

光

纤

通

信





电子科技大学

光电信息学院 光纤通信课程组



第三章 光器件

■ 通信用光器件:

● 光有源器件: 需要外加能源驱动工作的光器件。

● 光无源器件: 不需要外加能源驱动工作的光器件。

➡ 功能: 实现系统各组成间信道的互通、分路/和路、复用/解复用、光路转接、波长/频率选择、功率控制、噪声滤除、反向隔离、偏振选择控制等。



第三章 光器件

■ 光有源器件:

● 光源: ● 半导体激光器 (LD)

● 分布反馈 (DFB) 激光器

● 发光二极管 (LED)

● 光检测器: ● 光电二极管 (PD)

● PIN光电二极管

● 雪崩光电二极管 (APD)

● 光放大器: ● 掺铒光纤放大器 (EDFA)



第三章 光器件

■ 光无源器件:

- 光纤连接器和接头
- 光耦合器
- 光隔离器与光环行器
- 光调制器
- 光波分复用器/解复用器
- 光开关



第三章 光器件

本章内容:

3.1 光电器件一般工作原理

3.2 发光二极管

3.3 半导体激光器

3.4 光电二极管

3.5 光无源器件



3.1 光电器件一般工作原理

■ 半导体光源和光检测器优点:

- 体积小
- 效率高
- 可靠性高
- 工作波长与光纤低损耗窗口相对应
- 便于光纤耦合
- 调制速率高

■ **半导体光源**: 在注入电流作用下, 电子从低能级跃迁到高能态, 形成粒子数反转, 电子再从高能态跃迁到低能态产生光子而发光。

■ **半导体光检测器**: 注入光作用下, 电子从低能态跃迁到高能态, 并在外加电场作用下形成光生电流。



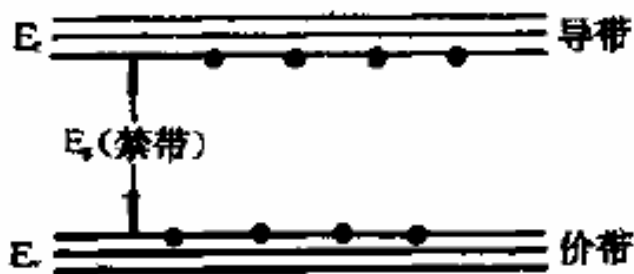
3.1.1 光发射与光吸收

能级理论:

- 原子由原子核和核外沿固定轨道旋转的电子组成;
- 电子在特定的能级中运动, 并通过与外界交换能量发生能级跃迁;
- 能级所对应的能量值是离散的。

能带理论 —— 针对半导体材料

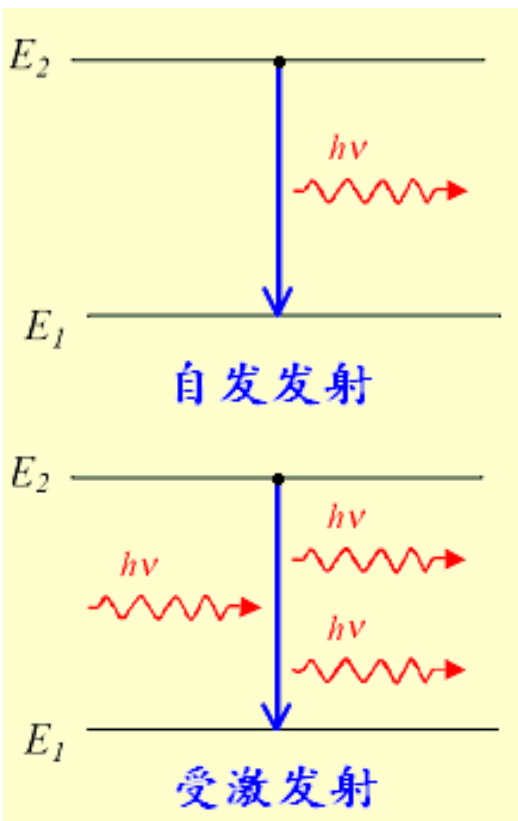
- 价带
- 导带



3.1.1 光发射与光吸收

- 处于高能态（导带）电子不稳定，向低能态（价带）跃迁，而能量以光子形式释放出来，发射光子的能量 $h\nu$ 等于导带价带能量差，即 $h\nu = E_c - E_v = E_g$ 。

■ 发光过程:



- 自发发射: 处于高能态的电子按照一定的概率自发地跃迁到低能态上，并发射一个能量为 $E_2 - E_1$ 的光子；

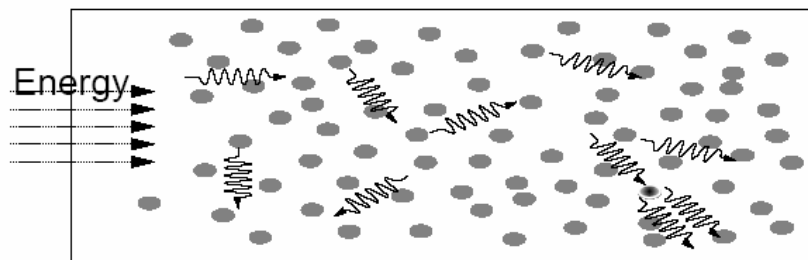
- 受激发射: 处在高能态的电子在外界光场的感应下，发射一个和感应光子一模一样的光子，跃迁到低能态。



3.1.1 光发射与光吸收

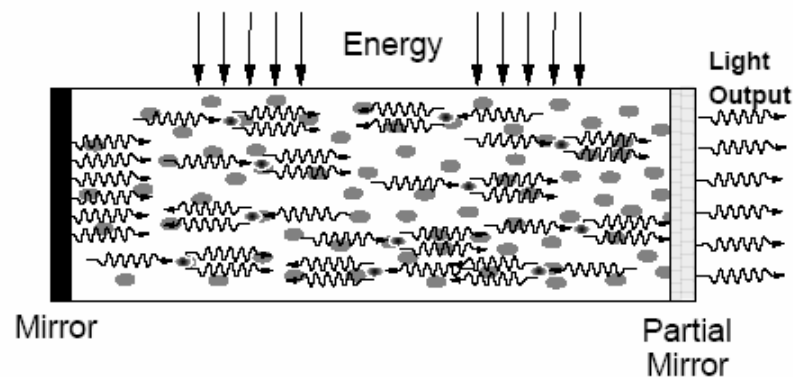
自发发射

- 光子随机地向各个方向发射，每次发射没有确定的相位关系——非相干光。
- LED通过自发发射过程发光。



受激发射

- 光子的发射方向、相位、频率都与激发它们的光子相同——相干光。
- LD通过受激发射过程发光。



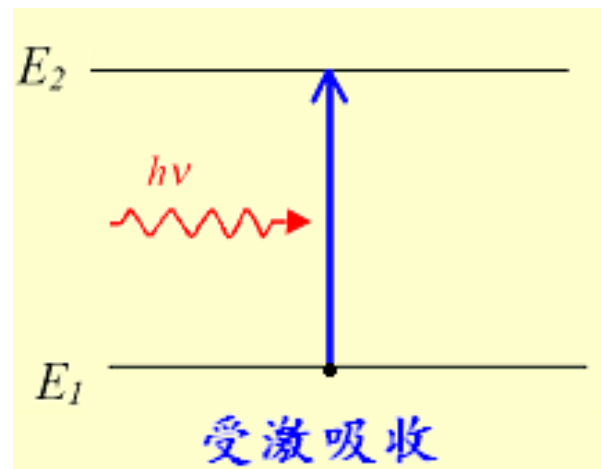
3.1.1 光发射与光吸收

- **光吸收**：处于低能态电子，如果受到外来光的照射，当光子能量等于或大于禁带能量时，光子将被吸收而使电子跃迁到高能态。

- **光吸收过程**：

- 受激吸收：如果入射光子的能量 $h\nu$ 近似等于 $E_2 - E_1$ ，光子能量就会被吸收，同时基态上的电子跃迁到高能态。

- 半导体光检测器基于这种效应。



- 自发发射、受激发射和受激吸收三种过程是同时存在的。

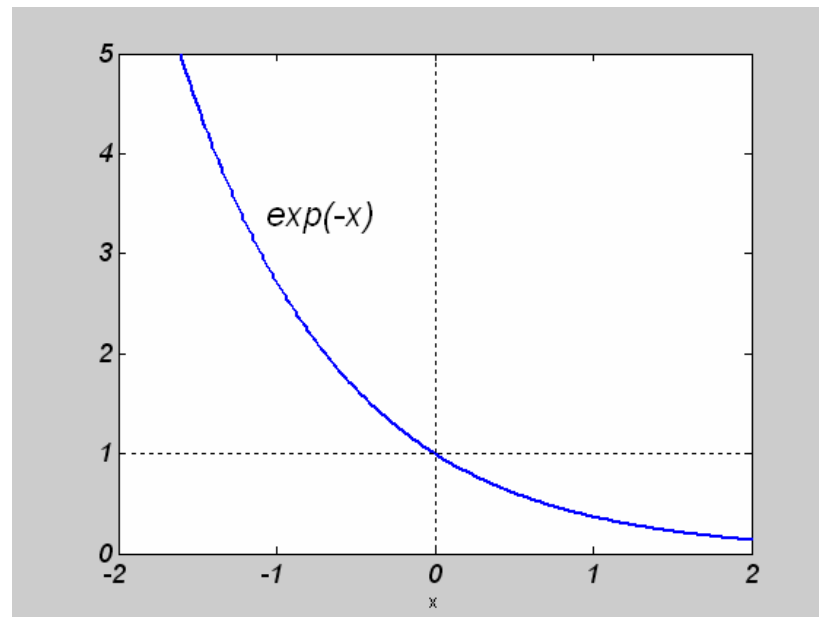


3.1.1 光发射与光吸收

- 考虑两能级原子系统。在单位物质中，处于低能级 E_1 和高能级 E_2 的原子数分别为 N_1 和 N_2 。系统处于热平衡状态时，服从玻尔兹曼统计分布：

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) = \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right)$$

(T 为热力学温度，玻尔兹曼常数 $k=1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)



3.1.1 光发射与光吸收

■ $N_1 > N_2$:

● 在热平衡状态下，自发发射居支配地位，不能发射相干光。

■ $N_2 > N_1$:

● 受激辐射大于受激吸收，当光通过这种物质时，产生放大作用。

● 这种分布和正常状态的分布相反，称为粒子数反转。



3. 1. 1 光发射与光吸收

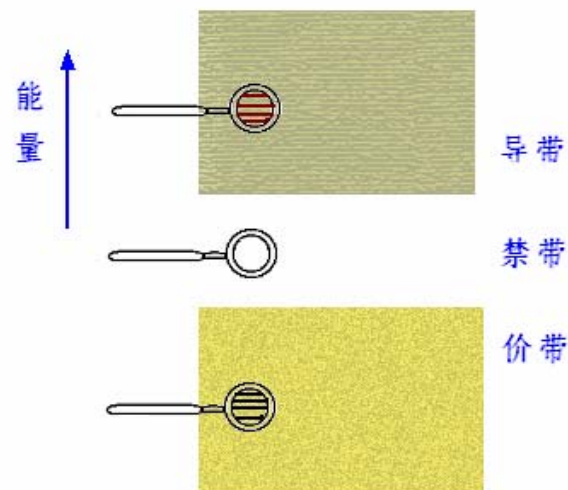
■ 半导体的能带：

● 半导体材料的能级结构不是分离的能级，而是有一定宽度的带状结构。

➡ 价带（能量较低）

➡ 导带（能量较高）

➡ 禁带



3.1.1 光发射与光吸收

- 电子在导带和价带的占据几率由费密—狄拉克分布给出：

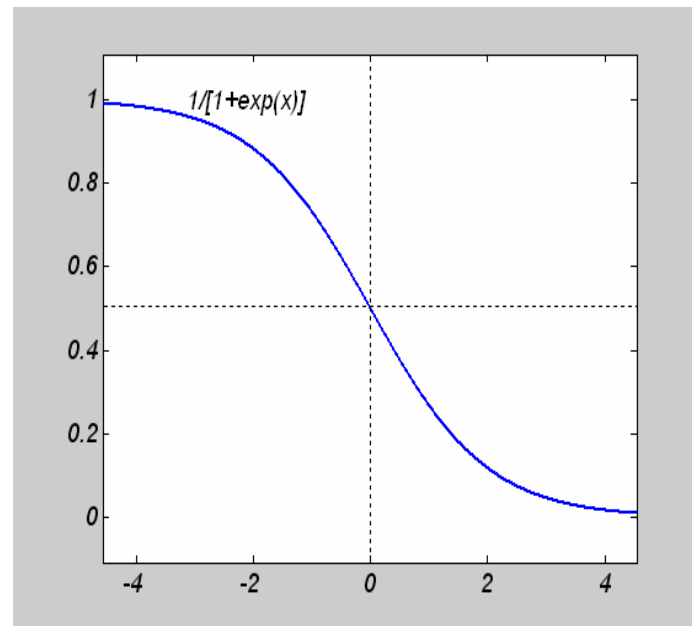
$$f_c(E_2) = \frac{1}{1 + \exp[(E_2 - E_{fc})/kT]}$$

$$f_v(E_1) = \frac{1}{1 + \exp[(E_1 - E_{fv})/kT]}$$

(E_{fc} 和 E_{fv} 为费密能级)

- 要使受激辐射大于吸收，达到粒子数反转，要求 $f_c(E_2) > f_v(E_1)$ ，即

$$E_{fc} - E_{fv} > E_2 - E_1 > E_g$$



3. 1. 2 PN结

1. PN 结的形成:

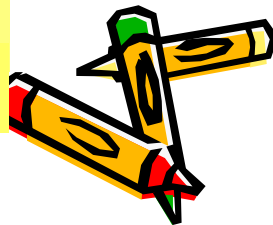
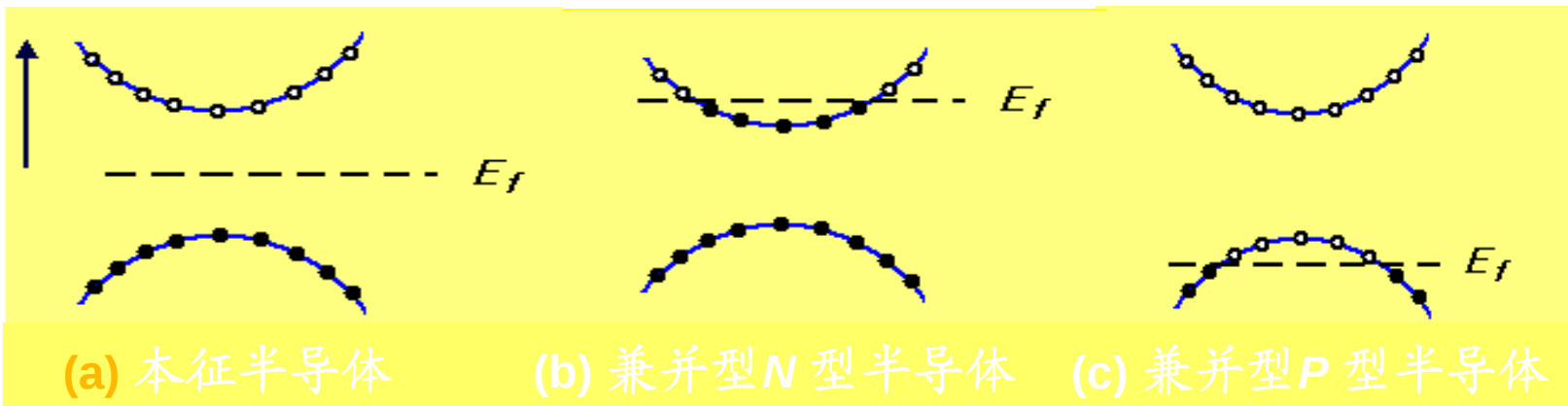
- 半导体光源的核心是PN结，将P型和N型半导体相接触形成PN结。
- N型半导体中过剩电子占据了本征半导体的导带。
- P型半导体中过剩空穴占据了价带。



3.1.2 PN结

费密能级：（热平衡状态下）

- 本征半导体的费米能级位于带隙中间；
- N 型掺杂将使费米能级向导带移动， P 型掺杂使费米能级向价带移动；
- 对于重掺杂 N 型半导体，费米能级位于导带内——兼并型 N 型半导体；
- 对于重掺杂 P 型，费米能级位于价带内——兼并型 P 型半导体；



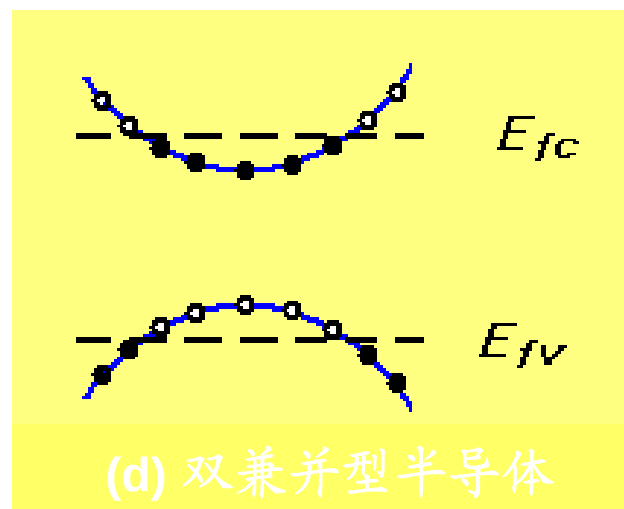
3.1.2 PN结

■ 双兼并型半导体:

● 非热平衡状态时，在 E_{fc} 和 E_{fv} 之间形成了一个粒子数反转区域。

● 如果入射光波能量满足：

$$E_g < h\nu < E_{fc} - E_{fv}$$



则经过双兼并型半导体时将得到放大。



3.1.2 PN结

- 当P型和N型半导体形成PN结时，载流子（电子、空穴）的浓度（密度）差引起扩散运动；
- 漂移运动的方向与扩散运动相反；
- 最后，漂移完全抵消了扩散，达到平衡。
- 为了维持电子-空穴的复合，在PN结上加正向电压，打破原有平衡；

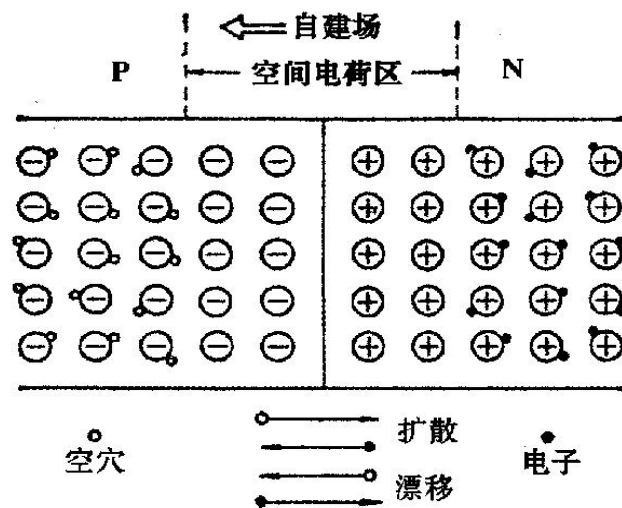


图 5.4 PN 结空间电荷区的形成及载流子导向



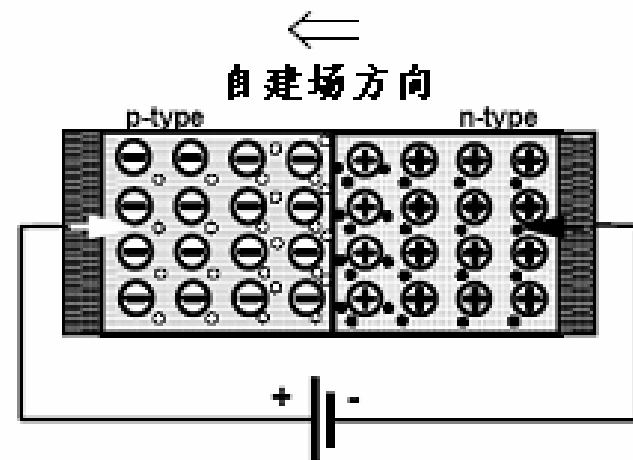
3. 1. 2 PN结

- **正向偏压**：P区空穴不断流向N区，N区电子流向P区，通过复合发光。

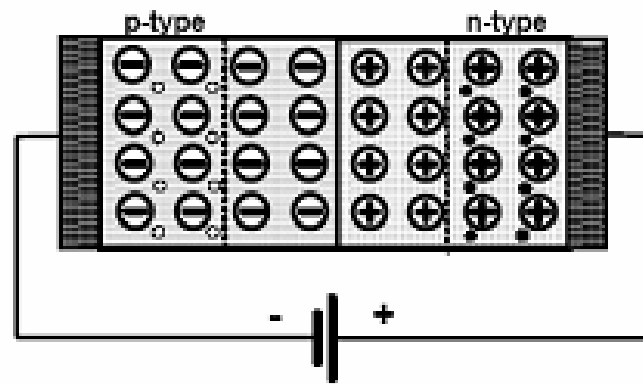
❑ 自发发射复合 —— **LED**

❑ 受激发射复合 —— **LD**

- **反向偏压**：区域内电子和空穴都很少，形成高阻区。



正向电压

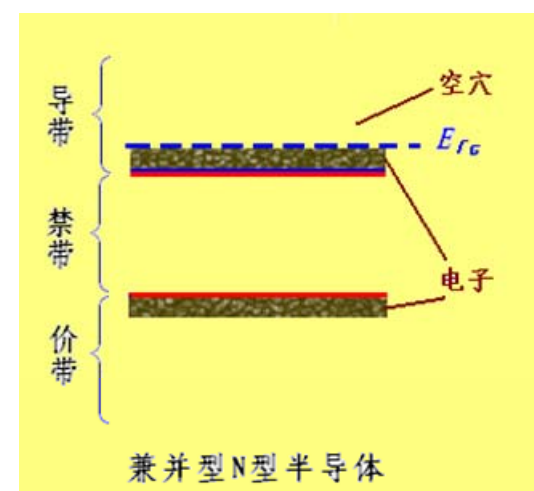
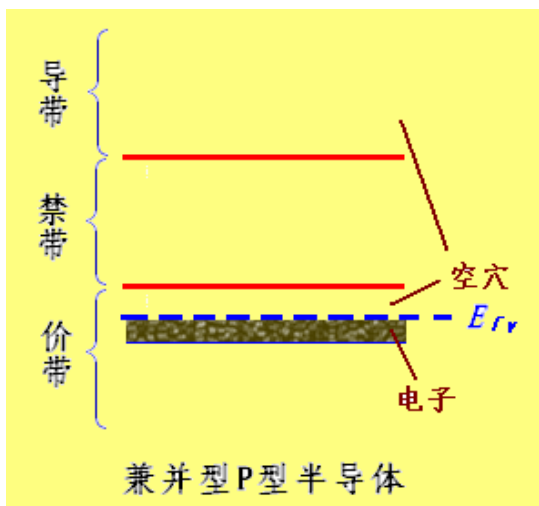
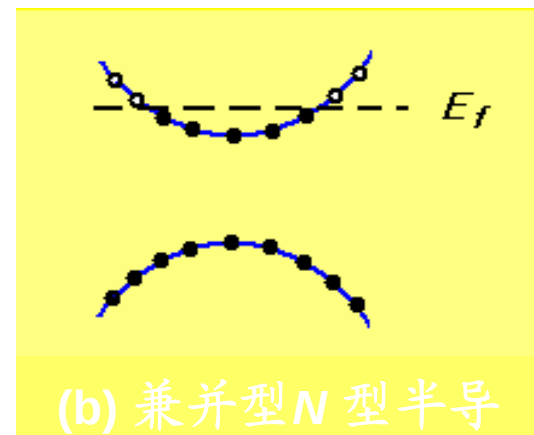
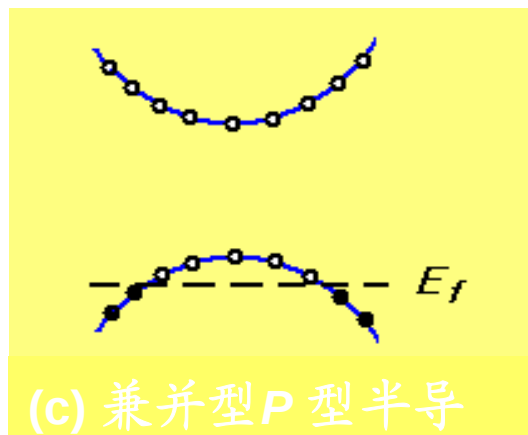


