(2) 电光调 Q 技术

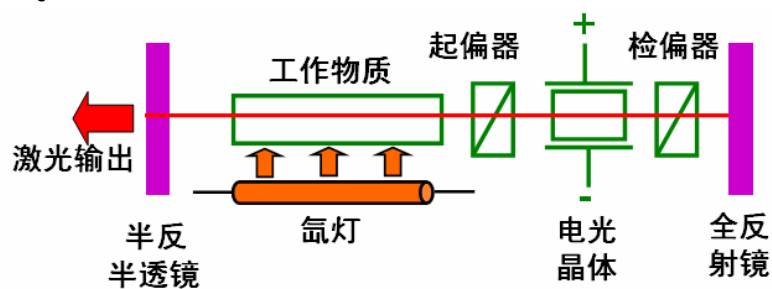


图 6.25 电光调 Q 激光器原理图

激光工作物质产生的激光通过起偏器后变为线偏振光，该线偏振光通过加了电压的电光晶体后，其偏振面旋转 90° （电光晶体的作用相当于 $1/2$ 波片）。偏振面旋转 90° 的线偏振光无法通过后面的检偏器（起偏器和检偏器的偏振轴平行），该状态相当于Q开关处于关闭状态，腔内的Q值很低。若瞬间去掉电光晶体上的电压，则偏振光的偏振方向不发生旋转而能通过检偏器，相当于Q开关被打开，Q值突然增大，完成调Q功能。

(3) 声光调Q技术

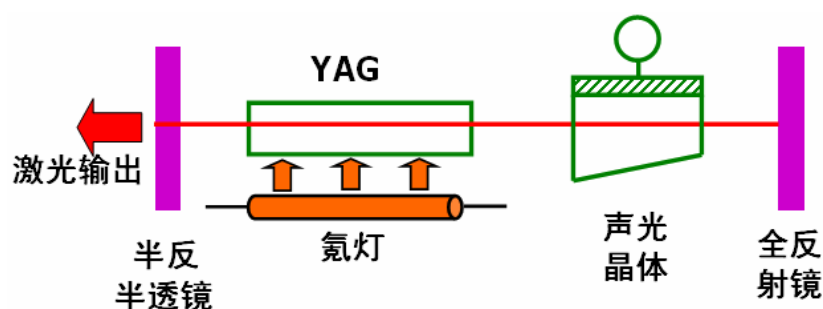


图 6.26 声光调 Q 激光器原理图

声光器件在腔内按布喇格条件放置。当介质引入超声场时，光束按布喇格条件决定的方向发生偏折，从而偏离谐振腔的轴向，此时腔内损耗很大，Q 值低，不能形成激光振荡。若撤去超声场，光束可顺利通过均匀的声光介质而不发生光束偏折，即腔的 Q 值增大，从而实现调 Q 功能。

七、锁模激光器原理

锁模技术：利用多纵模输出的激光束，经过特殊的调制，使其各纵模之间有确定的相位关系，使它们可以相互叠加从而获得一系列时间间隔一定的超短脉冲输出。

锁模目的：为获得脉冲宽度更窄（ 10^{-13}s ）的激光脉冲。

相位锁定：腔内存在多个纵模，相邻模式之间初始相位之差保持恒定。

主动锁模：在谐振腔内插入频率为 $\nu = c/(2L)$ 的调制器，对光束进行振幅（或相位）调制。

被动锁模：在腔内插入具有饱和吸收特性的染料盒，利用其吸收特性进行锁模，常用于脉冲激光器，稳定性较差。

1. 锁模脉冲的形成与输出特性

振幅相等、但初相位不同的多个光波叠加：无规则的起伏波形

振幅相等、但初相位有确定关系的多个光波叠加：周期性脉冲

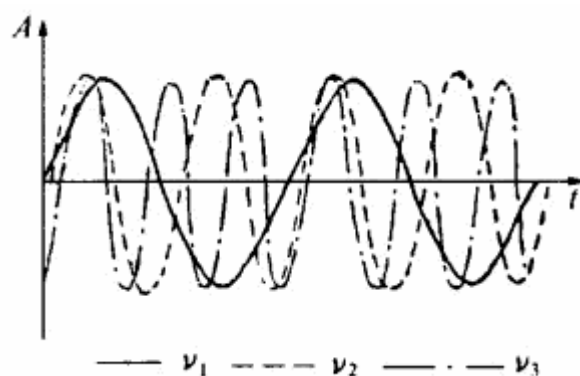


图 6.27 初相位不相等的三个光波波形

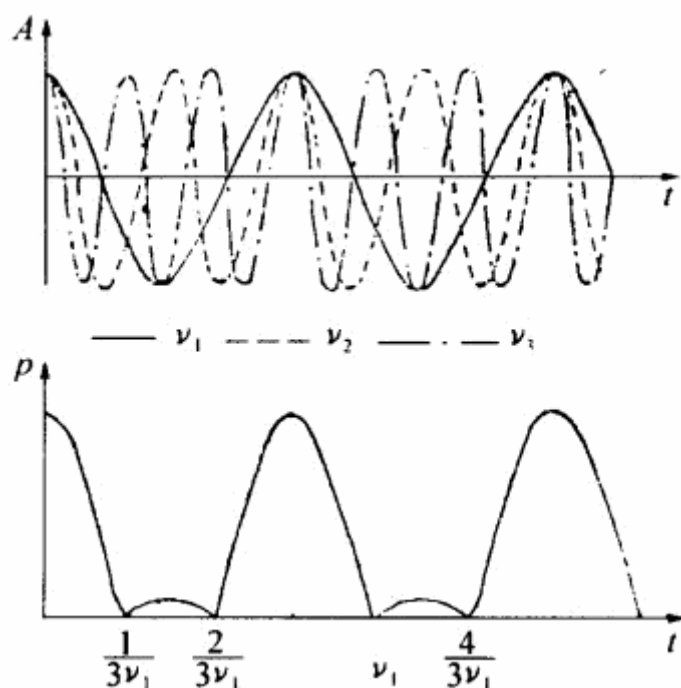


图 6.28 初相位相等的三个光波波形及叠加后产生的周期型脉冲波形
脉冲周期为

$$T = \frac{2\pi}{\Omega} = \frac{2L}{c} \quad (6.5)$$

相位锁定后输出脉冲功率为

$$I(t) \propto A^2(t) = \frac{E_0^2 \sin^2 \left[\frac{1}{2} (2q+1) (\Omega t + \beta) \right]}{\sin^2 \frac{1}{2} (\Omega t + \beta)} \quad (6.6)$$

$\Omega t + \beta = 2m\pi (m = 0, 1, 2, \dots)$ 时, 可得输出脉冲的峰值功率为

$$I_{\max} = (2q+1)^2 E_0^2 \quad (6.7)$$

最窄脉冲半宽度（半值功率点间的时间间隔）为

$$\Delta t_{\min} = \frac{2L}{c} \frac{1}{2q+1} = \frac{1}{\Delta \nu_F} \quad (6.8)$$

2. 振幅调制锁模

增益曲线中心附近的纵模光场为

$$E(t) = E_0 \cos(2\pi\nu_c t) \quad (6.9)$$

经频率为 $\nu = c/(2L)$ 的振幅调制器调制后光场变为

$$\begin{aligned} E(t) &= E_0 [1 + m \cos(2\pi\nu t)] \cos(2\pi\nu_c t) \\ &= E_0 \cos(2\pi\nu_c t) + \frac{mE_0}{2} \cos[2\pi(\nu_c - \nu)t] + \frac{mE_0}{2} \cos[2\pi(\nu_c + \nu)t] \end{aligned} \quad (6.10)$$

纵模振荡中新产生的两个频率边带为

$$\nu_{c-} = \nu_c - \nu = \nu_c - \frac{c}{2L} \quad (6.11a)$$

$$\nu_{c+} = \nu_c + \nu = \nu_c + \frac{c}{2L} \quad (6.11b)$$

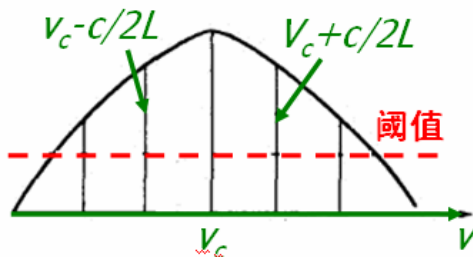


图 6.29 相邻的纵模振荡

§ 6-3 半导体激光器 (LD)

泵浦方式：电流注入

特点：体积小、寿命长、输出功率大、效率高

应用：光纤通信、光存储、光陀螺、激光打印和测距、激光雷达

一、半导体受激辐射原理

1. 半导体能带知识

晶体的能带

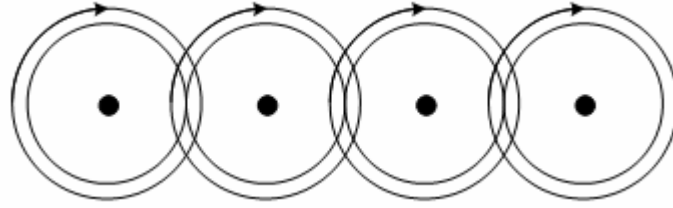


图 6.30 晶体中电子共有化运动

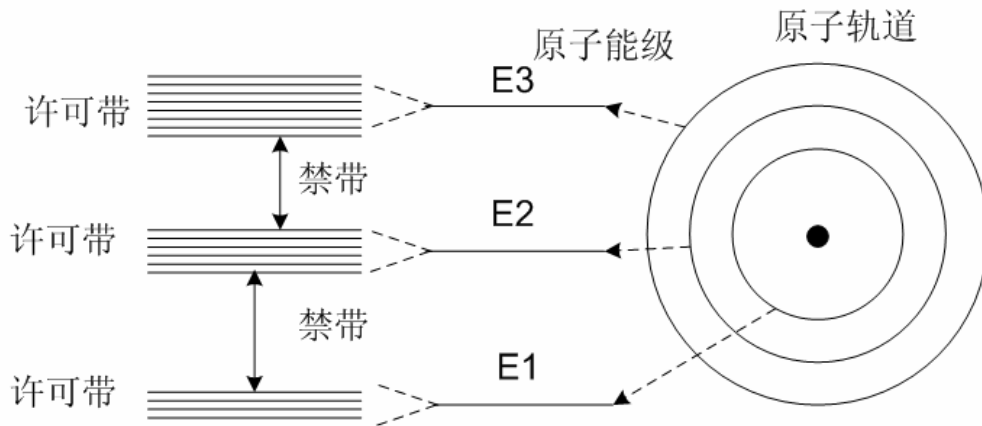


图 6.31 原子能级和晶体能带

在半导体中，由于邻近原子的作用，电子所处的能态扩展成能级连续分布的能带。能量低的能带称为价带，能量高的能带称为导带，导带底的能量 E_c 和价带顶的能量 E_v 之间的能量差 $E_c - E_v = E_g$ 称为禁带宽度或带隙。电子不可能占据禁带。

在半导体材料中，根据费米-狄拉克统计，对于由大量电子所组成的独立体系，每个能量为 E 的单电子态，被电子占据的概率 $f(E)$ 服从费米分布函数：

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1} \quad (6.12)$$

E_f ：费米能级。

注：费米能级不是一个可以被电子占据的实际的能级，它是反映电子在各能级中分布情况的参量，具有能级的量纲。对于具体的电子体系来说，在一定温度下，只要把费米能级确定后，电子在各量子态中的分布情况就完全确定了。费米能级的位置由系统的总电子数、系统能级的具体情况及温度等决定。

