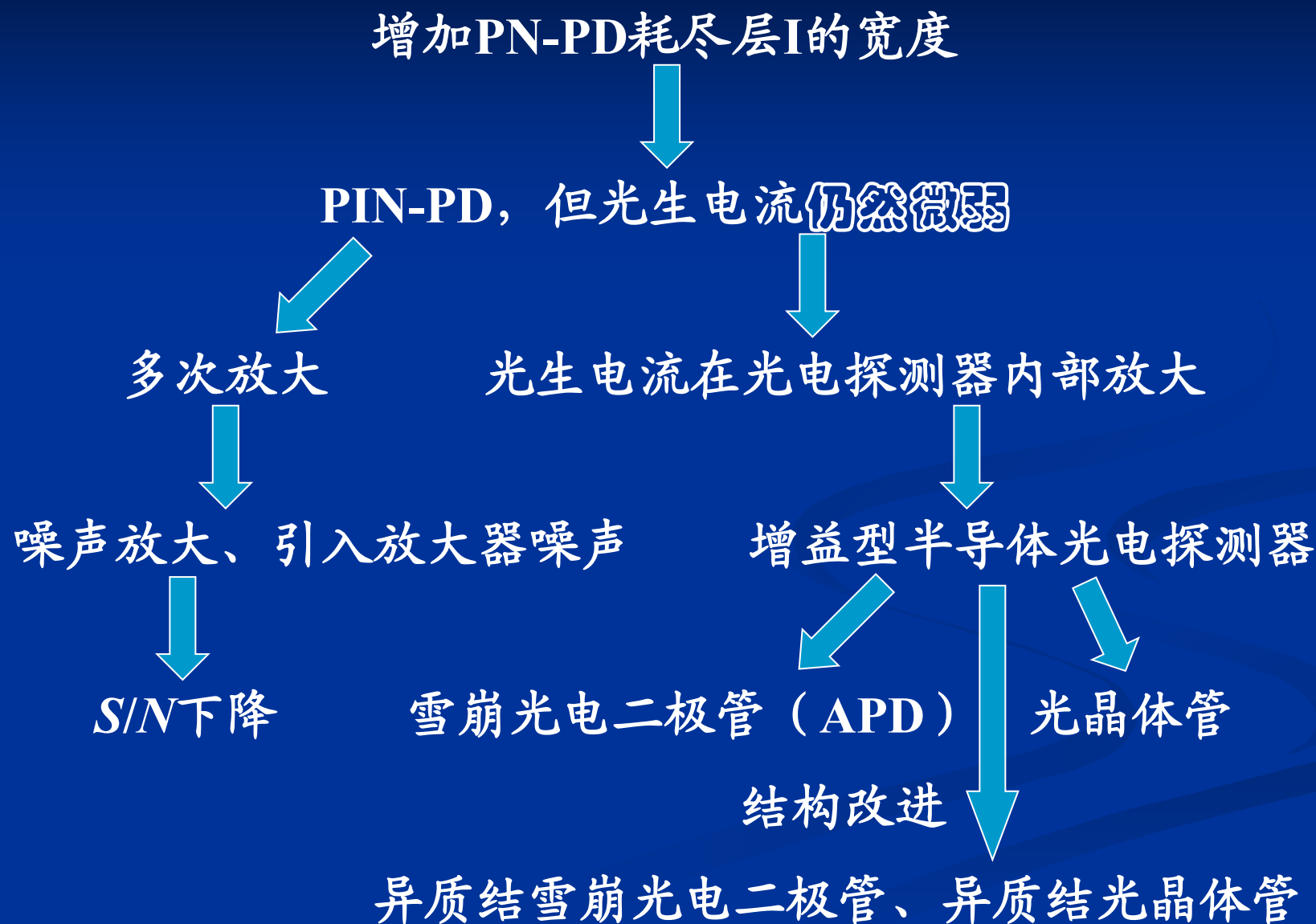


## 5.4 增益型和异质结半导体光电探测器



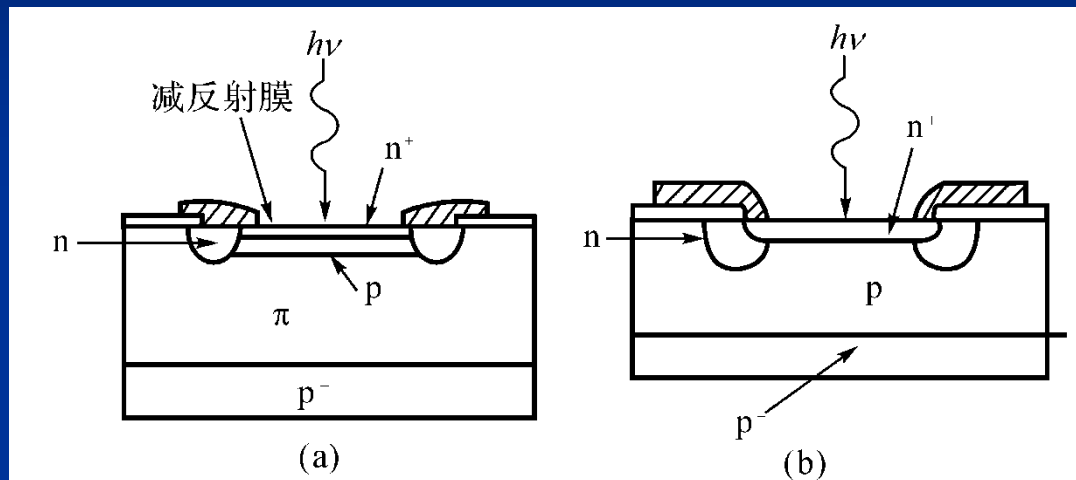
## 5.4.1 雪崩光电二极管 (APD)

PN-PD

高反偏压  $\downarrow$  碰撞离化

雪崩光电效应

雪崩光电二极管 (APD)



- 内部电流增益，灵敏度高
- 响应速度快，可达1000 GHz，即1 THz

## 1. 雪崩倍增因子 $M$

雪崩倍增过程是复杂的随机过程：  
每一个初始光生电子—空穴对的

- 产生位置
- 碰撞离化位置
- 激发二次电子—空穴对的数目都是随机的

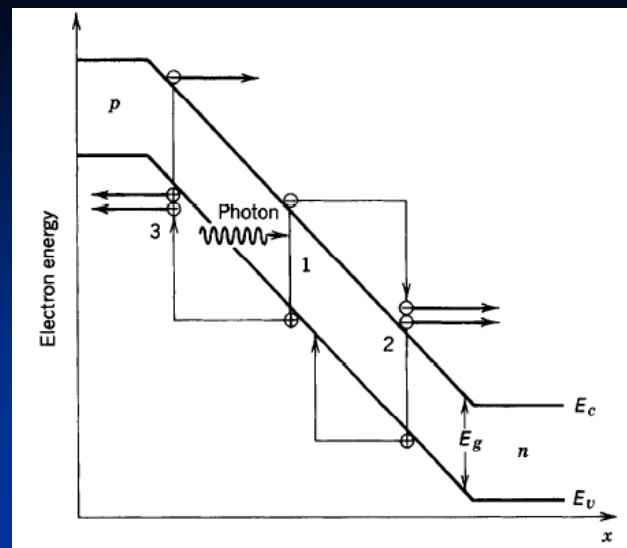
随机

电子（空穴）电离率 $\alpha_n$ （ $\alpha_p$ ）：

一个电子（空穴）在单位距离上**激发**一个二次电子—空穴对的**概率**，是电场的强相关函数。

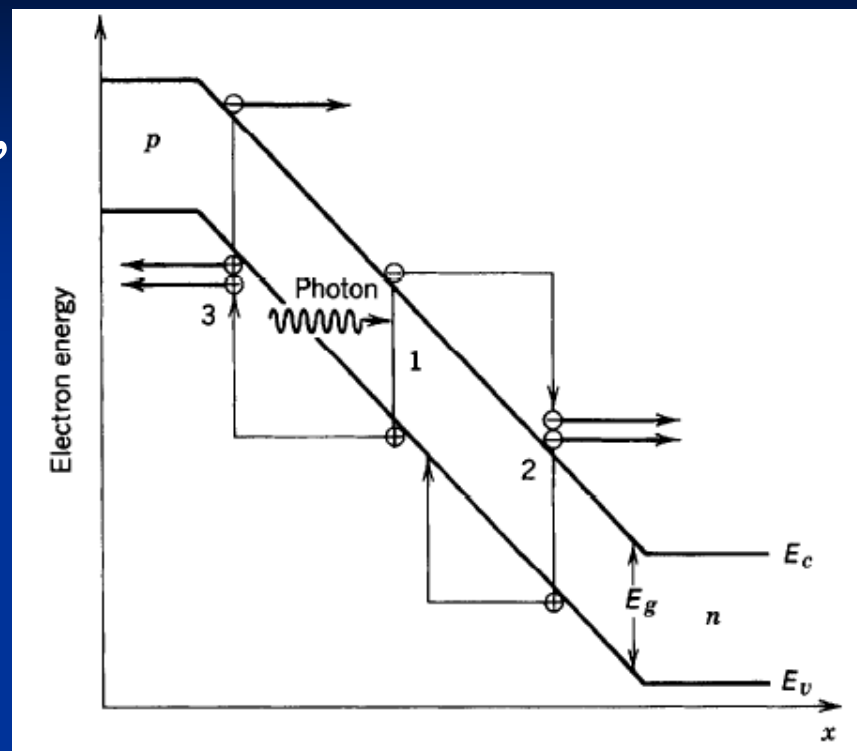
材料的电子—空穴电离率比：

$$K = \alpha_n / \alpha_p$$



如果电子和空穴有相同的电离化率 ( $K=1$ )，雪崩过程不断重复，不会停止：

- 增大器件增益；
- 耗时长，减小器件带宽；
- 随机过程，增大器件噪声；
- 不稳定会导致雪崩击穿。图5.4.3



APD器件的稳定工作要求仅有一种载流子能引起碰撞电离 ( $K=0$ 或 $\infty$ )。硅材料的电子的电离率远大于空穴，故雪崩过程主要从左向右进行。

电场增加，导致电离率 $\alpha_n$ 上升、 $\alpha_p$ 上升，雪崩增益上升

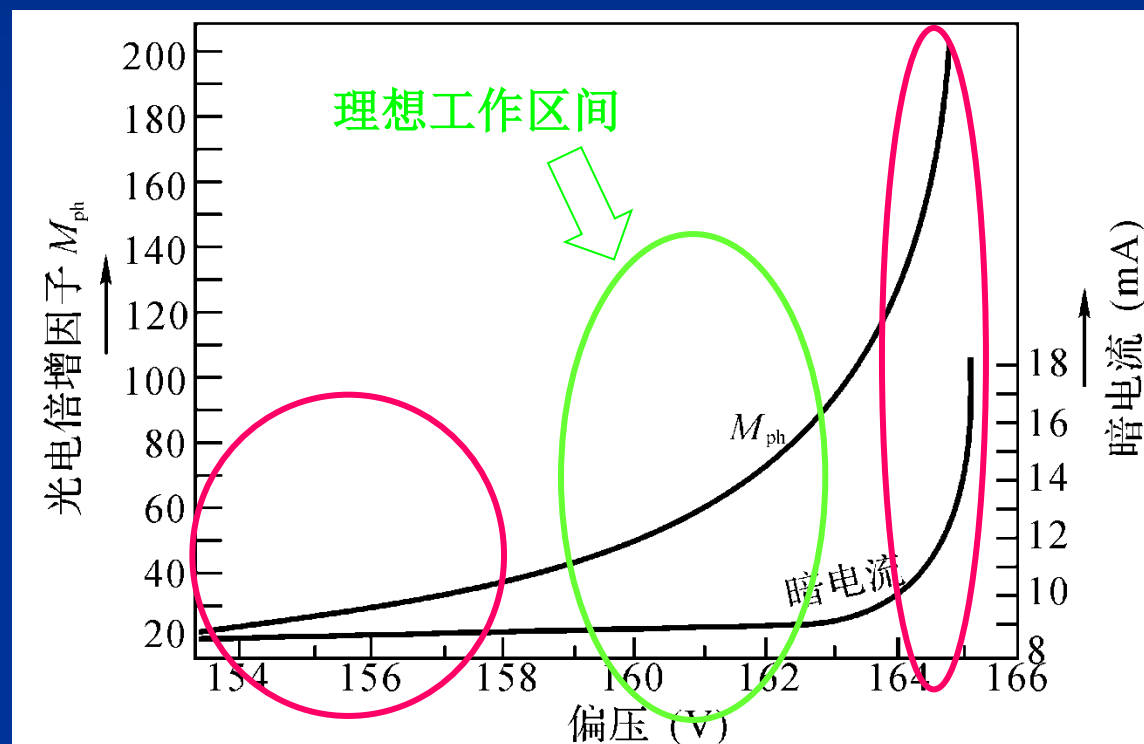
雪崩倍增因子multiplication factor:  $M$

$$M = J/J_0 = (J_{ph} + J_D)/(J_{ph0} + J_{D0})$$

光电倍增因子 $M_{ph}$

$$M_{ph} = J_{ph}/J_{ph0}$$

电离率比 $K = \alpha_n/\alpha_p$



## 2. 增益带宽积 $f_T$

雪崩倍增因子 $M$ 增加



雪崩平均渡越次数 $m$ 增加



雪崩区时间常数 $t_m$ 增加



响应时间增加、响应速度下降



带宽下降



增益与带宽互相制约



gain-bandwidth product

增益带宽积 $f_T = M \cdot B$

增益带宽积  $f_T = M \cdot B$



高增益高频

$$f_T = (K \cdot v_s) / [N(K) \cdot W]:$$

- 雪崩区宽度减少, 导致  $f_T$  增加
- 饱和漂移速度上升, 导致  $f_T$  增加
- 电离率比上升, 导致  $f_T$  增加
- $N(K)$  随  $K$  的慢变函数



电离率比  $K$  上升, 导致  $f_T$  增加



选用高电离率比的材料

### 3. 过剩噪声因子noise factor: $F$

理想的倍增过程:

- 通过倍增区的每个电子或空穴都倍增 $M$ 倍
- 光跃迁随机引起散粒噪声电流也相应倍增 $M$ 倍
- 散粒噪声均方电流增加了 $M^2$ 倍

$$\langle i_s^2 \rangle = 2e(I_{ph} + I_b + I_D)BM^2$$

实际的雪崩倍增:

- 载流子个体倍增 $g$ , 随机雪崩过程导致电流平均倍增 $M = \langle g \rangle$ 。
- 由于雪崩过程中碰撞电离的随机性, 会引起附加的噪声, 称为**雪崩噪声**或**过剩噪声**。

$$\langle i_s^2 \rangle = 2e(I_{ph} + I_b + I_D)B \langle g^2 \rangle$$

- $\langle g^2 \rangle = F(M)M^2$ ,  $F(M)$ : **过剩噪声因子**



过剩噪声因子 $F(M)$



雪崩倍增导致噪声倍增比信号倍增更强:

$$F(M) = M^\chi$$



$$\langle g^2 \rangle = M^{2+\chi}$$

过剩噪声指数 $\chi$

$\chi$ 一般在0.3~1范围内，对于硅的APD， $\chi=0.3\sim0.5$ ；对于锗的APD， $\chi=0.8\sim1$ 。选取APD时应该选择 $\chi$ 比较小的管子。

## 5.4.2 异质结的窗口效应、光限制作用、光电二极管

光照射异质结宽带区  $E_{g2}$

低能光子

$$h\nu < E_{g1}$$

光子不能产生  
电子—空穴对

无光电流

$$E_{g1} < h\nu < E_{g2}$$

光子透过宽带材料  
进入窄带材料

在窄带区产生  
电子—空穴对

产生光电流

高能光子

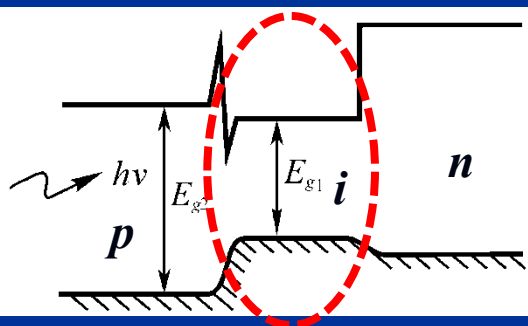
$$h\nu > E_{g2}$$

宽带区产生电子—空穴对  
光子不能进入窄带材料

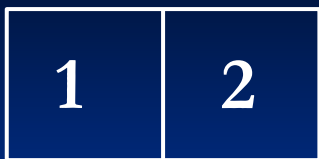
不能扩散到耗尽区

在窄带区不能产生电子—空穴对

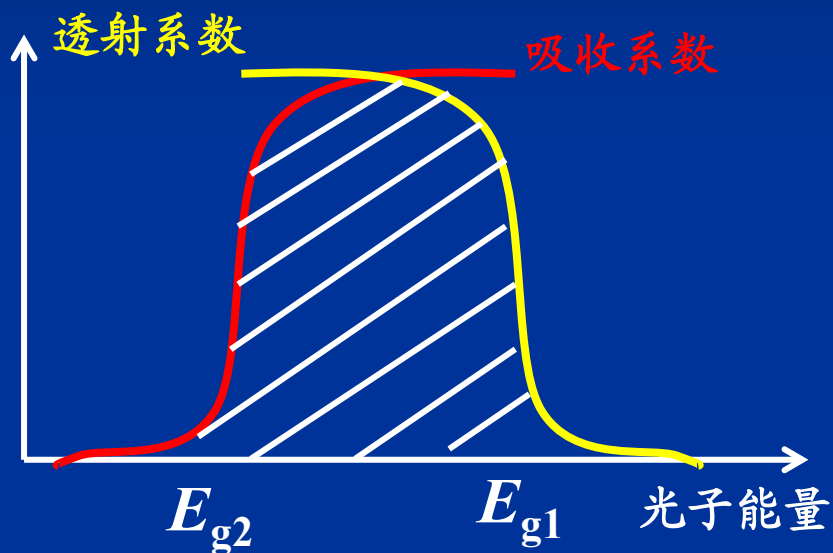
无光电流



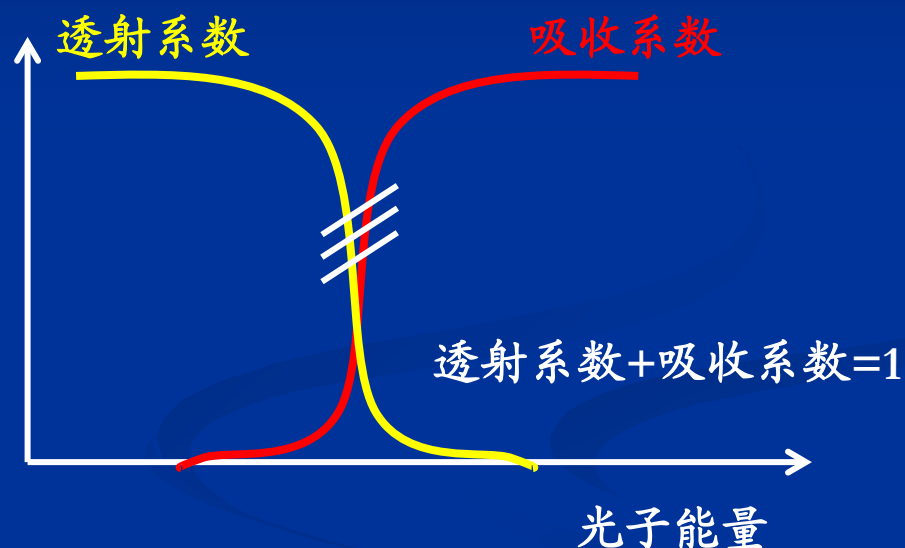
# 窗口效应



$$E_{g1} > E_{g2}$$



$$E_{g1} = E_{g2}$$



构成异质结PD:

- 缺点: 晶格常数不匹配, 暗电流较大
- 优点: 量子效率提高、响应速度上升、**选择响应窗口**

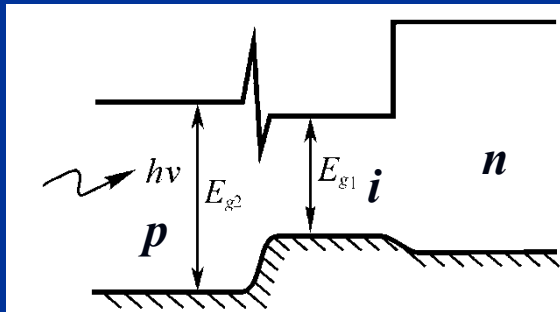
# 任何事情都不是绝对的!

能量大于 $E_{g2}$ 的光

宽带区宽度相当薄, 并进一步下降  
被宽带材料吸收, 产生电子-空穴对

透过宽带层被窄带材料吸收, 产生电子-空穴对

扩散到结区, 进入窄带材料



光电流

突破异质结窗口效应的限制, 光响应延伸到短波较远的区域:

- 异质结的“窗口”效应:  $1.24/E_{g2} < \lambda < 1.24/E_{g1}$
- 薄宽带区光响应延伸:  $\lambda < 1.24/E_{g2}$

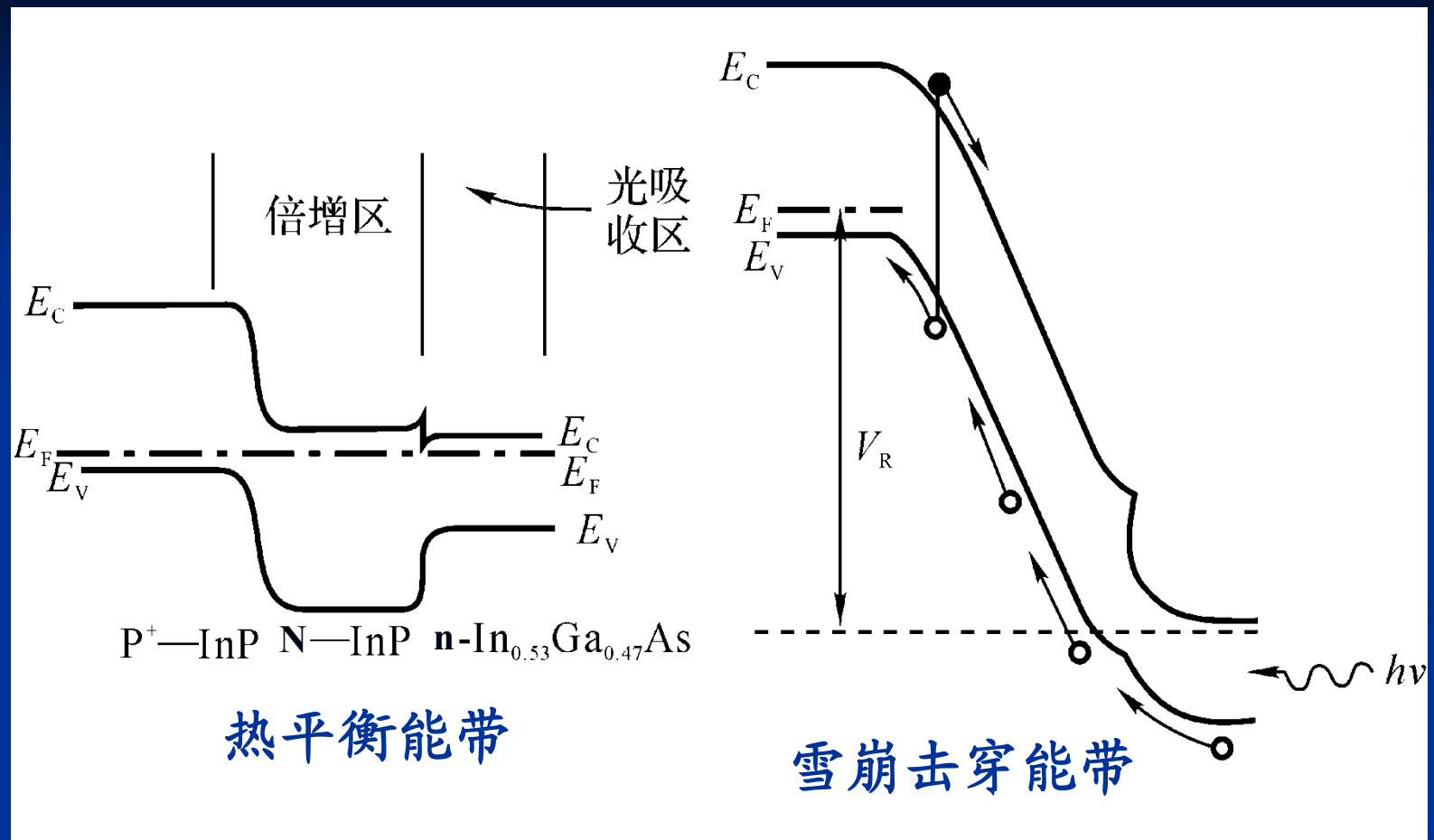
### 5.4.3 异质结雪崩光电二极管

异质结雪崩光电二极管优点（与Si或Ge-APD比较）：

- 波长可调谐
- 暗电流低
- 量子效率高
- 响应速度快

工艺要求：

- 降低隧道电流
- 减少异质结界面处电荷积聚
- 制作保护环层



InGaAs/InP异质结APD的能带结构

材料A:  $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$  :

厚度55 nm、电子和空穴电离率比值  $K = \alpha_n/\alpha_p \approx 1$

材料B: GaAs:

厚度45 nm、电子和空穴电离率比值  $K \approx 1$



异质结:  $\Delta E_c = 0.45 \text{ eV}$ 、 $\Delta E_v = 0.08 \text{ eV}$



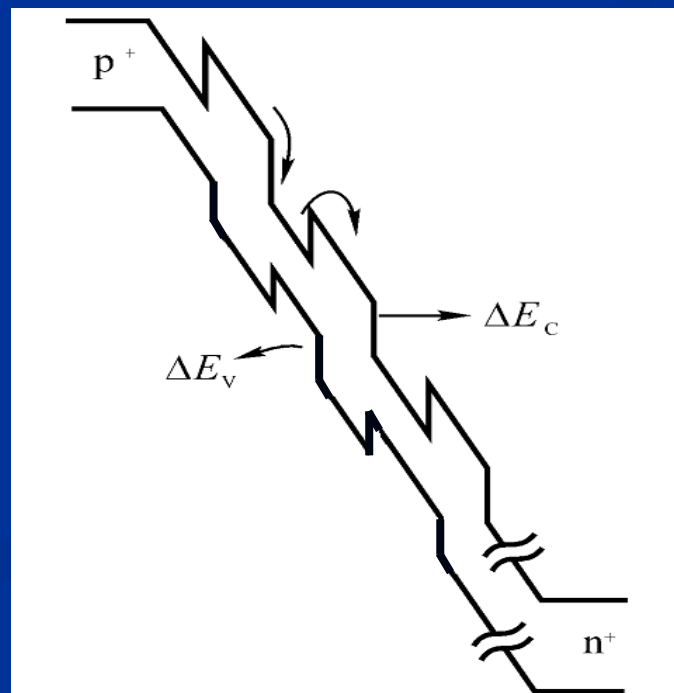
50层交替

周期性异质结(25):

电子自由程约为50 nm



超晶格结构



## 超晶格结构:

- AlGaAs中光激发的电子空穴对，碰撞电离产生电子空穴对
- $\Delta E_C = 0.45 \text{ eV}$ 较大
  - 倍增电子进入GaAs层，能量比导带底高 $\Delta E_C$
  - 热电子碰撞电离，电离率很大

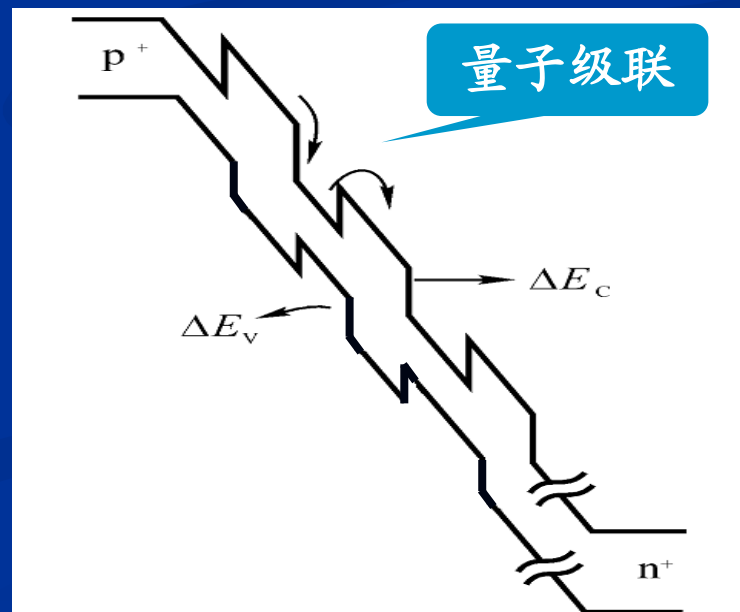


- 电子加速，从势阱中跌到下一层AlGaAs，继续碰撞电离
- $\Delta E_V = 0.08 \text{ eV}$ 很小:

附加能量很小，效应不显著



超晶格结构的 $K \geq 10$ ，作为  
雪崩光电二极管的耗尽区约2500 nm

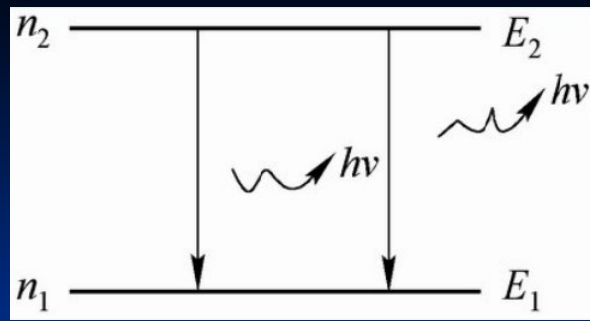




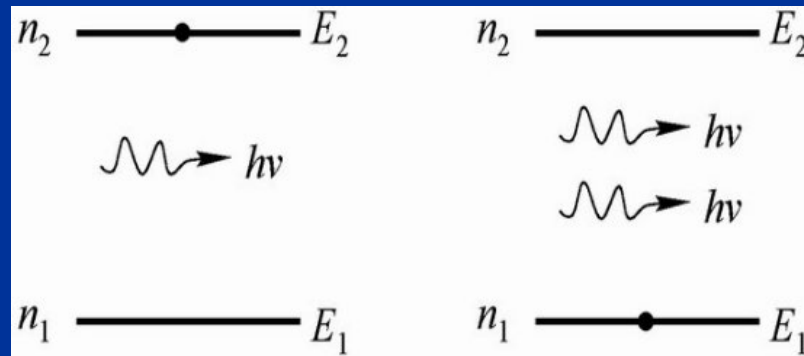
## 5.6 发光二极管(LED)



- 紫外光
- 可见光: 电光源 (显示、照明)
- 红外光: 通信 (0.85  $\mu\text{m}$ 、1.31  $\mu\text{m}$ 、1.55  $\mu\text{m}$ )



- **自发辐射**：无外电磁场作用时，电子自发从高能级向低能级跃迁，并发射光子。
- 自发辐射场的传输方向、偏振、相位等都是无规则随机分布的，**非相干**。



- **受激辐射**：当收到外来能量  $E=h\nu=E_1-E_2$  的光照射时，高能级的电子受外来光的激励作用向低能级跃迁，同时发射一个与外来光子完全相同的光子。
- 受激辐射的光子与外来光子特性完全相同：频率、相位、偏振和传播方向完全一样，即**受激辐射与外来辐射是相干的**，外来辐射被“**放大**”了。

## 5.6.1 发光效率与量子效率

二极管正向偏置电流密度有：

少子电子扩散电流密度：

$$J_n = \frac{eD_n n_{p0}}{L_n} \left[ \exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right]$$

少子空穴扩散电流密度：

$$J_p = \frac{eD_p p_{n0}}{L_p} \left[ \exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right]$$

空间电荷复合电流密度：

$$J_R = \frac{en_i W}{2\tau_0} \left[ \exp\left(\frac{eV}{2k_B T}\right) - 1 \right]$$

GaAs发光主要由少子电子复合产生 

少子扩散电流百分比：

$$\gamma = \frac{J_n}{J_n + J_p + J_R}$$

pn<sup>+</sup>-GaAs二极管的 $J_p$ 、 $J_R$ 都相对很小


$$\gamma \approx 1$$

为什么？

辐射效率radiative efficiency:  $\eta = \frac{\tau_{nr}}{\tau_{nr} + \tau_r}$

非辐射寿命

辐射寿命

Internal quantum efficiency内量子效率 $\eta_{内}$ :

$\eta_{内} = \gamma\eta$  = 单位时间产生光子数/单位时间注入电子-空穴对数

external quantum efficiency外量子效率 $\eta_{外}$ :

$\eta_{外}$  = 单位时间从晶体发射出的光子数/单位时间注入的电子-空穴

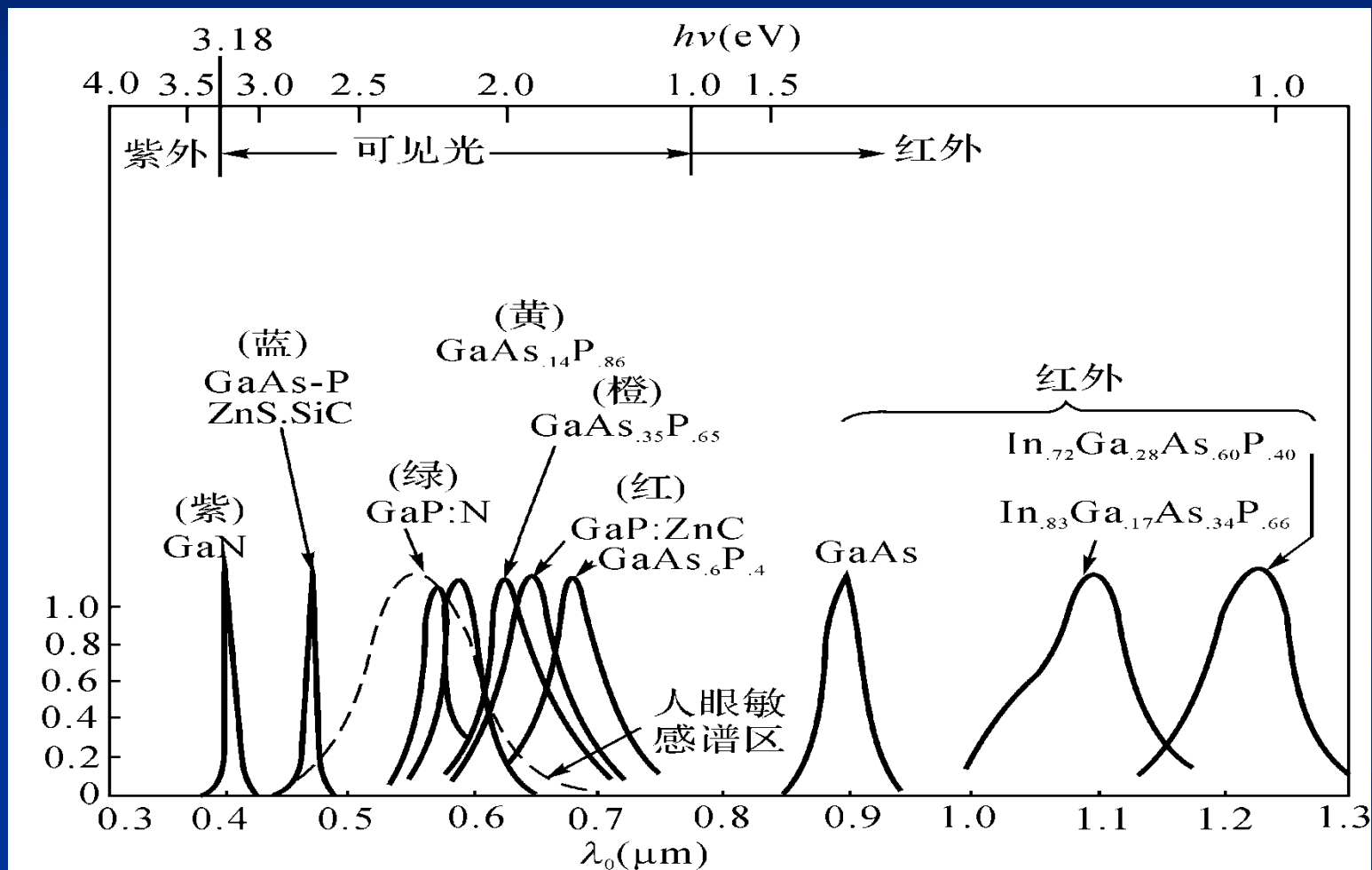
$$\eta_{外} < \eta_{内}$$

单位时间从晶体发射出的光子数 < 单位时间产生的光子数:

- 体内光吸收  $h\nu > E_g$
- 菲涅耳（反射）损耗
- 临界角（全反射）损耗

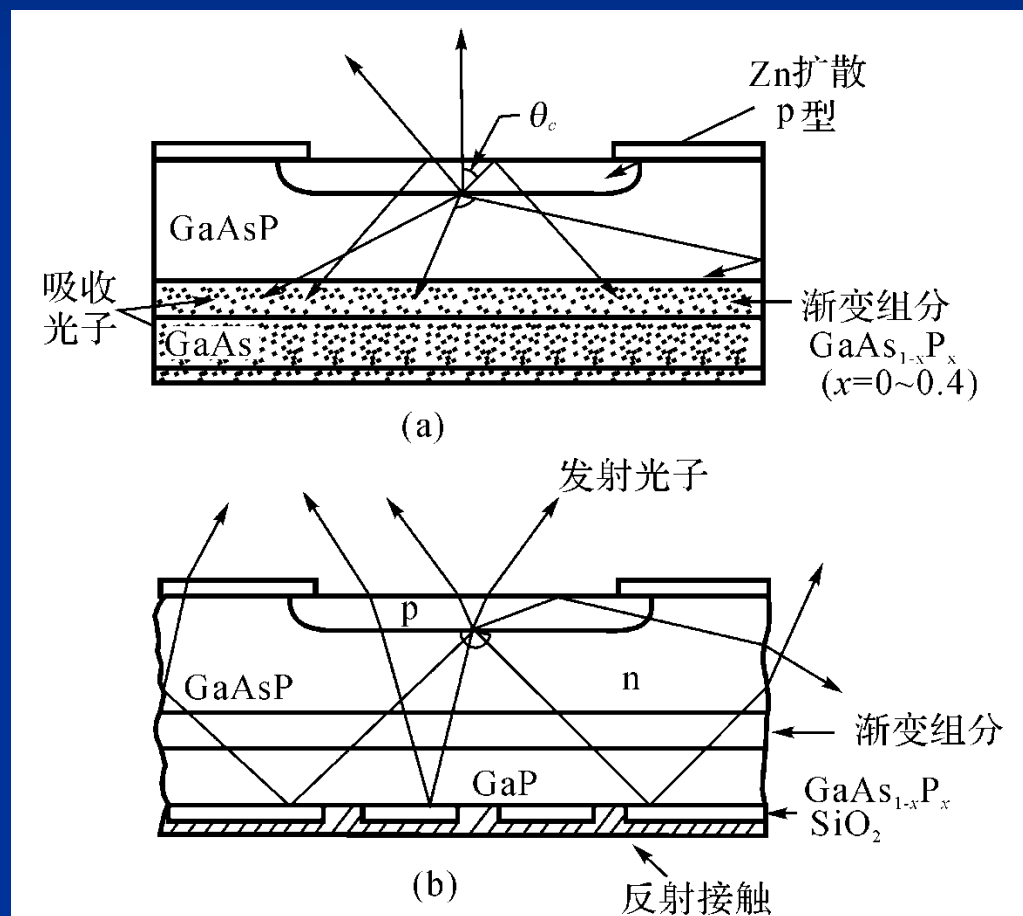
## 5.6.2 LED材料

几种材料LED在室温下的光谱响应:



### 5.6.3 LED的结构和性能

#### LED结构中光子吸收示意图:




## 5.7 半导体激光器(LD)

激光：辐射受激发射的光放大

light **a**mplification by **S**timulated **e**mission of **r**adiation

激光器种类（按工作物质分）：

- 固体激光器
    - 半导体激光器 → （连续）能带跃迁
    - 一般固体激光器
  - 液体激光器
  - 气体激光器
  - 其它激光器（自由电子、高温等离子体）
- 

# 上海超强超短激光实验装置 (SULF)



10拍瓦= $10^{16}$ 瓦=5000×全球电网平均功率



## 半导体激光器的特点:

- (连续) 能带跃迁
- 方向性较差
- 空间和时间特性受材料特性的影响较大
- 体积小、重量轻、抗震性强
- 结构简单
- 通过调制电流来调制激光的发射
- 高频调制特性好
- 可以产生 $0.85\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.31\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 附近的激光

-

+

++

# 光纤通信的光源与探测器

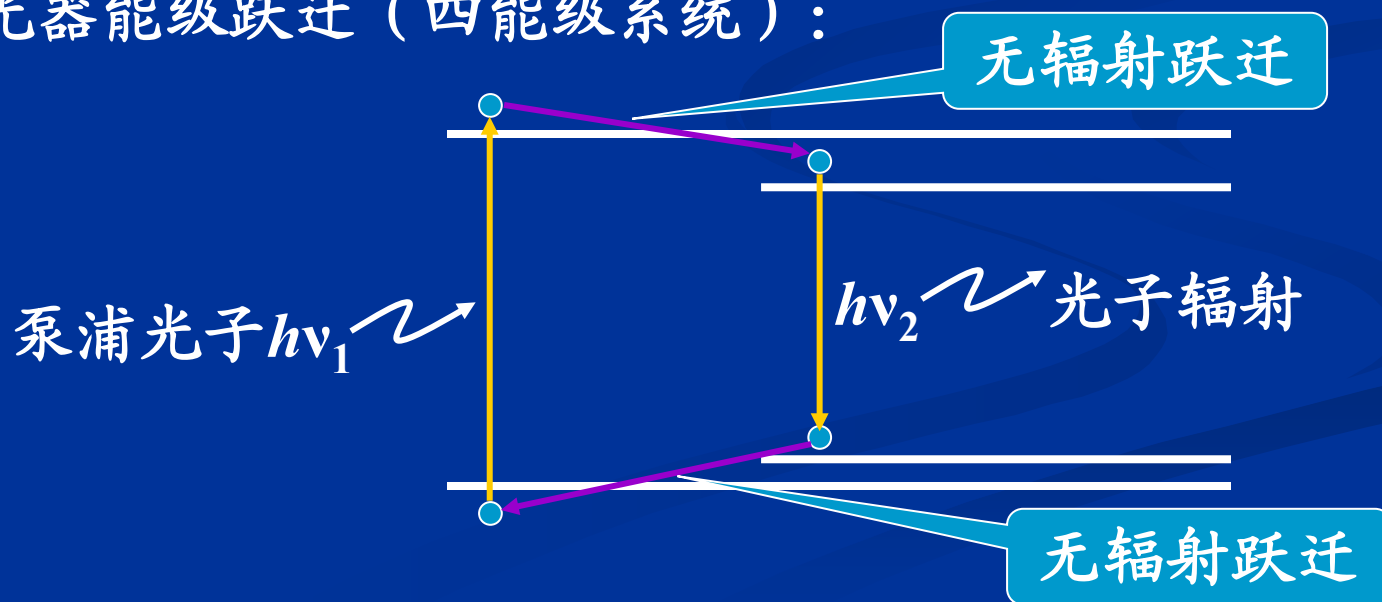
- 波长0.85  $\mu\text{m}$ :
  - 光源: GaAs-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As异质结LD、...
  - 探测器: Si-PIN、Si-APD、...
- 波长1.31  $\mu\text{m}$ 、1.55  $\mu\text{m}$ :
  - 光源: Ga<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>As<sub>y</sub>P<sub>1-y</sub>、Ga<sub>.47</sub>In<sub>.53</sub>As LD
  - 探测器: Ge、Ga<sub>.47</sub>In<sub>.53</sub>As、... , PIN、APD

