

# 致我尊敬的导师

2017年4月19日 星期三 09:02

话说这个也可以作为通通讯工具呢  
用这个联系到我的概率还大一些  
这是一次通信测试，收到请回复

看来你还是没有养成用OneNote 的习惯啊

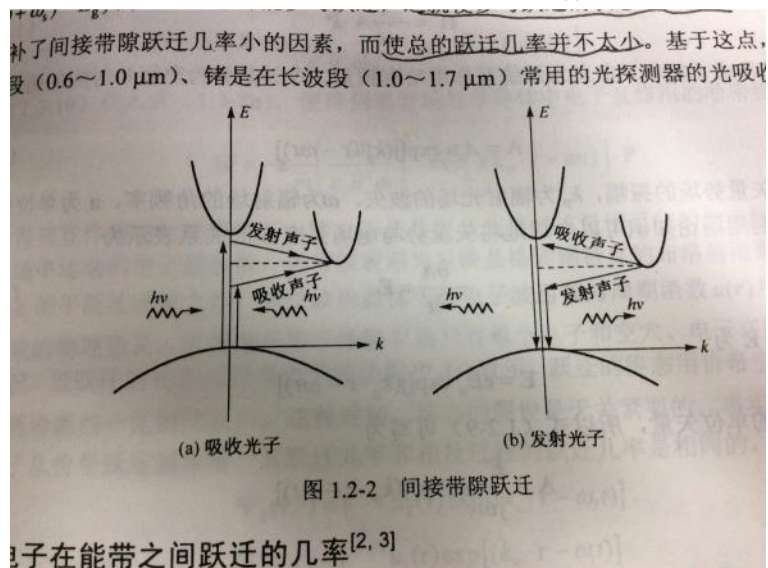
2017/4/25

# 第一章

2017年3月5日 星期日 10:23

直接跃迁

间接跃迁 参与跃迁的状态范围扩大, eg 硅 锗, 声子参与



K选择定律：量子系统总动量或能量守恒

跃迁速率影响因素：

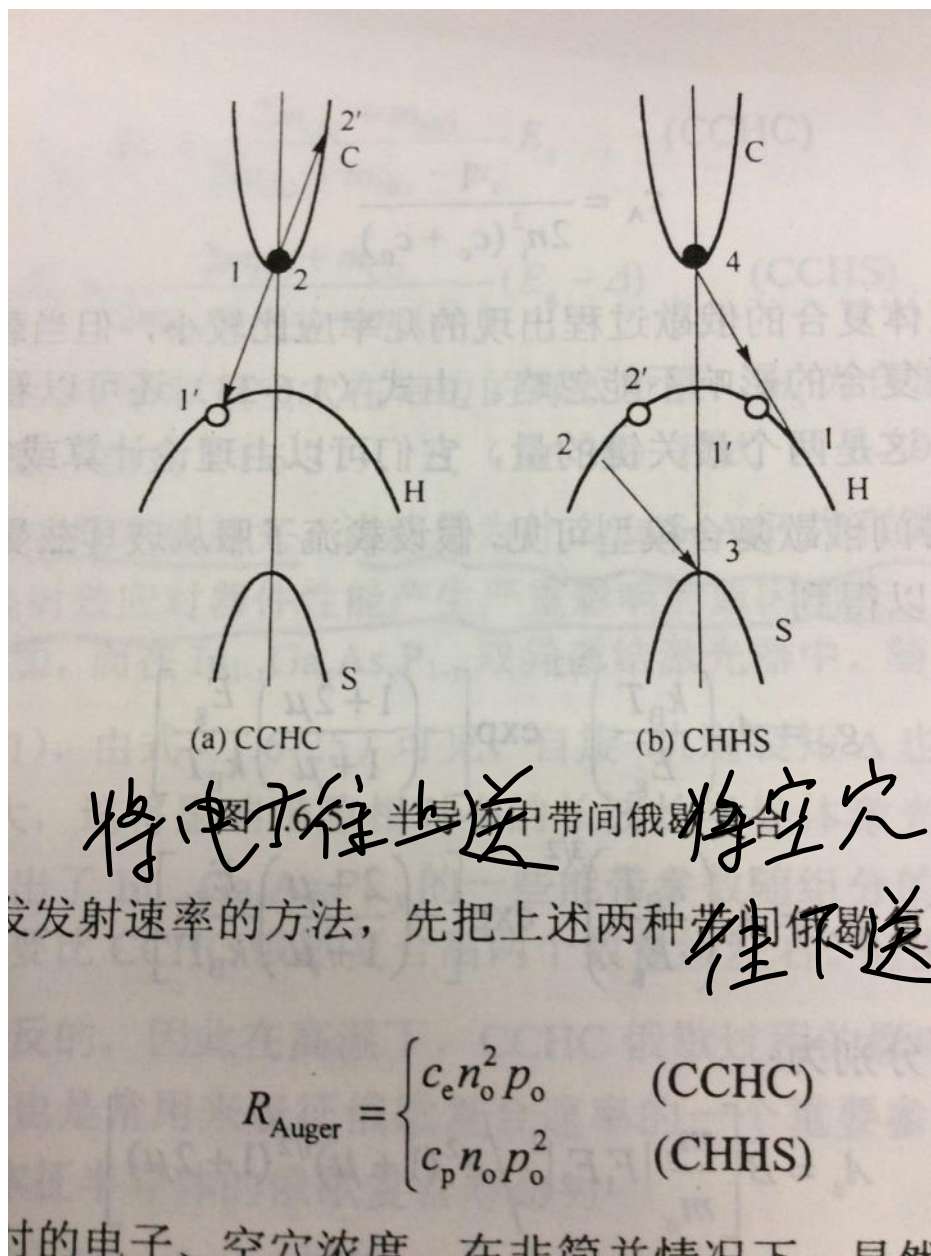
- 1: 电子的初态末态能级情况
- 2: 入射光子密度
- 3: 单位能量间隔中光跃迁密度
- 4: 跃迁几率系数  $B_{12}$ 、 $B_{21}$ 、 $A_{21}$