本征半导体：在较低温度下费米能级位于禁带的中心，价带中所有的状态都由电

子填充，而导带中所有状态都由空穴占据；

重掺杂 P 型半导体：由于受主杂质的掺入，费米能级的位置要比本征半导体低，进入价带；

重掺杂 N 型半导体：费米能级的位置要比本征半导体高，进入导带。

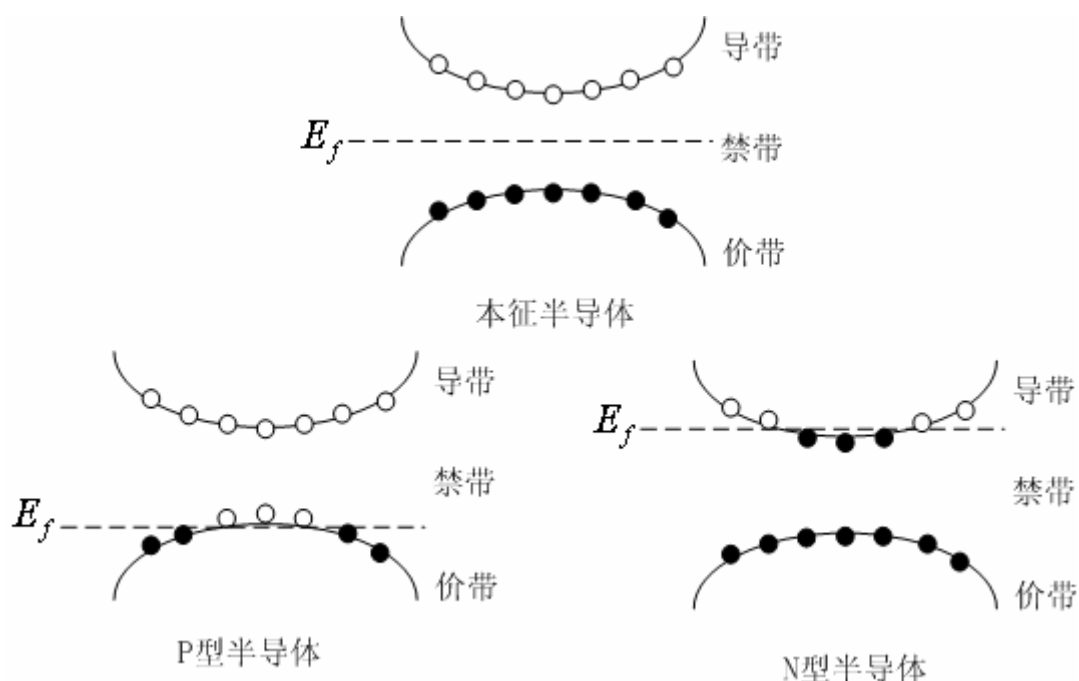


图 6.32 半导体中电子的统计分布

PN 结：当 P 型和 N 型半导体放置在一起形成 PN 结时，由于一个热平衡系统只能有一个费米能级，这就要求原来在 P 区和 N 区高低不同的费米能级达到相同的水平。如果 N 区的能级位置保持不变，那么 P 区的能级应该相应提高，从而使 PN 结的能带发生弯曲。能带图是用来描述电子能量的，PN 结能带的弯曲正反映了空间电荷区的存在。

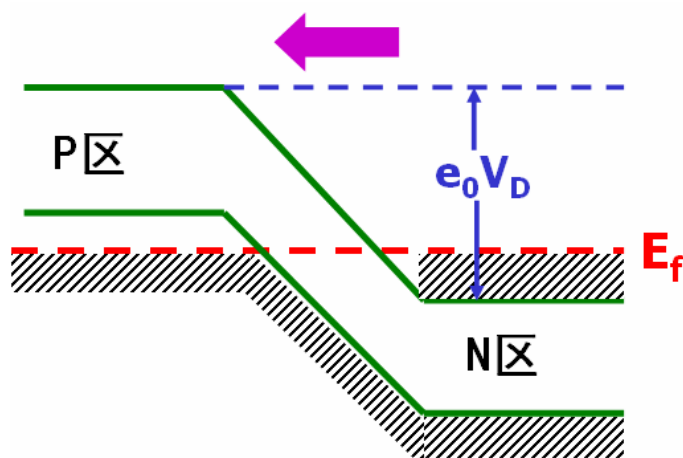


图 6.33 达到热平衡时 PN 结的能带

增益区的产生：在 PN 结上施加正向电压，产生与内部电场相反方向的外加电场，结果能带倾斜减小，扩散增强。电子运动方向与电场方向相反，便使 N 区的电子向 P 区运动，P 区的空穴向 N 区运动，最后在 PN 结形成一个特殊的增益区。