## 5.7.1 半导体受激光发射的产生

激光器三要素：

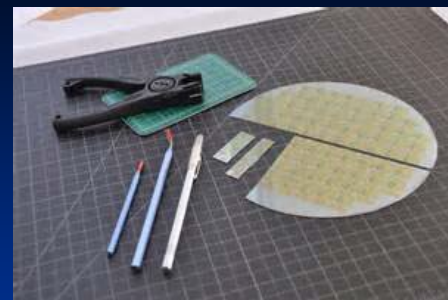
- 粒子数分布反转population inversion（区域：有源区）
- 谐振腔（产生单色性和方向性都很好的单色光）
- 阈值条件（泵浦：提供能量获得增益，抵消内部损耗、产生激光输出）

常见的激光器能级跃迁（四能级系统）：



## 半导体激光器泵浦（产生粒子数反转）：

- 光激励
- 电子束激励
- 雪崩碰撞激励
- pn结正向注入激励 ☆



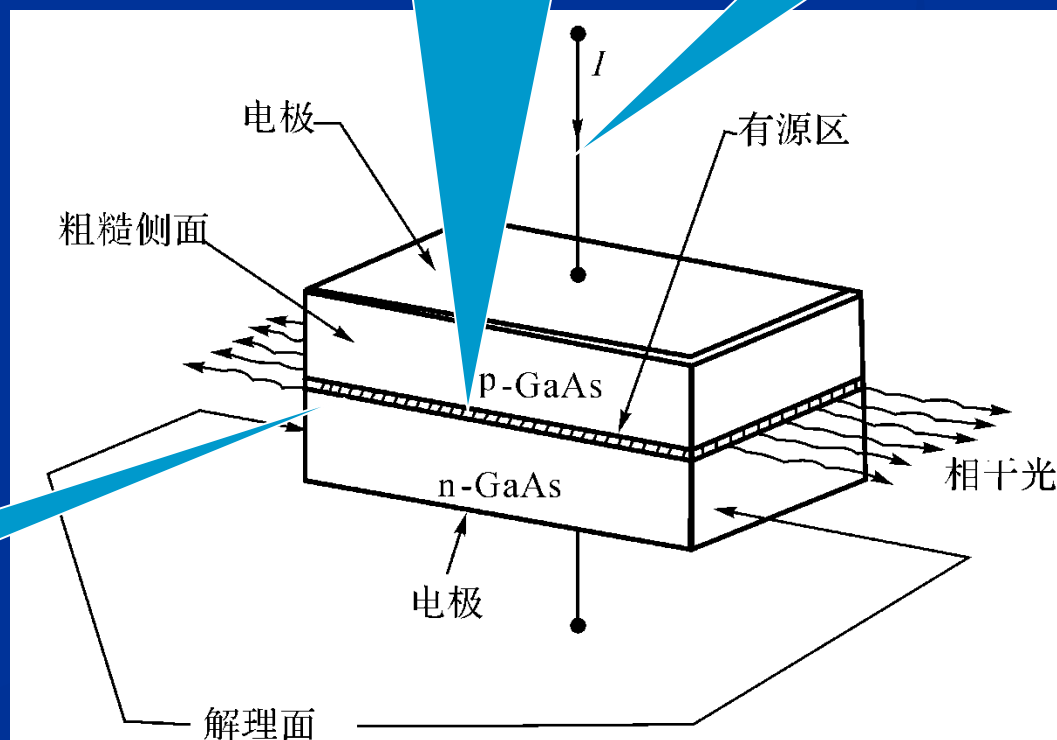
pn结作为有源区，  
粒子数分布反转

电流注入  
作为泵浦

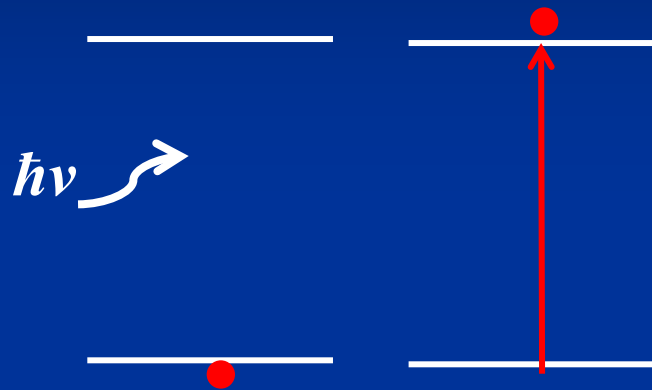
## 半导体的解理面：

- 晶面间距最大
- 结合最弱
- 最易断裂

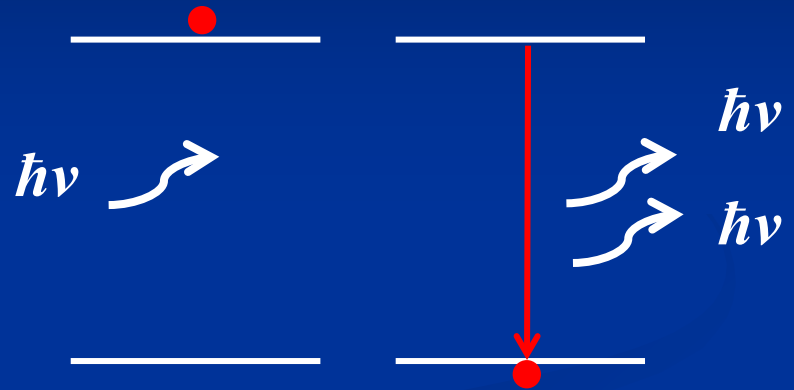
解理面作为反射镜，  
形成谐振腔



# 1. 粒子数分布反转



受激吸收



受激发射

- 受激发射概率=受激吸收概率；
- 哪一种过程起主导取决于粒子分布情况；
- 处于激发态原子数大于基态原子数，受激发射将超过吸收（光增益）；

# 1. 粒子数分布反转

pn结



简化高掺杂

$V_D$ 很大, 使

- n型区费米能级进入导带
- p型区费米能级进入价带



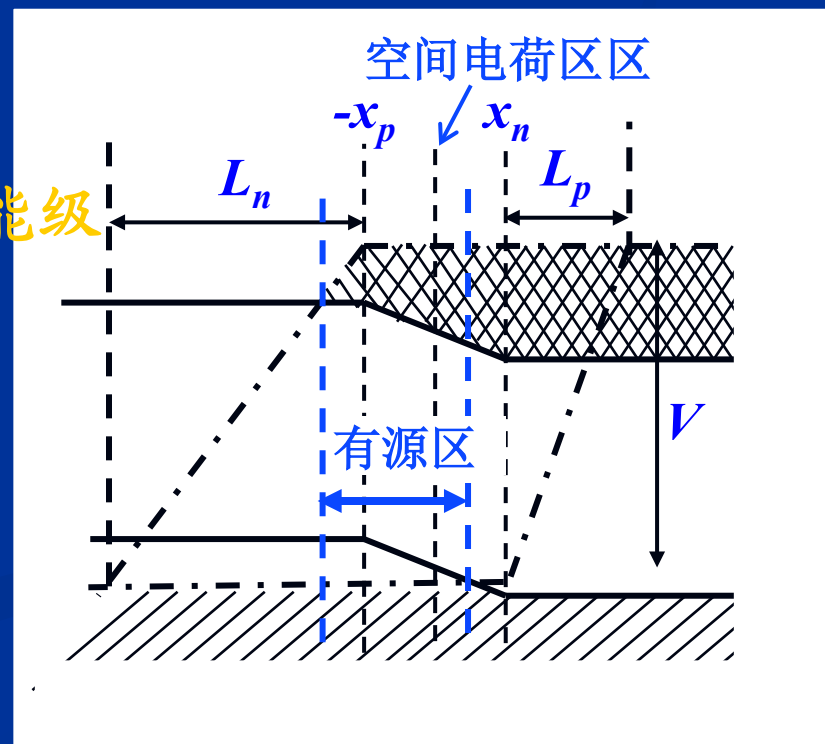
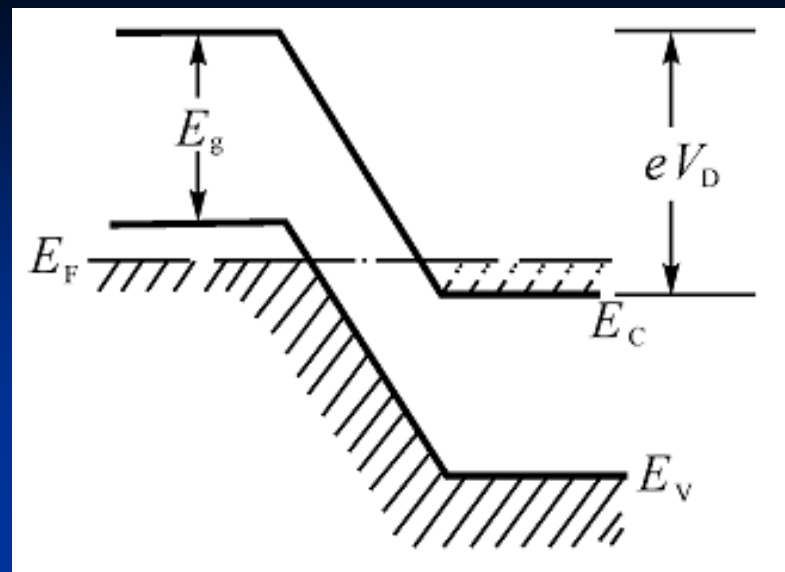
pn结正向偏置, 注入载流子

费米能级分裂成电子、空穴准费米能级

- 大量电子从n区注入到结区
- 大量空穴从p区注入到结区



高浓度的非平衡载流子



准费米能级quasi-Fermi energy level: 描述非平衡载流子在能带内分布状态的参考能级，表示单个主带中载流子处于热平衡状态，但电子与空穴之间不处于统一的热平衡状态