粒子数反转条件：

准费米能级之差

$$\Delta F \geq E_g$$

俄歇复合：电子与空穴的非辐射形式复合，以声子的形式将能量释放并转为载流子动能

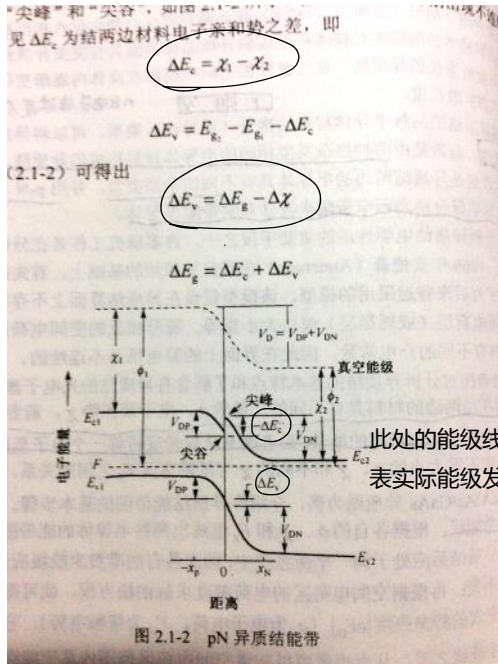


禁带宽度越小，俄歇复合发生的概率就越大 eg: InGaAsP

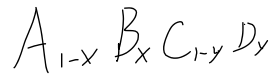
## 第二章

2017年3月16日 星期四 16:48

- 功函数：将一个电子从费米能级转移到真空能级所需的能量  
 电子亲和势：将一个电子个导带底转移到真空能级所需的能量



对于四元（三元）化合物，用弗伽定律计算晶格常数



$$a_{ABCD} = xy a_{BD} + x(1-y) a_{BC} + y(1-x) a_{AD} + (1-x)(1-y) a_{AC}$$

$$\text{晶格失配率: } \Delta a/a_0$$

对于禁带宽度： $G_{Al_{1-x}As_x}$

$$E_g (\text{eV}) = 1.424 + 1.247X \quad 0 < X < 0.45$$

$$E_g (\text{eV}) = 1.424 + 1.247X + 1.147 (x - 0.45)^2 \quad 0.45 < X < 1$$

对于禁带宽度： $In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}P_y$

$$\begin{aligned} \bar{E}_g (\text{eV}) = & (1-x)y \bar{E}_g (\text{InP}) + (1-x)(1-y) \bar{E}_g (\text{InAs}) \\ & + yx \bar{E}_g (\text{GaP}) + x(1-y) \bar{E}_g (\text{GaAs}) \end{aligned}$$

作业：2、5、7、8

## 第四章

2017年3月24日 星期五 10:45

同质结半导体激光器困难：

1. 阈值电流密度高且随温度变化剧烈
2. 电子扩散长度内产生的受激发射的光子无限制地向结区两边材料扩展

因为电子有比空穴高的迁移率，因而有大的扩散长度，所以同质结LD的有源区偏向P区一侧，有源区厚度主要由p区电子的扩散长度决定。

条形LD优点：

- (1) 由于有源层侧向尺寸减少，光场分布对称性增加，这对绝大多数应用都是有利的。
- (2) 因为在侧向对电子和光场也有限制，有利于减少激光器的阈值电流和工作电流。例如，目前掩埋条形激光器的阈值电流可低至5mA以下，而输出功率却可达10mW以上。
- (3) 在这种结构中，由于工作时产生热量的有源层被埋在导热性能良好的无源晶体之中，因而减少了激光器的热阻，有利于提高激光器的热稳定性。
- (4) 由于有源区面积小，容易获得缺陷尽可能少或无缺陷的有源层。同时，除用做谐振腔的解理面外，整个有源区与外界隔离，有利于提高器件的稳定性与可靠性。
- (5) 有利于改善侧向模式。

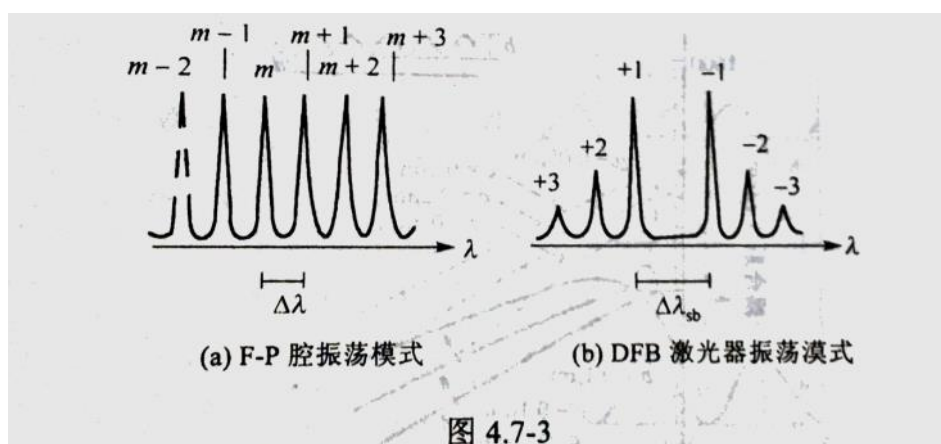


图 4.7-3

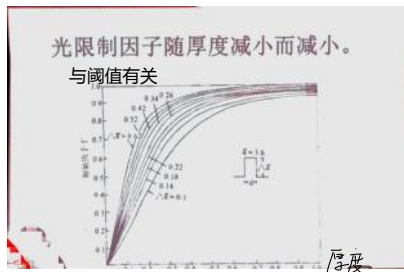
DFB对称模式带来了两个主模同时振荡

我们希望将辐射功率集中到一个主模上，同时使各振荡模式的阈值增益增大

引入 $1/4$ 波长相移

## 第五章

2017年3月23日 星期四 11:12



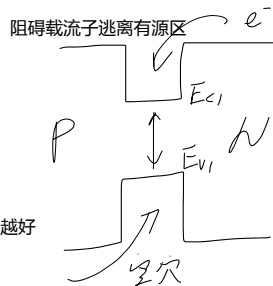
### 温度的影响

□ Why 温度升高, 阈值增加?