增益区的导带主要是电子，价带主要是空穴，结果获得粒子数反转分布。

在电子和空穴扩散过程中，导带的电子可以跃迁到价带和空穴复合，产生自发辐射光。

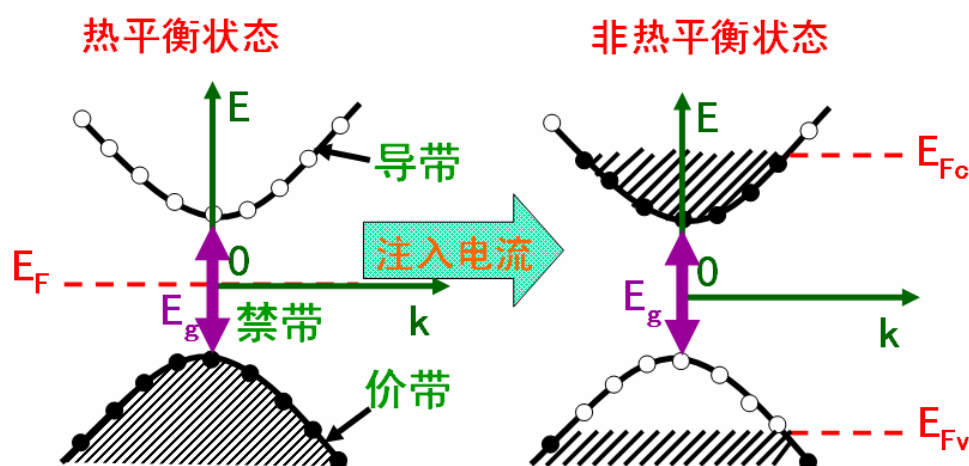


图 6.34 直接带隙半导体的能带结构及电子占据能带的情况

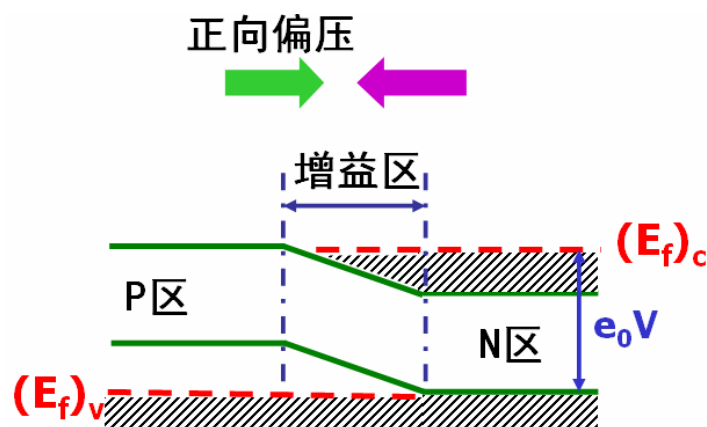


图 6.35 正向偏压下 P - N 结能带图

2. 半导体受激发射原理

(1) 粒子数反转分布

反转分布所需条件：导带能级上的电子占据几率应大于由辐射跃迁相联系的价带能级上被电子占据的几率。

$$f_c(E) > f_v(E - h\nu) \quad (6.13)$$

或表述为：非平衡的电子和空穴的准费米能级之差要大于禁带宽度，即要求有一个大的正向偏压。

$$(E_F)_N - (E_F)_P = qV > E_g \quad (6.14)$$

(2) 阈值条件

阈值电流密度为

$$J_t^m = \frac{1}{\beta} (\alpha_i - \frac{1}{2L} \ln r_1 r_2) \quad (6.15)$$

同质结：m=1；异质结：m>1。

二、结型激光器特性

主要结构：PN 结

解理面：PN 结的两个端面，相当于两个平行平面反射镜。

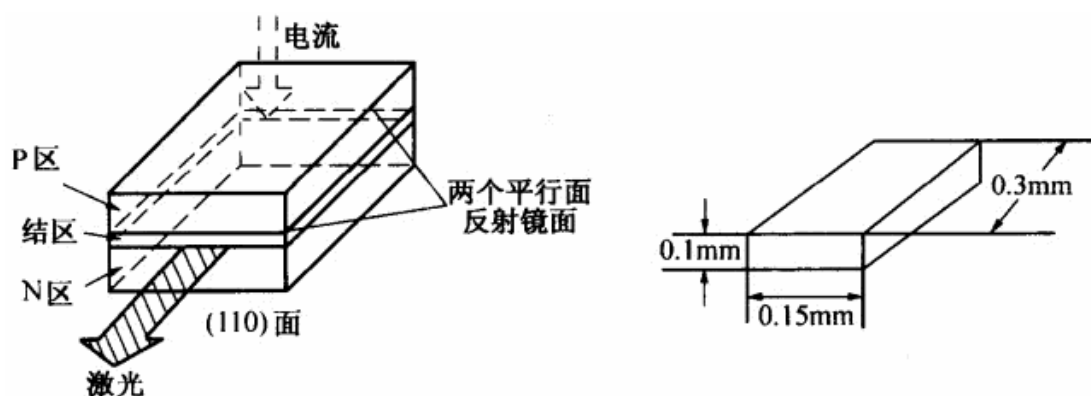


图 6.36 结型激光器结构示意图

1. 阈值特性

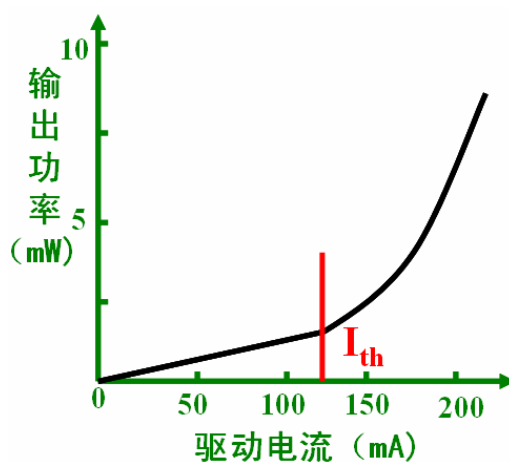


图 6.37 半导体激光器的输出特性

➤ $I < I_{th}$ ，自发辐射，发出的是非相干光

➤ $I > I_{th}$, 受激辐射, 发出的是相干光

影响阈值电流密度数值因素: 腔长、增益因子、损耗系数、谐振腔反射率、温度。

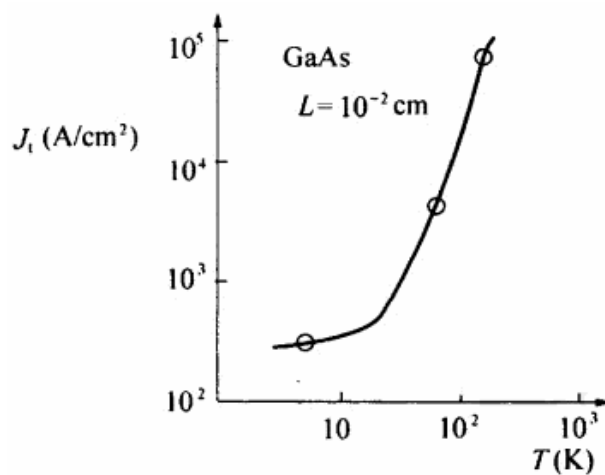


图 6.38 GaAs 激光器阈值电流密度与温度关系曲线图

2. 光谱性质

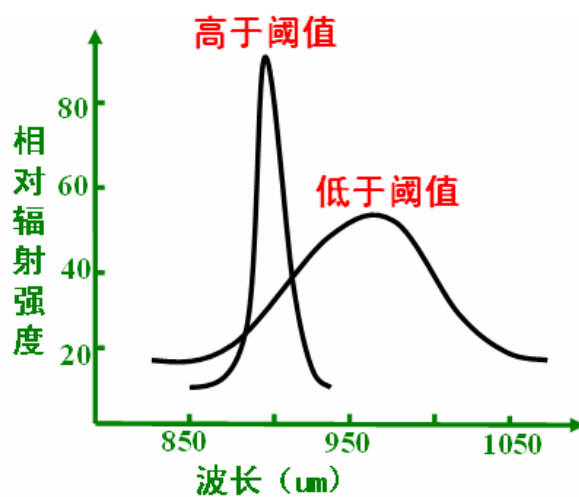


图 6.39 半导体激光器的光谱特性

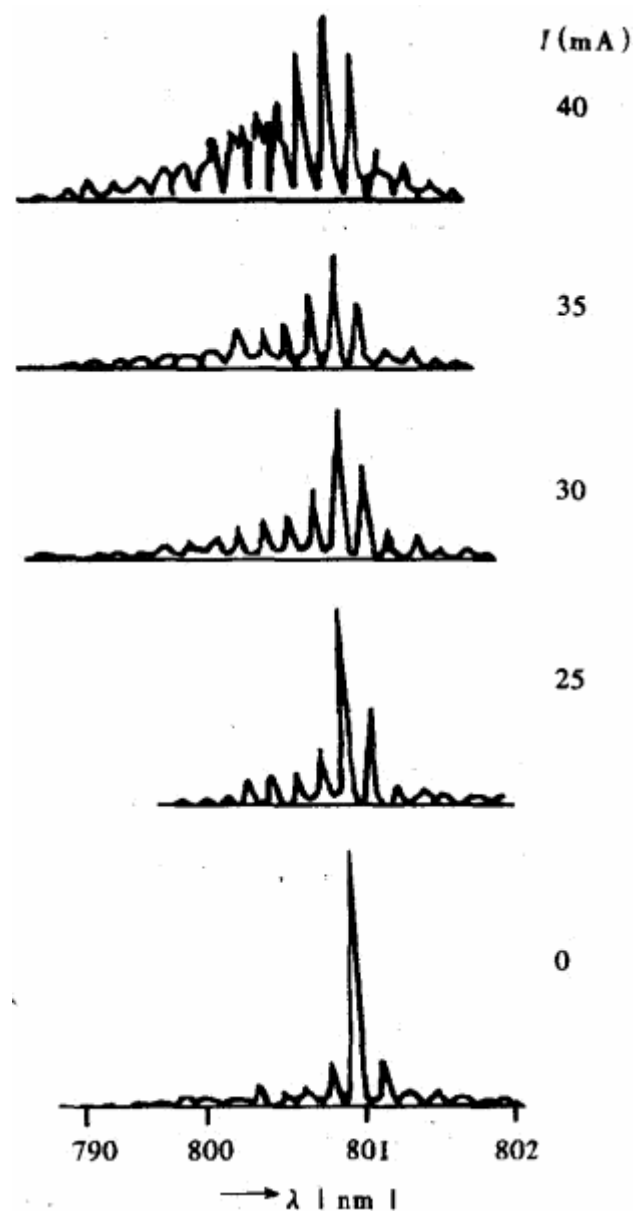


图 6.40 GaAlAs 激光器光谱随调制电流的变化

3. 光强分布

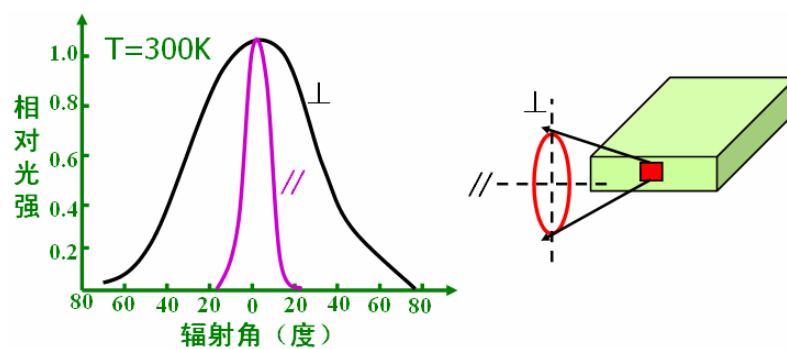


图 6.41 典型半导体激光器的远场辐射特性

(a) 光强的角分布； (b) 辐射光束

常用近场图样和远场图样表示激光器横向光场的分布。

近场图样：激光器输出镜面上光强的分布图样，由激光器的横模决定。

远场图样：离反射镜面一定距离处的光强分布，不仅由横模有关，还与光束的发散角有关。

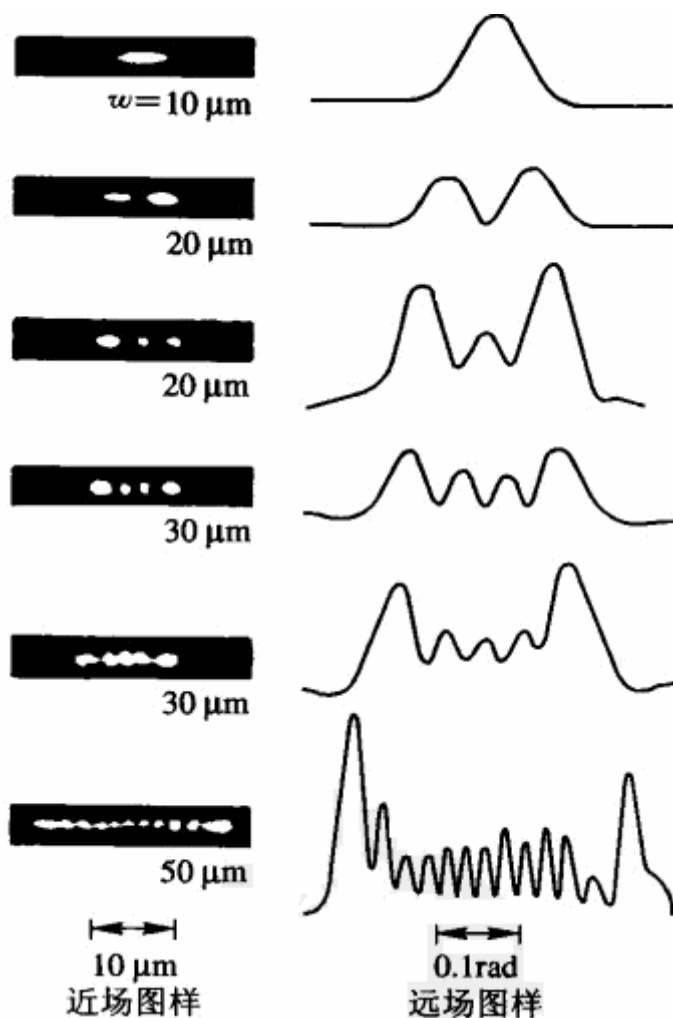


图 6.42 GaAlAs-DH 条形激光器的近场和远场图样

4. 温度特性

半导体结区的温度随工作时间的增加会不断升高，最终导致激光器阈值电流增加、半导体材料的禁带带宽变窄，并且发射的峰值波长会向长波长方向漂移。

解决方法：利用温度控制电路保持激光器 PN 结内部温度保持不变

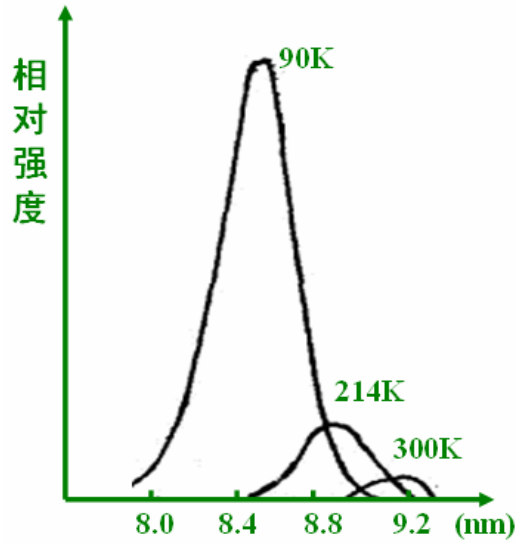


图 6.43 GaAs 激光器不同温度条件下激光光谱图

5. 输出功率与转换效率

内量子效率:

$$\eta_i = \frac{\text{有源区内每秒发射的光子数}}{\text{有源区内每秒注入的电子—空穴对数}} \quad (6.16)$$

外量子效率:

$$\eta_{ex} = \frac{\text{激光器每秒发射的光子数}}{\text{有源区内每秒注入的电子—空穴对数}} = \frac{P_0/h\nu}{I/e} \quad (6.17)$$

外微分量子效率: 对应阈值以上的线性范围的斜率, 与工作电流无关, 仅是温度的函数。

$$\eta_d = \frac{P_0/h\nu}{(I - I_t)/e} = \frac{P_0}{(I - I_t)V} \quad (6.18)$$

三、异质结激光器

同质结点缺点: 阈值高, 损耗大, 不能连续工作。

异质结: 由两种不同材料构成的 PN 结, 即在 PN 结的一边或两边增加了载流子浓度较大的外延层。

异质结的优点:

- (1) 载流子浓度大的材料层能够形成势垒, 限制载流子的扩散, 提高了有源区载流子浓度, 进而使有源区增益变大。
- (2) 外延层折射率较结区低, 形成高反层, 降低了周围材料对光辐射的吸收和衍

射。

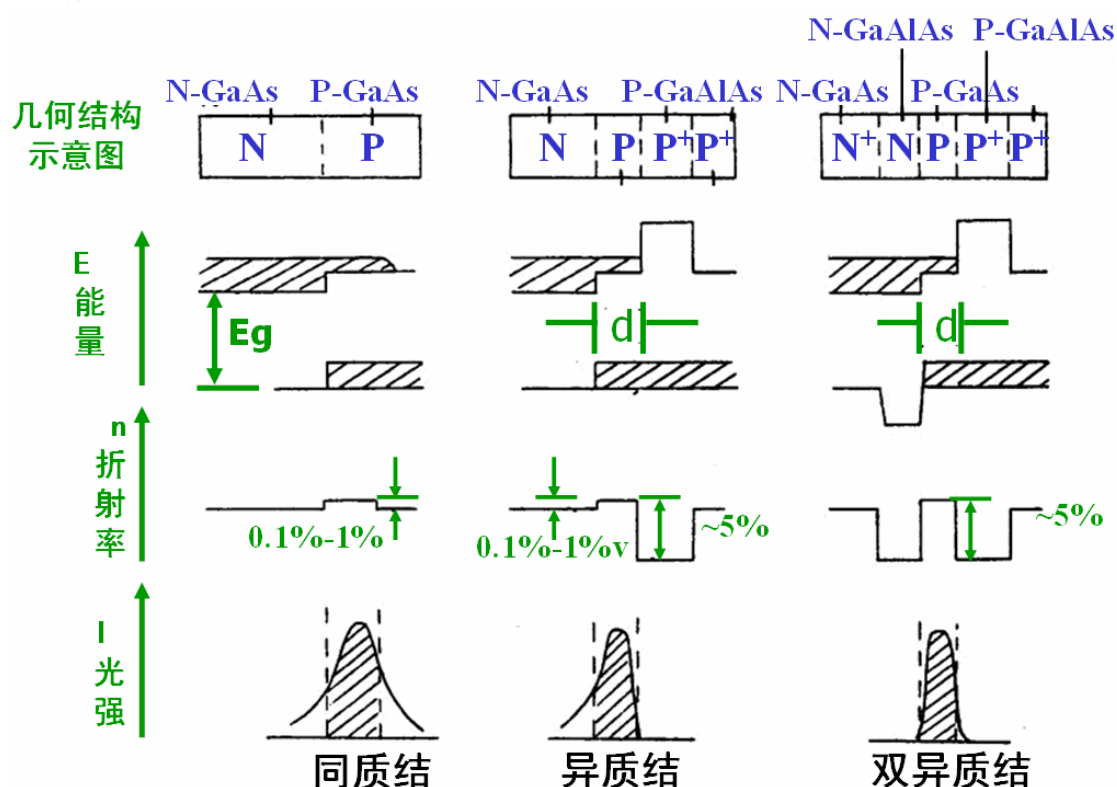


图 6.44 同质结、异质结激光器能带示意图

四、几种半导体激光器

1. 分布式反馈半导体激光器 (DFB-LD)

结构特点：激光振荡由周期性变化的波纹结构（波纹光栅）提供，能实现稳定的单纵模振荡。

结构分类：

- (1) 分布反馈激光器 (DFB)：波纹光栅在有源区一侧的限制层上刻制
- (2) 分布布喇格反射激光器 (DBR)：波纹光栅在有源区外面，避免了光栅制作过程中造成的晶格损伤。

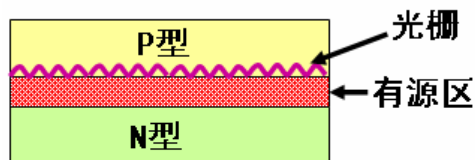


图 6.45 DFB 结构

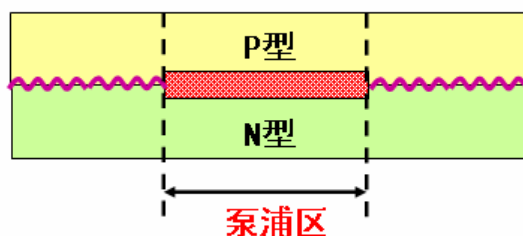


图 6.46 DBR 结构

布喇格衍射原理：

I', I'' 满足同相相位相加的条件

$$\Lambda + B = m\lambda/\eta \quad (m \text{ 为整数}) \quad (6.19)$$

即 $\eta\Lambda(1 + \sin \theta) = m\lambda \quad (6.20)$

对激光器需满足 $\theta = \pi/2$ ，由上式可得布喇格衍射条件为

$$2\eta\Lambda = m\lambda \quad (6.21)$$

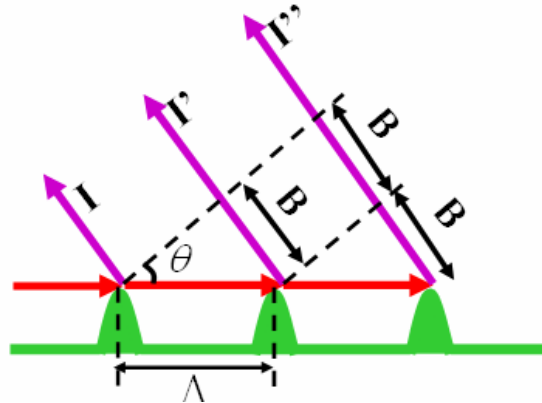


图 6.47 布喇格衍射原理图

2. 量子阱激光器 (QW-LD)

将普通的双异质结激光器有源层厚度做成数十纳米以下，载流子的活动从三维变为二维。在垂直于有源层的方向，载流子动量可用量子化能量表示。该超薄人造周期性结构称为超晶格结构，即量子阱。从结构上看，量子阱是将窄带隙的有源区夹在宽带隙的半导体材料之间形成的一种层状结构，有单量子阱和多量子阱两种结构。