高浓度的非平衡载流子



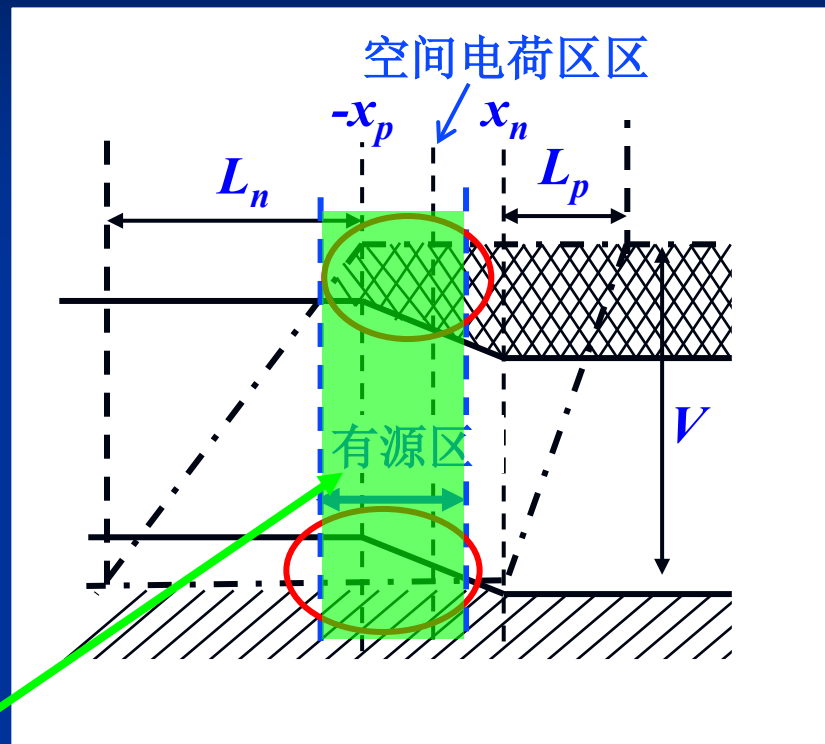
- 粒子数分布反转
- 偏离热平衡状态



结区及附近部分区域出现有源区

电子的扩散长度比空穴的大

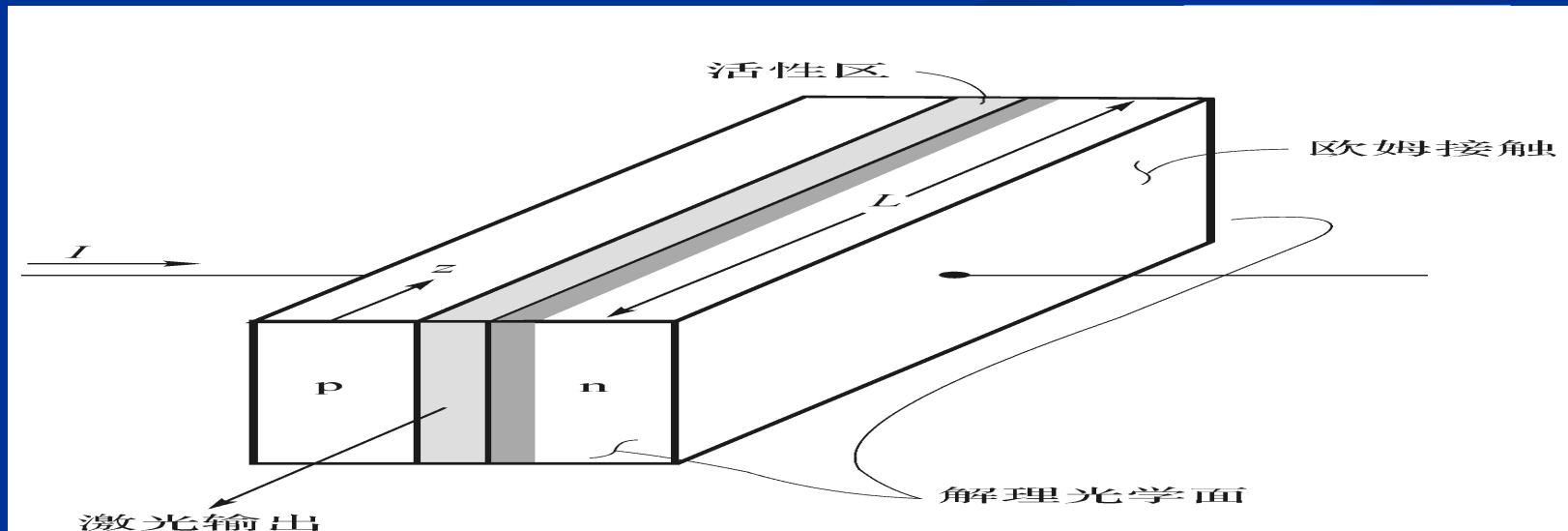
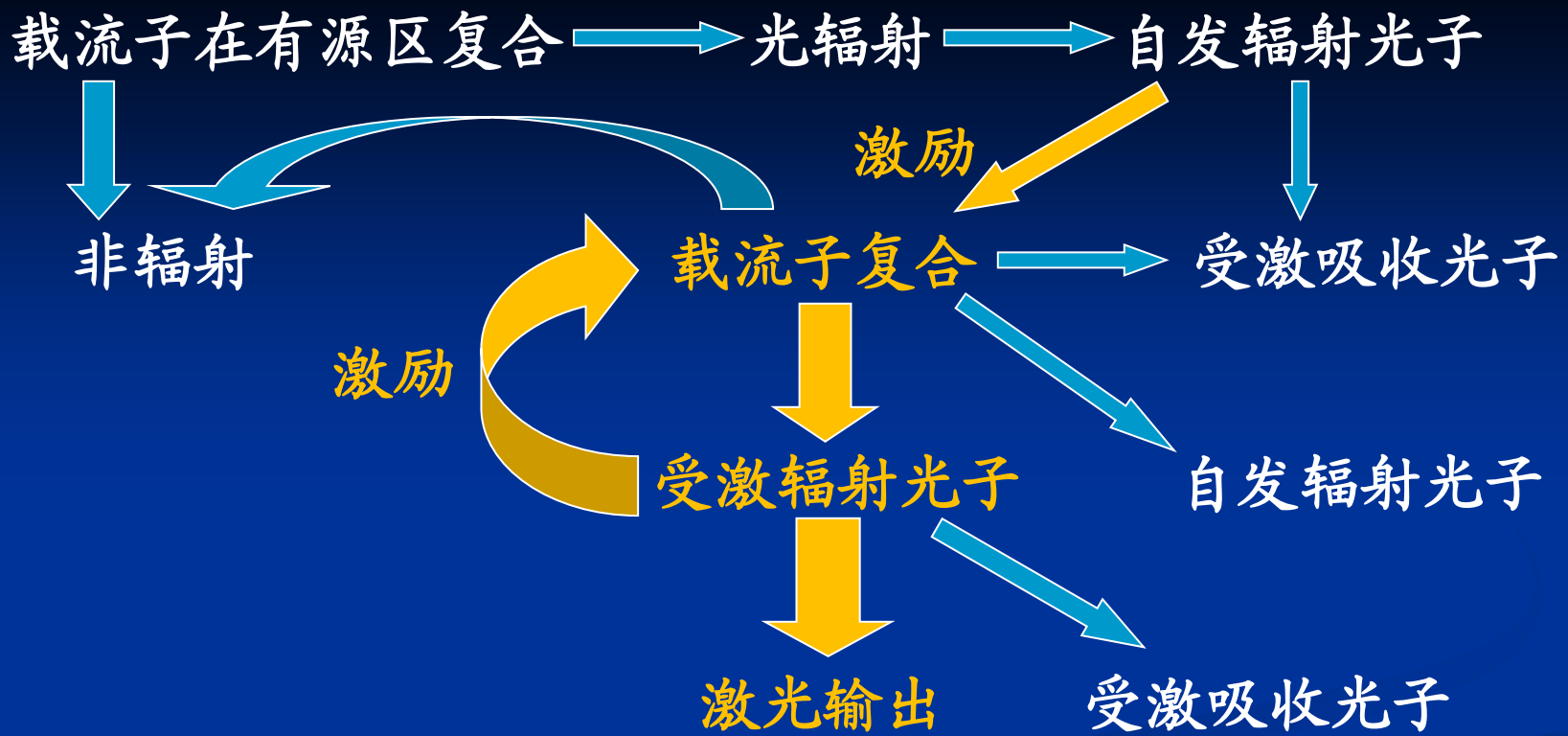
有源区偏离结区移向p区



粒子数分布反转（有源区）：

- 导带底部有较多电子
- 价带顶部有一些空穴

载流子在有源区复合





受激辐射产生的激光，具有相同的频率、相关的相位

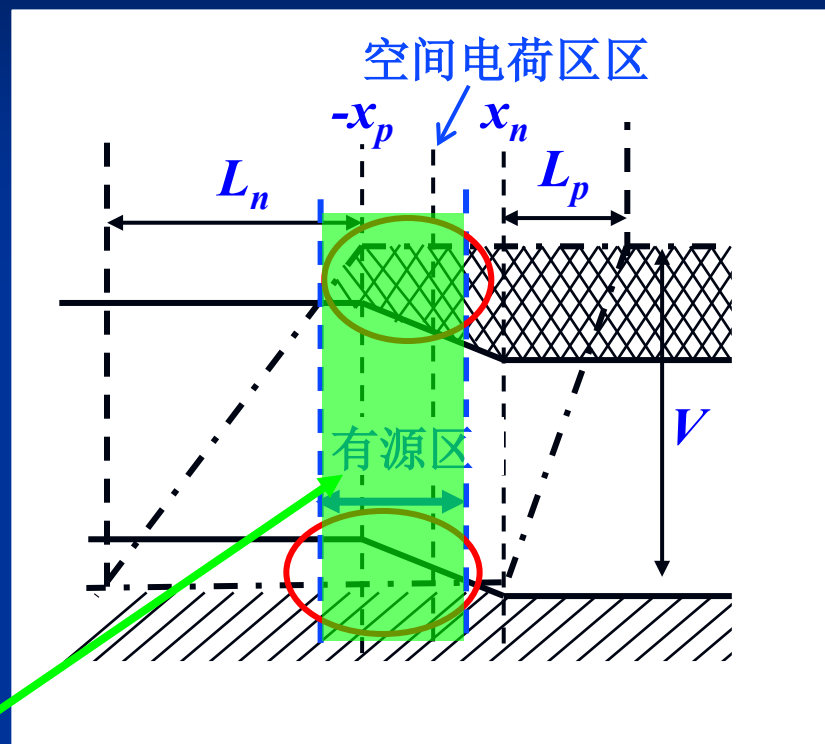
pn结

正向偏置

- 电子准费米能级 $E_F^n$ 在n型区导带中并延伸到p型区导带中
- 空穴准费米能级 $E_F^p$ 在p型区价带中

$$E_F^n - E_F^p = eV > h\nu > E_{gp}$$

在有源区内，粒子数分布反转

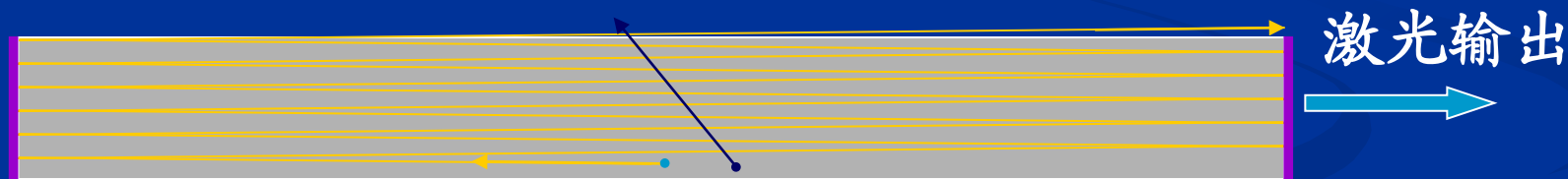
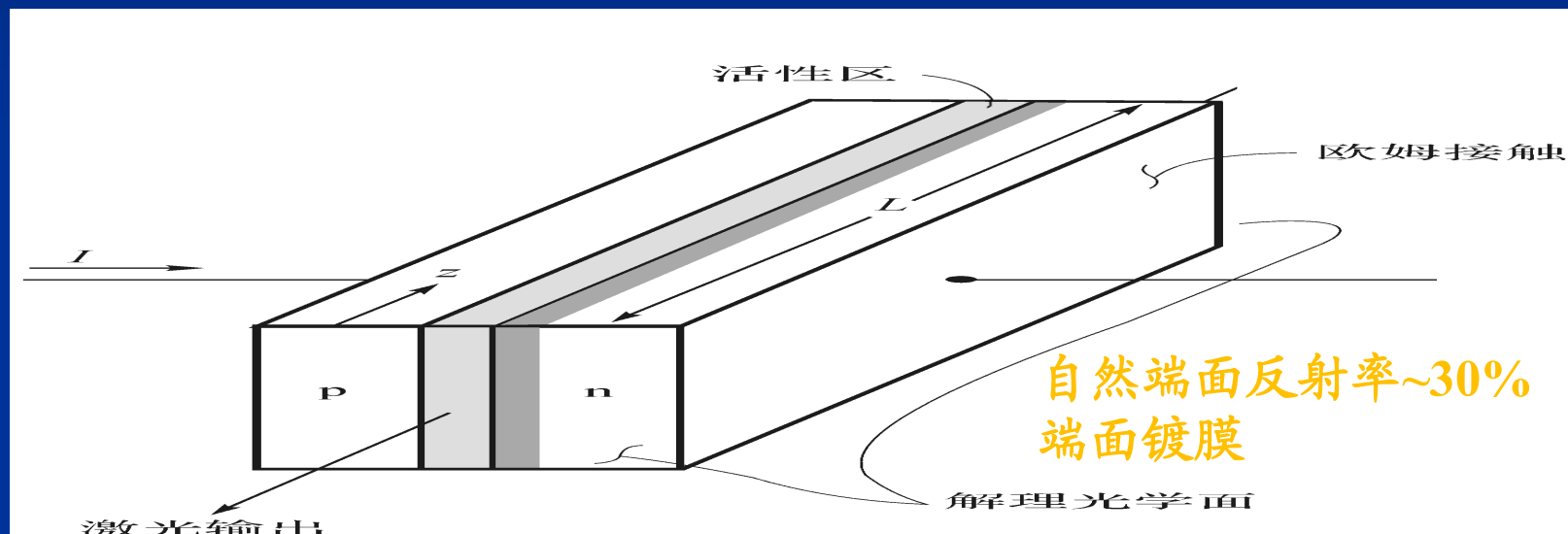
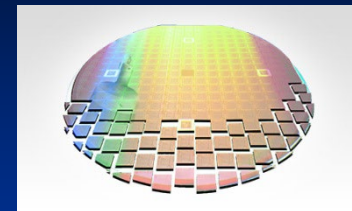


频率不单一

## 2. 光学谐振腔

GaAs-pn结激光器，以严格垂直结面方向的一对(110)解理面作为镜面构成平面谐振腔

常用法布里—珀罗(Fabry-Perot)谐振腔：



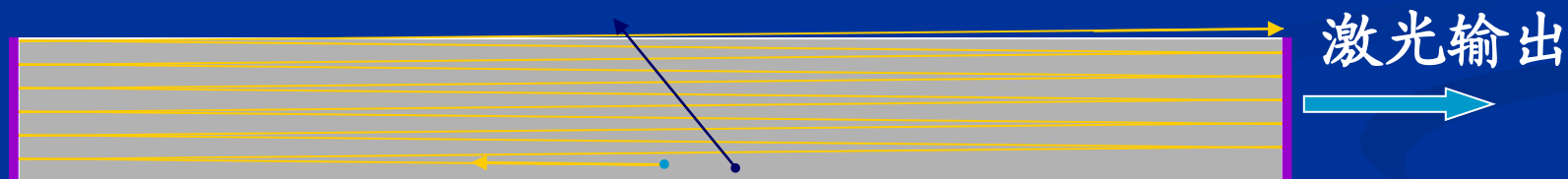
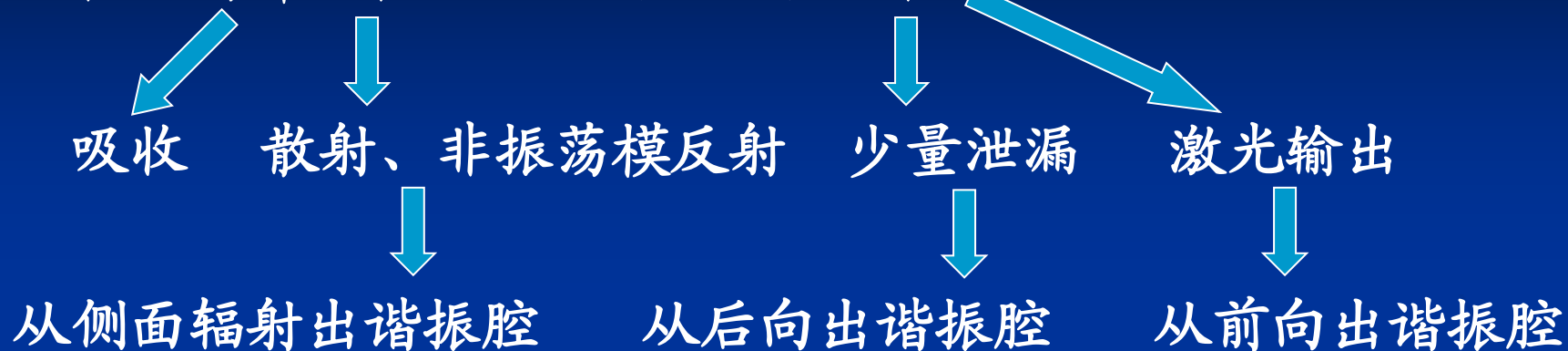
反射率 $R_1$   
(如100%)

长度 $l \gg$  横向线度

反射率 $R_2$   
(如98%)