反向电压

3. 1. 2 PN结

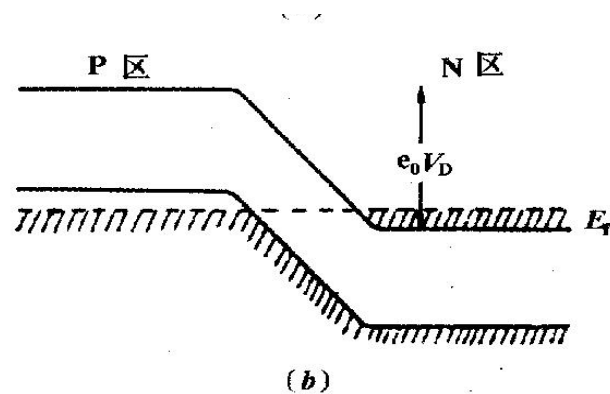
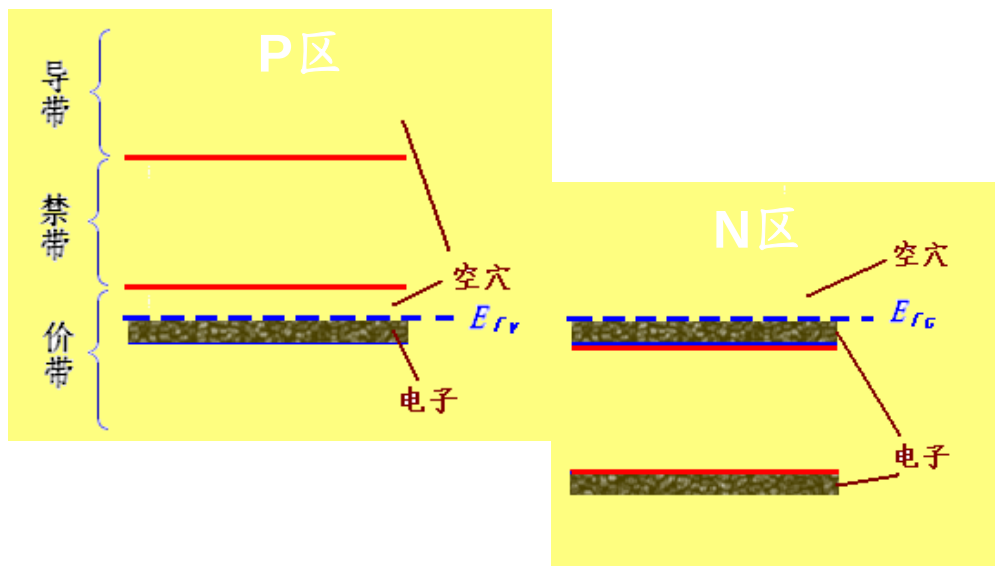
2. PN结的能带结构

- 一个热平衡系统只能有一个费米能级。



3.1.2 PN结

- 处于热平衡状态时，**PN**结两侧的费米能级相等。
- 如果**N**区的能级位置保持不变，则**P**区的能级应该提高。



3.1.2 PN结

- 当正向电压加大到某一值后，PN结里出现了增益区（有源区）。
- 在 E_{fc} 和 E_{fv} 之间价带主要由空穴占据，导带主要由电子占据，即实现了粒子数反转。

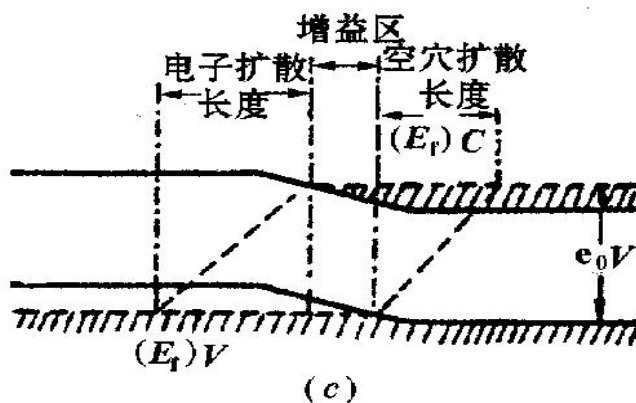
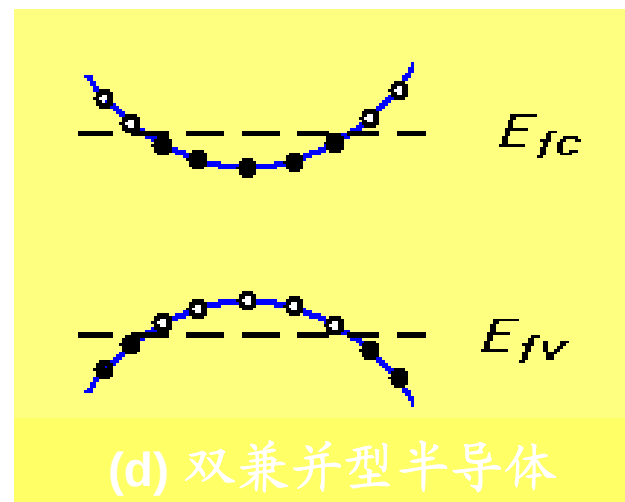


图 5.5 PN 结的能带结构



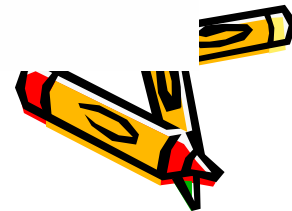
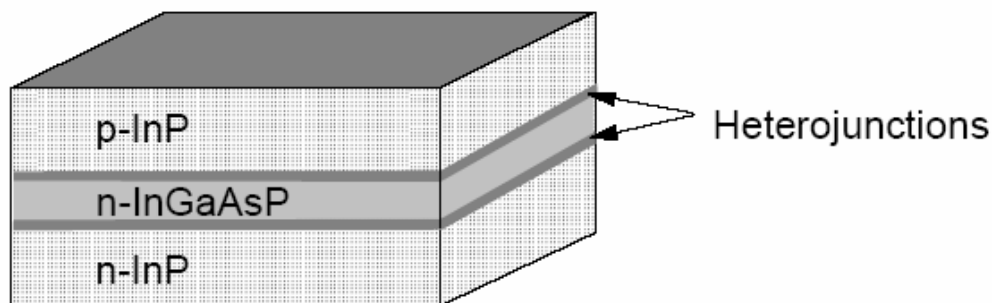
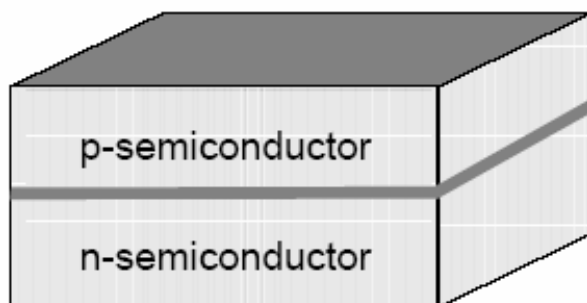
(d) 双兼并型半导体

3. 1. 2 PN结

■ 同质结和异质结

● 同质结：PN 结的两边使用相同的半导体材料。

● 双异质结：在宽带隙的P型和N型半导体材料之间插进一薄层窄带隙的材料。



3.1.2 PN结

对比:

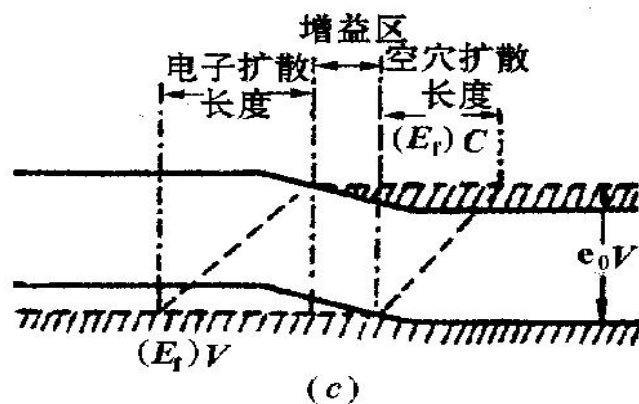
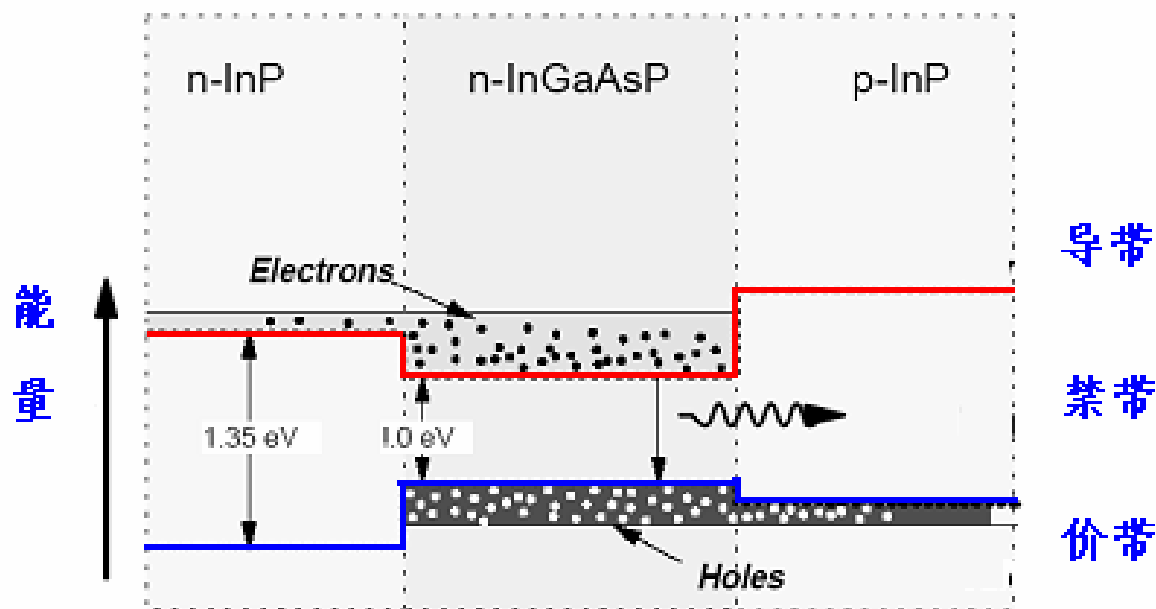


图 5.5 PN 结的能带结构



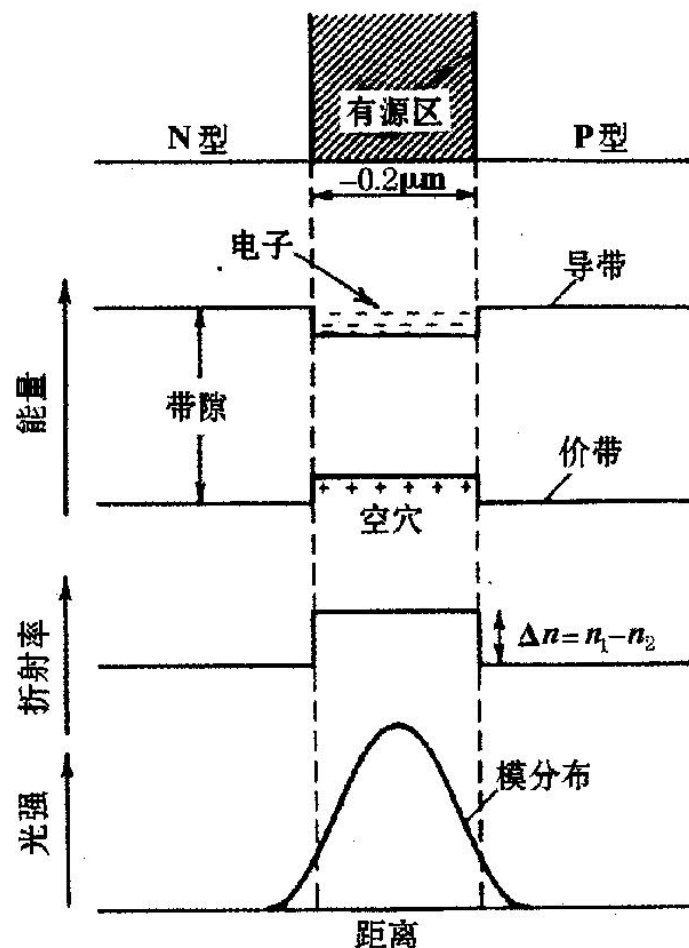
3.1.2 PN结

■ 同质结：有源区对载流子和光子的限制作用很弱：

● 异质结：

④ 带隙差形成的势垒将电子和空穴限制在有源区复合发光；

④ 折射率使光场（光子）有效地限制在有源区。



3.2 发光二极管

■ LED 适用范围：低速率、短距离光波系统。

■ LED 优点：

- ✿ 结构简单。
- ✿ 成本低。
- ✿ 寿命长。
- ✿ 可靠性高。
- ✿ 随温度变化较小。



3.2 发光二极管

■ 发光二极管通过自发发射过程发射非相干光。

■ 缺点

- 输出功率低。

- 输出光束发散角较大，耦合效率低。

- 光源谱线较宽。

- 响应速度较慢。



3.2.1 LED结构

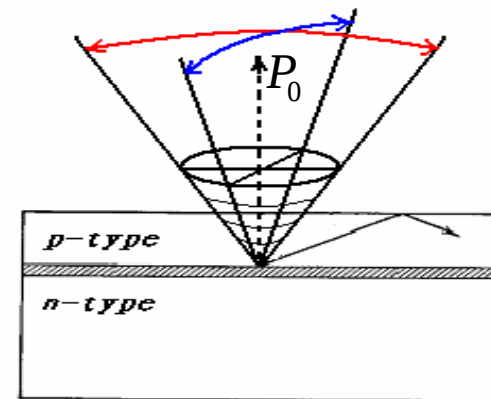
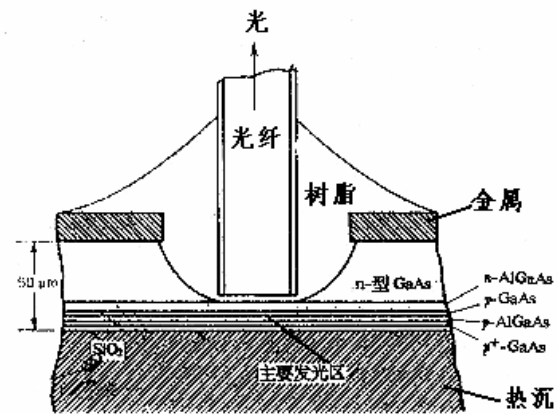
■ 面发光LED：从平行于结平面的表面发光。

❖ *SLED*光束呈朗伯分布：

$$P = P_0 \cos \theta$$

❖ *SLED*特点：

- 工艺简单。
- 发散角大。
- 效率低。
- 调制带宽较窄。

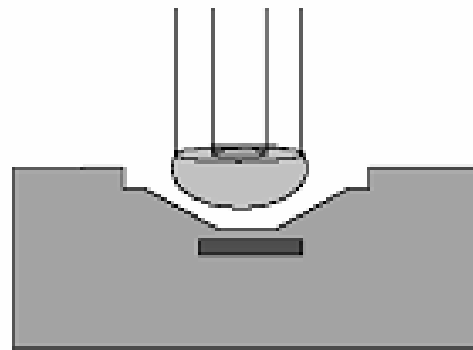
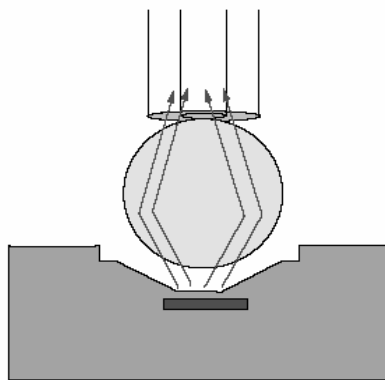


3. 2. 1 LED结构

■ 为提高面发光LED与光纤的耦合效率：

■ 在井中放置一个截球透镜；

■ 或者将光纤末端形成球透镜。

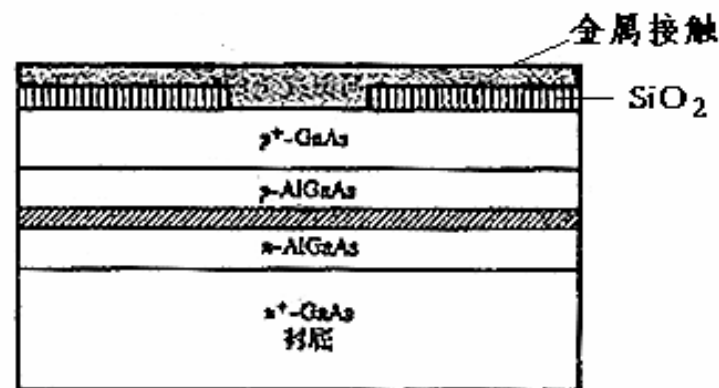


3. 2. 1 LED结构

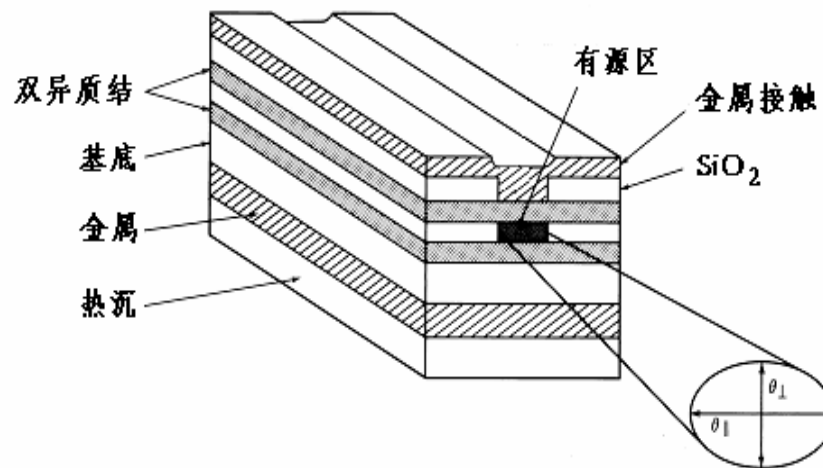
■ 边发光LED: 从结区的边缘发光。

❖ ELED特点:

- 发散角、耦合效率和调制带宽均比面发光LED有改善。



(b)



3.2.2 LED工作特性 – P-I特性

■ LED 内产生的光功率:

$$P_{\text{int}} = \eta_{\text{int}} \times (I/q) \times \hbar\omega = \eta_{\text{int}} (\hbar\omega/q) I$$