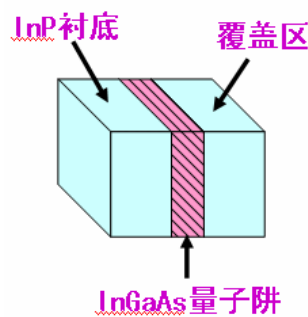


图 6.48 单量子阱结构

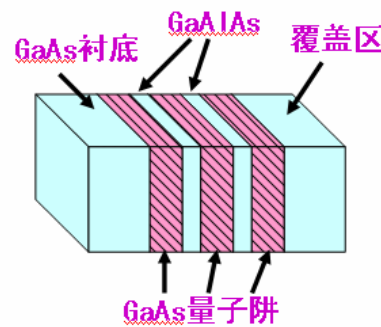


图 6.49 多量子阱结构

量子阱效应：窄势阱的量子效应，使载流子拉开并使有源区的异质结出现导带和价带的突变。

产生条件：有源区厚度小于电子的德布罗意波长。

量子阱作用：低能带隙的有源区为电子和空穴创造了势阱，将载流子限制在很薄

的区域，提高有源区粒子数反转浓度。

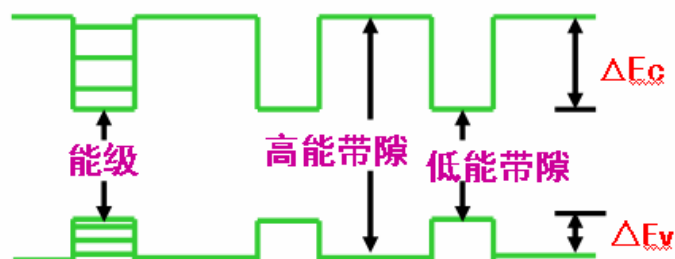


图 6.50 量子阱激光器能带示意图

§ 6-4 发光二极管 (LED)

一 概况

发光二极管 LED (Light Emitting Diode): 在半导体材料制作的 PN 结或类似结构中施加正向电流, 从而发射可见光或红外光。

制作材料: GaAs (砷化镓)、GaP (磷化镓)、GaAsP (磷砷化镓)。

基本结构: 双异质的 PN 结, 但无谐振腔。

发光原理: PN 结引入正向偏压, 电子与空穴复合发光

LED 与半导体激光器 (LD) 的**根本区别**: LED 没有谐振腔, 发光是基于自发辐射过程, 发出的光为荧光, 是非相干光源; LD 的发光是基于受激辐射过程, 发出的是激光, 属相干光源。

分类: 表面发光二极管 (SLED)、侧面发光二极管 (ELED)、平面 LED、圆顶 LED、超发光 LED。

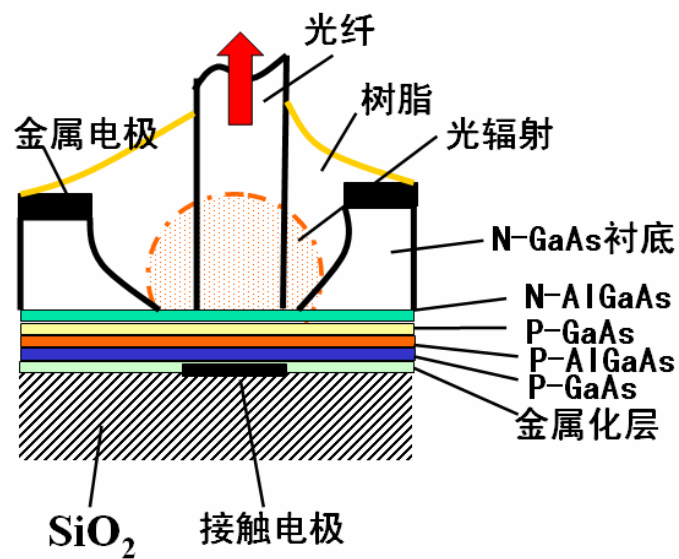


图 6.51 表面发光 LED 结构图

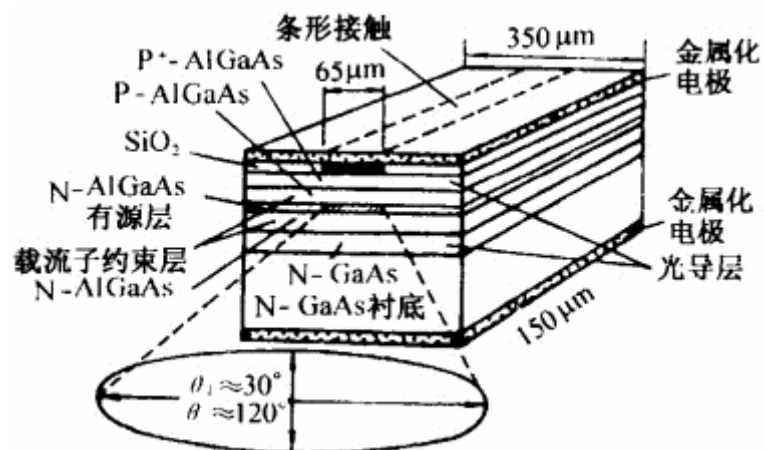


图 6.52 侧面发光 LED 结构图

二 发光跃迁原理

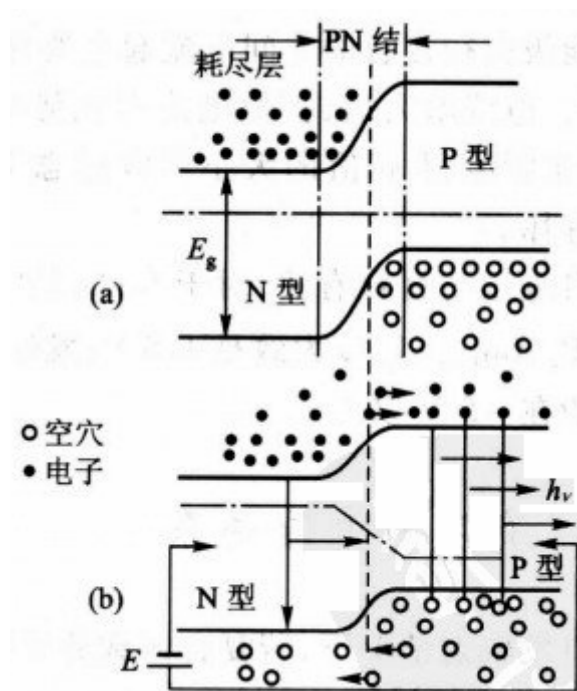


图 6.53 PN 结注入电致发光原理

PN 结施加正向电压，使势垒高度降低，耗尽层减薄。在正向电压作用下，电子由 N 区注入 P 区，空穴由 P 区注入 N 区。进入对方区域的少数载流子（少子）一部分与多数载流子（多子）复合。

辐射复合：电子与空穴复合释放的能量以光的形式辐射出来。

非辐射复合：复合后释放的能量转变为热能、机械振动能形式释放。

1. 辐射复合

- (1) 导带与价带之间的跃迁：电子从导带跃迁到价带中，与价带的空穴复合。
- (2) 浅施主能级到价带之间：俘获在施主能级上的电子与价带空穴复合发光。
- (3) 导带到浅受主能级之间的跃迁：导带电子同俘获在受主能级上的空穴复合。
- (4) 一般施主能级与受主能级之间的跃迁：施主俘获的电子与受主俘获的空穴复合发光。
- (5) 深能级之间的跃迁：处于禁带中部附近的深中心能级与导带或价带之间的跃迁。

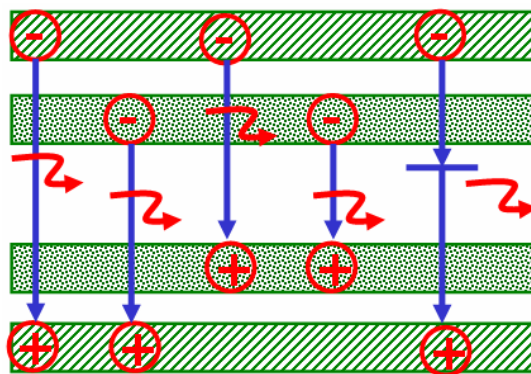


图 6.54 多种辐射复合过程

2. 非辐射复合

- (1) 单声子复合：电子与空穴复合时，多余能量赋予第三个载流子（电子或空穴），使其跃迁到同一能带中更高的能态上，当该载流子重新回到低能态时，先前获得的能量以热形式造成晶格振动。
- (2) 多声子复合：电子与空穴复合时，多余能量以多个声子发出的形式激发晶格振动，导致晶体升温。
- (3) 表面复合：注入载流子在禁带中由于晶体表面杂质或缺陷造成的一系列能级位置产生复合。

三 LED 的特性参数

1. 输出特性

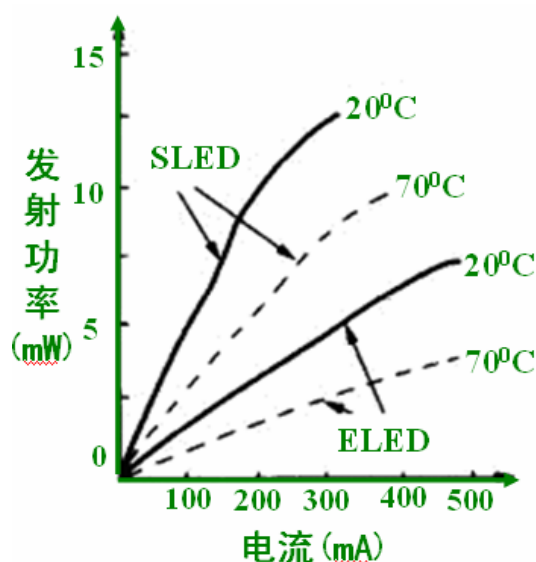


图 6.55 LED 的 P-I 特性曲线

LED 的工作电流：一般在十到数十毫安

发射功率：是几百微瓦到毫瓦量级。

P—I 特性曲线的线性区很宽，**无阈值电流**。在电流较大时，PN 结发热，发光效率较低，出现饱和现象。

2. 光谱特性

发射光波长：光的峰值波长 λ 与发光区域的半导体材料禁带宽度 E_g 相关，即

$$\lambda(\mu m) \approx 1.24/E_g(eV) \quad (6.22)$$

谱线宽度 $\Delta\lambda$ ：几十到上百微米。

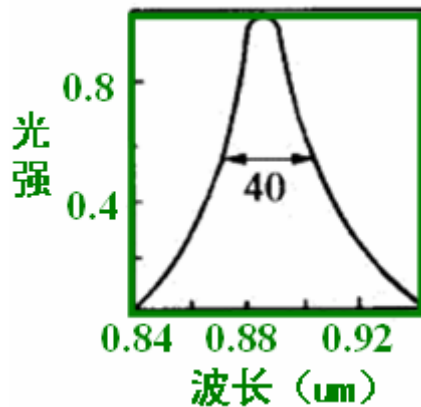


图 6.56 LED 的辐射谱线 (0.85μm 的 GaAlAs/GaAs 器件)

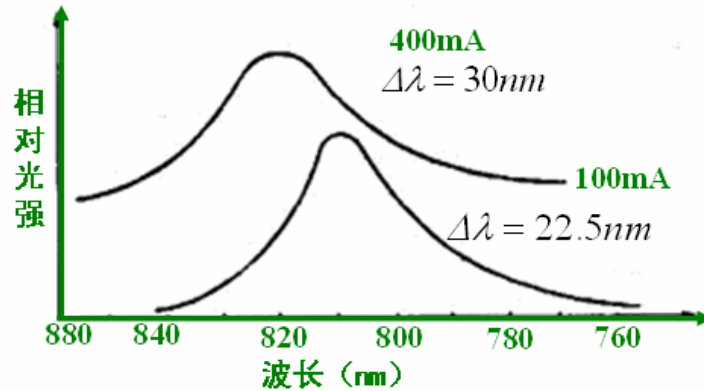


图 6.57 输出谱线宽度及峰值波长随温度的变化曲线

3. 调制特性

调制带宽：

$$\omega = \frac{1}{\tau} \quad (6.23)$$

归一化调制响应度

$$R(\omega) = \frac{P(\omega)}{P(0)} \quad (6.24)$$

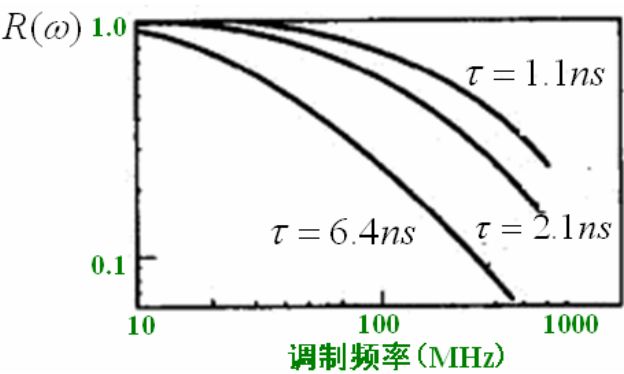


图 6.58 LED 的调制响应

表 6-2 半导体激光器（LD）和发光二极管（LED）的性能比较

	LD		LED	
工作波长 $\lambda/\mu m$	1.3	1.55	1.3	1.55
光谱宽度 $\Delta\lambda/nm$	1~2	1~3	50~100	60~120
阈值电流 I_{th}/mA	20~30	30~60		
工作电流 I/mA			100~150	100~150
输出功率 P/mW	5~10	5~10	1~5	1~3
调制带宽 B/MHz	500~2000	500~1000	50~150	30~100
辐射角 $\theta/(^{\circ})$	20×50	20×50	30×120	30×120
寿命 t/h	$10^6\sim 10^7$	$10^5\sim 10^6$	10^8	10^7
工作温度/ $^{\circ}C$	-20~50	-20~50	-20~50	-20~50