### 3. 阈值条件

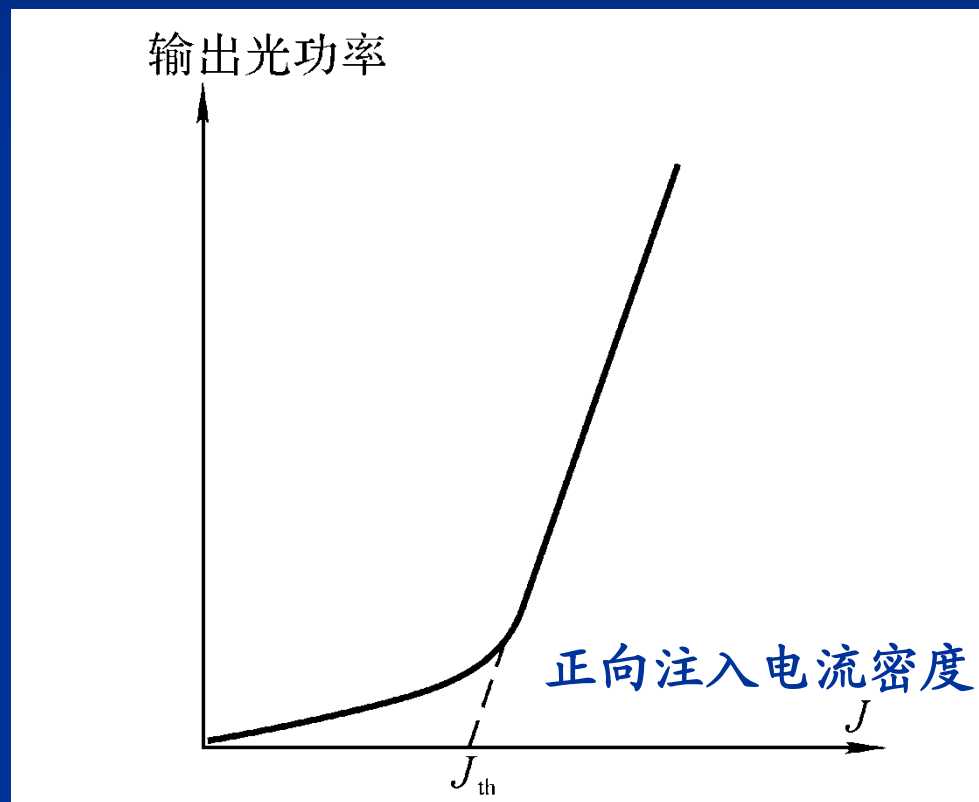
损耗：内部损耗、端面（镜面）损耗



- 增益系数 $g$ ：光波沿 $z$ 向传播单位长度内发射强度的增益
- 损耗系数 $\alpha$ ：光波沿 $z$ 向传播单位长度内发射强度的内部损耗
- 阈值条件：光波在谐振腔内往返传播一次的增益大于损耗

## 5.7.2 半导体激光器的主要特性

### 1. 半导体激光器输入输出关系



阈值电流密度

## 2. 阈值电流密度

谐振腔的振幅条件（阈值条件）：

光波在谐振腔内往返传播一次的总增益为：

$$(R_1 R_2) \exp(-\alpha \cdot 2l) \exp(g \cdot 2l) \geq 1$$

镜面损耗

内部损耗

增益

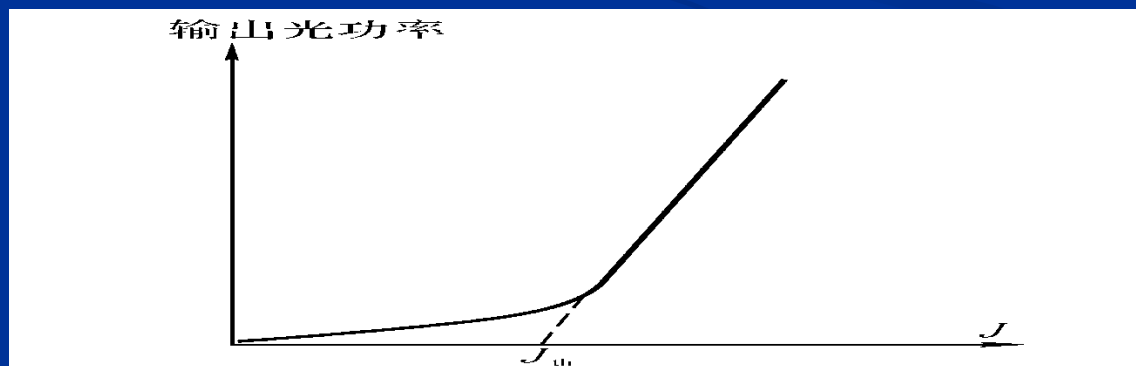
最低增益系数要求

阈值条件：

$$g \geq g_{th} = \alpha - \ln(R_1 R_2)/(2l) > \alpha$$

增益系数  $g > 0$

损耗系数  $\alpha > 0$



# pn结二极管正向偏置

正向电流 $J$ 较小；粒子数分布未能反转；

$J$ 增大，粒子数分布反转；

$J$ 超过 $J_{th}$

$J$ 继续增加

自发发射主导

受激发射主导

受激发射主导

激光功率急增

增益小于损耗

增益高于损耗

损耗>增益

超辐射

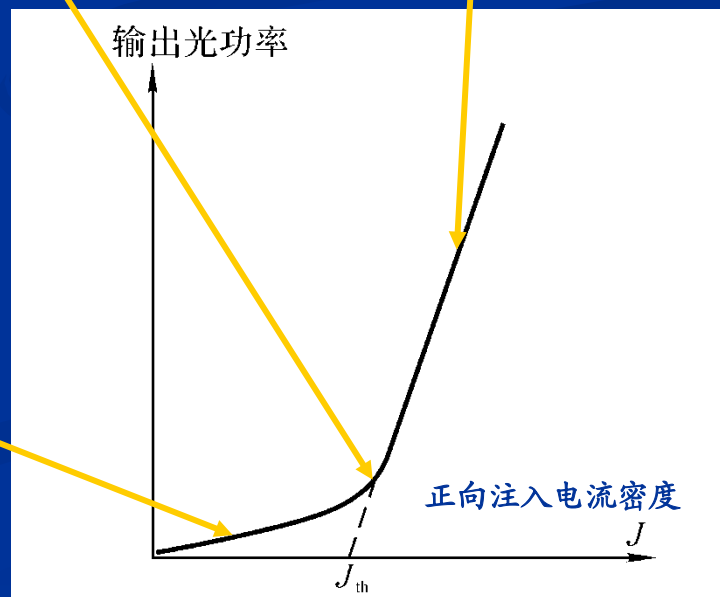
形成谱线敏锐的激光

无激光输出

无激光输出

- 普通荧光
- 带宽较宽
- 类似LED

- 较强荧光
- 无震荡模式



- 理想半导体激光器 (LD) 阈值增益系数:

$$g_{th} = \alpha - \ln(R_1 R_2)/(2l)$$

- 实际LD阈值电流密度与阈值增益系数的关系 (如GaAs):

$$g = \beta J^m$$



$$J_{th}^m = \frac{1}{\beta} \left[ \alpha - \frac{\ln(R_1 R_2)}{2l} \right]$$

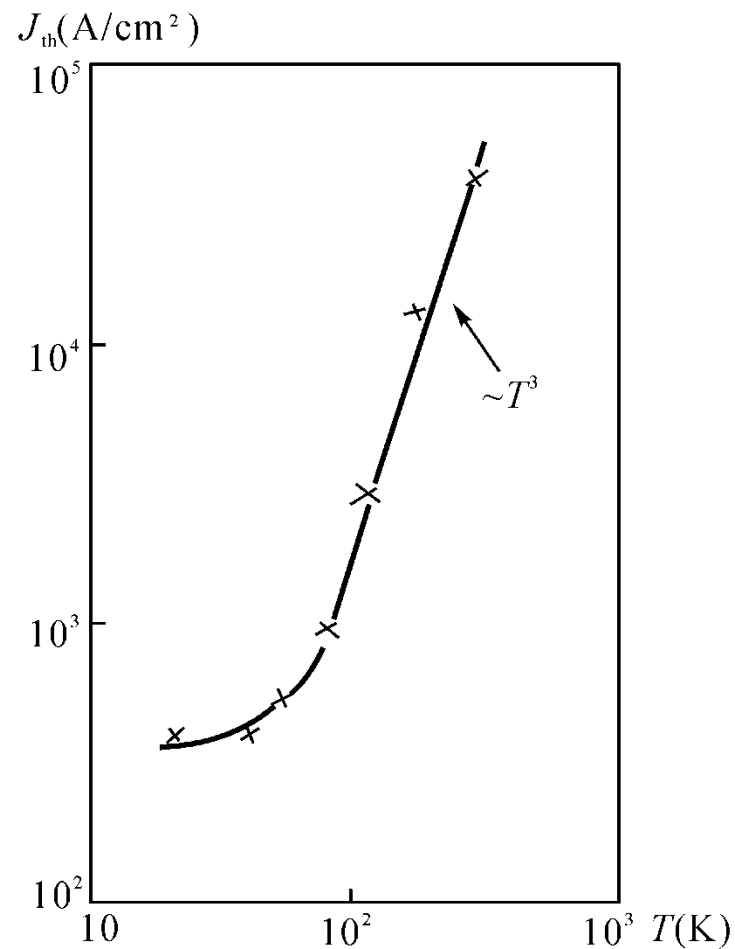


- $m=1$ : GaAs同质结,  $J_{th} \approx 4 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$
- $m=2.8$ : 某GaAs/AlGaAs双异质结,  $J_{th} \approx 10^3 \text{ A/cm}^2$



异质结的LD阈值电流密度 $J_{th}$ 较小

阈值电流密度  
大好? 小好?



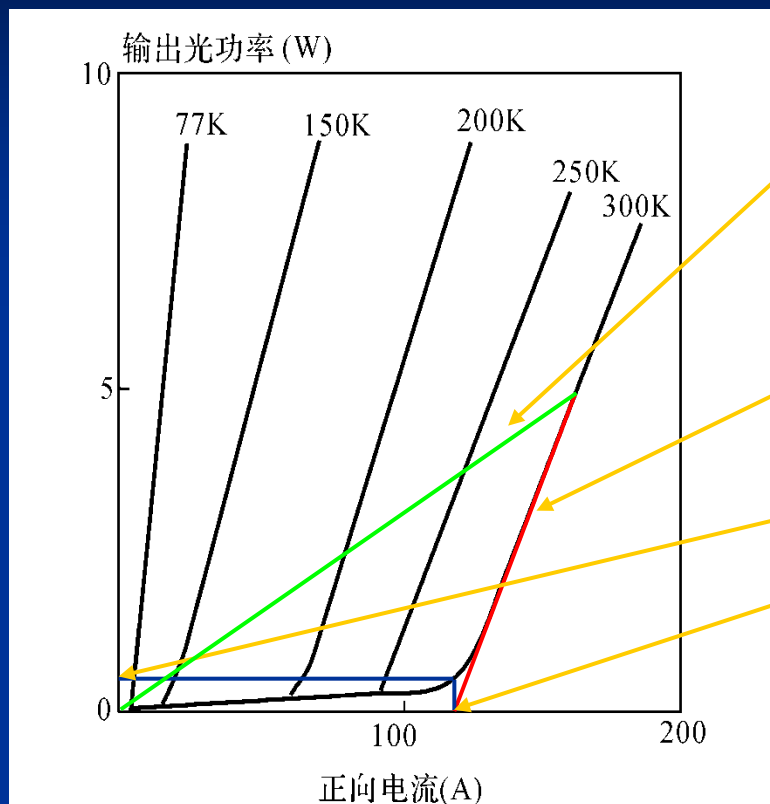
$$I_{th} = I_{th0} \exp(\Delta T/T_0), \quad T_0 \text{ 为特征温度}$$



温度上升，激光输出下降



### 3. 输出光功率和转换效率



外量子效率:

$$\eta_{\text{外}} = P / (IV)$$

外微分量子效率:

$$\eta_{\text{D}} = (P - P_{\text{th}}) / [(I - I_{\text{th}})V] \approx P / [(I - I_{\text{th}})V]$$

某LD的外微分量子效率:  $\eta_{\text{D}}$

$$77 \text{ K: } \eta_{\text{D}} = 50\%$$

$$300 \text{ K: } \eta_{\text{D}} = 30\%$$

$J > J_{\text{th}}$ , 外微分量子效率  $\eta_{\text{D}}$  与电流无关, 与温度有关:

$$\eta_{\text{D}} = f(T)$$

## 4. 模式与光谱分布



- 有源区长度（腔长） $l$ 、有源区宽度 $l_x$ 、有源区厚度 $l_y$
- 横向（ $x$ ,  $y$ ）边界反射，形成横向驻波（电磁场中的横模），  
两个横模指数： $m$ 、 $n$
- 沿谐振腔轴向镜面反射，形成纵向驻波（电磁场中的纵模），  
纵模指数： $q$



稳定的场分布由模指数（ $m$ ,  $n$ ,  $q$ ）表征

模式是一种场分布



谐振腔的相位条件（纵模条件）：

光波在谐振腔内往返传播一次，在

- 有源介质中的相位变化为： $k_0 n 2l$
- 单镜面反射的相位变化为： $0$  或  $\pi$
- 双镜面反射的相位变化为： $0$  或  $2\pi$



光波在谐振腔内往返传播一次的相位变化为：

$$\Delta\varphi = 2nlk_0 = 4\pi nl/\lambda_0 = 4\pi l/\lambda$$

相长干涉条件  $\Delta\varphi = 2\pi q$

- 真空中光波长： $\lambda_0 = 2nl/q$
- 介质中光波长： $\lambda = 2l/q$

真空中光波长:  $\lambda_0 = 2nl/q$        $q$ 是模指数



例:  $l = 200\mu\text{m}$ ,  $\lambda_0 = 0.9\mu\text{m}$ ,  $n = 3.6$

$$q = 1600 \gg 1$$

$q = 2nl/\lambda_0$  ↓ 差分

$$\frac{dq}{d\lambda_0} = \frac{2l}{\lambda_0^2} \left( \lambda_0 \frac{dn}{d\lambda_0} - n \right)$$