● 定义外量子效率 η_{ext} : LED 的逸出功率占内部产生功率的份额。

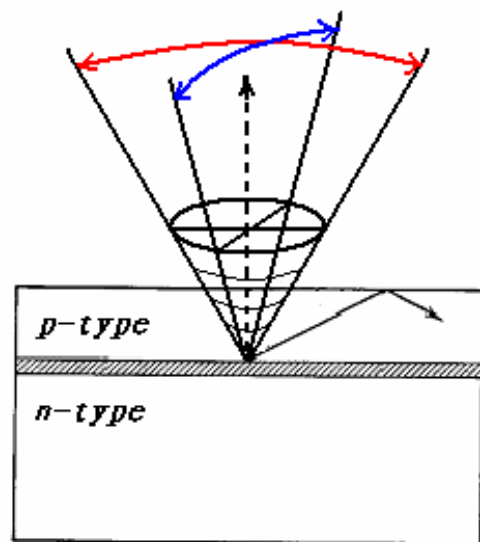
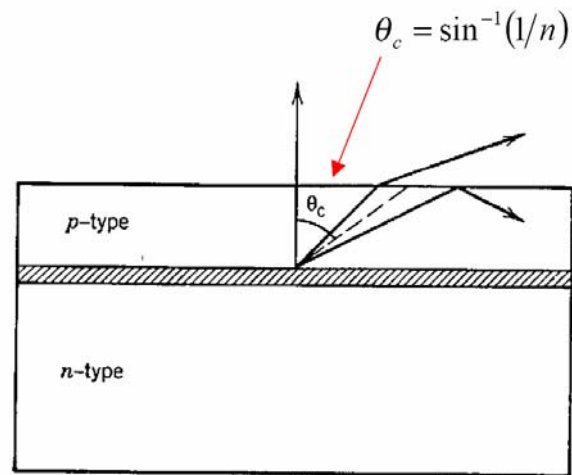
● LED 的发射功率为:

$$P_e = \eta_{\text{ext}} P_{\text{int}} = \eta_{\text{ext}} \eta_{\text{int}} (\hbar\omega/q) I$$



3.2.2 LED工作特性 – P-I特性

- 由于内部吸收、空气-半导体界面的反射，只有在圆锥角内发射时，光功率才能从LED表面逸出，外量子效率通常很小（百分之几）。
- 用双异质结制作LED可以降低内部吸收。



3.2.2 LED工作特性 – P-I特性

■ 设材料折射率 $n=3.5$ ，则：

$$\eta_{ext} = \frac{1}{n(n+1)^2} = \frac{1}{3.5 \times (3.5+1)^2} \approx 0.014$$

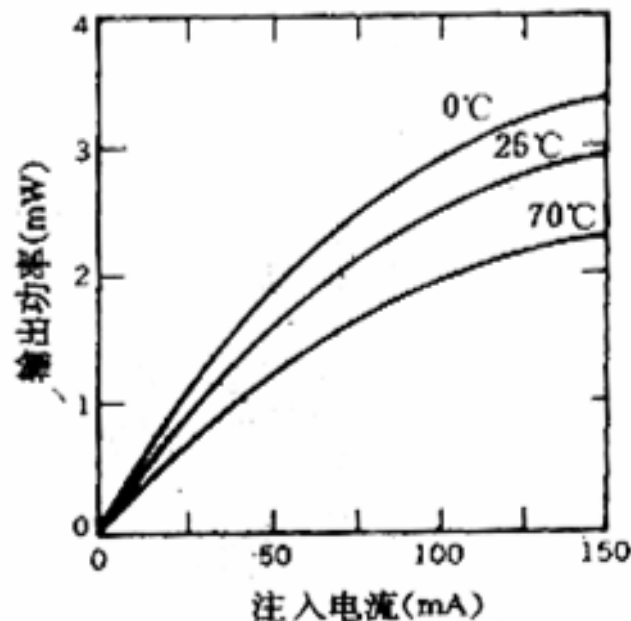
- 内部产生的功率只有一小部分可从 **LED** 发射出来。
- 将LED发射的光耦合进光纤时，功率还将进一步减小
- 其减小程度取决于与光纤的耦合系数 η_c ：
$$\eta_c = (NA)^2$$
- 例如： $NA = 0.3$ 时， $\eta_c = (0.3)^2 = 0.09$
- **LED** 的输出功率为 $100 \mu W$ 量级。



3.2.2 LED工作特性—P-I特性

■ LED 输出功率—注入电流特性(P-I 曲线)

- 光功率随注入电流增大而增大。
- 输出功率随温度升高而减小。
- 功率饱和效应。

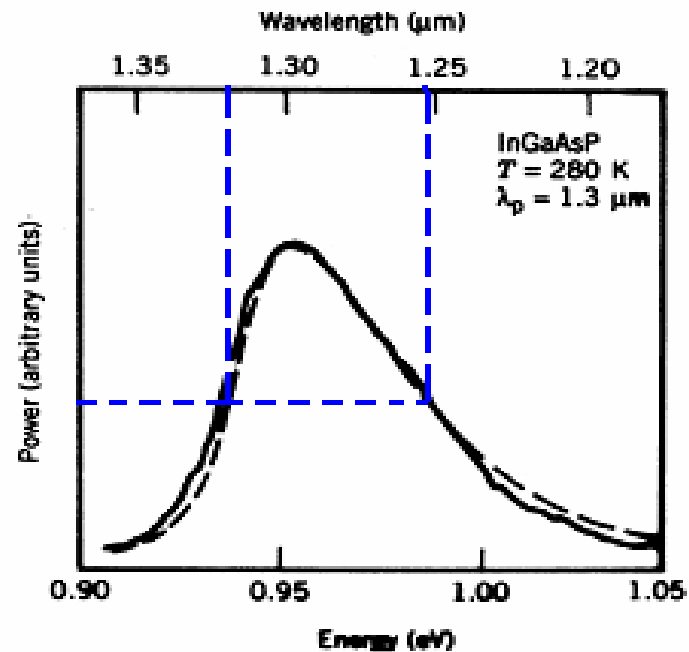


3. 2. 2 LED工作特性－光谱特性

■ 光谱半极大值全宽 (FWHM):

右图: $\lambda = 1.3\mu\text{m}, T = 280\text{K}$

$$\begin{aligned}\therefore \Delta\lambda &= 1.8kT \cdot \frac{\lambda^2}{c \cdot h} \\ &= 1.8 \times (1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}) \times 280\text{K} \times \frac{(1.3\mu\text{m})^2}{c \times h} \approx 60\text{nm}\end{aligned}$$



3. 2. 2 LED工作特性－光谱特性

- 对于一个典型 $1.3\ \mu\text{m}$ LED，其谱宽为50 - 60nm;
- LED的比特率－距离积BL不高。
- LED主要用于短途、低速率的本地网。



3.2.2 LED工作特性－调制特性

■ 频率特性:

● 发光二极管的频率响应可以表示为:

$$|H(f)| = \frac{P(f)}{P(0)} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2f\pi\tau_e)^2}}$$

● 发光二极管的截止频率: 最高调制频率应低于截止频率。
$$f_c = 1/(2\pi\tau_e)$$

● 电带宽 $(f_{3dB})_{electric}$: $|H(\omega_m)|^2$ 降为最大值的一半 (或 3dB) 时, 两调制频率间的宽度。

$$|H(\omega_m)|^2 = \frac{1}{2} \Rightarrow |H(\omega_m)|^2 = 3[dB]$$

● 3dB 光带宽是 3dB 电带宽的 $\sqrt{3}$ 倍。

$$(f_{3dB})_o = \sqrt{3}(f_{3dB})_e$$



3.3 半导体激光器

- 激光二极管**LD**通过受激辐射发光;
- **LD**可以发出单色、定向性好、高强度、相干性的光
- 优点:
 - ✓ 辐射功率高
 - ✓ 发散角窄
 - ✓ 与单模光纤耦合效率高
 - ✓ 辐射光谱窄
 - ✓ 能进行高速直接调制
- **LD** 适合于作高速长距离光纤通信系统的光源



3.3 半导体激光器

■ 产生激光的三个先决条件：

- 激励源是能量的提供者，实现粒子数反转。
- 激活物质是产生激光的物质基础，提供光放大。
- 光学谐振腔提供光反馈。

■ 要产生激光还应满足如下两方面的条件：

- 光的增益和损耗间应满足平衡条件——阈值条件。
- 在谐振腔中，光波反复反射能得到加强，从而能够存在，应满足的条件——相位条件。



3.3.1 LD激光振荡

- 当有源层载流子浓度超过一定值时，实现粒子数反转；
- 在有源区产生了光增益 —— 信号得到放大；

放大倍数为： $\exp(gz)$

增益系数： $g \propto (R_{st} - R_{ab})$

- 增益的产生表明有源区的受激辐射速率超过了受激吸收速率。
- 一旦实现粒子数反转，光增益将迅速增大。



3.3.1 LD激光振荡

■ 半导体激光器基本结构:

● 有源层

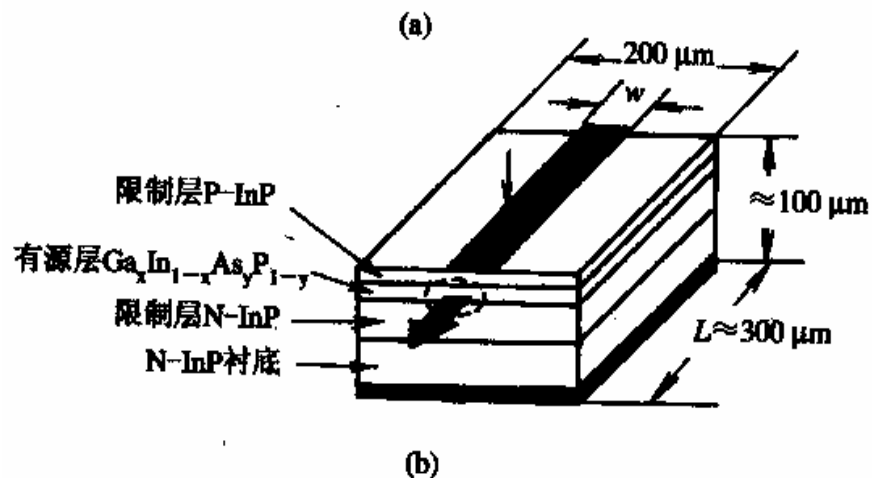
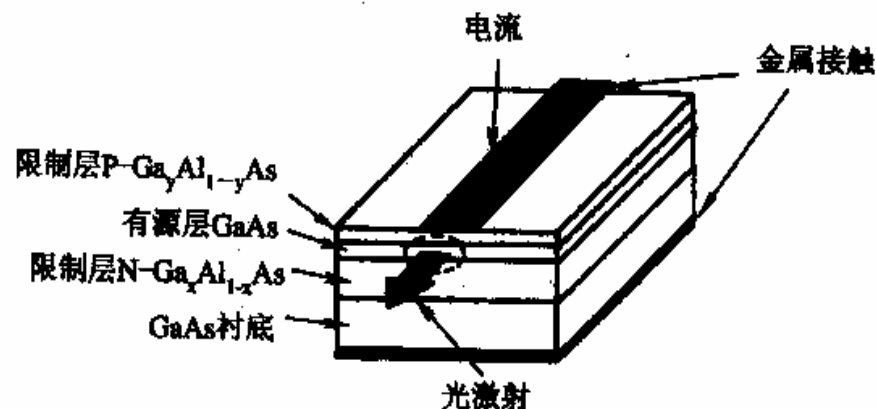
● 限制层

● 法布里—珀罗

(F-P) 谐振腔

双异质结平面条形激光器的基本结构

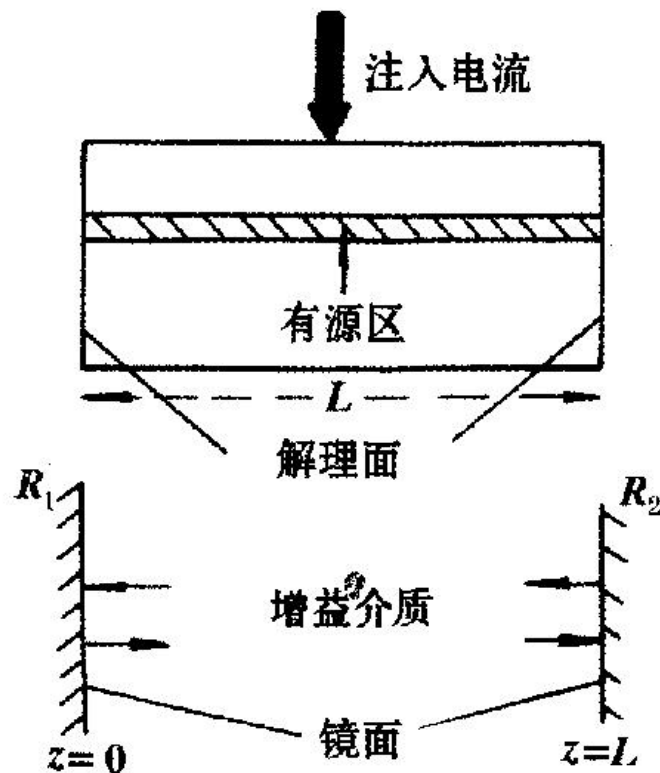
(a) 短波长 (b) 长波长



3.3.1 LD激光振荡

法布里-珀罗腔 (FP腔)

- 激光器的反馈通过将增益介质放入一个光学谐振腔（光腔）内来提供；
- 法布里-珀罗腔（FP腔）：
光腔由两块反射镜组成。
- 半导体激光器中，两端的解理面起反射镜的作用，不必再外加反射镜。
- 反射镜反射率：
$$R_m = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2$$
$$n = 3.5, R_m = 30\%$$



3.3.1 LD激光振荡

- 由于损耗的存在，受激发射产生的工作将不断消耗：

- ❖ 光腔损耗

- ❖ 反射镜的光辐射

- 半导体激光器是一种阈值器件；
- 只有当增益等于或大于总损耗时，才能建立起稳定的振荡
—— 这一增益称为阈值增益；
- 为达到阈值增益所要求的注入电流称为阈值电流。



3.3.1 LD激光振荡

阈值条件

- 自再现：在稳定工作时，光波在光腔内往返一次，（振幅、相位）保持不变。

- 自再现条件：

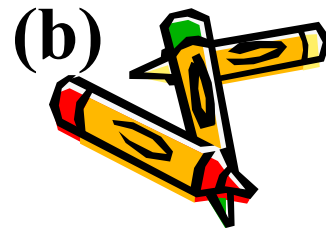
$$E_0 \exp(gL)(R_1 R_2)^{1/2} \exp(-\alpha_{\text{int}} L) \exp(2ikL) = E_0$$

- ✓ 令等式两边振幅相等：

$$E_0 \exp(gL)(R_1 R_2)^{1/2} \exp(-\alpha_{\text{int}} L) = E_0 \quad (\text{a})$$

- ✓ 令等式两边相位相等：

$$\exp(2ikL) = 1$$



3.3.1 LD激光振荡

❖ 幅值条件 —— 由(a)式, 解得:

$$g_{th} = \alpha_{int} + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) = \alpha_{int} + \alpha_{mir} = \alpha_c$$

❖ 相位条件 —— 由(b)式, 解得:

$$\begin{cases} 2kL = 2m\pi \\ k = 2\pi n\nu/c \end{cases} \Rightarrow \nu = \nu_m = mc/2nL$$

❖ 幅值条件规定了增益和电流的最低值;

❖ 相位条件规定激光器振荡频率必为 $\nu_m = mc/2nL$ 中的一个频率。



3.3.1 LD激光振荡

半导体激光器的模式增益谱

■ FP 腔中满足谐振条件的纵

模是均匀分布的:

$$\because \nu_m = mc/(2nL)$$

纵模间距: $\Delta\nu_L = c/(2nL)$

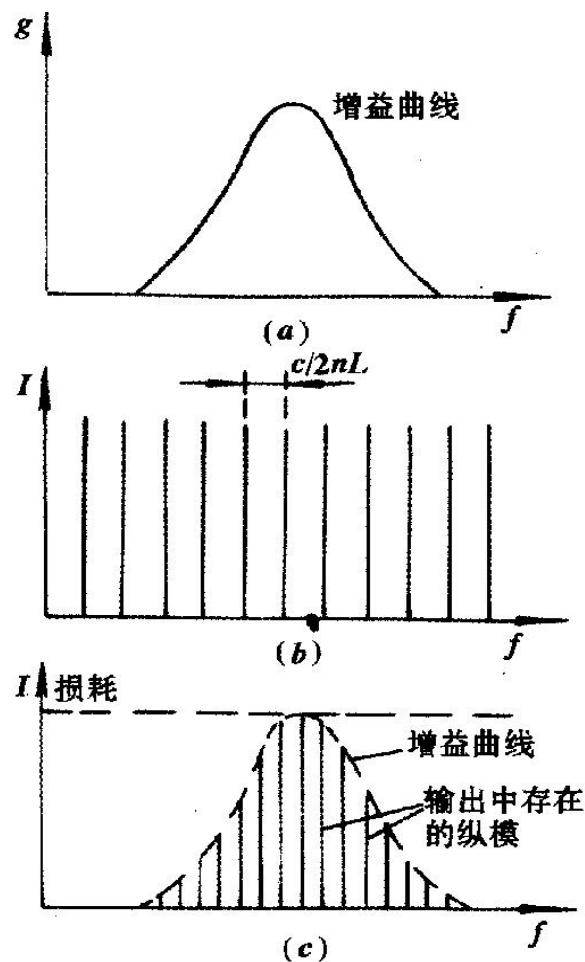
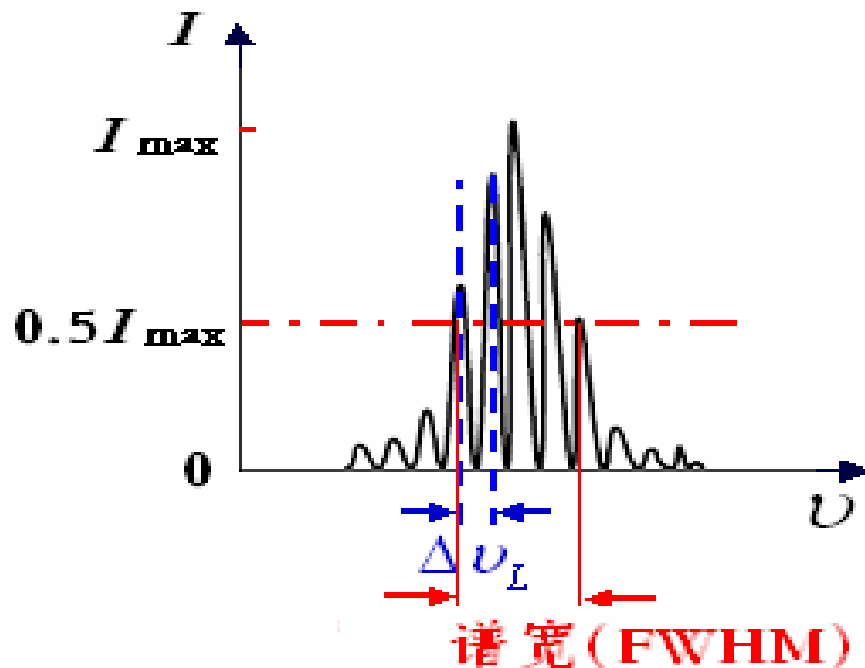


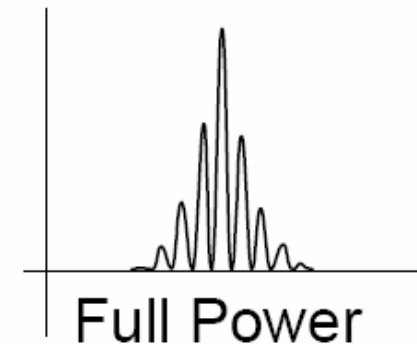
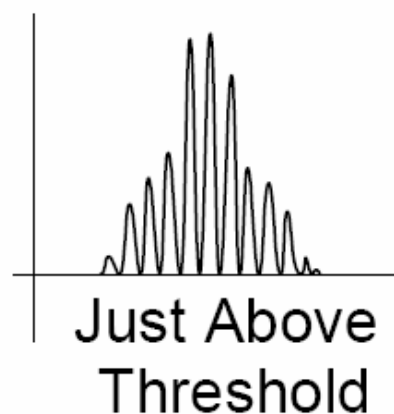
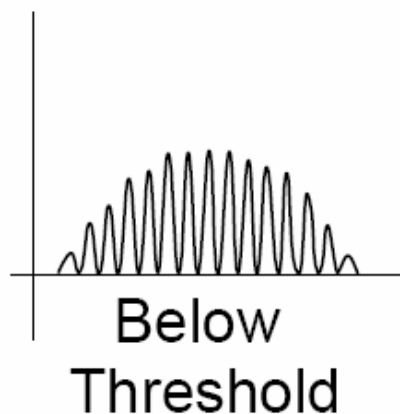
图 5.13 半导体激光器的模式增益谱
(a)增益谱分布;(b)腔膜分布;(c)工作模式的决定。