- 增益g 随T升高将变小
- 热载流子泄漏随T升高将加剧
- Auger复合, 表面复合、其它损耗随T升高将变大

$$J_{th}(T) = J_{th}(T_0) \exp\left(\frac{T - T_0}{T_0}\right)$$

$T_0$  -- 室温  
 $T_0$  -- 特征温度  
 $T_0$  越大, 温度稳定性越好



缺点: 对温度敏感, 所以要研发室温无制冷LD

### (1) 功率效率

□ 总体效率 (wall-plug efficiency)

$$\eta = \frac{\text{激光功率}}{\text{最大消耗的电功率}} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{(I E_g/e) + I r_s}$$

集载厚度 ← 结电压 串联电阻

一般LD的工作电压才几个伏特 → 方便

$V_{in} = E_g/e + I r_s$

主要影响

LD的结电压

$r_s = \text{LD体电阻} + \text{欧姆接触电阻} \rightarrow \text{掺杂浓度最高}$   
方便电流注入

内量子效率与**非辐射复合**有关, 所以不为100%, 不是所有注入有源区的电子都产生了光子

外量子效率, 产生的光子也不一定发射出来

### (2) 内量子效率

非辐射复合

有源区产生的光子数 (每秒)

$$\eta_i = \frac{\text{有源区产生的光子数 (每秒)}}{\text{注入到有源区的 } e-h \text{ 对数 (每秒)}}$$

### (3) 外量子效率

产生的光子 如何出去?

LD输出的光子数(每秒)

$$\eta_{ex} = \frac{\text{LD输出的光子数(每秒)}}{\text{注入到有源区的 } e-h \text{ 对数 (每秒)}}$$

阻碍光子产生:

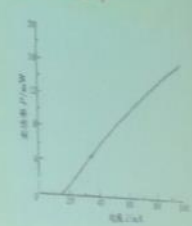
- 1, 电流是否足够 (侧向扩散等因素)
- 2, 非辐射复合
- 3, 不可能全部出射LD



### (4) 外微分量子效率

单位时间出射光子数

$$\eta_D = \frac{(P_o - P_{th}) \cdot h\nu}{(I - I_{th}) \cdot e}$$

$$\Rightarrow \eta_D = \frac{P_o}{(I - I_{th}) \cdot e} \times \frac{P_{th}}{(I - I_{th})}$$


### (5) 斜率效率

$$\eta_s = \frac{P_2 - P_1}{I_2 - I_1}$$

### 内量子效率和内损耗的测量

两部分

未知数2个

测量2个（或者更多）腔长不同的LD

曲线拟和求解出 $\eta_i, \alpha$

$$\eta_o = \eta_i \times \text{光输出效率}$$

$$\eta_o = \frac{\text{输出光}}{\text{消耗总功率}}$$

$$\text{输出光} = \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R}$$

$$\text{消耗总功率} = \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R} + \alpha$$

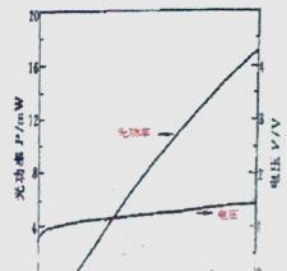
### 如何从LD的P-I曲线和V-I曲线判断LD的好坏？

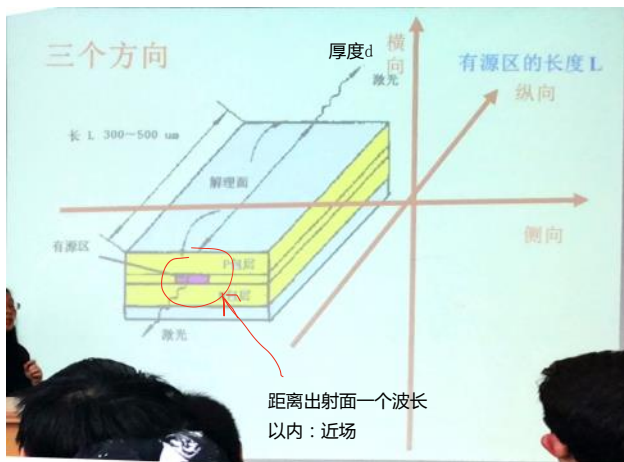
从P-I曲线看：

- ❖ 阈值电流——越小越好
- ❖ 曲线扭曲 (kink)——无，好
- ❖ 光功率的大小——越大越好
- ❖ 线性度

从V-I曲线看：

- ❖ 开启电压——越小越好
- ❖ 动态电阻:  $dv/dI$ ——越小越好





由于LD的发散角各向异性，有源区宽度与厚度不一致，所以  
远场为椭圆光斑

侧向发散角  $\theta_{\parallel}$

横向发散角  $\theta_{\perp}$

均是测量功率为一半的轮廓  $\theta = 2\theta_{1/2}$

要求：发散角小（光束集中），发散角对称（圆形）

优点：易于聚焦，易与光纤耦合

有源区厚度与横向发散角关系：

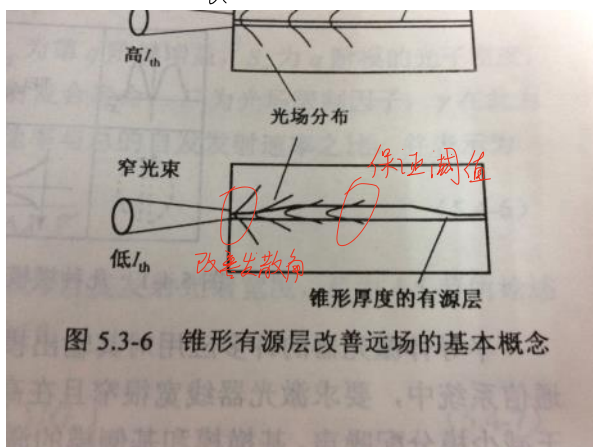
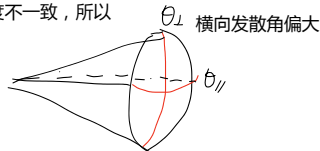
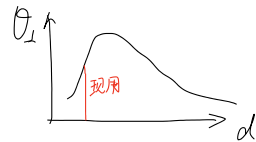