定义群速度 ↓

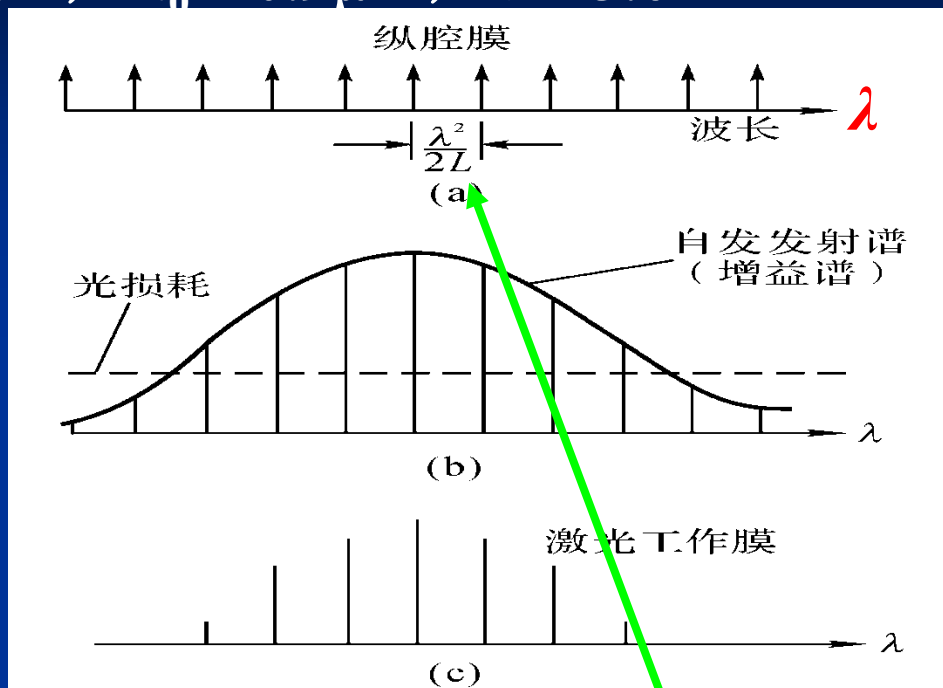
$$n_e = n \left[ 1 - \left( \frac{\lambda_0}{n} \right) \frac{dn}{d\lambda_0} \right]$$

$$\frac{dq}{d\lambda_0} = - \frac{2n_e l}{\lambda_0^2}$$



相邻纵模间隔  $dq=1$

$$\Delta\lambda_0 = \frac{\lambda_0^2}{2n_e l}$$



$$\Delta\lambda_0 = 0.56 \text{ nm} \ll \lambda_0$$

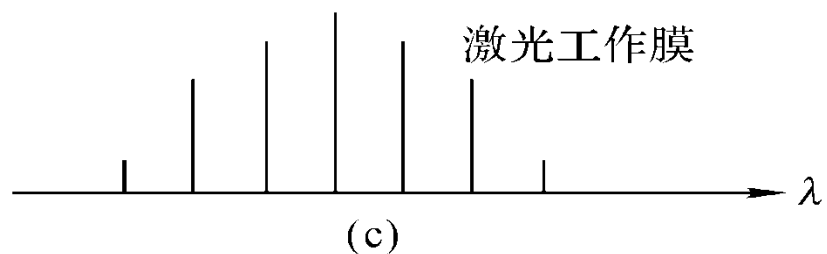
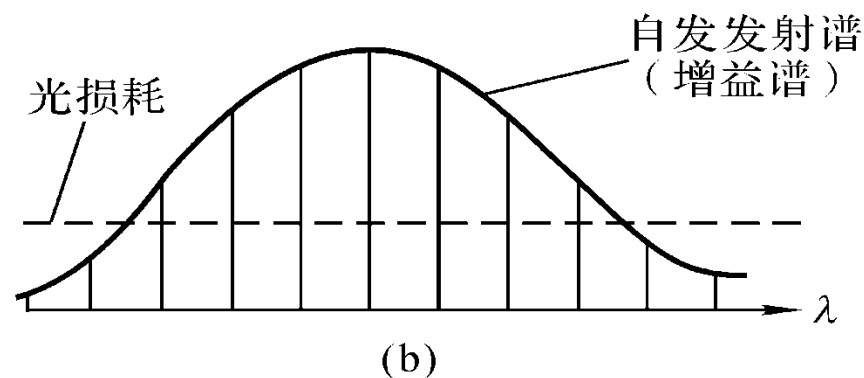
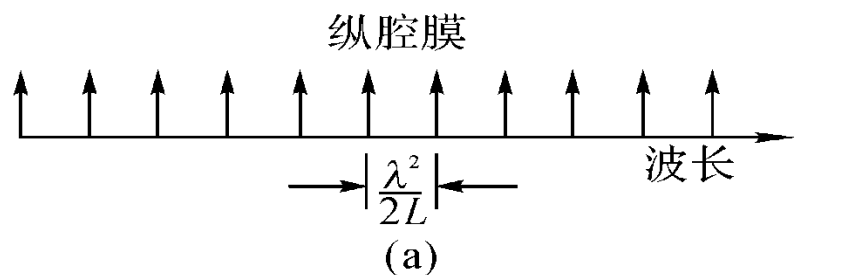
↑ 纵模间隔

$$\Delta\lambda_0 = \lambda_q - \lambda_{q+1} = \lambda_0^2 / (2nl) \approx \text{常数}$$

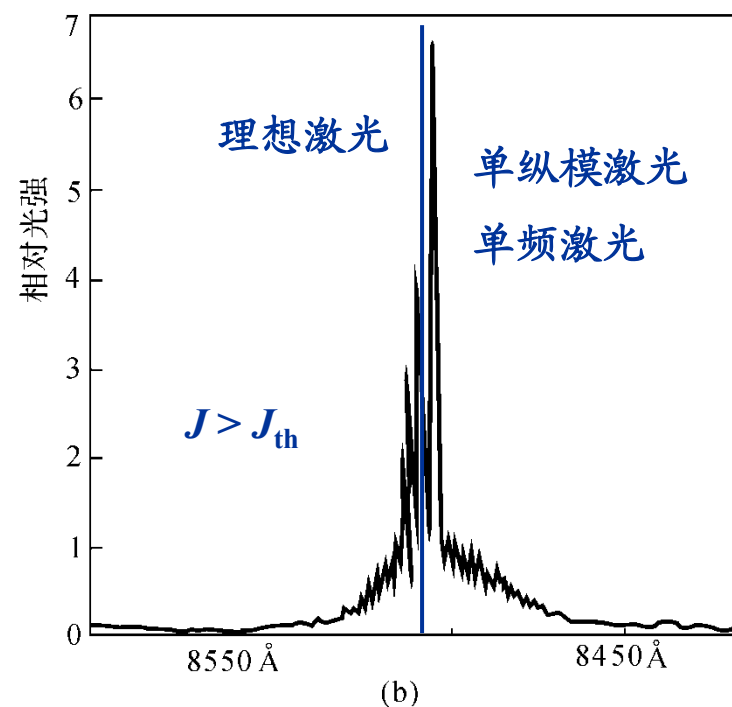
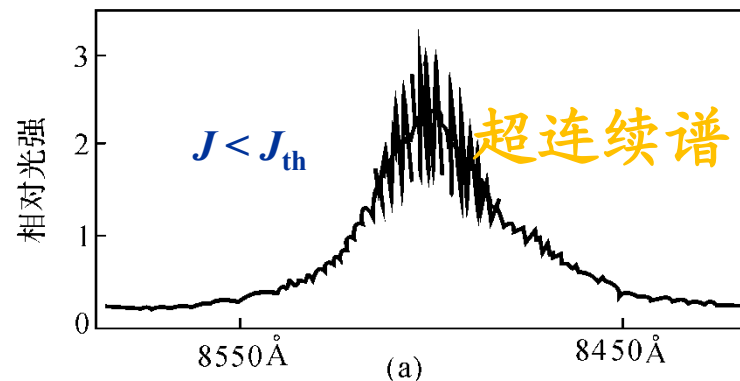
↑

$$\frac{dn}{d\lambda_0} = 0 \Rightarrow n_e = n \quad \text{无色散}$$

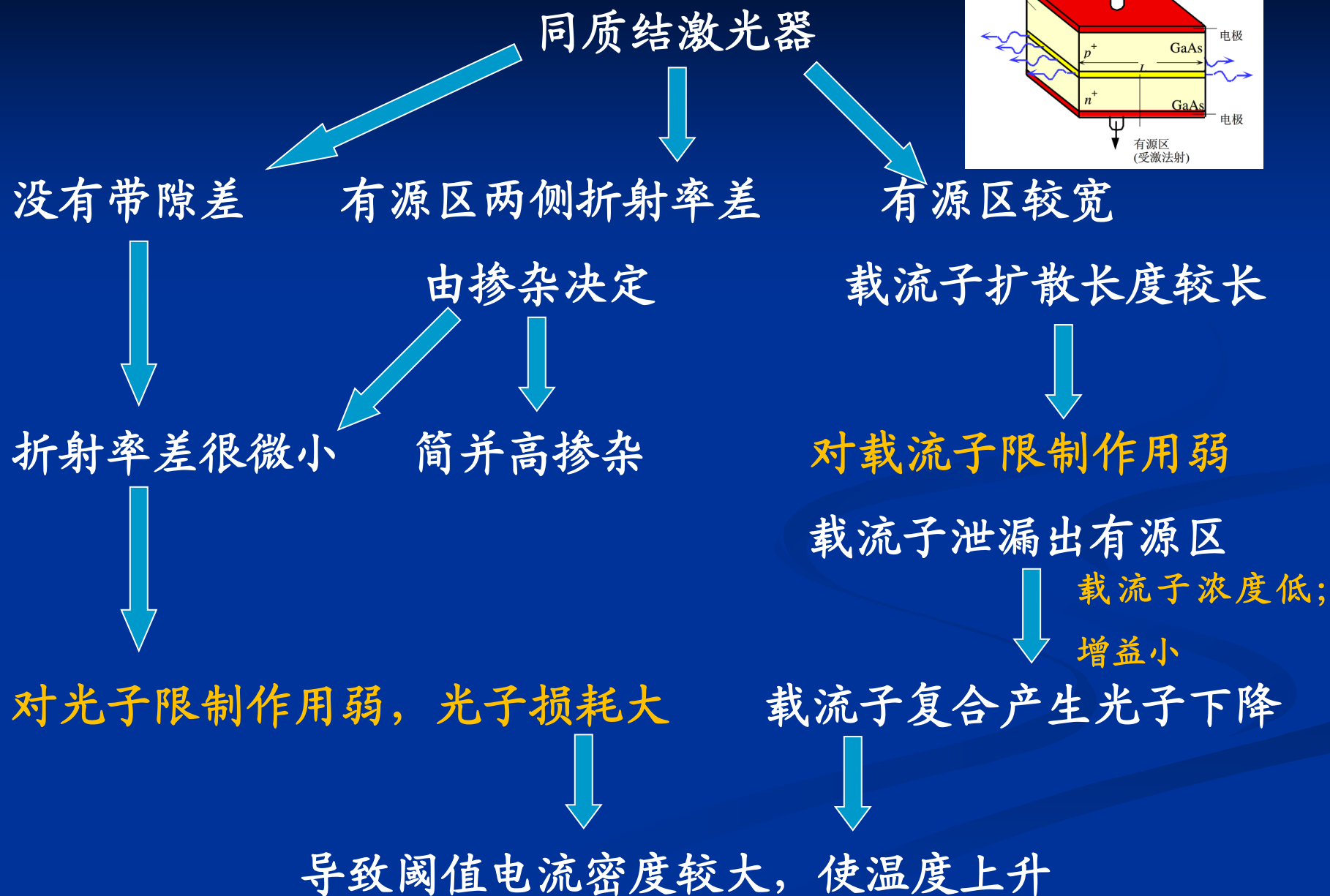
纵模数量与各纵模的能量  
都与LD的结构有关



GaAs激光器的发射光谱:



## 5.7.3 异质结激光器



## 同质结激光器



导致阈值电流密度较大，使温度上升

一般注入



要求较大的电流密度

不能在室温下连续工作（低温、脉冲）

异质结激光器



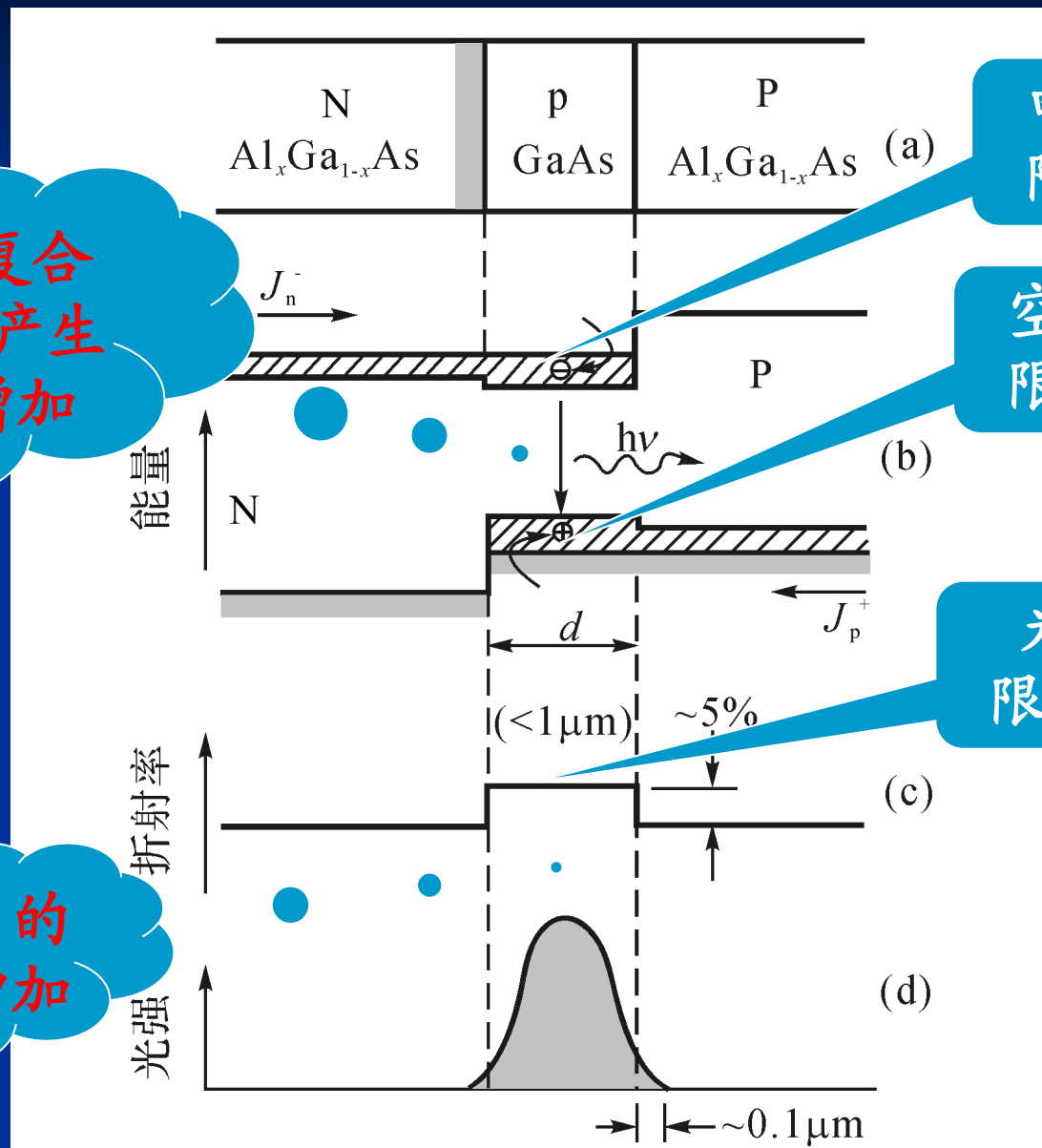
阈值电流密度下降，可以在室温下连续工作

- 同质结激光器：  $J_{th} \approx 4 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$
- 单异质结激光器：有源区一侧是异质结
- 双异质结激光器：有源区两侧都是异质结

$$J_{th} \approx 8 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$$

$$J_{th} \approx 1 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$$

# $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-\text{GaAs}-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 双异质结激光器