3.3.1 LD激光振荡

利用纵模间距： $\Delta\nu_L = c/(2nL)$

可计算激光器的腔长： $L = c/(2n\Delta\nu_L)$

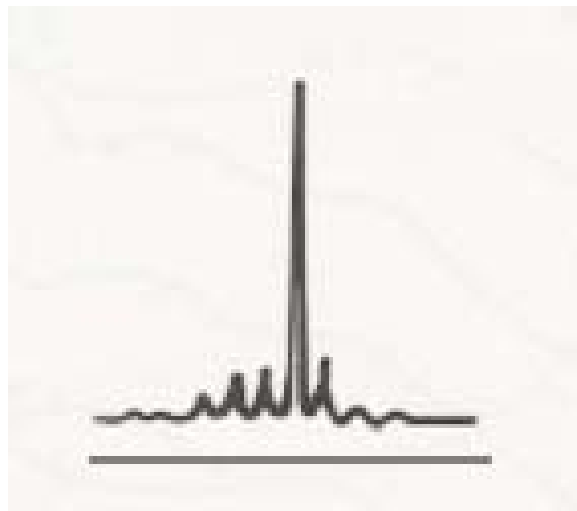
- 主导模式：最靠近增益峰的模式。
- 多模激光器：主模及其临近的两个边模同时振荡



3.3.1 LD激光振荡

- 单纵模激光器：仅有主模能够产生振荡。

- ❖ 绝大部分功率都集中在一个纵模上；
- ❖ 谱宽较窄，单色性较好。



- 将LD设计在单纵模工作能进一步提高BL积。

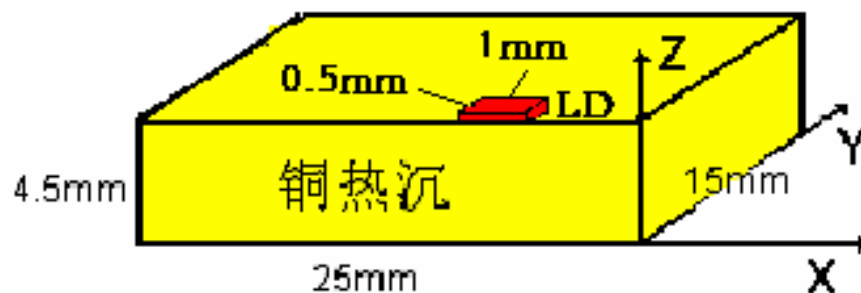
∴ 纵模间距： $\Delta\nu_L = c/(2nL)$

- 增大激光器的腔长可使输出谱线更窄。



3.3.2 LD的结构

- 大面积激光器 —— 使用较少
- 增益导引半导体激光器 —— 使用较少
- 折射率导引半导体激光器 —— 广泛使用
 - 弱折射率导引 - 脊形波导激光器
 - 强折射率导引 - 掩埋异质结激光器



3.3.2 LD的结构

大面积激光器

- 是结构最简单的LD：一个薄的有源层夹在P型和N型限制层中间。
- 正向电流在较大面积注入，所以称为大面积激光器。
- 缺点：沿激光器整个宽度上都存在光辐射，因此损耗大，阈值电流高。

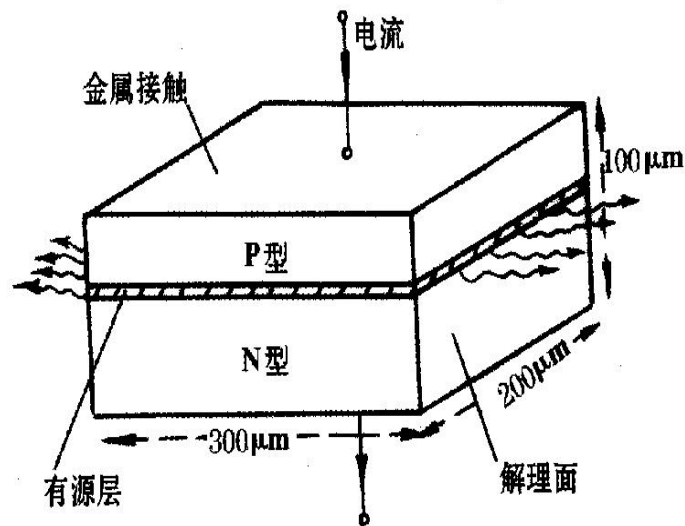
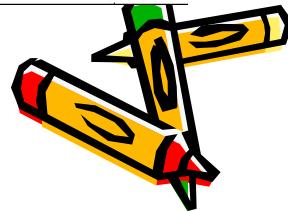


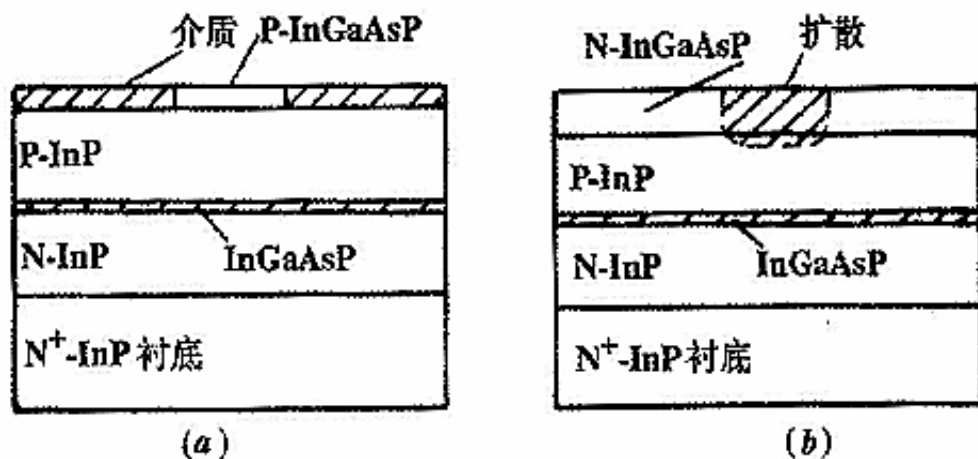
图 5.14 大面积激光器



3.3.2 LD的结构

增益导引半导体激光器

- 限制光的办法：电流在狭窄的中间带内注入，导致载流子浓度在条形区最高，光被限制在条形区域内。



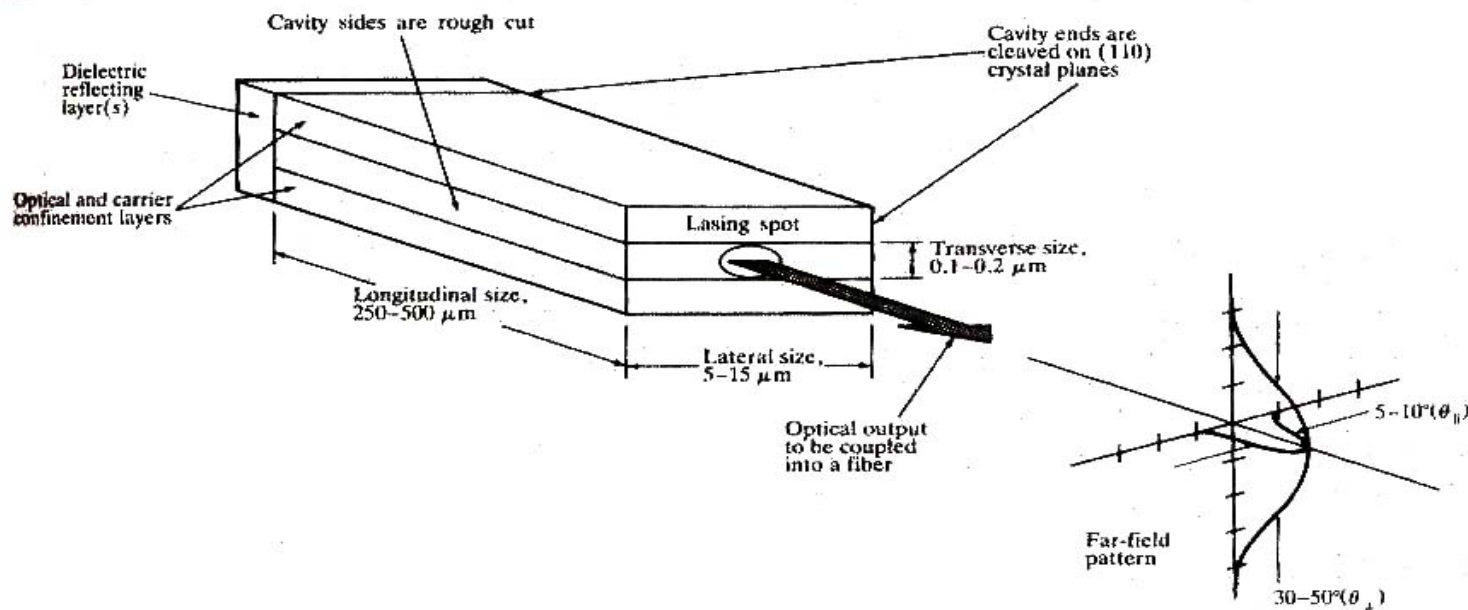
- 因为电流在有源区产生增益，光限制是借助条形区的增益来实现的，这样的激光器称为增益导引半导体激光器。



3.3.2 LD的结构

缺点:

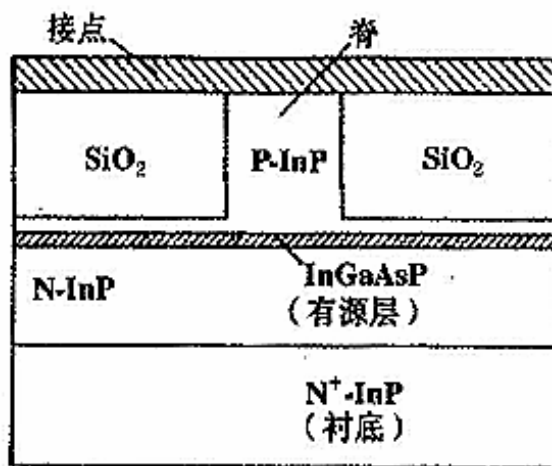
- 功率增大时，光斑尺寸不稳定，
- 模式稳定性不高（辐射模式随激光器增益的增加而改变），
- 增益导引激光器很少用于光波系统中。



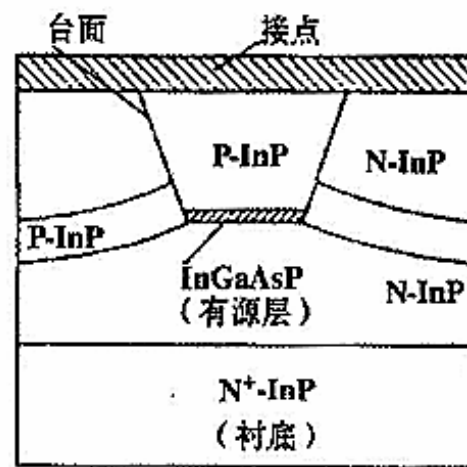
3.3.2 LD的结构

折射率导引半导体激光器

- 限制光的办法：在侧向引入折射率差，以达到限制光场的目的。
- 根据折射率差的大小，分为弱折射率导引半导体激光器和强折射率导引半导体激光器。



(a)



(b)



3.3.2 LD的结构

弱折射率导引半导体激光器 脊形波导半导体激光器:

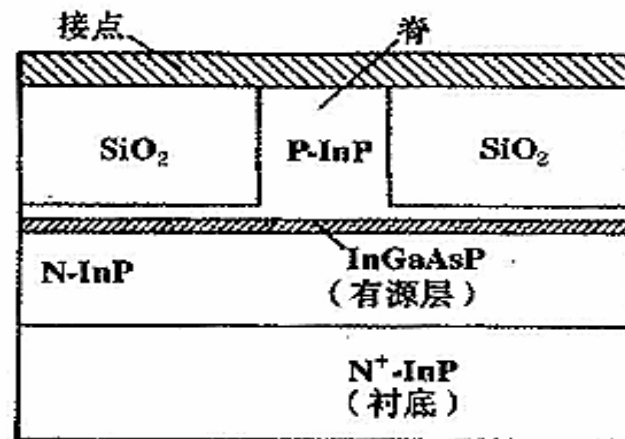
■ 弱折射率导引: $\Delta n_L \approx 0.01$;

■ 结构特点:

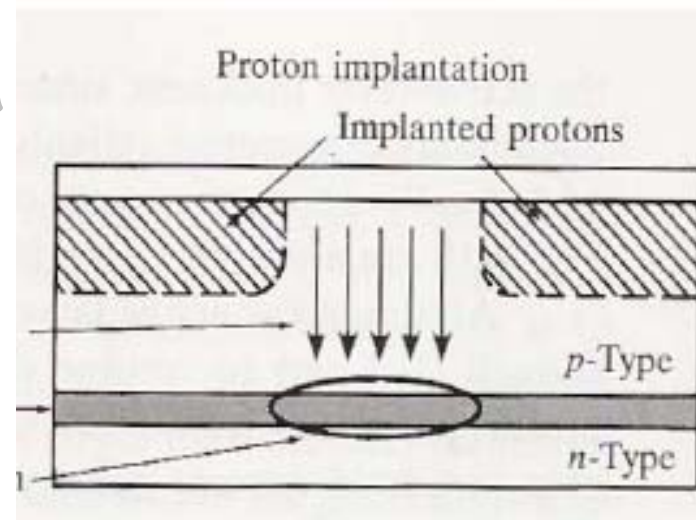
● 将P型的一部分腐蚀掉形成脊;

● 在脊的两边沉积 SiO_2 , 形成折射率波导 ($n_{\text{SiO}_2} < n_{\text{P-InP}}$), 将光限制在脊区。

● 优点: 结构简单,
制造工艺较简单。



(a)

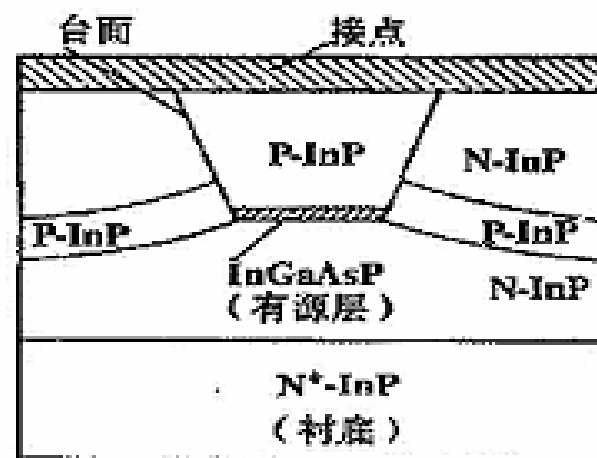


3.3.2 LD的结构

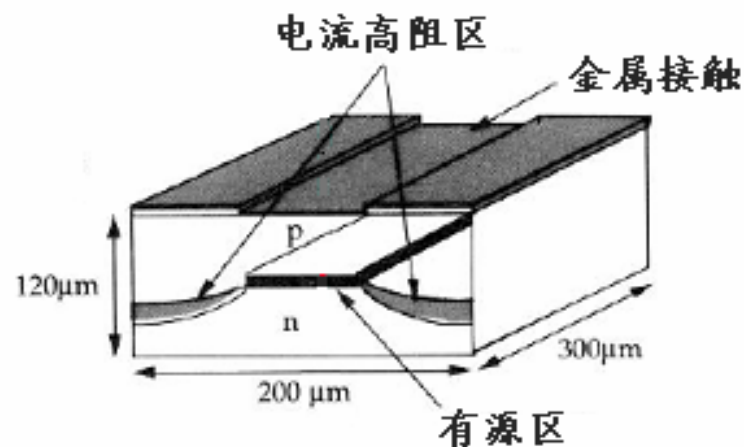
强折射率导引半导体激光器

掩埋异质结半导体激光器:

- 强折射率导引: $\Delta n_L = 0.2 \sim 0.3$;
- 结构特点: 有源区被若干低折射率层从各个方向掩埋。
- 优点:
 - ✓ 侧向折射率差较大, 对光场限制作用强;
 - ✓ 光空间分布稳定性高, 被大多数光波系统采用。



(b)



3.3.3 LD的工作特性

速率方程组

- 考虑到有源区光子数目 P 和电子数目 N 在相互作用过程中随时间变化的特点，建立速率方程组：

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP}{dt} = \frac{GP}{\text{①}} + \frac{R_{sp}}{\text{②}} - \frac{P}{\tau_p} \end{array} \right.$$

① 受激发射产生的光子数

② 自发发射产生的光子数

③ 光腔内光子的损耗

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dN}{dt} = \frac{I}{q} - \frac{N}{\tau_c} - GP \end{array} \right.$$

$\frac{I}{q}$ $\frac{N}{\tau_c}$ GP
(I)(II)(III)

(I) 由注入电流提供的电子数

(II) 自发发射和非辐射复合导致的电子数减少

(III) 受激发射消耗的电子数



3.3.3 LD的工作特性

在速率方程组中：

● 光增益 G ： $G = \Gamma \nu_g g$ (5.4.2)

∴ 增益系数 g 随 N 线性增大： $g = \sigma_g (N - N_T)$,

∴ 光增益 G 随 N 也线性增大。

● 光子寿命 τ_p —— 代表光腔内光子的损耗：

$$\tau_p^{-1} = \nu_g \alpha_c = \nu_g (\alpha_{mir} + \alpha_{int}) \quad (5.4.3)$$

● 载流子寿命 τ_c —— 包括自发辐射和非辐射复合导致的载流子（电子）损耗：

$$R_{sp} + R_{nr} = N / \tau_c \quad (5.1.15)$$



3.3.3 LD的工作特性—P-I特性

■ 激光器的转换效率用外微分量子效率 η_d 表示:

● η_d 定义: 在阈值电流以上, 每对复合载流子产生的光子数。

$$\eta_d = \frac{(P - P_{th}) / hf}{(I - I_{th}) / e} = \frac{\Delta P}{\Delta I} \frac{e}{hf}$$

● 解得激光器的输出光功率为:

$$P = P_{th} + \frac{\eta_d hf}{e} (I - I_{th})$$



3.3.3 LD的工作特性—P-I特性

■ 阈值电流 I_{th} 的确定:

P - I 曲线线性部分的反向延长线与电流轴的交点。

- 当 $I < I_{th}$ 时,激光器发出自发辐射光。
- 当 $I > I_{th}$ 时,激光器发出受激辐射光。

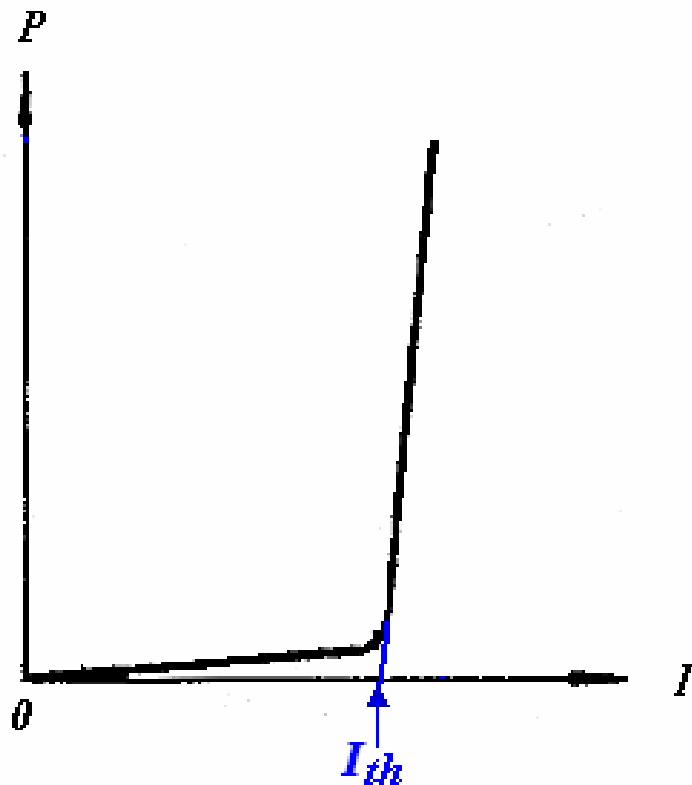
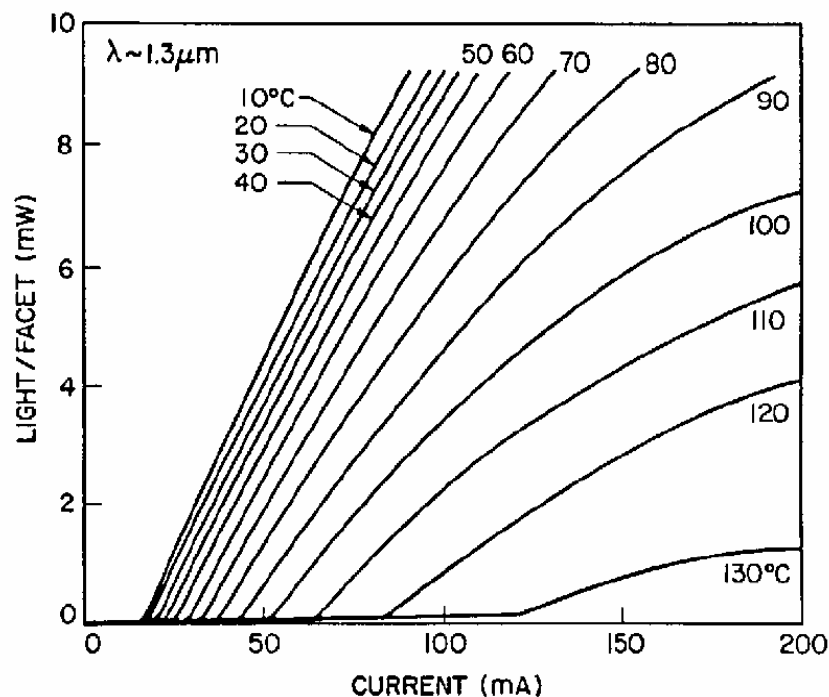