图 5.3-6 锥形有源层改善远场的基本概念

#### 5.4 模式特性

横模，侧模

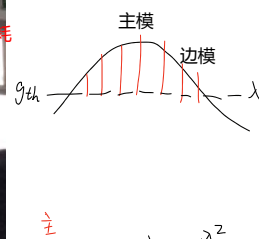
希望基横模，基侧模

厚度d很小，通常只有基横模激发，一般0.15um

侧向模数目受到条宽W的影响，一般2 - 3um

纵模：

初选，在一定波长范围内增益大于0（粒子数反转条件）







每个激光的波长，称为LD的一个纵模  
其中再分主模，次模（旁模，边模）  
纵模间隔，长腔长更好

主模  $q=0$   
次模  $q=1, q=2$

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2nL}$$

$$\Delta\nu = \frac{c}{2nL}$$

**边模抑制比 (SMSR)**  
SMSR—side mode suppression ratio

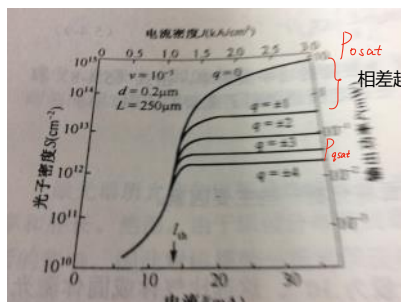
$$SMSR = 10 \times \log \frac{\text{主模功率}}{\text{最大的次模功率}}$$

以分贝 (dB) 为单位

当 SMSR 达到 30 dB  
可认为单纵模

一般 LD：纵模间隔 0.5—1 mm  
增益谱几十 nm，容易形成多纵模

纵模：  
① SMSR，② 纵模间隔



相差越大，越容易得到单纵模

**单纵模 LD 的意义**

多纵模的危害：

- 模式分配噪声
- 模式跳动
- 在光纤中传播时，出现脉冲展宽，尤其在高速、长距离光通信中

#### 影响因素

1. 自发发射因子，越小则单纵模越好， $P_{qSat}$  降低
2. 器件结构 (eg. 折射率波导更好，DFB 激光器更好)
3. 工作状态
  - a. 电流，电流增大，增益增大，使次模饱和
  - b. 温度，温度增大，禁带减小，波长红移 → LD 最大缺点  
可利用于可调谐激光器
  - c. 调制状态
    - i. 静态，直流电，单纵模
    - ii. 低速率调制，单纵模
    - iii. 要求，动态单纵模

#### 4. 空间烧孔效应

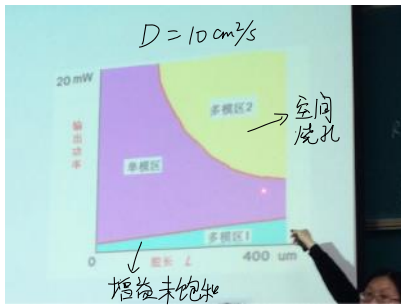
电流增加，使次模向主模转移

进一步增加，驻波波峰处载流子消耗，平均增益下降，多纵模  
与载流子扩散速率相关，腔长越长，电流越大，越易烧孔

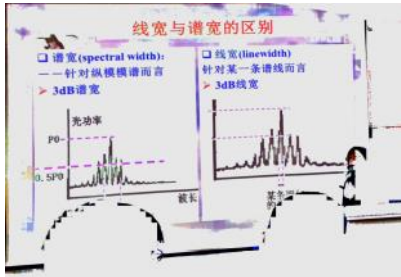
**如何实现单纵模 LD?**

1. 短腔长
  - 原理？  $\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2nL}$
  - 比如：
    - ◆ 短腔 FP-LD
    - ◆ VCSEL
2. 引入选择反馈机制
  - 只对特定的波长有强的光反馈，对别的波长的反馈很弱
  - 比如：
    - ◆ DFB LD、DBR LD
    - ◆ 外腔 LD

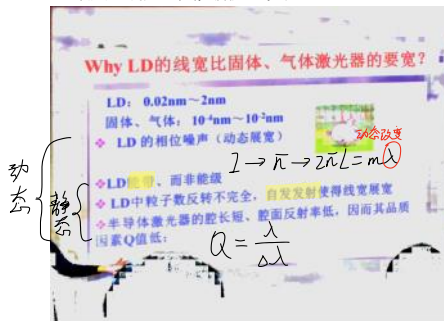
□ 增加主模饱和功率，降低次模饱和功率



## 5.5 LD 线宽



LD 缺点: 线宽比其他激光器更宽



$$\Delta\nu = \frac{v_g^2 h \nu n_{sp} \alpha_m (1 + \alpha^2) K}{8\pi P_0}$$

最重要

降低

电流

尽量不要改电流, 影响阈值

$$\alpha = \frac{d\bar{n}/dN}{dg/dN}$$

折射率

电子浓度

增益

提高微分增益  $dg/dN$

在决定  $\alpha$  和半导体激光器调制带宽中都起着重要作用

可能使半导体激光器的  $\alpha$  减至  $0 \sim 1$ 。在光纤通信中, 减小  $\alpha$  的影响, 延长通信距离。

## 5.6. 瞬态特性

### 两个速率方程

- 注入电流增加载流子。
- 自发发射消耗载流子。
- 受激发射的每一个纵模 (不同的q值) 消耗载流子

$$\frac{dN}{dt} = \frac{J}{ed} - \frac{N}{\tau_s} - \sum_q g_q S_q \dots \dots \dots \text{载流子速率方程 (P133:5.4-4)}$$

$$\frac{dS_q}{dt} = \frac{\Gamma_q N}{\tau_s} + \frac{c}{n} [\Gamma g_q - \alpha_s] S_q \dots \dots \dots \text{光子速率方程 (P133:5.4-5)}$$

与电子浓度相关

自发发射

受激发射

### 两个速率方程

- 注入电流增加载流子。
- 自发发射消耗载流子。
- 受激发射的每一个纵模消耗载流子

$$\frac{dN}{dt} = \frac{J}{ed} - \frac{N}{\tau_s} - GS \dots \dots \dots \text{载流子速率方程 (P145:5.6-1)}$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{N}{\tau_s} + GS - \frac{S}{\tau_p} \dots \dots \dots \text{光子速率方程 (P145:5.6-2)}$$

单纵模

- 自发发射增加光子密度
- 受激发射增加光子密度
- 光子寿命是有限值, 光子死亡使得光子密度降低。

### 稳态

忽略光子寿命的影响

作了哪些假设?