§ 6-5 电子束显示器件

一 黑白显像管

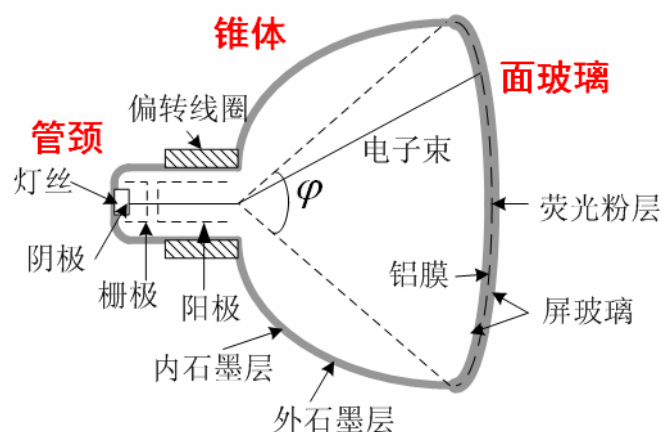


图 6.59 黑白显像管结构示意图

1. 电子枪

(1) 双电位电子枪

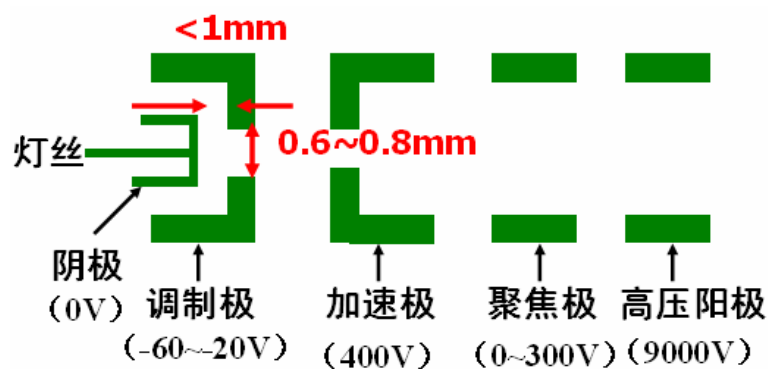


图 6.60 双电位电子枪

灯丝加热，阴极向外发射电子。当加速极电压 U_{G_2} 电压恒定时，改变第一控制栅极电压（或阳极电压）即可改变阴极表面电位，从而控制电子束流的大小：当调制电压为截止电压时，阴极电子因负电位全部返回阴极；当合成场强为正时，大量阴极电子发射并被加速。

(2) 单电位电子枪（自聚焦电子枪）

特点：在加速极 G_2 和聚焦极 G_4 之间增加了高压阳极 G_3

高压阳极 G_3 的作用：增强了预聚焦能力；提高了聚焦特性的稳定性。

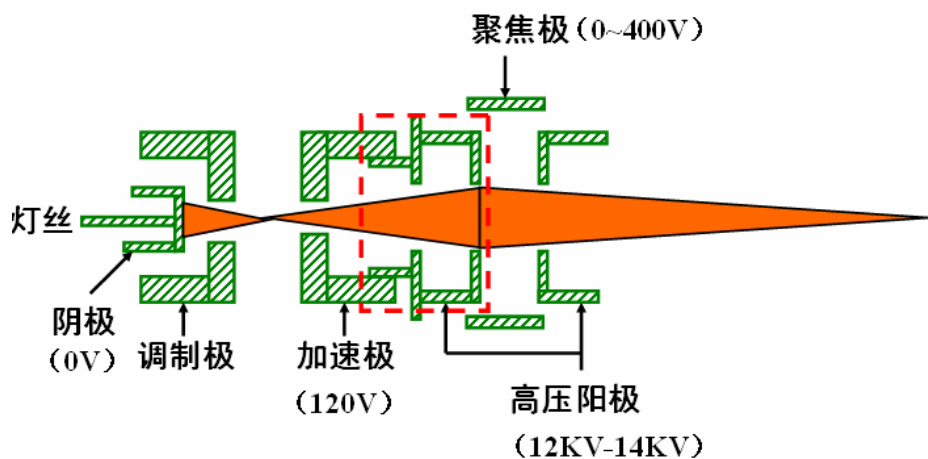


图 6.61 单电位电子枪

(3) 对电子枪的要求

- ① 电子束斑大小符合扫描线宽的要求；
- ② 束流足够强。(束流: $50\mu A \sim 200\mu A$ ；屏幕电压: $10kV \sim 20kV$)
- ③ 调制特性陡。

2. 偏转系统

单向匀速直线扫描：每帧 625 行，每秒 25 帧；隔行扫描，每秒 50 场。

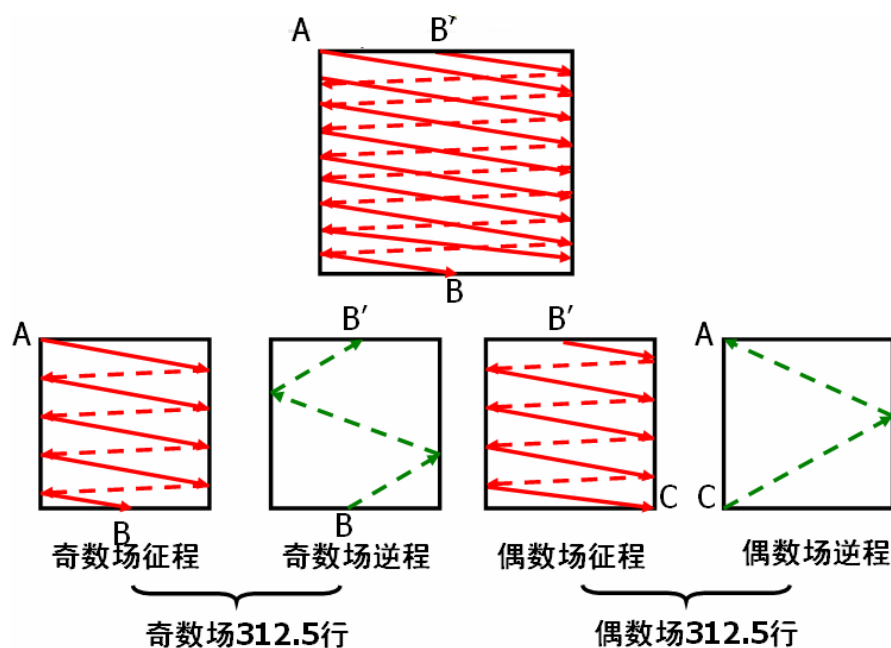


图 6.62 扫描光栅

3. 荧光屏

烟灰玻璃：具有中性吸光性能，可减小环境光的影响，提高图像对比度。

荧光粉：光电转换功能，黑白显像管要求在电子轰击下荧光粉发白光。

余辉时间：亮度减少到 1/10 时所用的时间。

余辉时间长于 0.1s 的叫长余辉荧光粉；

介于 0.1~0.001s 的称为中余辉荧光粉（电视机）；

短于 0.001s 的称为短余辉荧光粉（示波器）。

铝膜：荧光粉发向管内的光线反射到观察者一侧，提高亮度；

防止负电荷积累导致的屏面电位下降，限制亮度的提高；

阻挡负离子对荧光层的轰击，防止离子斑。

二 彩色显像管

1. 彩色合成原理

（1）三基色的确定

复色光中存在三种最基本的色光，分别是红（700nm）、绿（546.1nm）、蓝（435.8nm）。三基色的本质是三基色具有独立性，三基色中任何一色不能用其余两种颜色合成。这三种颜色以不同的比例混合，几乎可以得到自然界中的一切色光。

（2）相加混色原理

由两种或两种以上的色光相混合时，同时或者在极短的时间内连续刺激人的视觉感官，使人产生一种新的色彩感觉，称这种色光混合为加色混合。这种由两种以上的色光相混合，呈现另一种色光的方法称为色光加法。

国际照明委员会进行的实验证明：当红、绿、蓝三基色的亮度比例为 1：4.5907：0.0601 时就能匹配出白光。

2. 彩色 CRT

彩色显像管能产生三束电子流，它们可以是来自一个电子枪，也可以来自三个电子枪。彩色显像管的荧光屏上密集而规则排列着红、绿、蓝三种荧光粉圆点或条，在相应的电子束轰击下发出基色光。

彩色显像管采用红绿蓝三基色相加混色原理实现彩色图像的显示。确保受三个基色信号控制的三束电子束能准确轰击相应的荧光粉，是彩色显像管的**技术关键**，并因此设计了不同的彩色显像管。

（1）三枪三束彩色显像管

结构特点：①三个电子枪成品字形排列；②采用打有小孔的荫罩钢板，小孔与荧光屏像素相对应；③荧光屏三基色荧光粉点成品字形排列。

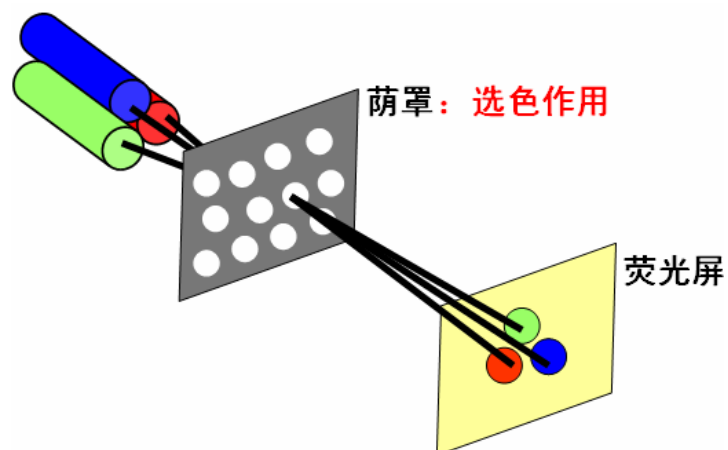


图 6.63 三枪三束彩色显像管结构

荫罩：**选色作用**。由红、绿、蓝三个电子枪发射的三个电子束在荫罩上的小孔处会聚，通过小孔后打在相应的红、绿、蓝荧光粉点上。

黑底技术：将荫罩板上的小孔加大使通过小孔后的电子束直径比荧光粉点大，这样就提高了输出亮度；屏面上除荧光粉点以外的部分涂上石墨，这样又提高了对比度。一般全黑底管荧光屏的 50% 为黑底，50% 为荧光粉点

(2) 单枪三束彩色显像管

结构特点：①三条电子束成水平一字排列，共用一个电子枪；②三基色荧光粉点成条状排列；③荫罩改为条状荫栅。

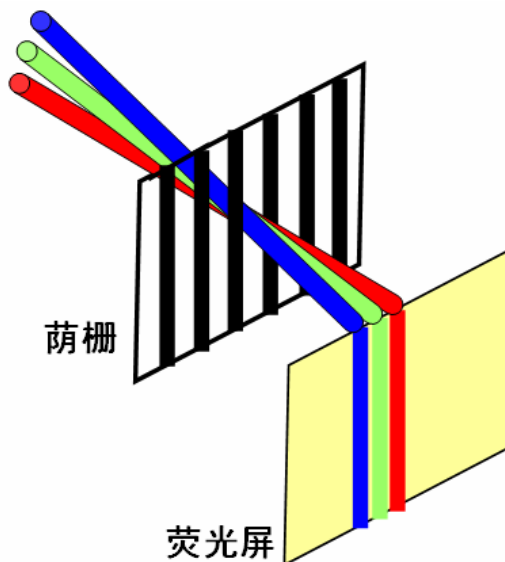
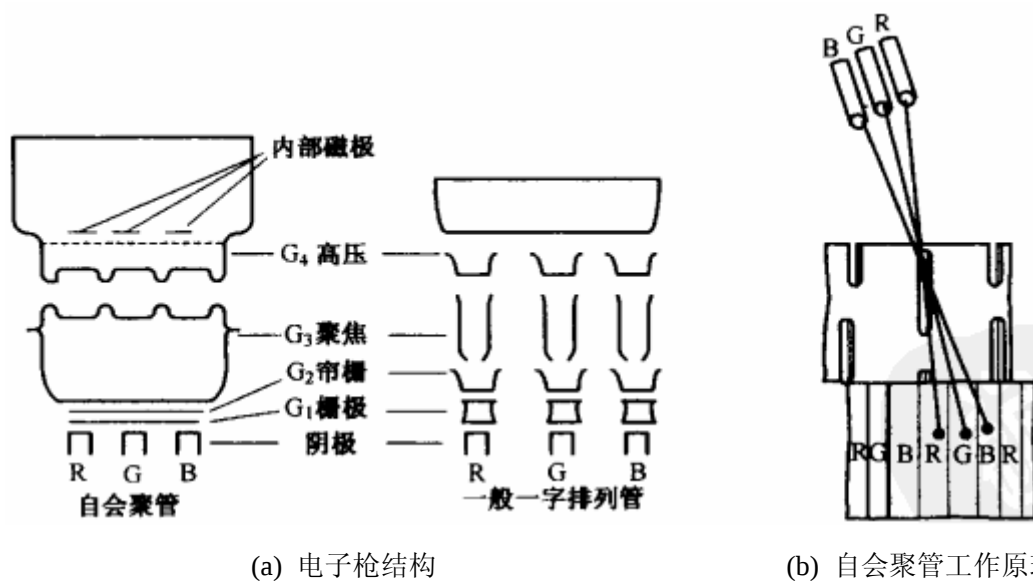