图 半导体激光器的P-I曲线

3.3.3 LD的工作特性—P-I特性

- 温度升高时性能下降，
阈值电流随温度按指数
增长。



3.3.3 LD的工作特性—P-I特性

温度对LD的影响

- 阈值电流随温度按指数增长:

$$I_{th}(T) = I_0 \exp(T/T_0)$$

- 特征温度 T_0 代表阈值电流 I_{th} 对温度的灵敏度。
- 对InGaAsP 激光器, $T_0: 50 \sim 70$ K,
对温度比较敏感, 需内装热电致冷器。
- 对GaAs 激光器, $T_0 > 120$ K。



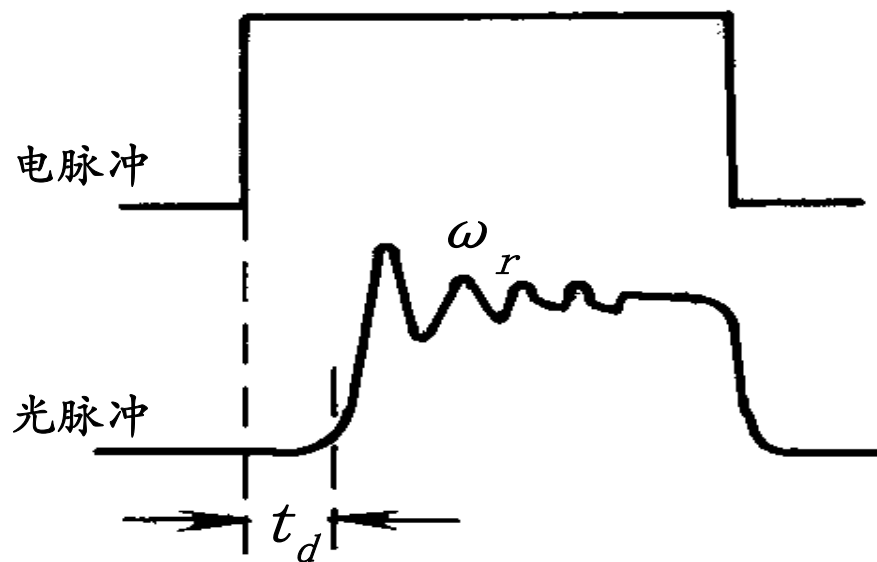
3.3.3 LD的工作特性－调制特性

■ 高速调制下出现的现象：

- 电光延迟：输出光脉冲和注入电流脉冲之间存在一个初始延迟时间。
- 张弛振荡：当电流脉冲注入激光器后，输出光脉冲会出现幅度逐渐衰减的振荡。
- 自脉动现象：当注入电流达到某个范围时，输出光脉冲出现持续等幅的高频振荡。



3.3.3 LD的工作特性－调制特性



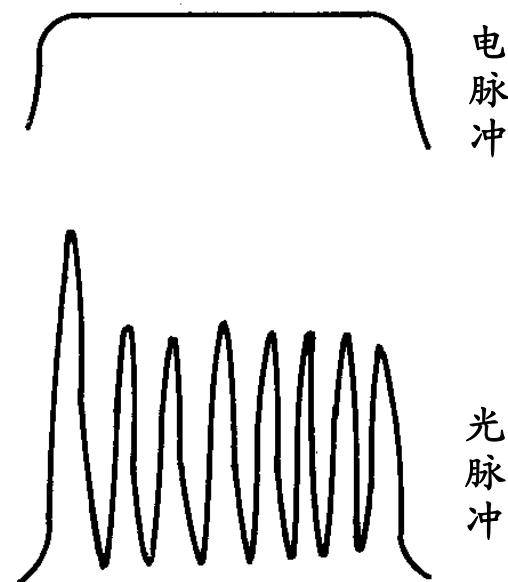
电光延迟和张弛振荡现象



3.3.3 LD的工作特性－调制特性

■ 自脉动现象:

- 自脉动现象往往和P-I曲线的非线性有关。



激光器自脉动现象

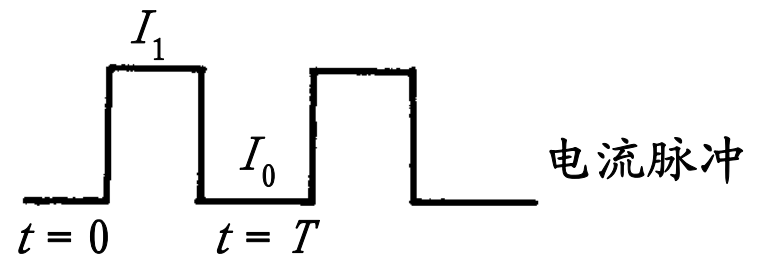


3.3.3 LD的工作特性－调制特性

●调制速率低时，结发热效应现象更明显。

●结发热效应：

➡定义：由于调制电流的作用，引起激光器结区温度的变化，使输出光脉冲的形状发生变化。



$$\begin{array}{l} T_{PN\text{结}} \uparrow \rightarrow I_{th} \uparrow \rightarrow P_{out} \downarrow \rightarrow A \downarrow \\ T_{PN\text{结}} \downarrow \rightarrow I_{th} \downarrow \rightarrow P_{out} \uparrow \rightarrow A \uparrow \end{array}$$

结发热现象



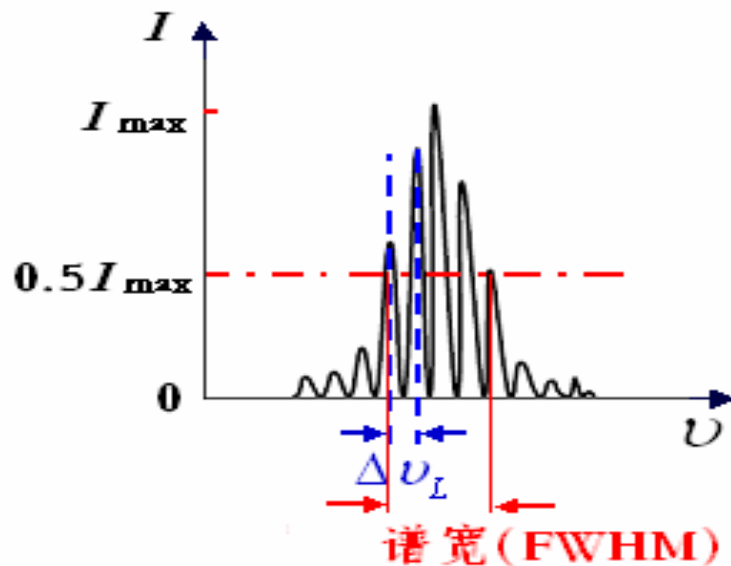
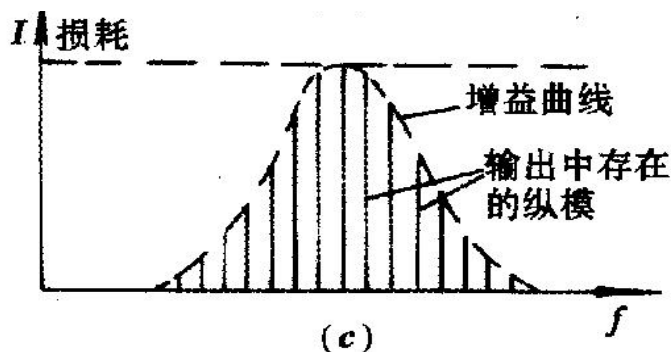
3.3.3 LD的工作特性—激光模式

■ 激光腔的振荡模式

● LD的纵模

● LD的横模

LD的纵模——激光腔只支持频率满足 $\nu_m = mc/(2nL)$ 的模式



3.3.3 LD的工作特性－激光模式

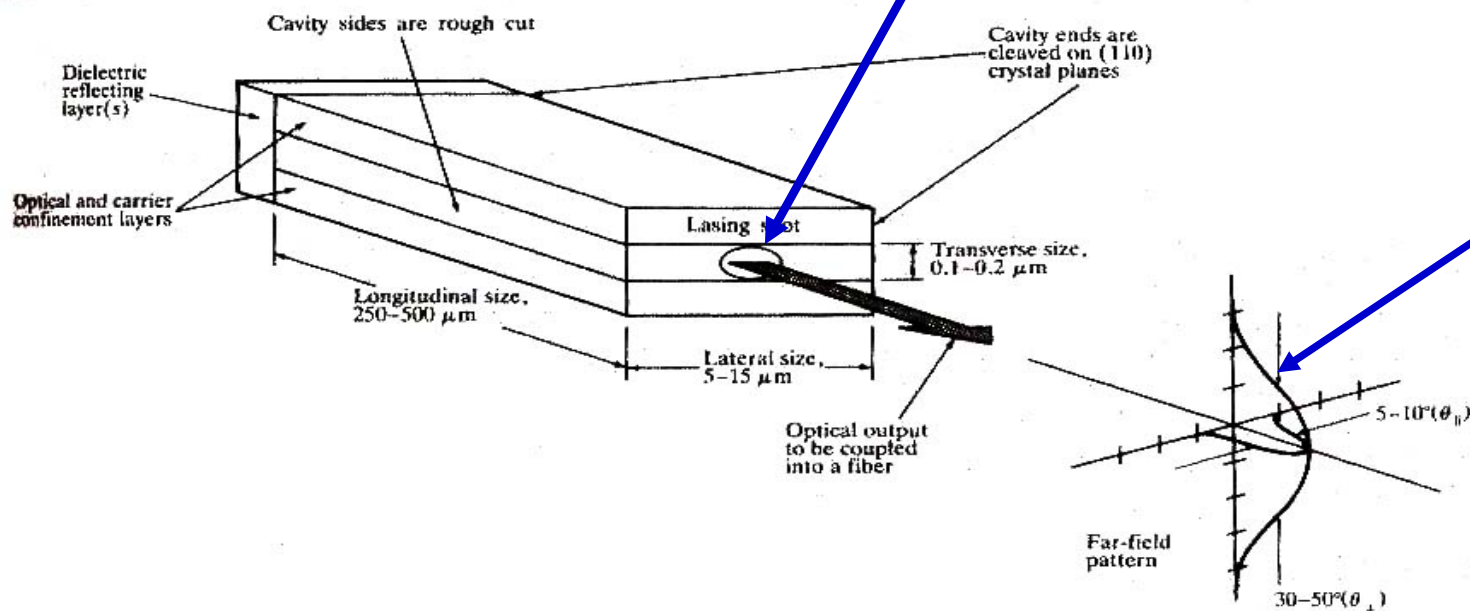
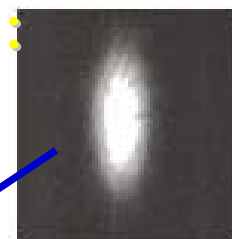
LD的横模

- ❖ 是一种稳定的电磁场分布;
- ❖ 表现为激光器输出能量在空间上的稳定的分布。
 - 近场分布
 - 远场分布

近场分布:



远场分布



3.3.3 LD的工作特性－激光模式

■ LD基模的近场和远场分布均可拟合为高斯分布。

■ 近场分布 —— 通常为横椭圆形状

■ 远场分布 —— 是激光器发散角的一种度量，对激光与光纤的耦合有重要影响。

❖ 角宽度 θ_T 和 θ_L 定义为相应角分布的FWHM

$\theta_T : 40^\circ \square 50^\circ$

$\theta_L : 30^\circ \square 40^\circ$

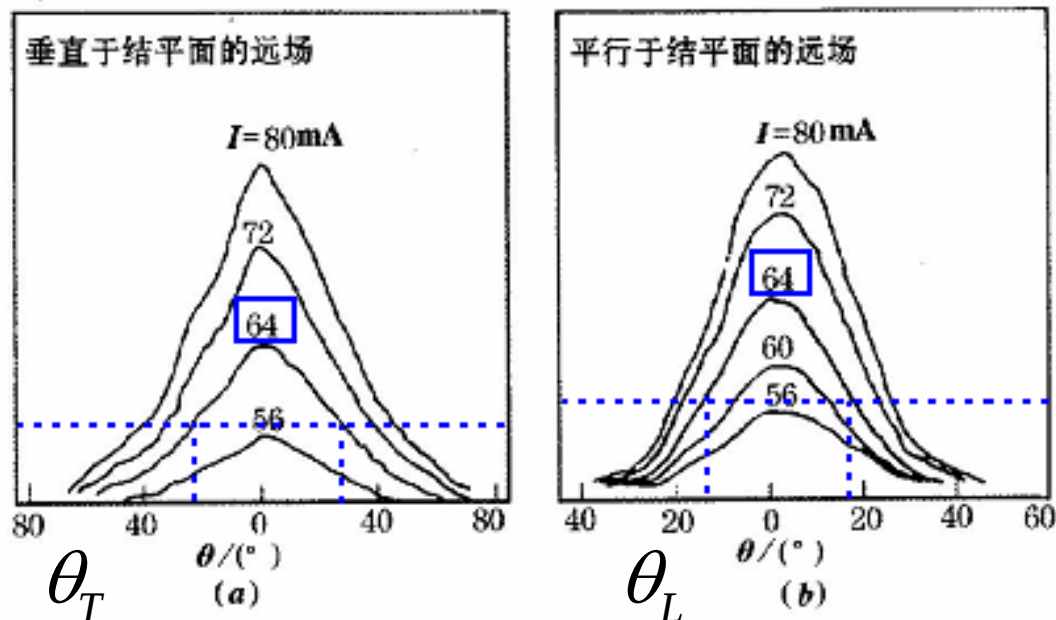
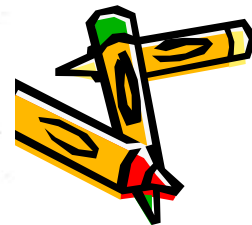
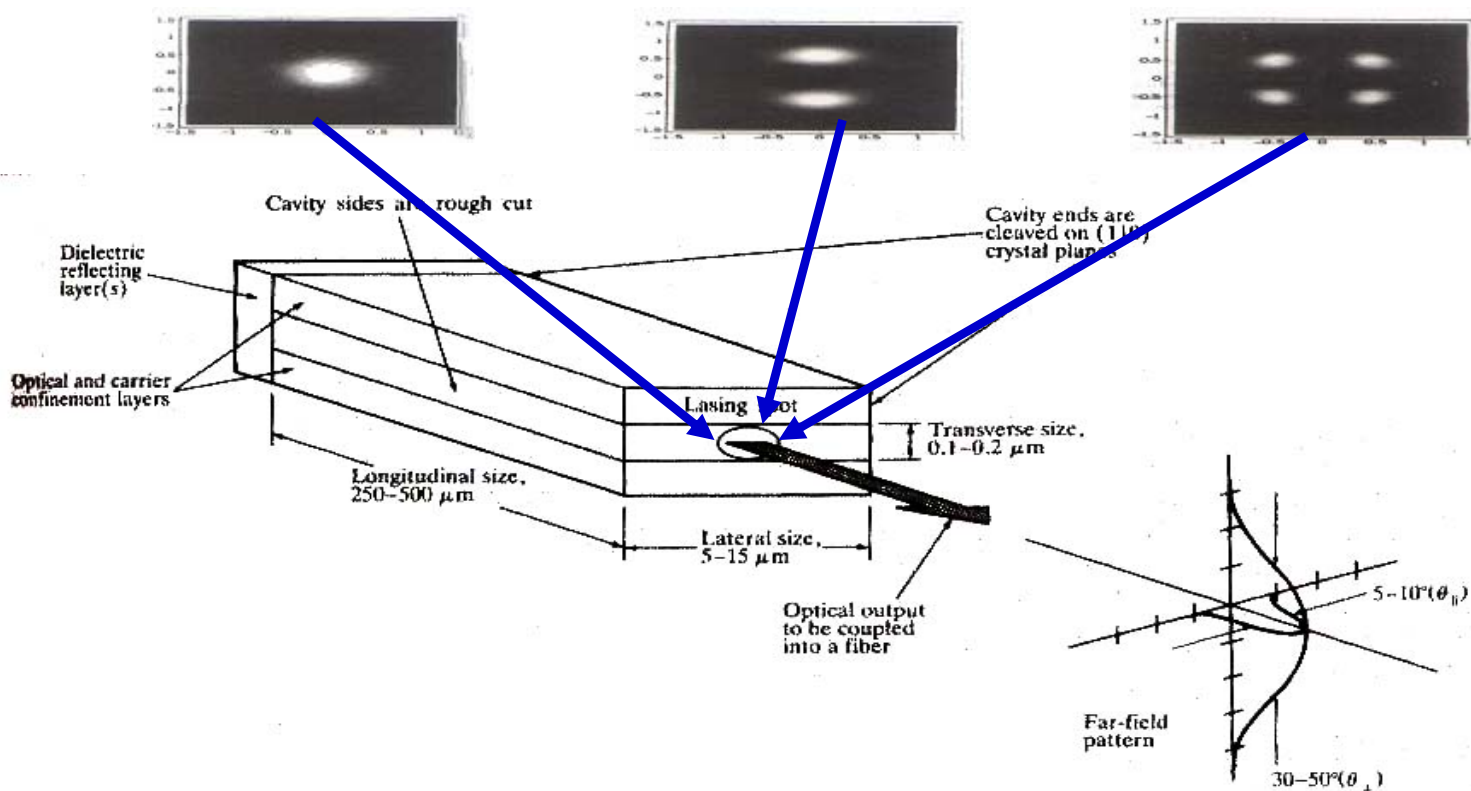


图 5.17 BH 激光器的远场分布
(a) 横向分布; (b) 侧向分布。

3.3.4 单纵模半导体激光器

提高LD输出光的性能:

1. 从横模的角度——使LD工作于单横模发光
实现办法：通过控制有源层的厚度和宽度

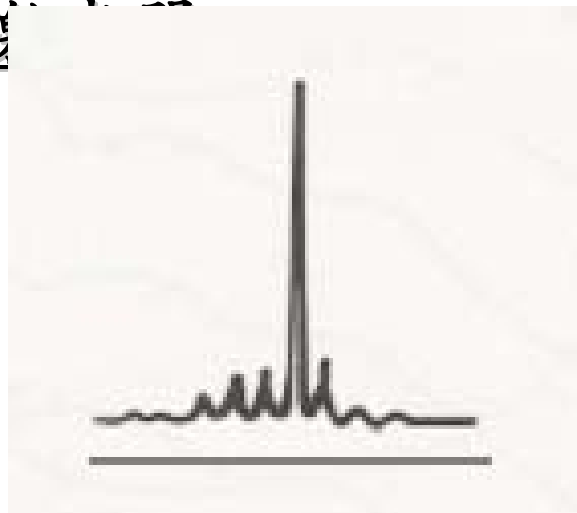
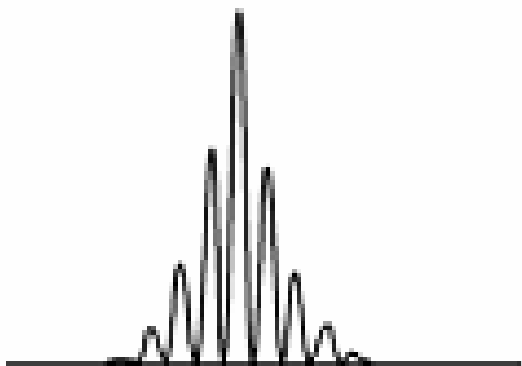


3.3.4 单纵模半导体激光器

■ 提高LD的性能:

2. 从纵模的角度——使LD工作于单纵模发光

实现办法: 设计窄谱线单纵模激光器



✓ 多纵模激光器: 输出谱宽较宽

✓ 单纵模激光器: 输出谱宽较窄

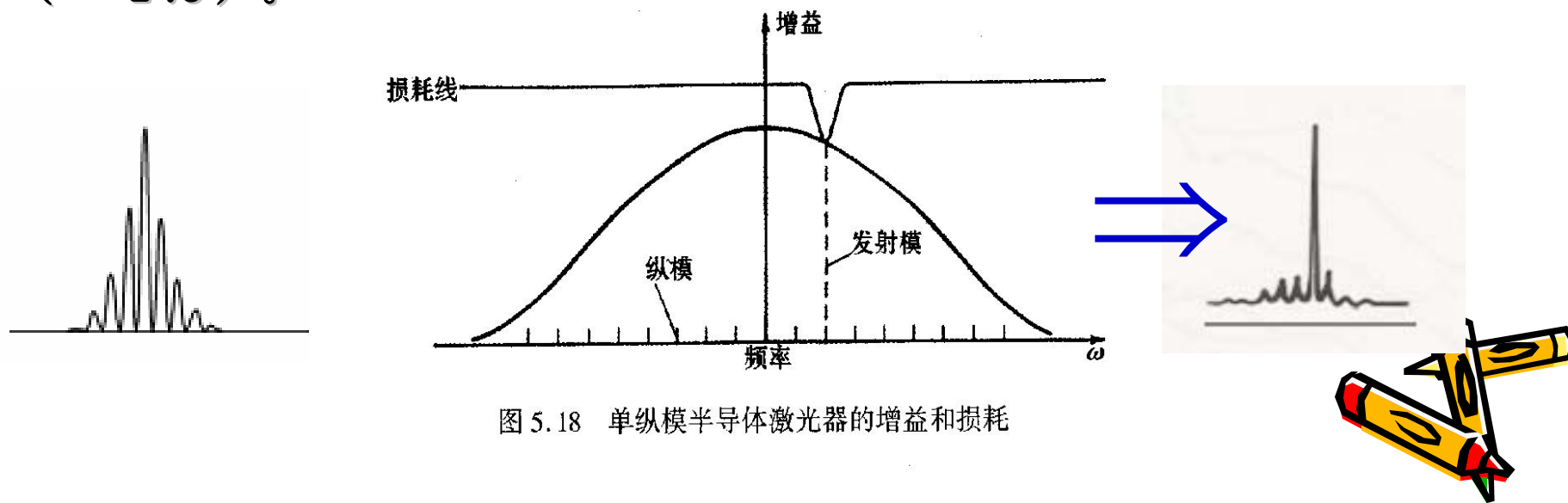
✓ 设计SLM激光器可使谱宽进一步变窄



3.3.4 单纵模半导体激光器

SLM激光器设计的基本思想:

- 是不同纵模具有不同的腔损耗。
- 具有最低光腔损耗的纵模最先达到阈值并成为支配模式。
- 其他邻模由于高损耗而被截止。
- 邻模携带的功率在总的辐射功率中只占很小一部分 ($< 1\%$)。



3.3.4 单纵模半导体激光器

模式抑制因子 (MSR)

- SLM激光器的性能一般用模式抑制因子 (MSR) 表征, 定义为:

$$MSR = \text{主模功率} / \text{主要边模的功率} = P_{mm} / P_{sm}$$

- 通常, SLM激光器的模式抑制因子 (MSR) 应超过1000 (或者30 dB)。

$$MSR = P_{mm} / P_{sm} = 10 \lg(1000) \text{ [dB]} = 30 \text{ [dB]}$$



3.3.4 单纵模半导体激光器

SLM 半导体激光器的结构:

● 分布反馈 (DFB) 激光器

● 耦合腔激光器



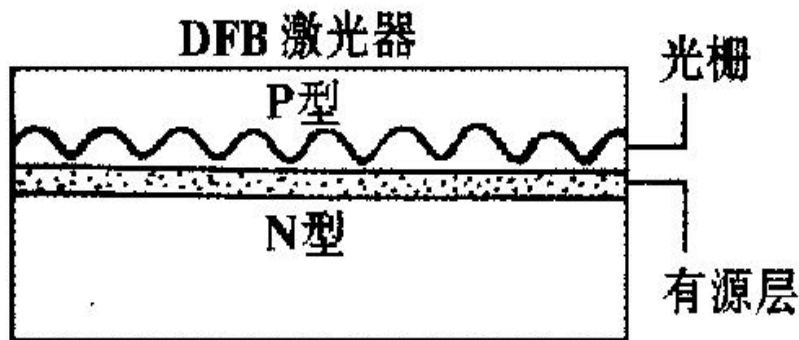
3.3.4 单纵模半导体激光器

分布反馈 (DFB) 激光器

- 反馈不位于端面上，而是分布在整个光腔长度上，通过折射率周期扰动的内建光栅产生布拉格散射，并使正向和反向传播的波相互耦合。

● DFB的模式选择条件为布拉格条件：

—— 只有当波长满足 $\Lambda = m(\lambda_B / 2\bar{n})$ 耦合才发生。



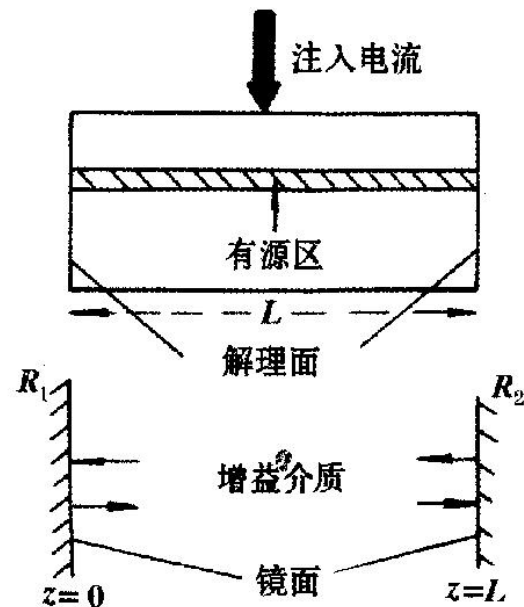
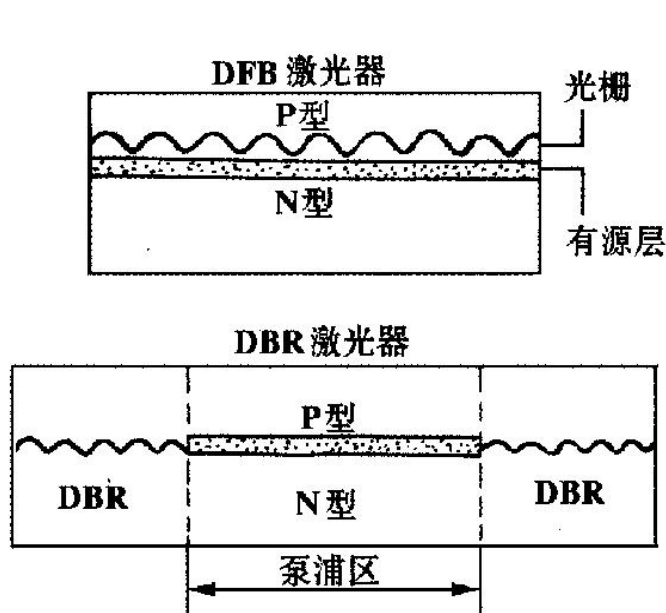
3.3.4 单纵模半导体激光器

DFB激光器:

—— 反馈发生在整个光腔有源区长度上。

分布布拉格反射 (DBR) 激光器:

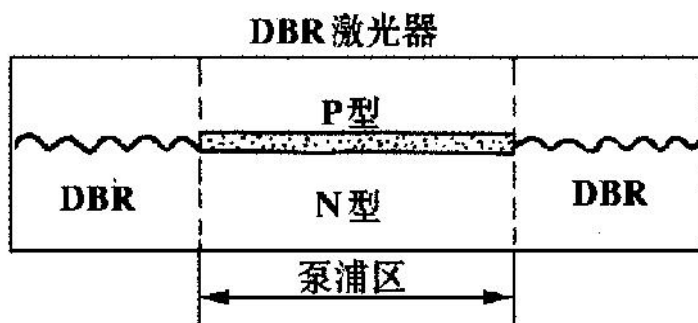
—— 反馈不发生在有源区内, 而是在激光器末端制作布拉格反射镜。



3.3.4 单纵模半导体激光器

分布布拉格反射 (DBR) 激光器:

- DBR的工作机理: DBR末端区域起到镜子的作用, 该镜子对波长等于 λ_B 的纵模反射率最大, 因此, 光腔损耗对最靠近 λ_B 的纵模最小。



耦合腔半导体激光器

- 单纵模工作通过将光耦合到外腔来实现。
- 工作机理：一部分反射光从外腔反馈回激光光腔，因为在外腔发生了相移，仅当那些波长几乎与一个外光腔纵模的波长一致的激光模式才能发生同相反馈。

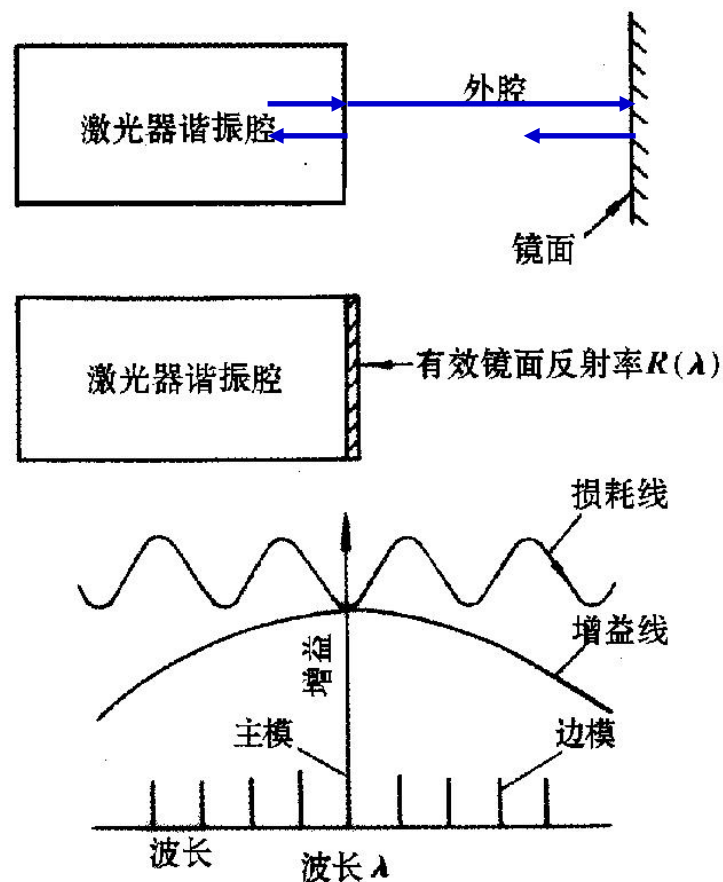


图 5.20 耦合腔中的纵模选择

3.3.4 单纵模半导体激光器

- 面对外光腔的激光器的端面的有效折射率变成与波长相关;
- 外腔引入的相位使端反射镜的有效反射率随波长变化, 导致激光腔损耗的周期性变化;
- 最靠近增益峰值, 并具有最低损耗的纵模成为主模。

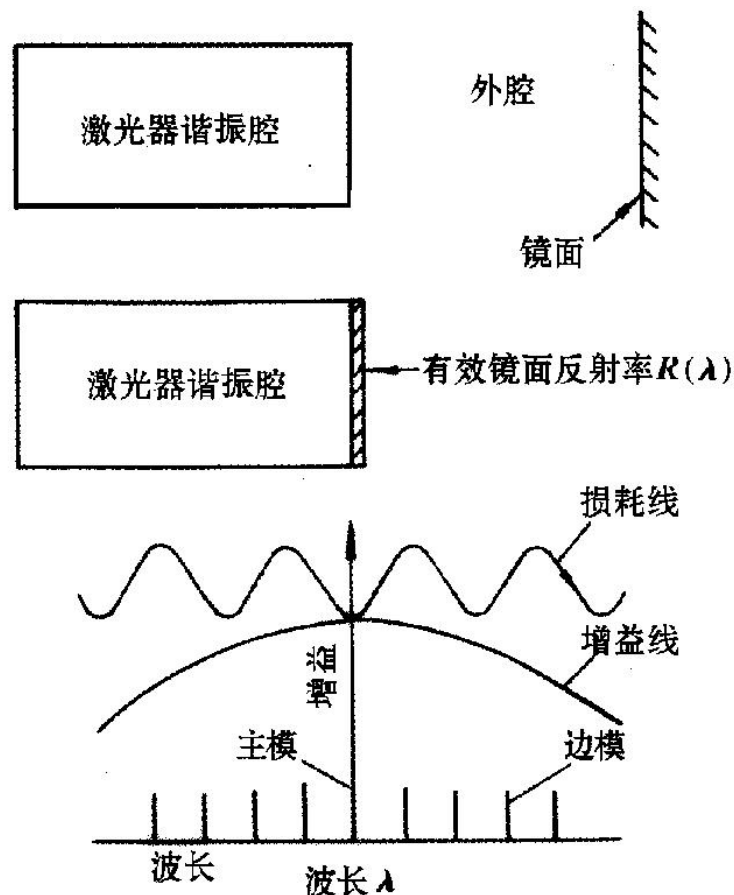
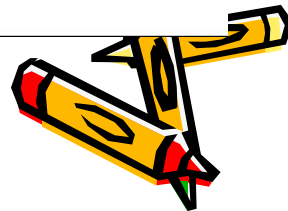


图 5.20 耦合腔中的纵模选择

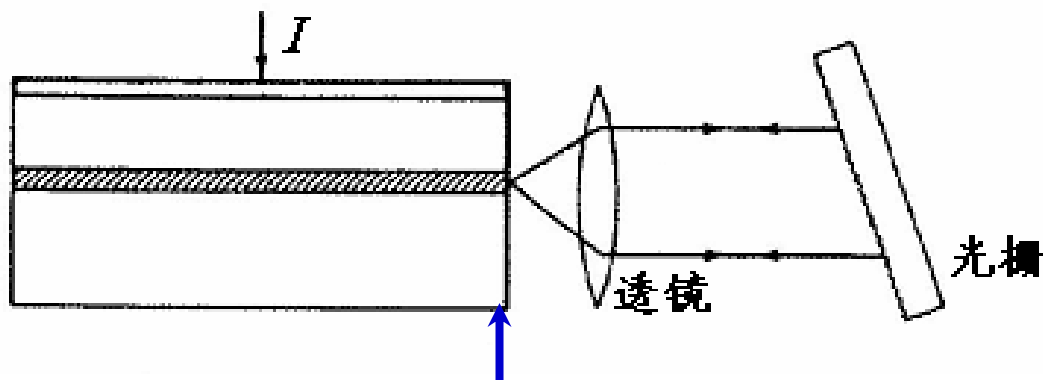


3.3.4 单纵模半导体激光器

耦合腔半导体激光器的三种方案

■ 1. 外腔半导体激光器:

❖ 制造方法：将半导体激光器发的光耦合到一个外光栅。



❖ 为提供强的耦合，可采用增透膜降低面向光栅的解理面的自然反射率；

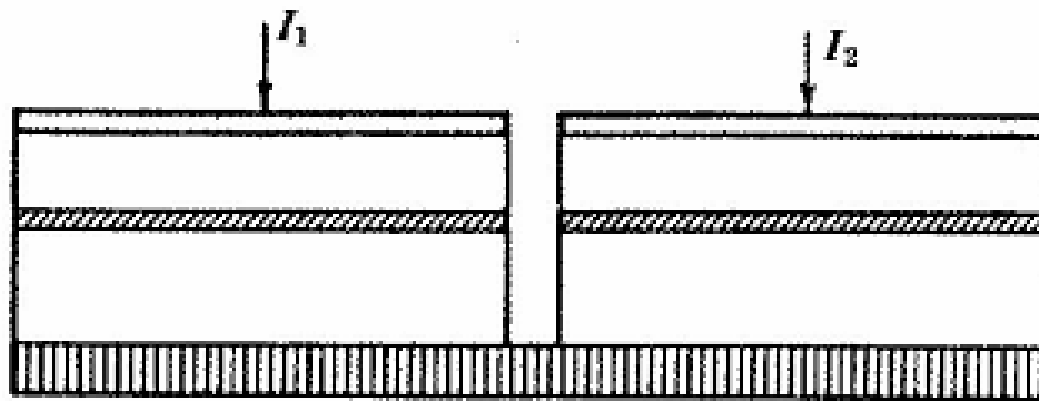
❖ 可通过旋转光栅在宽范围调谐，作为波长可调谐光源。



3.3.4 单纵模半导体激光器

■ 2. C³激光器（解理耦合腔激光器）

- ❖ 制造方法：通过将一个常规多模激光器在中间解理，把激光器分为长度大致相等的两部分，并由窄的空气间隙（ $\sim 1\mu\text{m}$ ）分开。



- ❖ 通过调节注入到模式控制器的电流，可实现波长调谐。
- ❖ 目前C³激光器尚未用于实际系统。

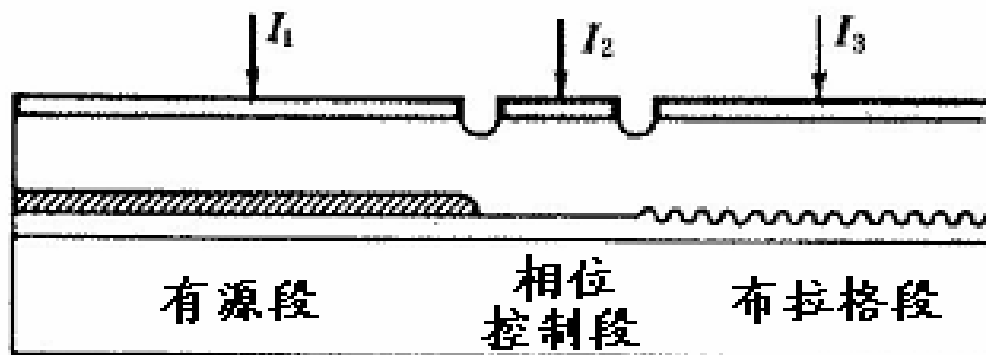


3.3.4 单纵模半导体激光器

3. 多段DFB激光器

❖ 结构：由三段组成：

—— 有源段、相位控制段和布拉格段。



❖ 布拉格段：通过改变注入电流的大小，改变布拉格段的折射率，从而改变布拉格波长 $\lambda_B = 2\bar{n}\Lambda$ 。

❖ 相位控制段：注入到相位控制段的电流导致折射率变化，改变从DFB反馈的相位。



3.4 光电二极管

- 光检测器是光接收机的核心。
- 光检测器的功能：把光信号转换为电信号。
- 常用光检测器：
 - PN 光电二极管
 - PIN 光电二极管
 - 雪崩光电二极管 (APD)
- 工作原理：
 - 当入射光作用在PN结时，光子能量大于或等于带隙能量时，价带的电子通过受激吸收跃迁至导带，形成电子 - 空穴对。当电路闭合时，这些自由载流子的定向流动形成（光）电流。
 - 施加反向偏压可以增强光电流。



3.4.1 光电二极管结构原理 – PN光电二极管

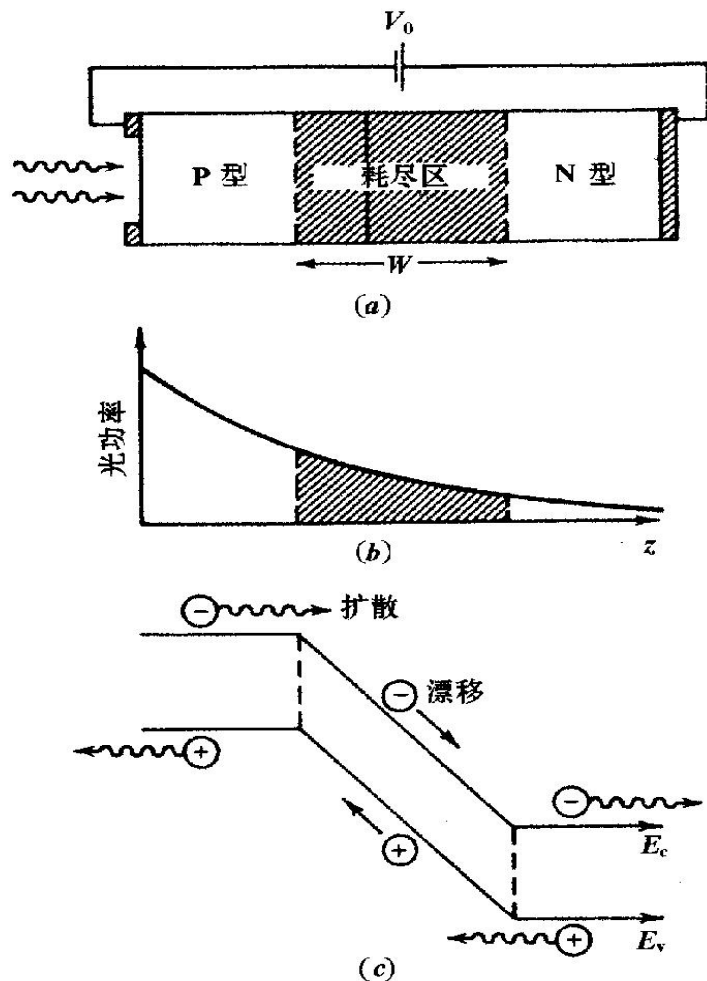


图 6.4 PN 光电二极管的工作原理

(a)反偏 PN 结及其耗尽区；(b)PN 结内的光功率变化；
(c)能带图及由耗尽区内外漂移和扩散导致的载流子运动。

■ PN光电二极管：

● **工作原理：**当有光照射 **PN** 结的一边，**P** 侧通过吸收光产生电子 - 空穴对，并在内建电场作用下，分别漂移到 **N** 侧和 **P** 侧，产生比例与照射光功率的电流流动。

● 功率在势垒区外也被吸收，只有势垒区内被吸收的光才能产生光生电流。



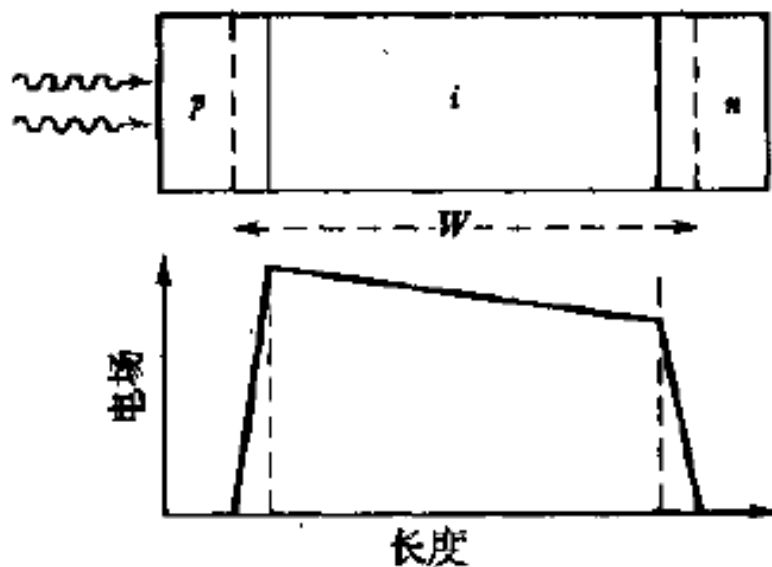
3.4.1 光电二极管结构原理 – PN光电二极管

- **限制因素**：光生电流中的扩散分量，光信号在势垒区外吸收所致。p区光生电子和n区光生空穴的扩散相当慢，因此扩散电流分量引起时间响应畸变。
- **克服方法**：通过减小p区和n区厚度减小扩散时间和吸收电能来增大势垒区宽度。
- 有两种改进方案已在光波系统中得到广泛应用：
 - PIN光电二极管
 - 雪崩光电二极管（APD, Avalanche Photodiode）