单纵模  
自发发射因子  $\gamma=1$   
光限制因子因子  $\Gamma=1$ ;  
内量子效率=1 (内损耗  $\alpha_c=0$ )  
光子寿命是有限的

瞬态

$$G = (c/n) * g$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{J}{ed} - \frac{N}{\tau_s} - GS \dots \dots \dots \text{载流子速率方程 (P145:5.6-1)}$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{N}{\tau_s} + GS - \frac{S}{\tau_p} \dots \dots \dots \text{光子速率方程 (P145:5.6-2)}$$

### LD的瞬态现象

#### 电光延迟

#### Why?

如何减少延迟时间? 预先给予一个电流  $I_0$ , 小于阈值电流

使  $I_0 \rightarrow I_{th}$ , 则  $t_d \rightarrow 0$

$$t_d = \tau_s \ln \left[ \frac{I_p}{(I_p - I_{th} + I_0)} \right]$$

电光延迟时间

注入电流

电子密度

光子密度

自发发射

阻尼振荡

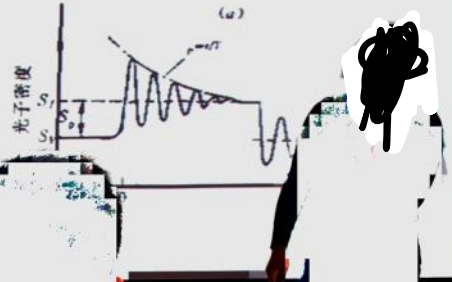
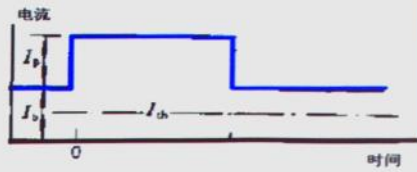
电子密度仍大于  $N_{th}$ , 光子仍增加

$$t_d = \tau_s \ln \left( \frac{J}{J - J_{th}} \right)$$

## 张弛振荡

➤ 张弛振荡频率  $f_r$

➤ 张弛振荡角频率  $\omega_r$

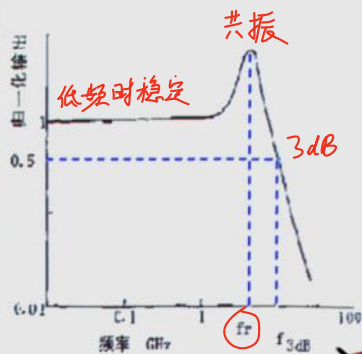


## LD的调制带宽

■ 3dB 调制带宽  $f_{3dB}$

■  $f_{3dB}$  越大, LD的调制特性越好.

■ 当  $f_r$  越高,  $f_{3dB}$  越大.  
➤ 表明LD能够直接调制的速率越大.



外部电流  $I \uparrow$

$f_r \uparrow$

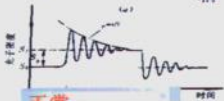
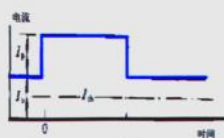
调制含义

9/17

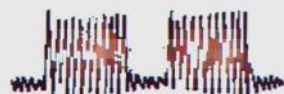
提高调制带宽3dB

- 1, 提高张弛振荡频率, 提高微分增益
- 2, 减少寄生电容

## 脉冲调制下的自脉动



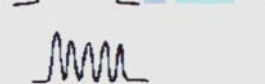
正常,  
无自脉动



(d) 脉冲调制 (100 ns)  
 $I_0 = 158 \text{ mA}$   $I_p = 30 \text{ mA}$   
100 ns/div



反常,  
有自脉动



14/17

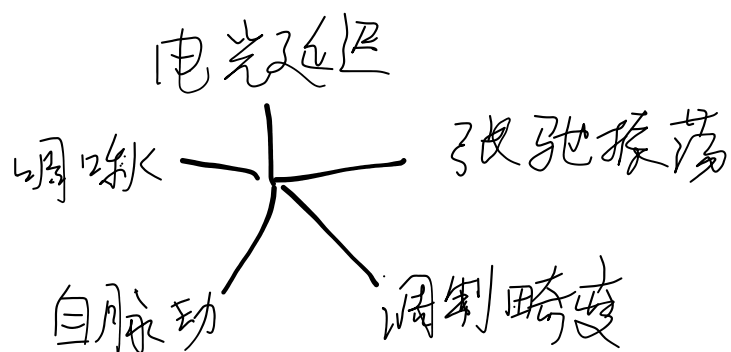
- **增益波导LD**易出现自脉动。
- **LD内部缺陷杂质多**，易出现自脉动。
- **LD中不均匀**，易出现自脉动

危害：干扰LD高速调制  
应用：超短脉冲LD

Why ?

饱和吸收体模型？  
载流子烧洞和自聚焦效应？  
其他模型？

15/17



5.7

### LD的热效应对LD的不利影响

T 升高 →

- 阈值提高
- 激射波长漂移
- 光功率下降
- 性能退化、失效

$$\Delta T = r_T P_T$$

热耗散功率  $P_T = \text{总功率} - \text{光功率}$

$$= IV_{th} + I^2 r_s - P_p$$

$r_T$  -- 热阻

2 / 14

## 如何减小温升？

$$\Delta T = r_T P_T$$

$$P_T = IV_{\text{偏}} + I^2 r_s - P_f$$

$P_T$  { ✓ 降低LD的串联电阻 $r_s$ ,  
✓ LD材料、结构优化

$r_T$  { ✓ 提高LD封装的散热性  
✓ 热沉、半导体制冷器、强制水冷通道

## LD的退化

□ 腔面的破坏和退化 突然性的，不可逆转  
➤ COD—灾难性损伤- **Catastrophic Optical Damage**

□ LD的解理腔面上由于光功率密度太大，  
解理面局部融化而被损坏。

原因：

• 近场分布的不均匀、局部过热

• 氧化、腐蚀、表面态、

• 解理面损伤

腔面破坏阈值功率密度

$10^2 \text{ A/cm}^2$

• ....

缓慢性的：氧化，腐蚀.....