图 6.64 单枪三束彩色显像管结构

(3) 自会聚彩色显像管



(a) 电子枪结构

(b) 自会聚管工作原理

图 6.65 精密直列式电子枪与工作原理示意图

结构特点：① 三个电子枪水平一字排列；② 采用槽孔断续的开槽荫罩；③ 荧光屏仍采用条状结构；④ 采用环形磁偏转系统。

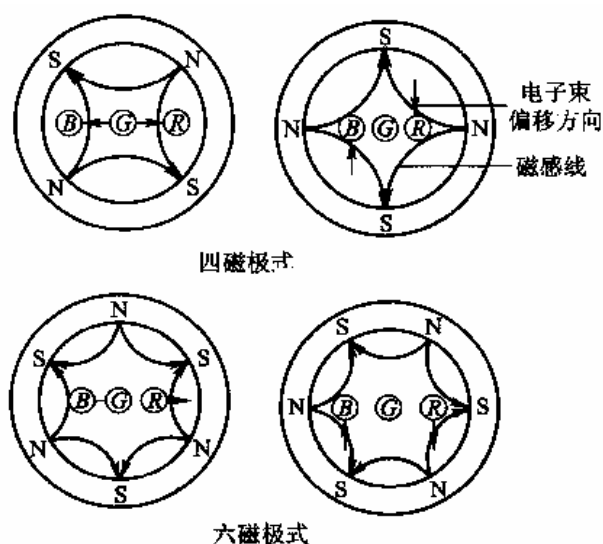
会聚：是指红绿蓝三种颜色在屏幕上的重合效果。

自会聚原理：利用三对环形永久磁铁实现。

二磁极式：使三条电子束一起沿同方向移动；

四磁极式：红、蓝两边束等量反向移动；

六磁极式：红、蓝两边束等量同方向移动。



四磁极式

六磁极式

图 6.66 静会聚磁环示意图

动态失会：三条电子束受到偏转场的偏转作用后，在离屏幕中心较远的区域内，会聚点位于荫罩之前，造成有动态会聚误差的失会聚状态。

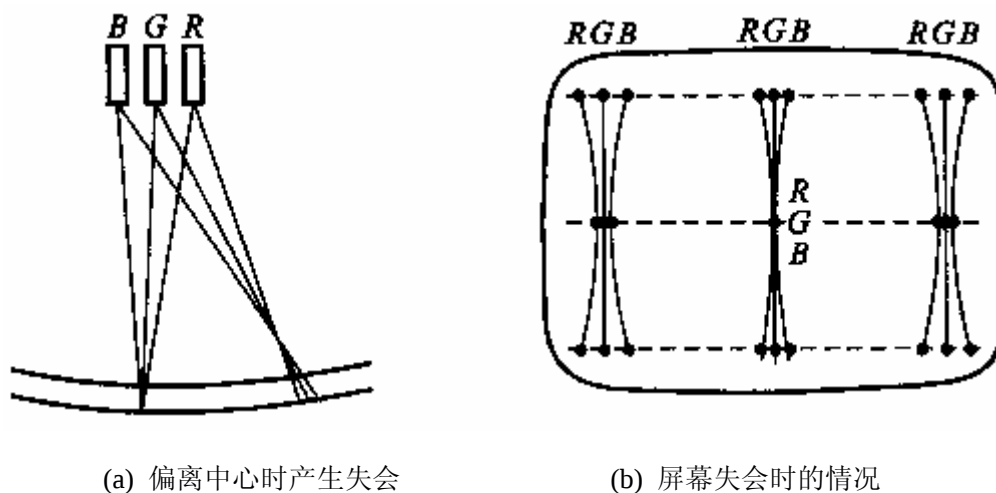


图 6.67 动态失会示意图

动态会聚校正原理：利用两组非均匀磁场实现。

桶形磁场：垂直向偏转；

枕形磁场：水平向偏转。

三色光栅重合原理：利用磁增强器和磁分路器实现。

磁增强器：使中心束光栅尺寸增加；

磁分路器：使红、蓝边束光栅尺寸减小。

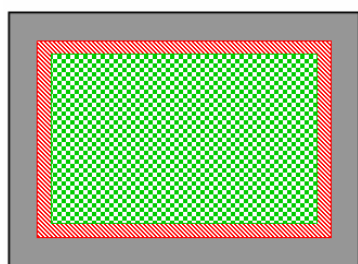


图 6.68 RGB 三电子束会聚图形

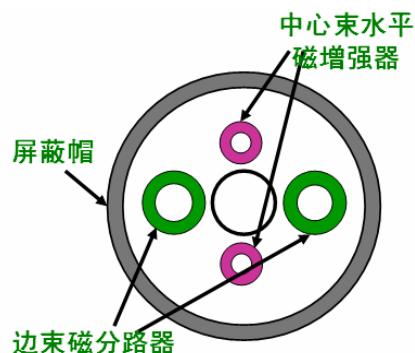


图 6.69 磁增强器与磁分路器作用

§ 6-6 液晶显示器件

一 液晶基本知识

1. 液晶定义

在机械上具有液体的流动性，在光学上具有晶体性质的物质形态被命名为流动晶体——液晶(Liquid Crystal)。

液晶分为两大类：溶致液晶和**热致液晶**

2. 液晶分类

按照热致液晶分子**排列状态**不同可分为:

- (1) 近晶相液晶（层状液晶）：分子按层状排列，长轴相互平行，其方向可以垂直于层面或与层面倾斜排列。
- (2) **向列相液晶**（丝状液晶）：由长径比很大的棒状分子组成，分子长轴相互平行，但无分层。
- (3) 胆甾相液晶（螺旋状液晶）：和近晶相一样具有层状结构，但层内分子排列则与向列型液晶相似，分子长轴在层内相互平行，而在垂直这个平面上每层分子都会旋转一个角度，整体呈螺旋结构。

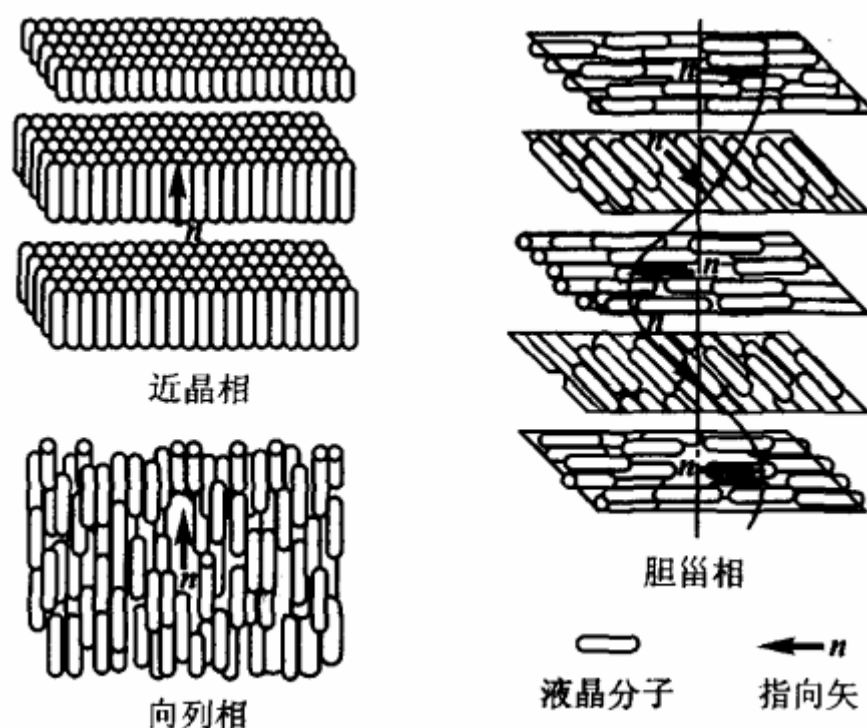


图 6.70 液晶分子排列的三种类型

3. 液晶的光电特性

- (1) 电场中液晶分子的取向

$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{//} - \varepsilon_{\perp} > 0$: P 型液晶，在外电场中液晶分子长轴方向平行于外电场方向。

$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{//} - \varepsilon_{\perp} < 0$: N 型液晶，在外电场中液晶分子长轴方向垂直于外电场方向。

- (2) 线偏振光在向列液晶中的传播

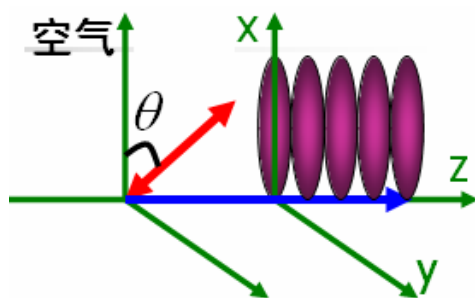


图 6.71 线偏振光在向列相液晶中的传播

入射光在 x, y 方向上电矢量强度:

$$E_x = E_o \cos \theta \cos(\omega t - k_{//} z) = a \cos(\omega t - k_{//} z) \quad (6.25a)$$

$$E_y = E_o \sin \theta \cos(\omega t - k_{\perp} z) = b \cos(\omega t - k_{\perp} z) \quad (6.25b)$$

两光场相位差:

$$\delta = \frac{\omega z}{c} (n_{//} - n_{\perp}) \quad (6.26)$$

合成光场失端方程:

$$\left(\frac{E_x}{a} \right)^2 + \left(\frac{E_y}{b} \right)^2 - 2E_x E_y \frac{\cos \delta}{ab} = \sin^2 \delta \quad (6.27)$$

结论:

① $\theta = 0$ 或 $\frac{\pi}{2}$: 偏振光的振动方向和状态不发生变化, 仍以线偏振光和原方向前进。

② $\theta = \frac{\pi}{4}$: 偏振方向改变, 偏振态相继为椭圆、圆和线偏振光。

(3) 线偏振光在扭曲向列相液晶中的传播

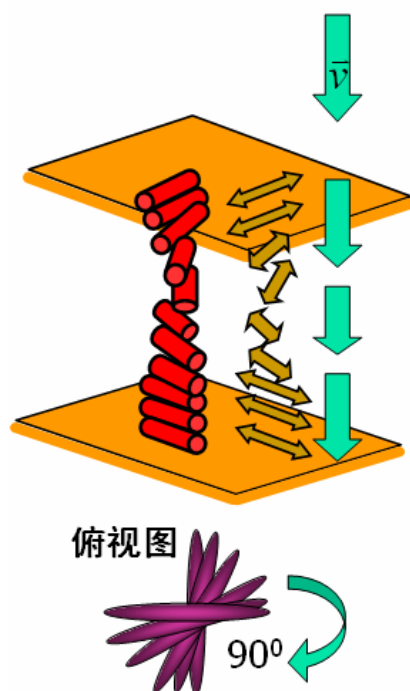


图 6.72 线偏振光在扭曲向列液晶中的传播

条件：线偏振光垂直入射，并沿液晶分子短轴方向传播。

结论：

- ① 若偏振方向和上层表面分子取向相同：线偏振光偏振方向随分子轴旋转，以平行于出口处分子轴的偏振方向输出。
- ② 若偏振方向和上层表面分子取向垂直：以垂直于出口处分子轴的偏振方向输出。
- ③ 其它方向线偏振光入射：根据平行分量和垂直分量的相位差值，以椭圆、圆或直线等偏振态输出。