3.4.1 光电二极管结构原理 – PIN光电二极管

- **结构：**在PN结中间夹一层掺杂浓度很低的本征半导体（**I**层）。
- **工作原理：**由于**I**层很厚具有较高电阻，电压基本上落在该区，使势垒区宽度增加，减小扩散运动影响，提高了响应速度。



3.4.1 光电二极管结构原理 — PIN光电二极管

- 采用双异质结设计能显著提高二极管的性能。
- 带隙的选取时光仅在I吸收。

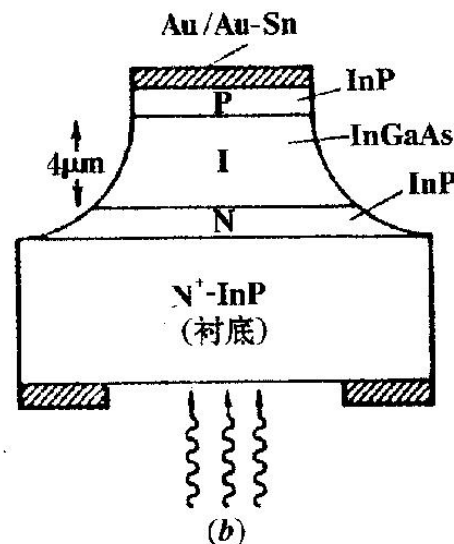
★ 对于InP: $E_g = 1.35\text{eV}$

$$E_g(\text{eV}) = h\nu/q = hc/(q\lambda)$$

$$\Rightarrow \lambda = hc/(qE_g) = 1.24/E_g = 1.24/1.35 \approx 0.9\ \mu\text{m}$$

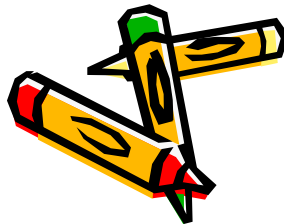
- ★ 对于 $\lambda > 0.9\ \mu\text{m}$ 的光，InP是透明的；
- ★ 同理，InGaAs的截止波长: $(\lambda < \lambda_c)$

$$\lambda_c = 1.24/E_g = 1.24/0.75 \approx 1.65\ \mu\text{m}$$



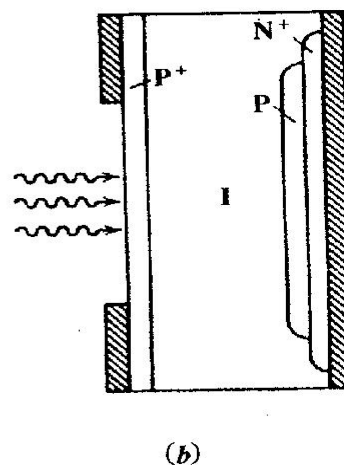
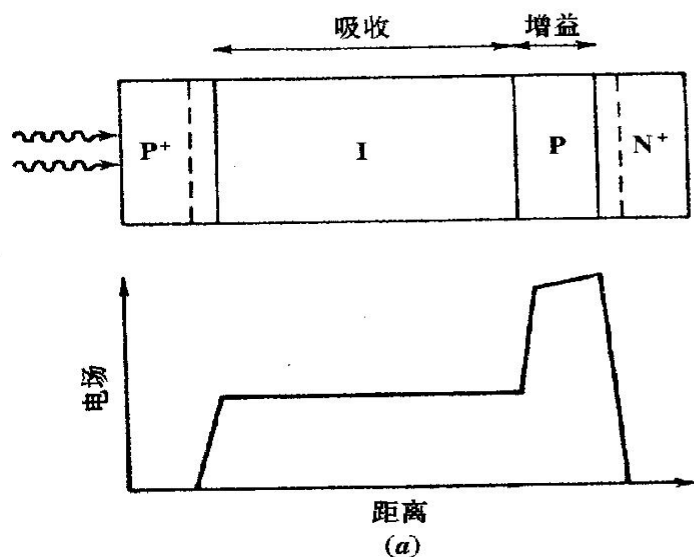
3.4.1 光电二极管结构原理 — PIN光电二极管

- 因此在中间InGaAs层，在 $1.3\ \mu m \sim 1.65\ \mu m$ 范围内有很强的吸收。
- 由于光子仅在耗尽区内吸收，完全消除了扩散分量。采用几微米厚的InGaAs，量子效率可接近100%。
- 长波长波段： InGaAs
- 短波长波段： Si

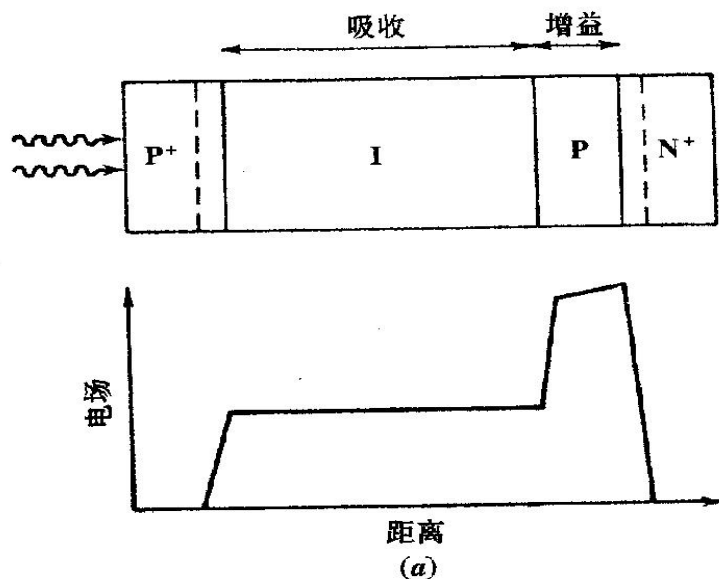


3.4.1 光电二极管结构原理 — APD光电二极管

- 为了获得更高响应度，采用**APD**光电二极管。
- **工作原理**：当光入射到**PN**结时，光子被吸收产生的一次电子 - 空穴对在高电场区获得足够能量而加速运动，使晶格原子电离，产生的二次电子-空穴对再和原子碰撞。如此多次碰撞，产生连锁反应，致使载流子雪崩式倍增。



3.4.1 光电二极管结构原理 — APD光电二极管



■ 结构:

对 p 区、 n 区进行了重掺杂，并在 I 区和 n 区之间引入另一层 p 区作为碰撞电离区，即增益区，以产生二次电子-空穴对。

- I 区：耗尽区，产生一次电子-空穴对。
- P 区：增益区，通过雪崩倍增效应，实现光电流放大。



3.4.2 工作特性和参数

■ **光电流** I_P ：与入射光功率 P_{in} 成比例。

$$I_P = RP_{in}$$

★ **量子效率** η ：能转换为光电流的电子数和入射总光子数之比。

$$\eta = \frac{I_P / q}{P_{in} / (h\nu)}$$

★ **响应度** R ：

$$\left. \begin{array}{l} R = I_P / P_{in} \quad (1) \\ I_P / P_{in} = \eta q / (h\nu) \end{array} \right\} \begin{array}{l} R(A/W) = \eta q / (h\nu) = \eta \lambda q / (hc) \\ = \eta \lambda (\mu m) / 1.24 \end{array}$$



3.4.2 工作特性和参数

响应度 R :

✴ 从功率角度:

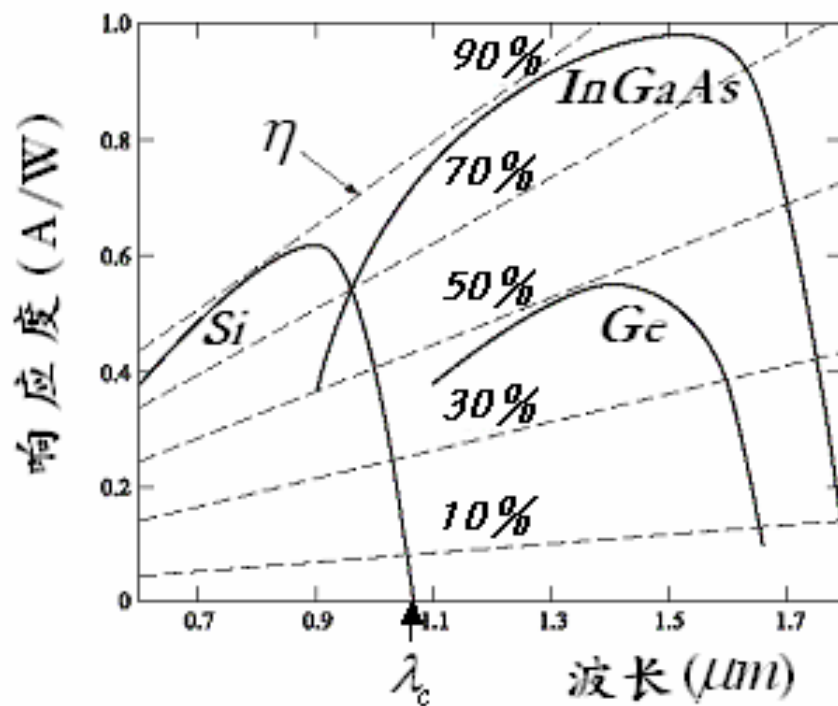
$$R = I_P / P_{in}$$

✴ 从波长角度:

$$R = \eta \lambda (\mu m) / 1.24$$

✴ 响应度随波长增加而增大;

✴ 但当 $h\nu < E_g$ 时, 上式失效, $\eta \rightarrow 0$



3.4.2 工作特性和参数

量子效率 η ：

✴ 透射光功率： $P_{tr} = \exp(-aW)P_{in}$

✴ 吸收光功率：

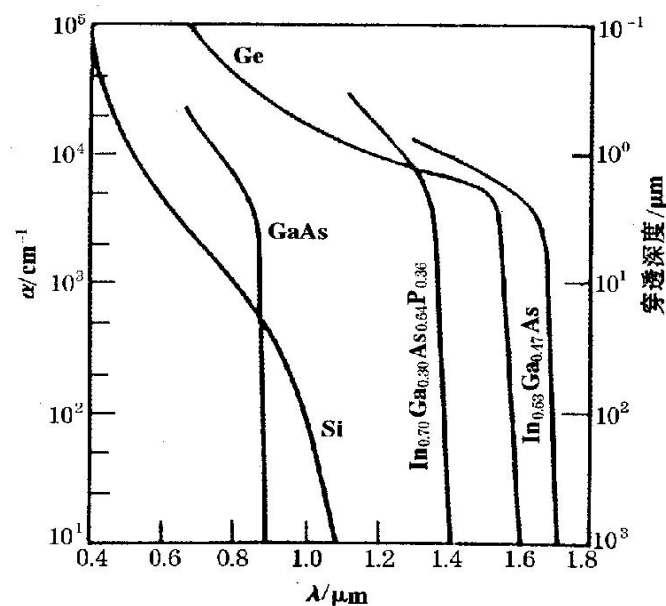
$$P_{ab} = P_{in} - P_{tr} = [1 - \exp(-aW)]P_{in}$$

✴ 量子效率：

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{in}} = 1 - \exp(-aW)$$

✴ $W \uparrow$, $\eta \uparrow$; 若 $aW \gg 1$, 则 $\eta \rightarrow 1$ 。

✴ 原因： $w \uparrow$ ，光子入射该区域可能性越大，被吸收产生光电流的概率就越高。



3.4.2 工作特性和参数

■ APD的倍增系数及噪声：

● 倍增系数 M ： $M = \frac{\text{输出光电流}}{\text{一次光生电流}} = \frac{I_p}{I_0}$

● APD的响应度比PIN提高了 M 倍。

$$R_{APD} = MR = M\eta q / h\nu = M\eta \lambda (\mu m) / 1.24$$

● APD的噪声：包括量子噪声、暗电流噪声和倍增噪声。

➡ 倍增效应对噪声电流也被放大了。

➡ 雪崩效应的随机性引起噪声增加的倍数为 $\langle M \rangle^x$ 。

$$\langle i^2 \rangle = 2qI_0 \langle M \rangle^{2+x} B$$

➡ APD的 x 值一般在 $0.3 \sim 1$ 之间。 $x=0$ ， $\langle M \rangle^x = 1$ ，是理想情况。



3.4.2 工作特性和参数

● **响应带宽**：光生电流下降**3 dB**的频率响应带宽

$$\Delta f = 0.44v_s / W$$

W 为耗尽层宽度， v_s 为载流子渡越速度。

■ 本征响应带宽与倍增系数也有关系。

■ **APD传输函数**为 $H(\omega) = \frac{M(\omega)}{M(0)} = \frac{1}{[1 + (\omega\tau_e M_0)^2]^{1/2}}$

• $M_0 = M(0)$, 为APD低频倍增系数； τ_e 为等效渡越时间

■ 在空穴和电子的碰撞电离系数比值 $\alpha_k / \alpha_e < 1$ 情况下，

3dB电带宽为 $\Delta f = (2\pi\tau_e M_0)^{-1}$

电带宽与倍增系数有着矛盾关系。

■ 对Si, $\alpha_k / \alpha_e = 0.22$, 工作于 $0.8 \mu\text{m}$ 时有很高的性能。



3.4.3 光电二极管一般性能和应用

■ PIN二极管特点:

- 结构简单, 可靠性高。
电压低, 使用方便。

- 量子效率高。

- 噪声小。

- 带宽较高。

★ APD二极管特点:

- ★ 灵敏度高。

- ★ 高增益。

- ★ 高电压, 结构复杂。

- ★ 噪声大。



3.4.3 光电二极管一般性能和应用

■ 使用场合:

● **PIN**: 广泛应用于光纤通信系统。在灵敏度要求不高的场合，一般都采用**PIN**。

● **APD**: 在光接收机灵敏度要求较高的场合，采用**APD**。

■ 如：小信号测量。



3.4.3 光电二极管一般性能和应用

- **Si-PIN/APD**用于短波长($0.85\ \mu\text{m}$)光纤通信系统。
- **InGaAs-PIN**用于长波长($1.31\ \mu\text{m}/1.55\ \mu\text{m}$)系统。
- 把**InGaAs-PIN**和使用场效应管 (**FET**) 的前置放大器集成, 构成**FET-PIN**接收组件, 可以进一步提高灵敏度, 改善器件的性能。



3.5 光无源器件

■ 光无源器件：

- 光纤连接器和接头
- 光耦合器
- 光波分复用器
- 光隔离器与光环行器
- 光调制器
- 光开关



3.5 光无源器件

■ 对光无源器件的普遍要求：

- 插入损耗小、反射损耗大。
- 工作温度范围宽。
- 性能稳定、寿命长。
- 体积小。
- 价格便宜。
- 便于集成。



3.5.1 连接器和接头

- **连接器**是实现光纤与光纤之间可拆卸连接的器件。（活动连接）
 - 主要用于光纤线路与光发射机输出或光接收机输入之间，或光纤线路与其他光无源器件之间的连接。
- **接头**是实现光纤与光纤之间的永久性连接。（固定连接）
 - 主要用于光纤线路的构成。



3.5.1 连接器和接头

- 对于活动连接，光纤固定在插针的微孔内，两支带光纤的插针用套管对中实现连接。
- 对于FC型连接器，光纤端面为平面。
- 对于PC型，要求光纤端面为球面或斜面。

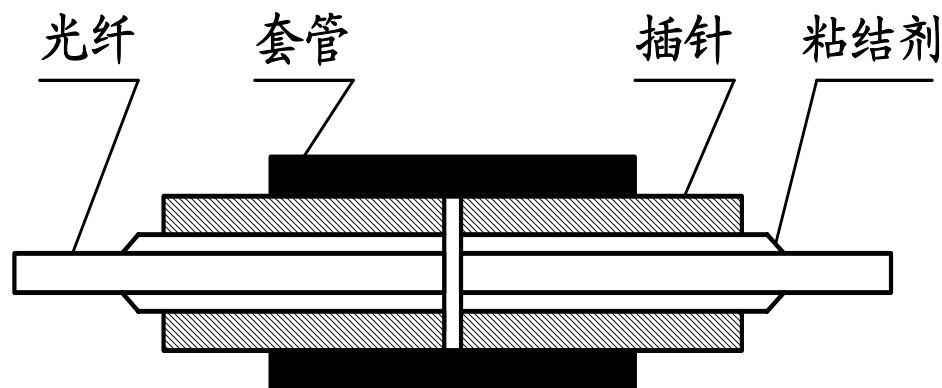


图 套管结构连接器简图



3.5.1 连接器和接头

■ 光纤固定接头的方法：

- 熔接法：使光纤端面加热并熔接在一起。
- V型槽法：采用V型槽或几根平行棒之间的间隙时光纤准直连接。



3.5.2 光耦合器

■ 耦合器功能:

把一个输入光信号分配给多个输出，或把多个输入的光信号组合成一个输出。

■ 耦合器对线路影响:

带来附加插入损耗、发射、串扰噪声。

■ 耦合器类型:

● T形耦合器

● 星形耦合器

● 定向耦合器

● 波分复用器/解复用器



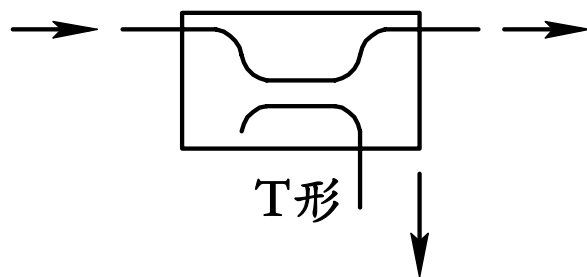
3.5.2 光耦合器

● T形耦合器:

➡ 2×2 的三端耦合器。

➡ 功能：把一根光纤输入的光信号按一定比例分配给两根光纤，或把两根光纤输入的光信号组合在一起，输入一根光纤。

➡ 用作不同分路比的功率分配器或功率组合器。



(a)



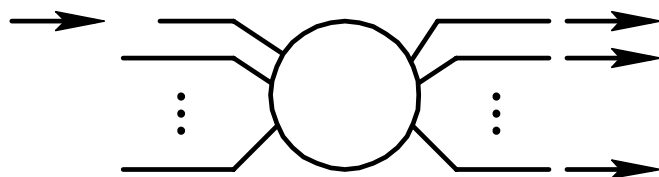
3.5.2 光耦合器

星形耦合器:

➡ $n \times m$ 耦合器。

➡ 功能：把 n 根光纤输入的光功率组合在一起，均匀地分配给 m 根光纤。

➡ 常用作多端功率分配器。



星形

(b)



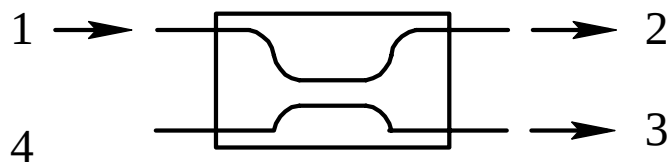
3.5.2 光耦合器

● 定向耦合器:

➡ 2×2 的 3 端或 4 端耦合器。

➡ 功能：分别取出光纤中向不同方向传输的光信号。
例如：光信号从端 1 传输到端 2，一部分由端 3 输出，端 4 无输出。

➡ 可用作分路器，不能用作合路器。



定向

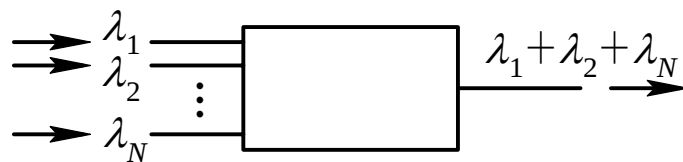
(c)



3.5.2 光耦合器

● 波分复用器/解复用器:

- ➡ 与波长相关的耦合器称为波分复用器/解复用器。
- ➡ 波分复用器功能：把多个不同波长的光信号组合在一起，输入到一根光纤。
- ➡ 解复用器功能：把一根光纤输出的多个不同波长的光信号，分配给不同的接收机。



波分

(d)

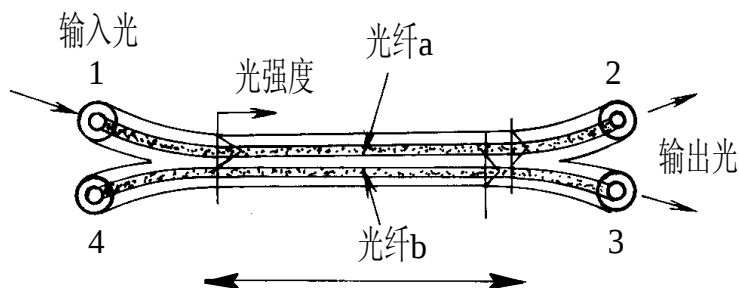


3.5.2 光耦合器

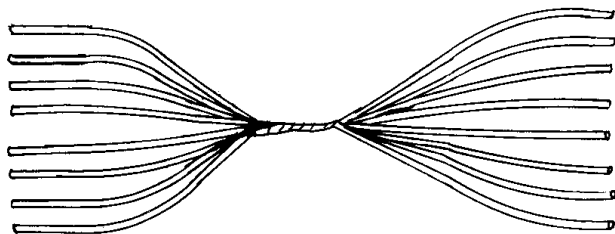
■ 光耦合器的基本结构:

● 光纤型、微器件型、波导型

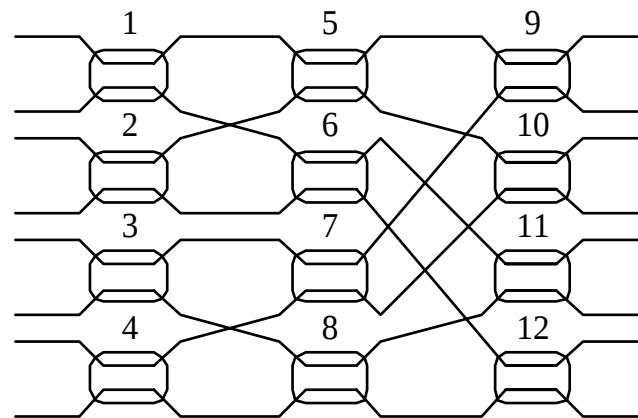
■ 光纤型：把两根或多根光纤排列，用熔拉双锥技术制作各种器件。



(a)

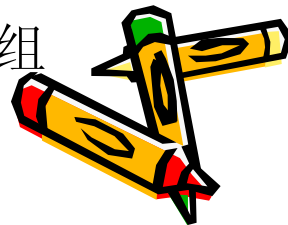


(b)



(c)

(a)定向耦合器； (b) 8×8 星形耦合器； (c) 由12个 2×2 耦合器组成的 8×8 星形耦合器



3.5.2 光耦合器

根据耦合理论得到

$$P_a = \cos^2(C_\lambda L)$$

$$P_b = \sin^2(C_\lambda L)$$

光纤波分解复用器原理：对于波长 λ_1 的信号，当光纤a的输出最大时，光纤b的输出为0；对于 λ_2 信号，当光纤a的输出为0时，b的输出最大。

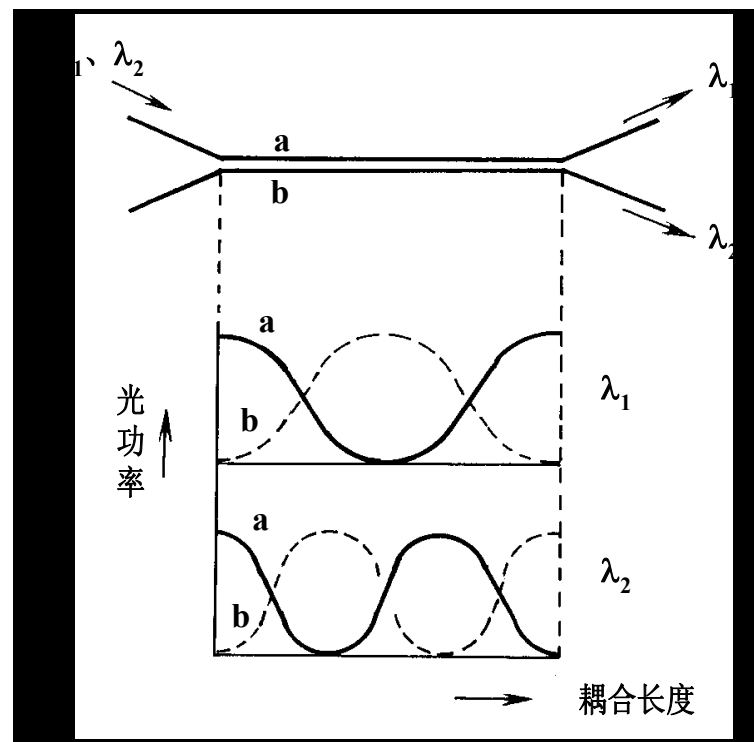


图 光纤型波分解复用器原理

3.5.2 光耦合器

微器件型:

用自聚焦透镜和分光片、滤光片或光栅等微光学器件构成。

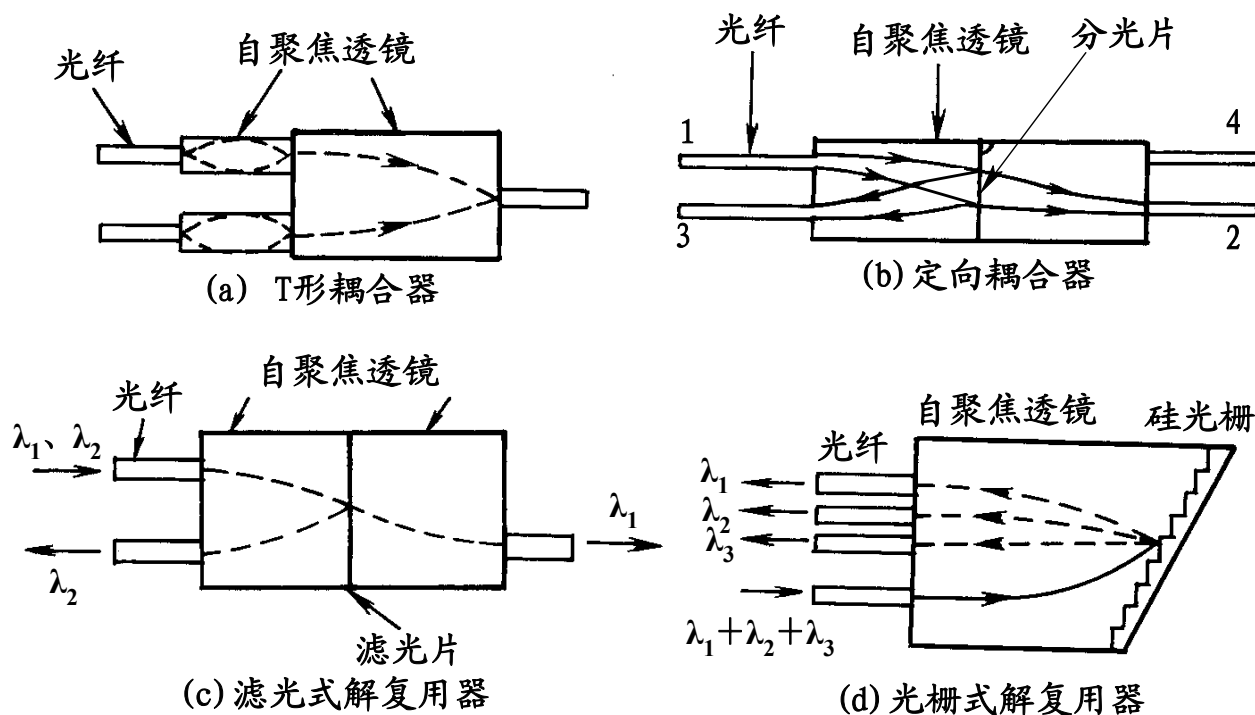


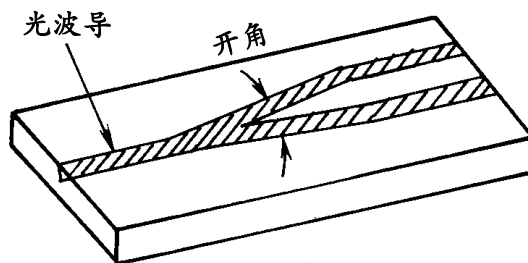
图 微器件型耦合器



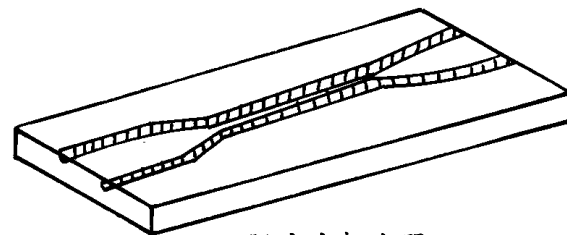
3.5.2 光耦合器

● 波导型:

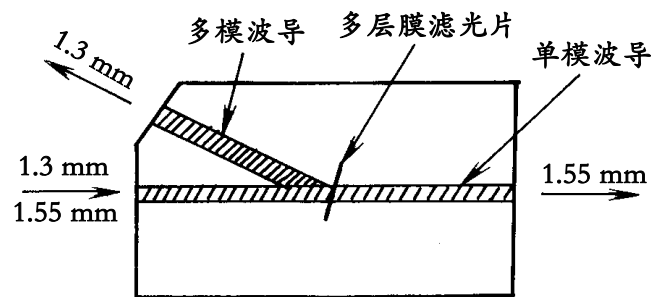
在一片平板衬底上制作所需形状的光波导，衬底作支撑体，又作波导包层。



(a) T形耦合器



(b) 定向耦合器



(c) 波分解复用器



3.5.2 光耦合器

主要特性:

● **耦合比CR**: 一个指定输出端的光功率和全部输出端的光功率总和的比值。

$$CR = \frac{P_{OC}}{P_{Ot}} = \frac{P_{oc}}{\sum_{n=1}^N P_{on}}$$

● **功率分路损耗 L_s** : $L_s = 10\lg\left(\frac{1}{CR}\right)$

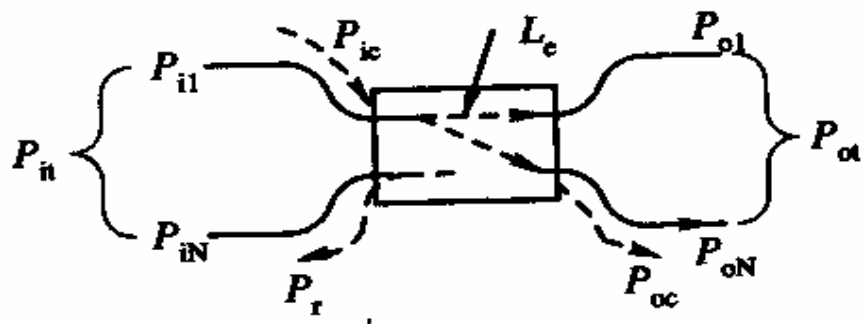


图 3.33 说明耦合器参数的模型



3.5.2 光耦合器

主要特性:

● **附加损耗 L_e** : 由散射、吸收和器件缺陷产生的损耗, 是全部输入端的光功率总和 P_{it} 和全部输出端的光功率总和 P_{ot} 的比值, 用分贝表示

$$L_e = 10 \lg \frac{P_{it}}{P_{ot}} = 10 \lg \left\{ \frac{\sum_{n=1}^N P_{in}}{\sum_{n=1}^N P_{in}} \right\}$$

● **插入损耗 L_t** : 一个指定输入端的光功率 P_{ic} 和一个指定输出端的光功率 P_{oc} 的比值, 用分贝表示

$$L_t = 10 \lg \frac{P_{ic}}{P_{oc}}$$



3.5.2 光耦合器

主要特性:

● **方向性DIR(隔离度)** : 一个输入端的光功率 P_{ic} 和由耦合器反射到其它端的光功率 P_r 的比值

$$DIR = 10 \lg \frac{P_{ic}}{P_r}$$

● **一致性U** : 不同输入端得到的耦合比的均匀性, 或者不同输出端耦合比的等同性。



3.5.3 光隔离器与光环行器

- 隔离器的作用：

只允许光波往一个方向上传输，阻止光波往其他方向特别是反方向传输。

- 隔离器主要用在激光器或光放大器的后面，以避免反射光返回到该器件，致使器件性能变坏。



3.5.3 光隔离器与光环行器

■ 隔离器工作原理:

- 由于入射光偏振方向与第一个偏振器透振方向相同，因此输入光能够通过第一个偏振器。
- 法拉弟旋转器能使光的偏振态旋转一定角度（例如 45° ）。
- 第二个偏振器的透振方向在 45° 方向上，因此经过法拉弟旋转器的光能够顺利地通过第二个偏振器。
- 当反射光通过法拉弟旋转器时再继续旋转 45° ，变成了水平偏振光。
- 但是水平偏振光不能通过左面第一个偏振器，于是达到光隔离效果。



3.5.3 光隔离器与光环行器

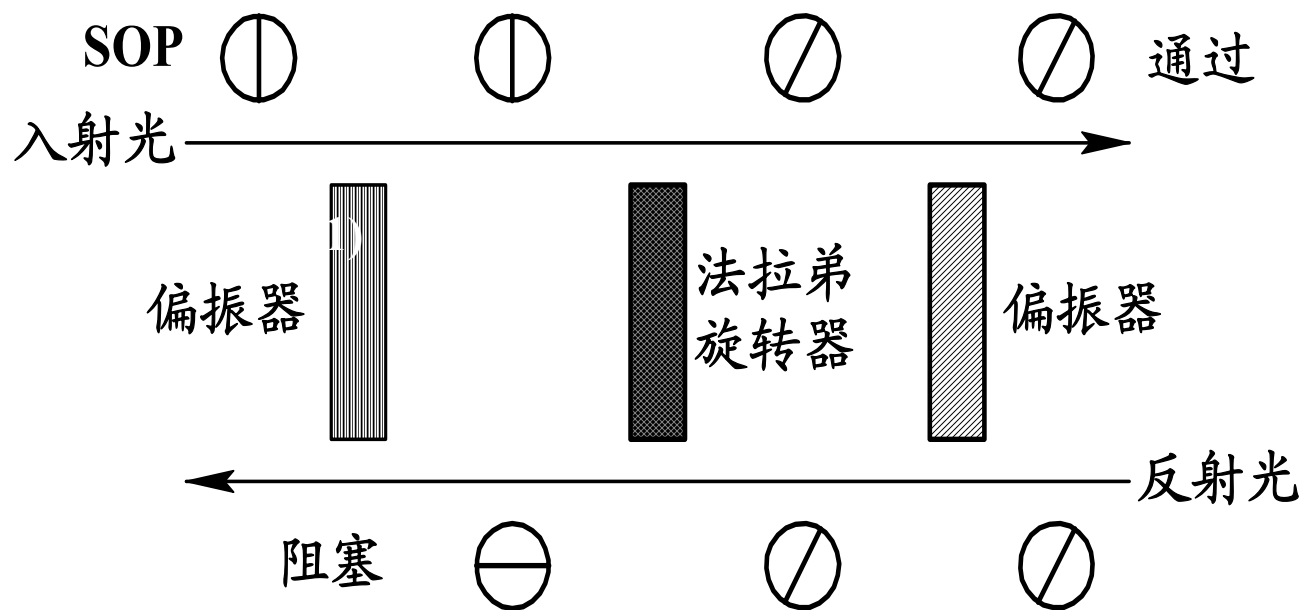


图 隔离器的工作原理



3.5.3 光隔离器与光环行器

■ 与入射光偏振态无关的隔离器的工作原理:

- 入射光先通过空间分离偏振器 (**SWP**)，被分解为两个正交偏振分量，垂直分量直线通过，水平分量偏折通过。
- 两个分量通过法拉弟旋转器，偏振态顺时针旋转 **45°**。
- 半波片将从左向右传播的光的偏振态顺时针旋转 **45°**。

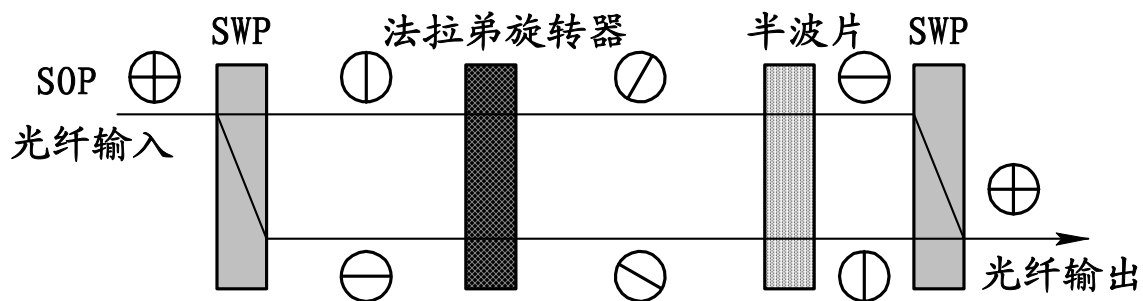


3.5.3 光隔离器与光环行器

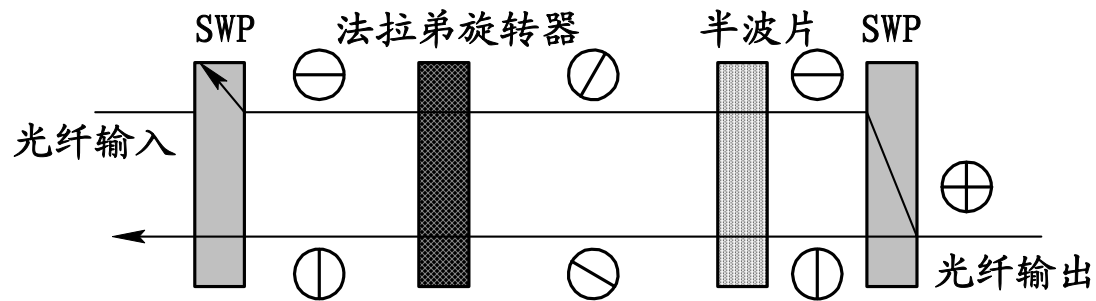
- 两个分量的光在输出端由**SWP**合成，如图3-20(a)所示。
- 当反射光在反方向上传输时，半波片将从右向左传播的光的偏振态逆时针旋转 45° 。
- 两个分量通过法拉弟旋转器，偏振态顺时针旋转 45° 。
- 在输入端，水平分量偏折通过，垂直分量直线通过，不能被**SWP**再组合在一起，起到隔离作用，如图3-20(b)所示。



3.5.3 光隔离器与光环行器



(a)



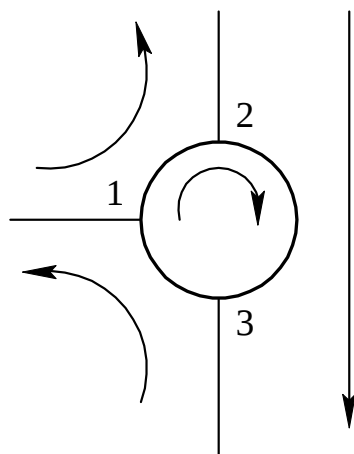
(b)

图 与输入光偏振方向无关的隔离器

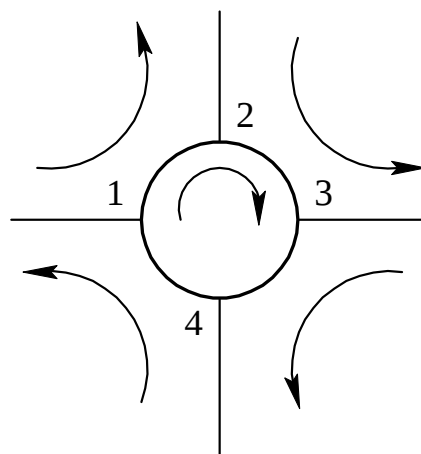


3.5.3 光隔离器与光环行器

■ **三端口环行器**：端口1输入的光信号在端口2输出，端口2输入的光信号在端口3输出，端口3输入的光信号由端口1输出。



(a) 三端口



(b) 四端口



3.5.4 光调制器

- 避免直接调制激光器时产生线性调频限制，采用外调制方式。
- 用于高速率系统、波分复用系统和相干光系统中。
- 可用电光、磁光或声光效应实现。
- **最有用的调制器：** LiNbO_3 晶体调制器，晶体折射率随外加电场按比例变化：

$$n = n_0 + \alpha E + \beta E^2$$

- $\beta = 0$ ，为线性电光效应即普克尔效应。
- $\alpha = 0$ ，为二次电光效应即克尔效应。



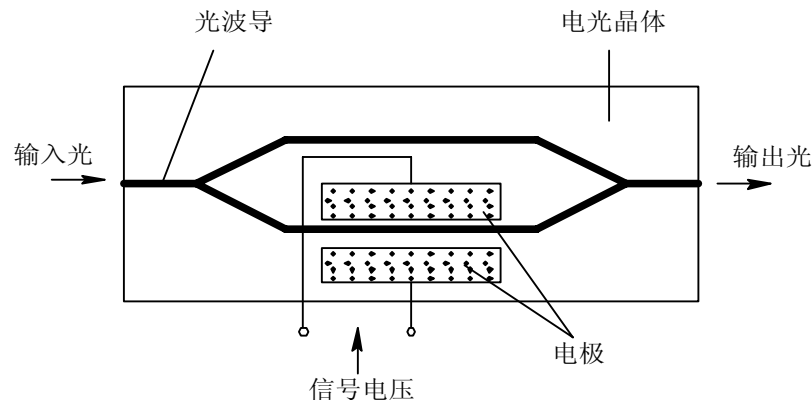
3.5.4 光调制器

■ 马赫 - 曾德尔 (MZ) 干涉仪型调制器结构: 在 LiNbO_3 晶体衬底上, 制作两条光程相同的单模光波导, 在其中一条波导的两侧施加可变电压。设输入调制信号按余弦变化, 则输出信号的光功率

$$P = 1 + \cos\left(\pi \frac{U_s + U_b}{U_\pi}\right)$$

● U_s 和 U_b 分别为信号电压和偏置电压, U_π 为半波电压。

● 当信号电压和偏置电压之和等于0时, 输出光功率最大; 当信号电压和偏置电压之和等于 U_π 时, 输出光功率等于0。



3.5.5 光开关

■ 光开关功能：转换光路， 实现光交换。

● 机械光开关：

➡ 优点：插损小，串扰小，适合各种光纤，技术成熟。

➡ 缺点：开关速度慢。

● 固体光开关：

➡ 优点：开关速度快。

➡ 缺点：插损大，串扰大，只适合单模光纤。