在出厂前进行加速老化测试

改善措施：镀膜，密封保护

## 本章习题（下周四交）

- 1
- 2
- 4
- 6
- 7



## 第六章

2017年4月11日 星期二 10:09

能带工程：量子阱，量子线，量子点

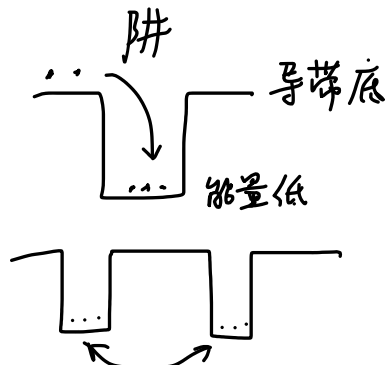
超晶格

**量子阱、超晶格**

□ 超晶格 (superlattice)

由两种或者两种以上的不同材料的超薄层，交替生长形成的人工周期性结构。

- ◆  $E_g$  较小的叫阱，势阱，
- ◆  $E_g$  较大的为垒，势垒



量子阱中，有源区很窄，载流子被束缚在很小的区域内，能够取的能量值是分立的，量子化的

量子尺寸效应，材料在某方向尺寸很小，可以与德布洛意波相比，载流子在该方向运动受限，出现量子化的能级

两个阱的电子相互作用大，则为超晶格，反之为量子阱

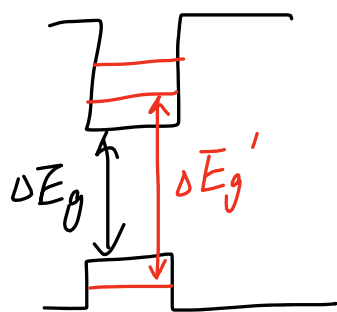
**出现量子化的子能级**

好处：

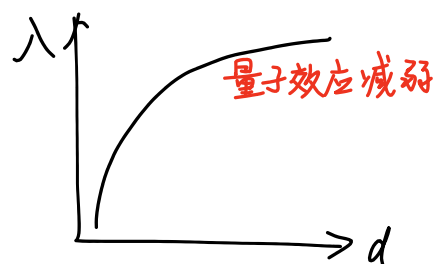
□ 跃迁主要发生在这些子能级之间，

线宽更窄 好处 ①

② 等效带隙增大



激射波长随阱厚而改变



**QW：台阶状的态密度**

□ 体材料：抛物线能带

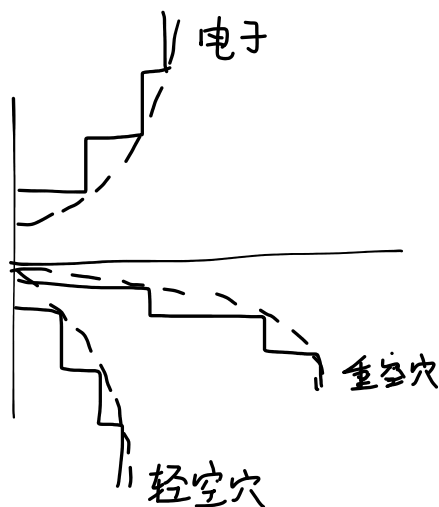
□ QW：台阶状的态密度

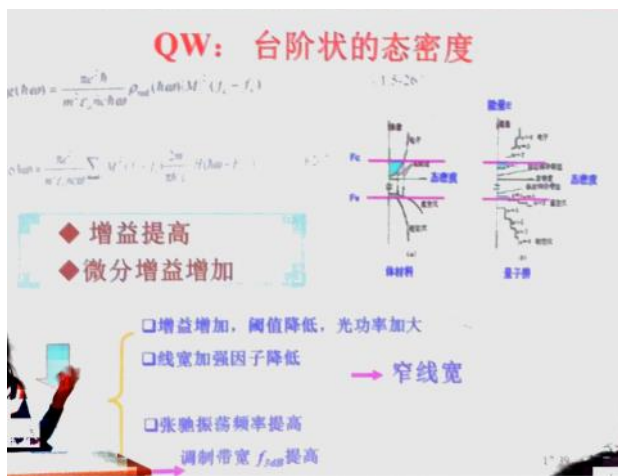
有利粒子数反转

图 6-2-3 量子阱中的电子分布图

体材料  $\rho_{2D} = \frac{(2m^* \hbar^2)^{-1/2}}{2\pi} \sqrt{E}$  抛物线分布

量子阱  $\rho_{2D} = \frac{m^*}{\pi \hbar^2 L_z} \sum H(E - E_i)$  台阶状分布





多米诺排骨

能带结构改变：

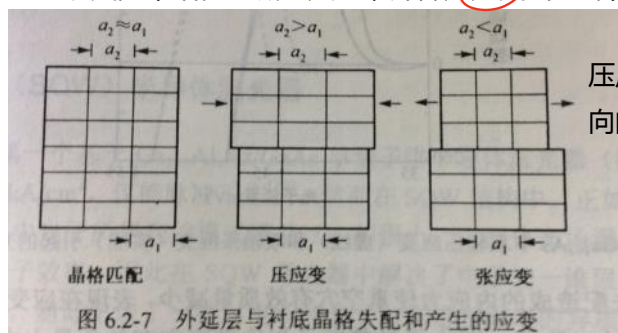
空穴有效质量减小

价带间吸收减小

俄歇复合降低

} 降低阈值

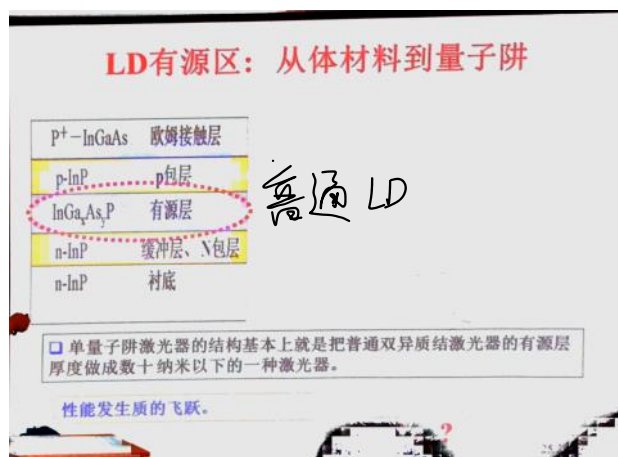
怎么改变能带结构：减小尺寸，外界加应变引入弹性势能



压应变和张应变会产生另一方向的收缩或膨胀

应变层外延材料的厚度不超过临界厚度

## 6.3 量子阱 LD



## QW LD的结构



体材料

QW LD

### SCH——分别限制层

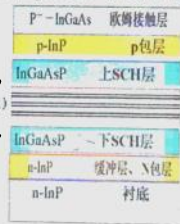
#### separate confinement heterostructure