二 扭曲向列型液晶显示（TN-LCD）（第二代，1971-1984）

1. 结构

组成部分：偏振片，玻璃，定向层（配向膜）。

特点：上、下表层分子空间呈 90° 扭曲分布。

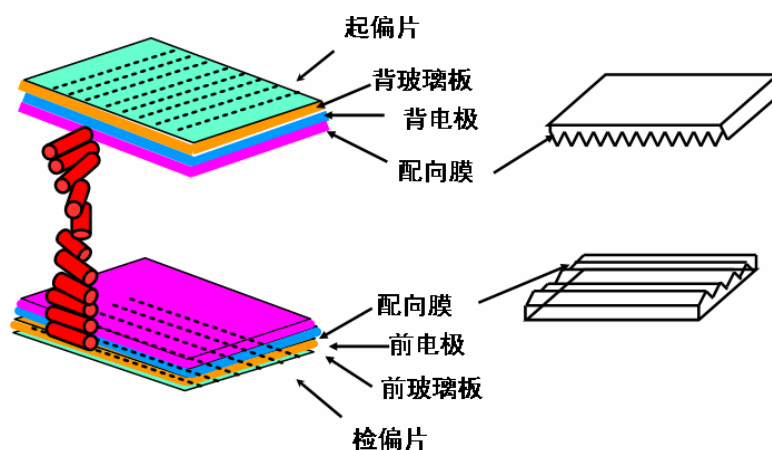


图 6.73 扭曲向列型液晶盒的基本结构

2. 工作原理

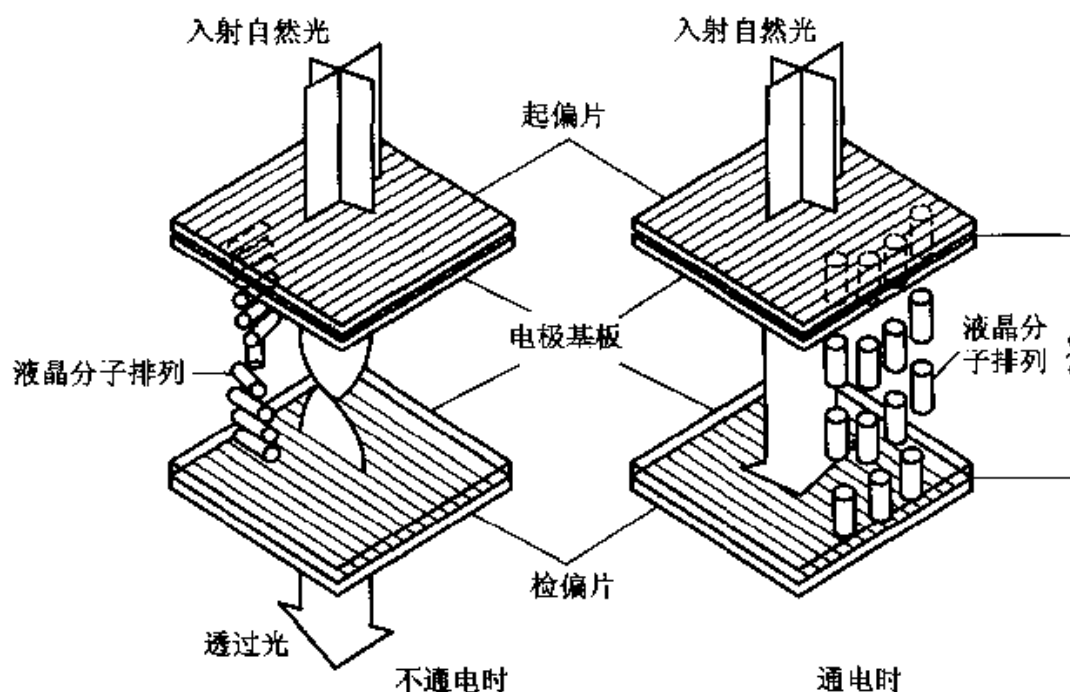


图 6.74 TN-LCD 工作原理图

无电场：入射线偏振光偏振面旋转 90° ，屏幕有光输出，呈亮态。（旋光特性）

有电场：入射线偏振光偏振面不发生旋转，屏幕无光输出，呈暗态。

旋光特性须满足条件： $d \cdot \Delta n \gg \lambda / 2$

3. TN-LCD 的电光特性

阈值电压 V_{th} ：透射率为器件最大透射率的 90%（常白型）或 10%（常黑型）时所对应的电压有效值。

饱和电压 V_{sat} ：透射率为器件最大透射率的 10%（常白型）或 90%（常黑型）时所对应的电压有效值。

陡度 γ : $\gamma = \frac{V_{sat}}{V_{th}}$

对比度：在恒定环境照明条件下，显示部分亮态与暗态的亮度之比。

瞬态响应特性：用延迟时间、上升时间和下降时间三个参数描述。

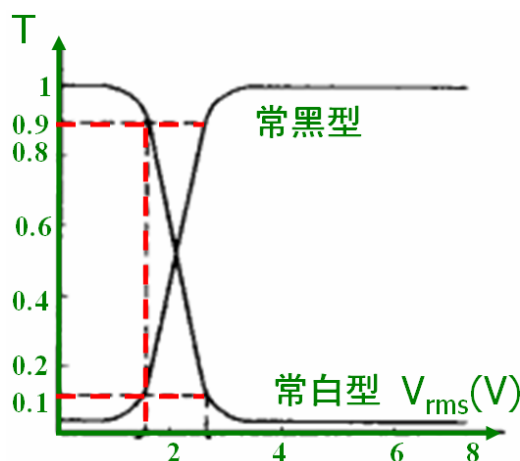


图 6.75 TN-LCD 的电光特性

4. TN-LCD 的驱动

静态驱动：在需要显示的时间里分别同时给所需显示的段电极加上驱动电压，直到不需要显示的时刻为止。仅适用于电极数量不多的段式显示。

矩阵寻址驱动：利用行、列电极实现。按时间顺序逐一给各行电极施加选通电压，选到某一行时各列电极同时施加相应于该行的信号电压。

矩阵的交叉效应：当只对一个像素施加电压，矩阵上的所有像素均会由于矩阵网格的交叉耦合而被分摊到一定数值的电压后被点亮。

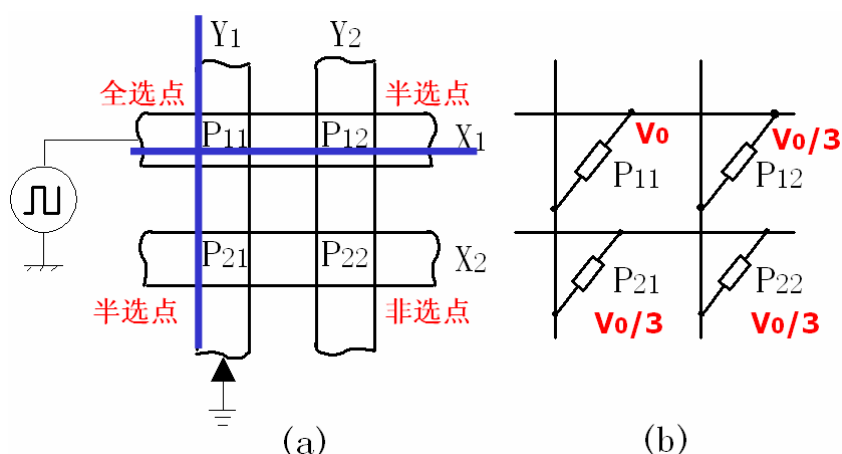


图 6.76 矩阵的交叉效应

三 超扭曲向列型液晶显示 (STN-LCD) (第三代, 1985-1990)

1. 结构

组成部分：和 TN-LCD 类似，增加了补偿膜用于有色背景的补偿。

特点：上、下表层分子空间呈 $180^\circ \sim 240^\circ$ 扭曲分布。

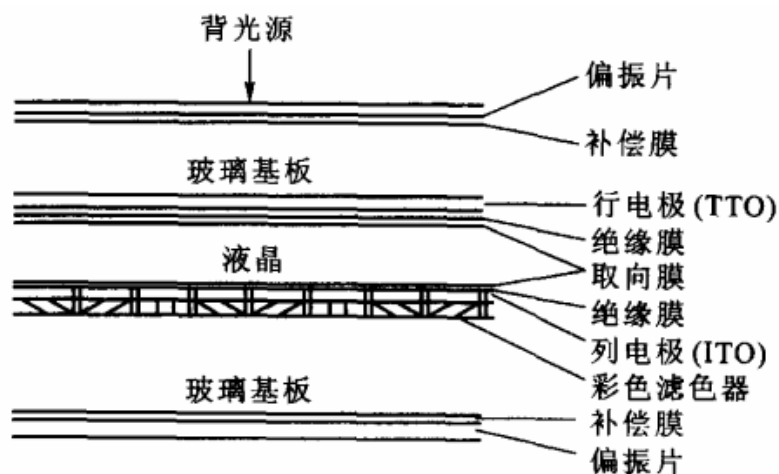


图 6.77 超扭曲向列型液晶盒的基本结构

2. STN-LCD 的原理

在 TN-LCD 结构的基础上通过加大上、下层液晶分子的扭曲角度以期获得更高的响应速度。将扭曲角在 $180^\circ \sim 240^\circ$ 范围内的显示器称为 STN-LCD。

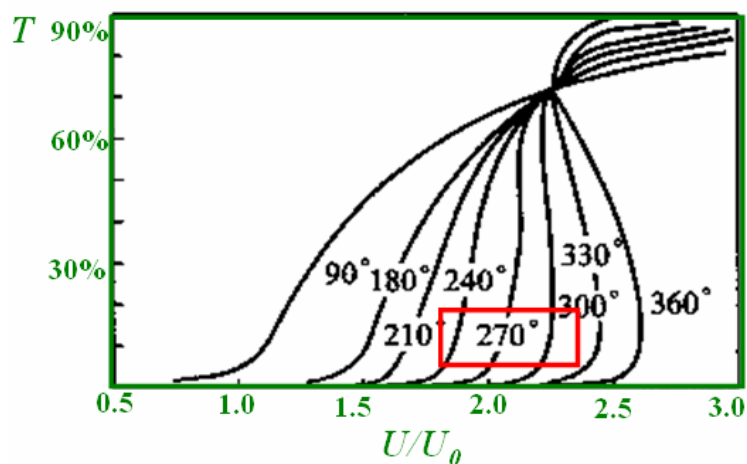


图 6.78 STN-LCD 中中间层分子的倾斜角与约化电压的关系

条件：上下层液晶分子扭曲 180° ；

液晶盒起偏器和检偏器透振方向正交；

起偏器光轴方向和液晶盒表面分子长轴方向成 45° 夹角。

无电场：入射线偏振光分解为 o 光和 e 光两束，通过液晶层后产生光程差，通过检偏器时产生干涉现象，呈现一定颜色的显示。

引入电场：液晶分子空间排列发生变化，液晶分子长轴沿电场取向，入射线偏振光穿过液晶层仍沿原方向振动，而检偏器和起偏器正交，光无法通过，

屏幕呈暗显示。

黄模式：黄绿背景上显示黑字。

蓝模式：蓝色背景上显示灰字。

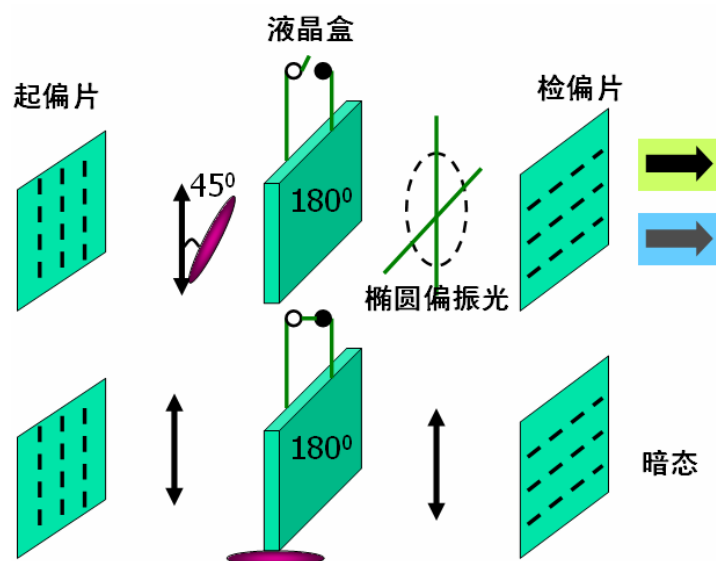


图 6.79 STN-LCD 显示原理示意图

四 有源矩阵液晶显示 (AM-LCD) (第四代)

TN-LCD、STN-LCD 的缺点：

- (1) 采用矩阵寻址法，产生“交叉效应”。
- (2) 每个像素相当于一个平行板电容器，该电容并无法将电压保持到下一次再更新画面数据的时候。（以一般 60Hz 的画面更新频率，需要保持约 16ms 的时间）这样一来，电压有了变化，所显示的灰阶就会不正确。

AM-LCD 的设计思路：

- (1) 在每个像素上设计一个非线性有源器件，使像素被独立驱动，克服交叉效应。
- (2) 借助存储电容，使像素两端电压在一帧时间内保持不变。

AM-LCD 的种类：

- (1) 二端型：以 MIM（金属-绝缘体-金属）二极管阵列为主
- (2) 三端型：以薄膜晶体管（TFT）为主

1. 二端有源矩阵液晶显示

结构特点：MIM 与液晶显示单元串联排列，MIM 二极管具有双向导通性。

工作原理：

- (1) 扫描电压和信号电压同时作用于像素单元，二极管处于断态，压降集中在

C_{MIM} 上, 当该电压大于二端器件的阈值电压时, 二端器件被导通, 电流对 C_{LC} 充电至阈值后, 像素显示。

- (2) 外加电压消失, 二端器件恢复断态, C_{LC} 上的信号电荷通过 R_{LC} 缓慢放电。通过参数选取可使一帧时间内该显示单元电压保持在阈值电压以上。