电子势阱  
限制电子

空穴势阱  
限制空穴

光波导  
限制光子

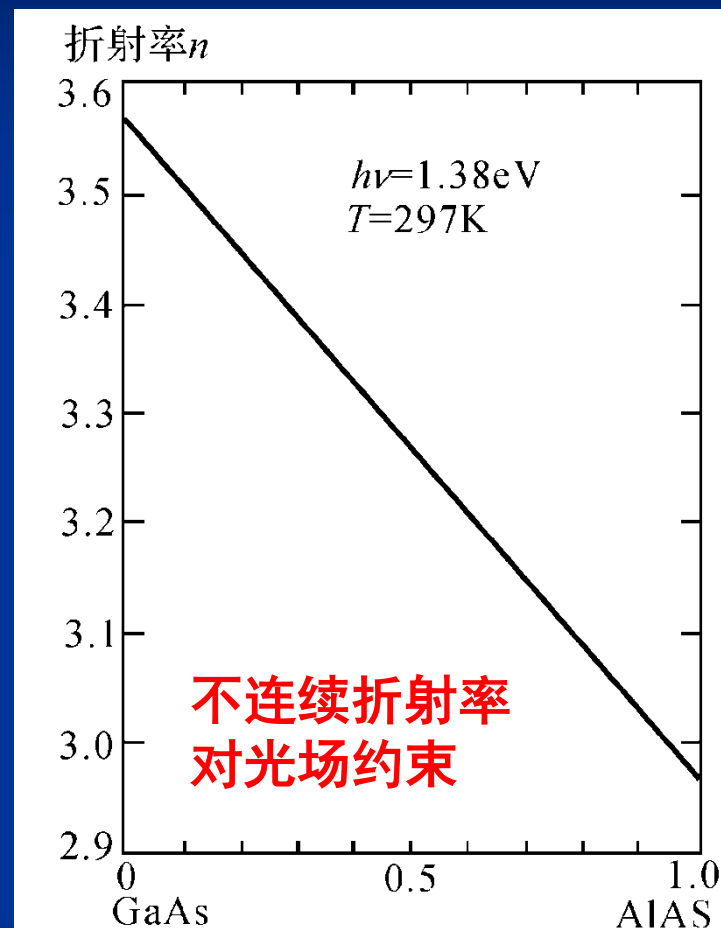
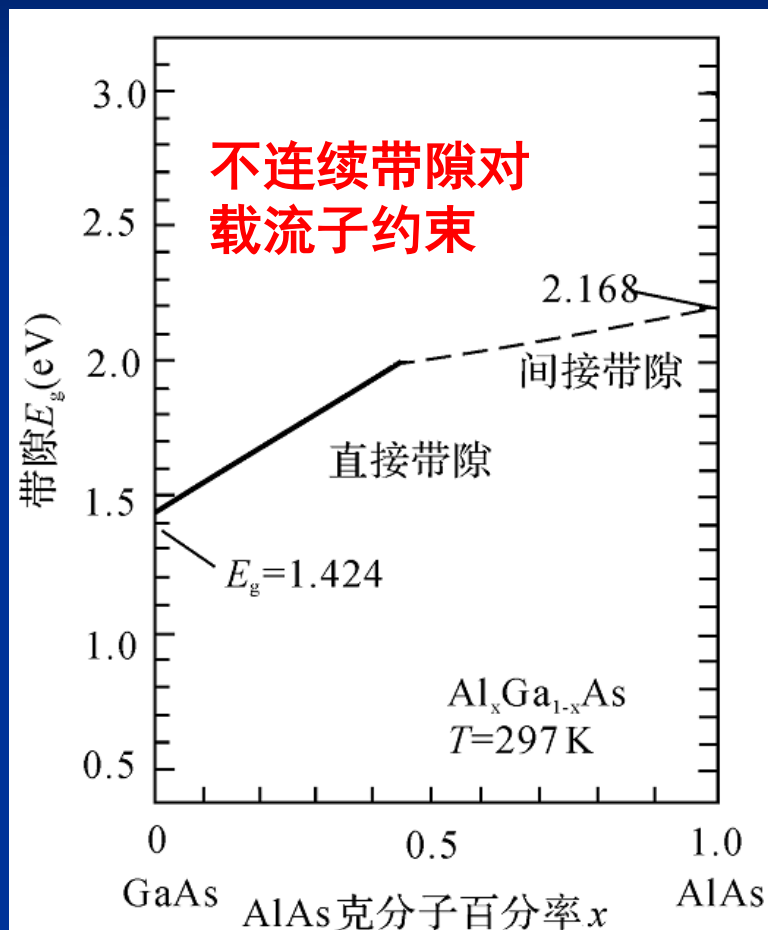
电子-空穴复合  
机会增加，产生  
的光子数增加

有效利用的  
光子数增加



为提高辐射功率，需对载流子和辐射光产生有效约束

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的 $E_g$ 与Al组分 $x$ 的关系



$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的 $n$ 与Al组分 $x$ 的关系

## 5.7.4 分布反馈式(DFB) 半导体激光器

Fabry-Perot谐振腔镜面反射

一系列间隔为 $\delta\lambda_0$ 的纵模

激光的单色性、单模（单频）性能下降

在有源区邻近的波导上制作周期性的波纹光栅结构

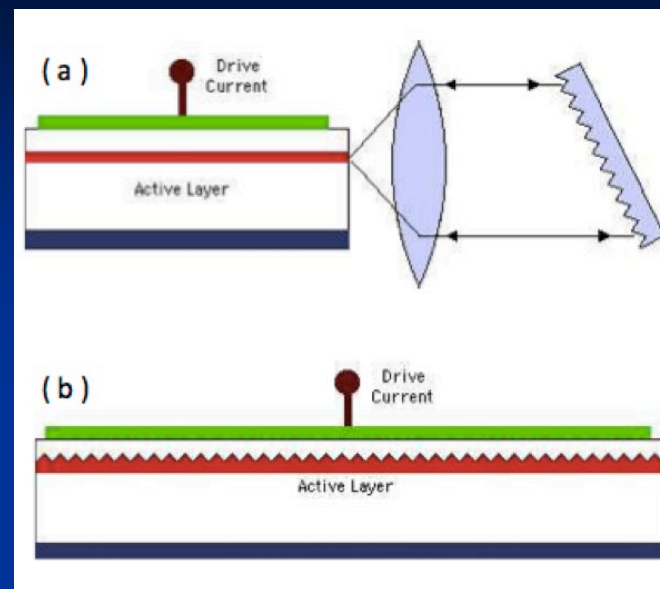
布喇格(Bragg)反射原理，同时需要满足的相位匹配条件：

$$\lambda_0 = 2n_s\Lambda/m, \quad (m=1, 2, 3, \dots \text{为衍射级})$$

$\lambda_0$ 为真空波长， $n_s$ 为半导体折射率

单模单频输出

$$\lambda_0 = 2n_sl/q$$



半导体激光器



布喇格光栅

单模单频输出



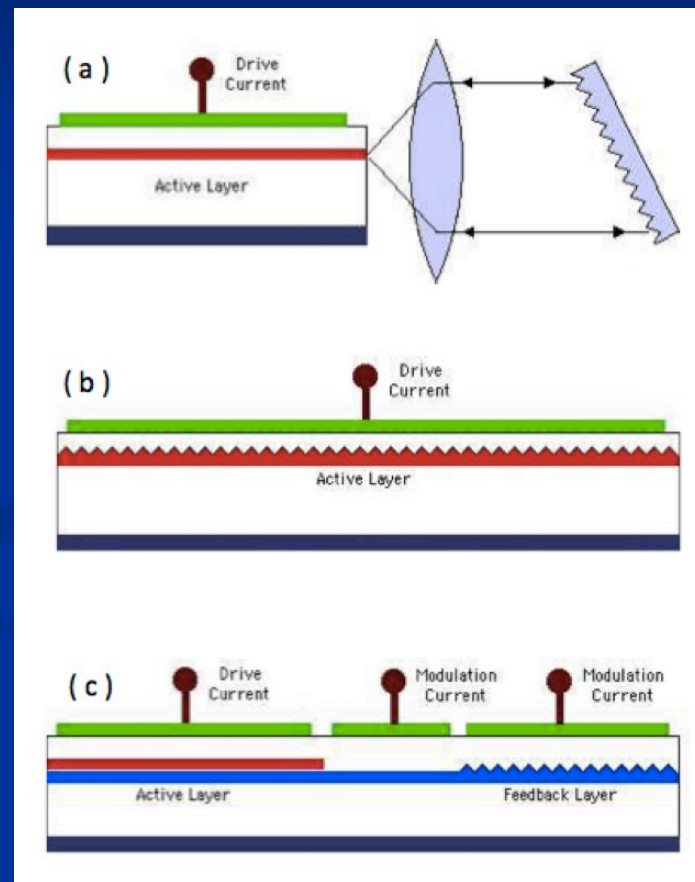
分布反馈式(DBF)半导体激光器



布喇格光栅移到有源区外面

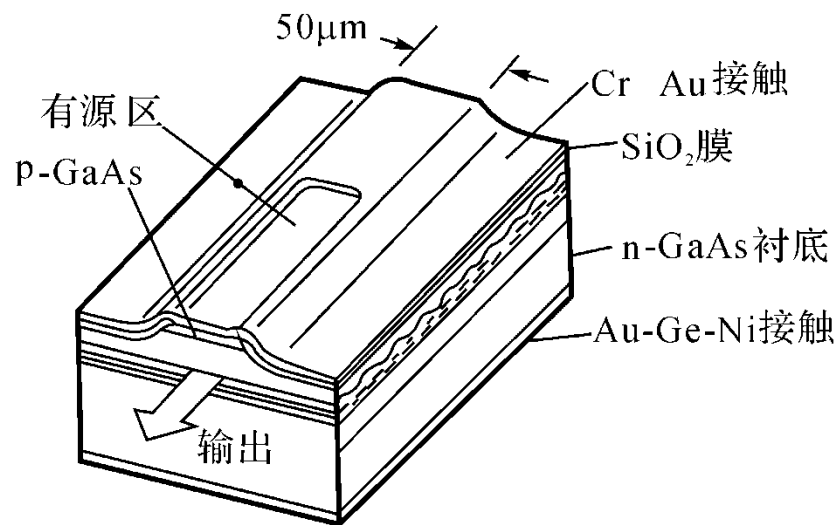
分布布喇格反射(DBR)半导体激光器

- 避免晶格损伤
- 降低损耗
- 降低阈值电流密度
- 提高发光效率

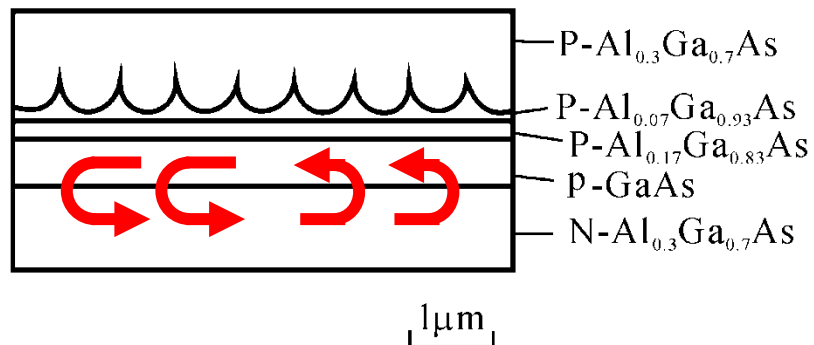


# DFB (GaAs-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As)双异质结

半导体激光器例:

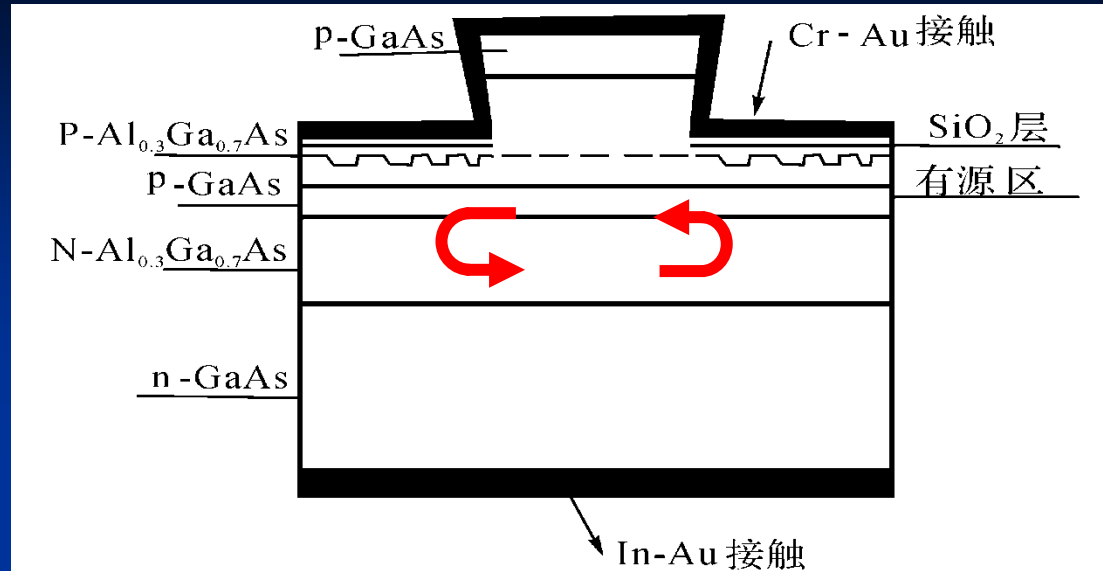


(a)



(b)

## 分布布喇格反射(DBR)半导体激光器例:



- 低的阈值电流密度:  $1000 \text{ A/cm}^2$
- 窄的谱线线宽:  $0.01 \text{ nm}$
- 易于控制纵模
- 不需F-P反射腔
- 有利于与其它光电子器件的耦合
- 可在同一衬底上获得多个不同波长的激光器