由于QW有源层太薄，不能有效地将光场限制在有源区内，所以在其两边加上SCH层（其 $E_g$ 较大，折射率较小），以提高光限制因子。

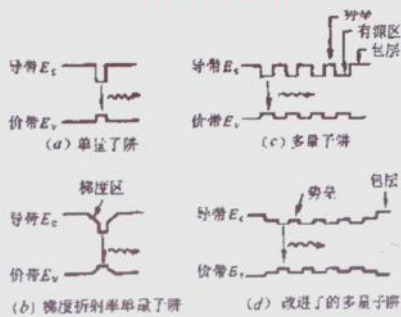
$$r = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} I_z dx}{\int_{-\infty}^{\infty} I_z dx}$$

低折射率

限制光



### 几种MQW有源区

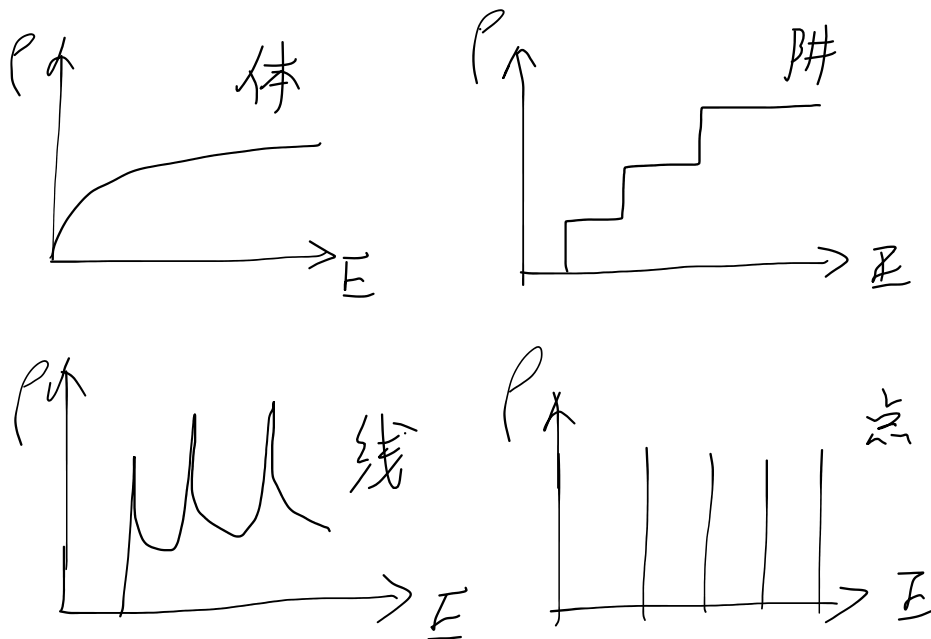


### 量子阱LD的优点

- ❑ 改变量子阱的厚度可以在相当宽的范围内改变激励波长；
- ❑ 只要较小的注入载流子就能有高的增益、高的效率，产生更大的功率；减小了俄歇复合和内损耗。
- ❑ 降低 $J_{th}$ ，而且 $J_{th}$ 随温度变化小，更大的特征温度；温度稳定性好，可靠性高。
- ❑ 微分增益系数高，能在更高的调制速率下工作，动态工作特性好。
- ❑ 增益变化只引起较小的折射率改变，所以光谱线宽窄，频率啁啾小；
- ❑ ...

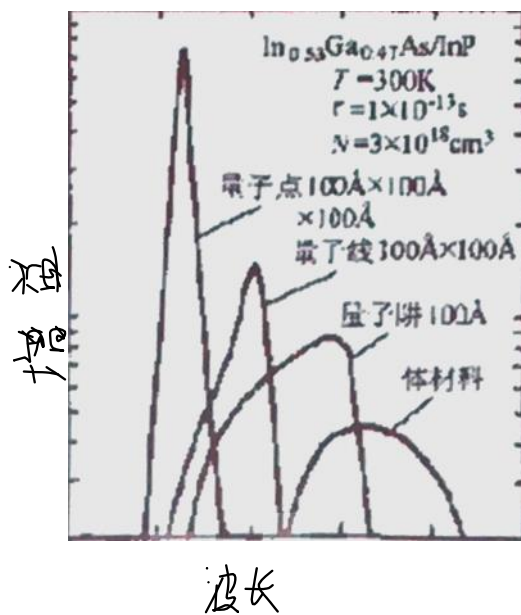
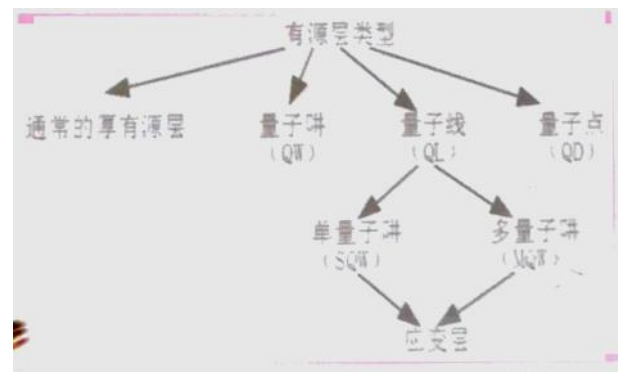
## 6.4 量子线和量子点

阱 体 阱



量子点将能带分裂为能级

	体材料	量子阱	量子线	量子点
载流子所受到的限制	0维	1维	2维	3维
载流子运动自由度	3	2	1	0
增益	小	大	大	大
微分增益	小	大	大	大
阈值	高	低	低	低
增益谱宽	大	小	小	小
调制带宽	小	大	大	大
啁啾线宽	大	小	小	小
噪声特性	差	好	好	好
温度特性	差	好	好	好



- 1谱宽：能级分立
- 2增益幅度
- 3波长蓝移：等效带宽增大

4 5 6, 7

# 第八章

2017年4月25日 星期二 10:10

## 可见光半导体光发射器件

红光，用GaAlAs 作为材料，增大Al的比例可以增大带隙，使探测波长蓝移。但是同时使有源层和限制层晶格失配，使阈值电流增大，会在含量0.45时由直接变为间接带隙材料

现在最广泛使用GaInAs/AlGaInAs双异质结构，能很好地与衬底GaAs晶格匹配，在此基础上调节Al的含量调节直接带隙。

LD能保证垂直于有源层方向为横基模，但是侧向一般为多模特性

绿光一直难以解决，现行的方法是非线性效应实现频率变换

# 第九章

2017年4月13日 星期四 10:10

LD	LED	PD
发光器件	发光器件	光吸收器件
将电信号转变成光信号	将电信号转变成光信号	将光信号转变成电信号
受激发射为主	自发发射为主	受激吸收为主
一般： 直接带隙材料 Why?	一般： 直接带隙材料 Why?	直接带隙材料 间接带隙材料
正向偏压	正向偏压	反向偏压 或者零偏压