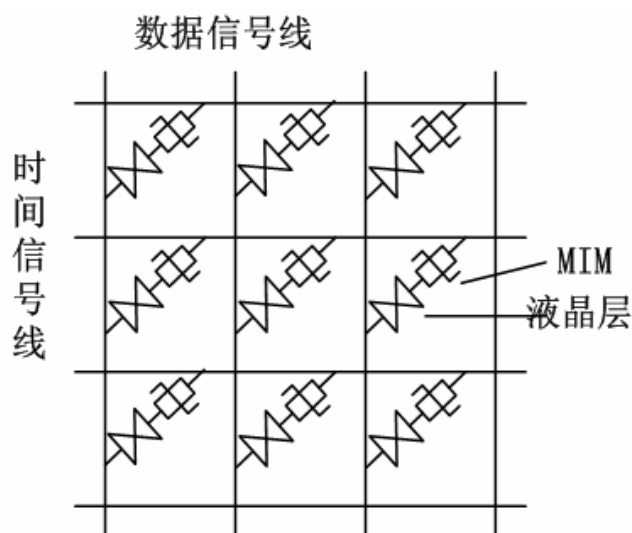


图 6.80 二端有源矩阵液晶显示的电极排列结构

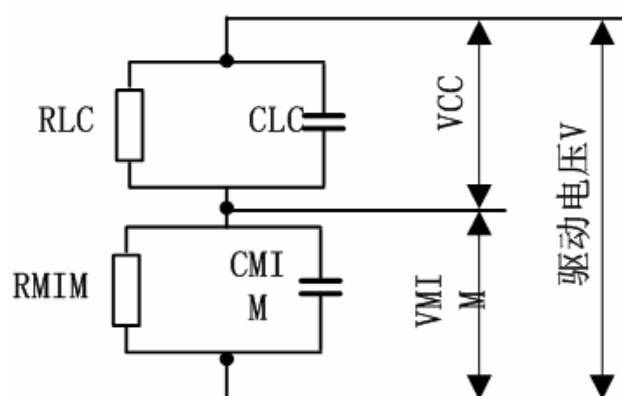


图 6.81 MIM 矩阵等效电路

2. 三端有源矩阵液晶显示

结构特点: 在每个像素上串联一个薄膜晶体管。

工作原理:

- (1) 扫描电压加到G上, D-S导通, 信号电压对 C_{LC} 快速充电至阈值后, 像素显示。
- (2) 扫描电压消失, D-S断开, C_{LC} 上的信号电荷通过 R_{LC} 缓慢放电。

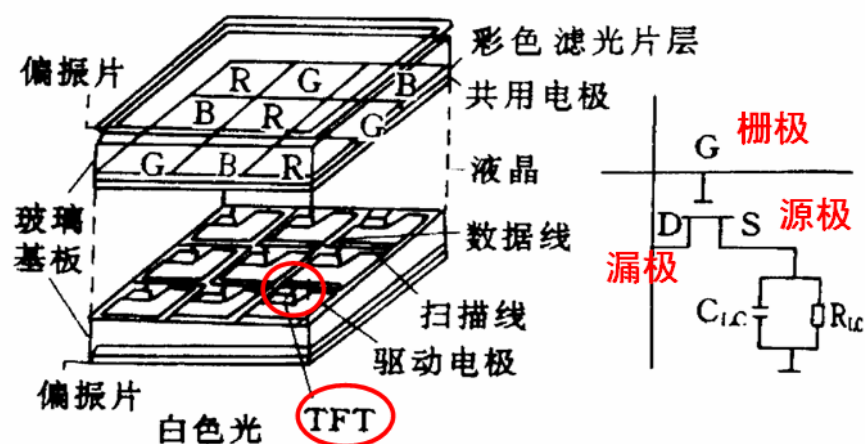


图 6.82 三端有源矩阵液晶显示的结构和等效电路

3. LCD 的背光源

作用：提供一个高亮度,而且亮度分布均匀的光源。

目前常用的背光源种类：CCFLS(冷阴极荧光灯，Cold Cathode Fluorescent Lamps);

LED（发光二极管，Light Emitting Diode）。

§ 6-7 等离子体显示

利用气体放电产生发光现象的平板显示技术。

气体放电：气体中带电粒子不断增加的过程。由外界催离作用或上一次放电残存下来的原始电子从外电场获得能量并使气体粒子电离，新产生的电子又参加电离过程，使气体中的电子、离子不断增加。

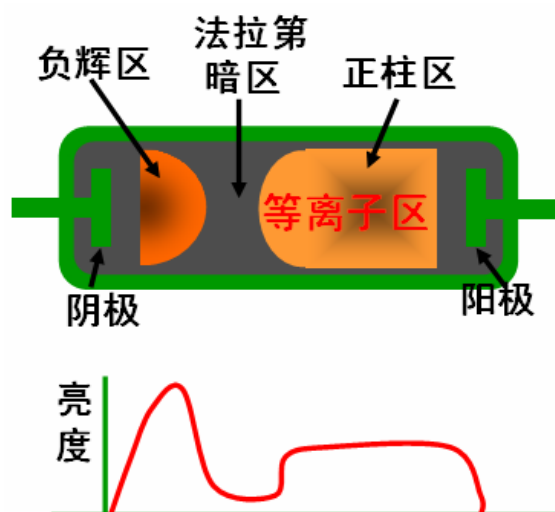


图 6.83 放电单元极间放电时的发光区域和光强度分布

PDP 显示器由于极间间隙小，主要是利用了上图中的负辉区发光区域。在该区域内，自由电子不具备足够能量使气体电离，但能使经过该区域的气体原子从基态跃迁到激发态。当原子再次回到基态时，能量以光子的形式释放。

一 单色等离子体显示

1. 结构

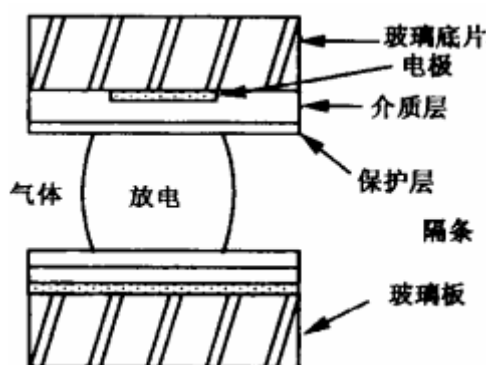


图 6.84 AC-PDP 结构图

2. 工作原理

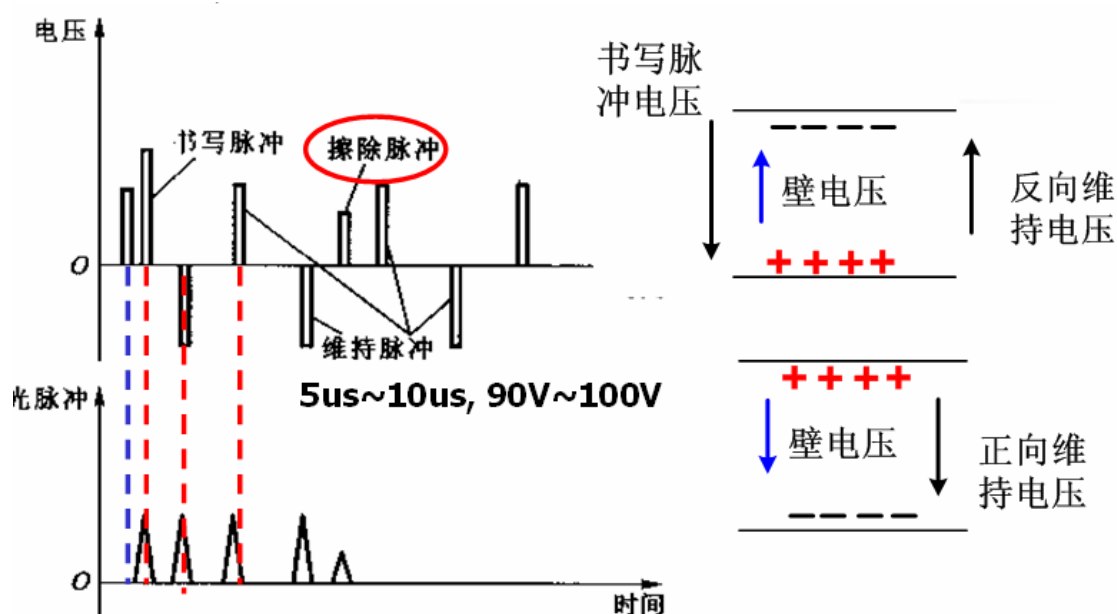


图 6.85 AC-PDP 的维持、书写和擦除脉冲工作方式

存储特性：显示单元只要由书写脉冲点燃后，只需在幅值较低的、极性交替变化的维持脉冲控制下即可持续发光。

3. AC-PDP 的驱动

驱动电路：在控制电路控制下产生 PDP 所需要的维持、书写和擦除脉冲。

显示控制电路：提供驱动控制电路所需要的各种控制信号。

电源：提供系统所需电压。

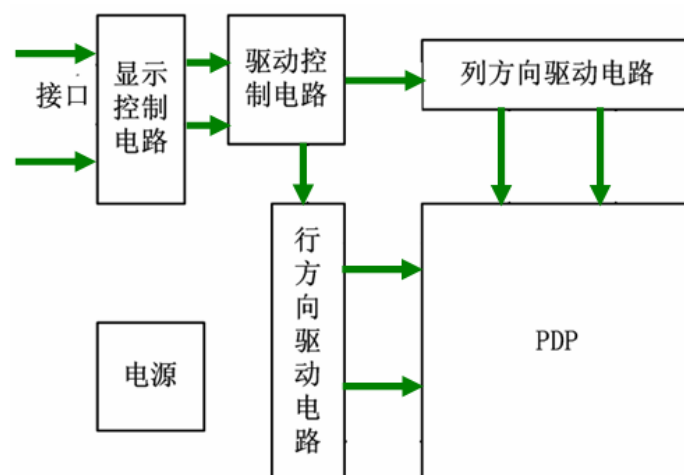


图 6.86 单色 AC-PDP 驱动电路原理图

二 彩色等离子体显示

1. 原理

利用气体放电产生的电子或紫外光激发低压荧光粉或光致荧光粉发出彩色光，实现彩色图像显示。（目前主要采用紫外光激发方式）

2. 基本结构

结构：对向放电式与表面放电式。

对向放电式：两个电极分别在相对放置的底板上。

缺点：等离子体放电时，荧光粉受离子轰击会使发光性能变差。

表面放电式：电极位于同一侧的底板上，放电在同侧电极间进行。（主流结构）

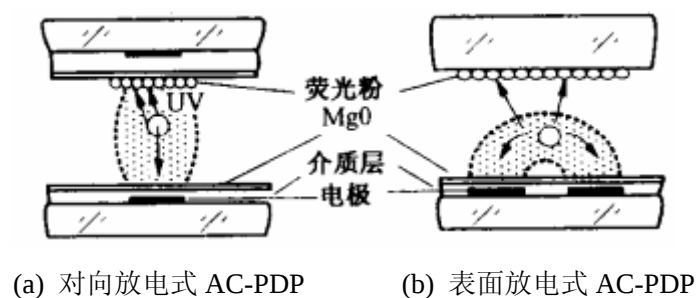


图 6.87 彩色 AC-PDP 单元原理结构示意图

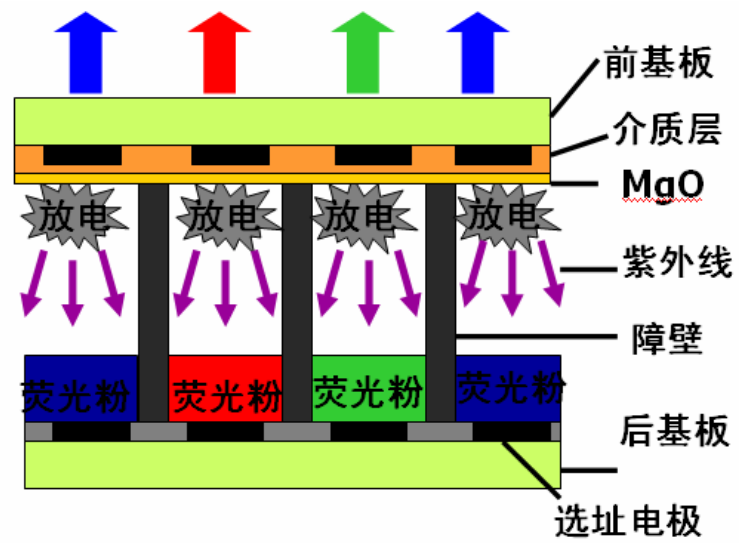


图 6.88 表面放电式彩色 AC-PDP 结构图