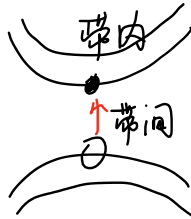
半导体材料光吸收，LD和LED，PD

## 1 本征吸收

电子在带与带之间跃迁形成的光吸收

$$h\nu \geq E_g$$

$$\lambda \leq \frac{1.24 (\mu\text{m})}{E_g (\text{eV})}$$



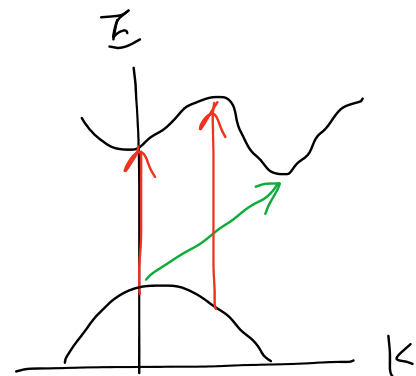
波长过大的光子不被材料作用，称为透明窗口

分为：直接&间接吸收

直接吸收

- 直接跃迁——整直跃迁
  - 电子光子系统自动满足能量守恒、动量守恒
  - 不需要第三者的参与 → *phono?*
  - 一级过程
  - 跃迁几率大
  - 书上称为“直接带隙跃迁”

光子的动量可以忽略  
不记，主要看跃迁前  
后电子的动量守恒



间接带隙材料也能发生直接吸收



## 间接吸收

- 间接跃迁——非垂直跃迁
  - 电子光子系统不能满足能量守恒、动量守恒
  - 需要第三者——声子的参与
  - 二级过程
  - 跃迁几率小
  - 书上称为“间接带隙跃迁”

只有满足光谱选择定则的跃迁才能以较大的概率发生  
由此分为：允许跃迁 & 禁戒跃迁  
紫外光探测困难：吸收系数过大，吸收发生在材料表面，而不是结区

## 本征吸收系数

*edge*

- 陡峭的吸收边
  - 发生本征吸收的最小能量（最大波长）
  - 由  $E_g$  决定
- 本征吸收谱——连续

渗透深度

$$I = I_0 e^{-\alpha x}$$

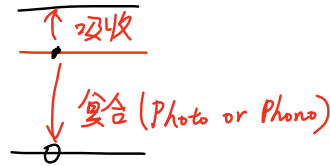
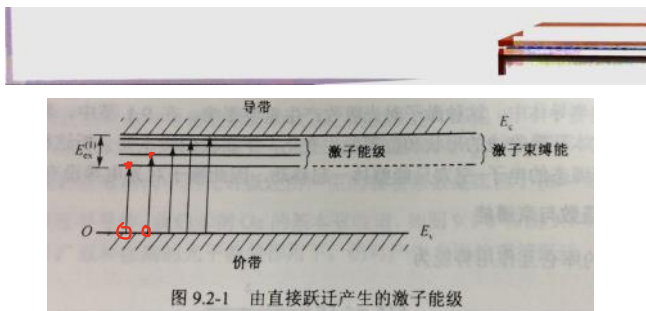
深度定义为强度下降为  $1/e$  的距离

$$d = \frac{1}{\alpha}$$

## 2. 激子吸收

### (2) 激子吸收

- 激子——Exciton
- 激子的产生
  - 当光子能量  $h\nu$  比  $E_g$  小一些时，此时并不能发生本征吸收。
  - 但是在一定的条件下，价带电子也会吸收这样的光子，从价带跃出，却还不足以进入导带成为自由电子，而是在导带底附近的禁带中，依然受到空穴的库仑作用。
  - 受激电子与空穴相互束缚而结合在一起成为一个新的系统——激子。

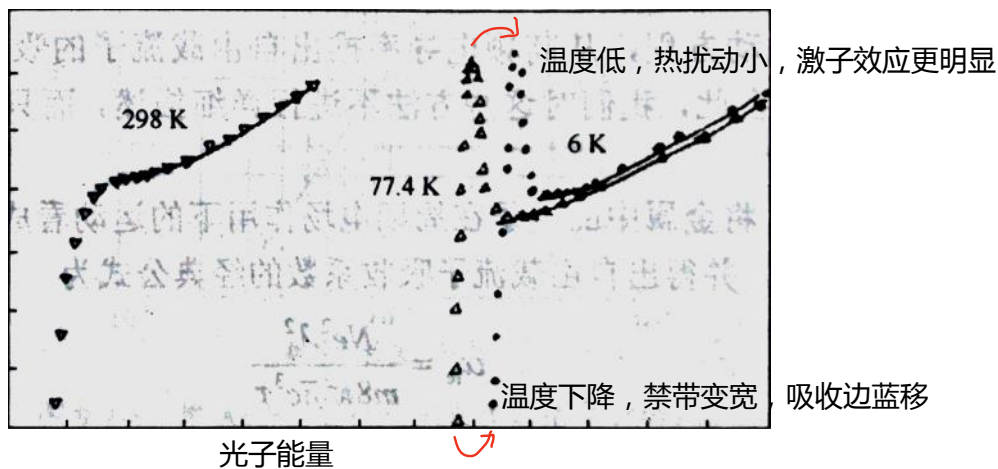


激子束缚能越小，则激子效应越不明显

禁带越大，激子束缚能越大

激子体系中，电子空穴一起移动，但是这种束缚不稳定，容易受外界干扰

激子吸收 & 激子发光

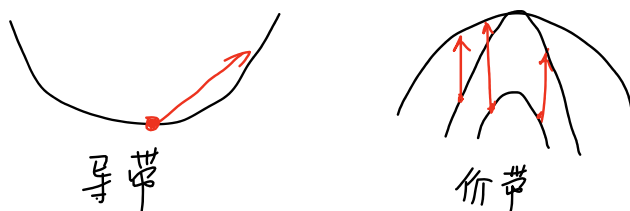


□ 一般在以下几种情况下，可以观察到激子的存在

- 在低温下
- 宽禁带高纯材料——(GaN 发光器件中，激子发光机制?)
- 超晶格、量子阱器件——应用。激子吸收应用在电吸收调制器中

### 3, 自由载流子吸收 (带内过程)

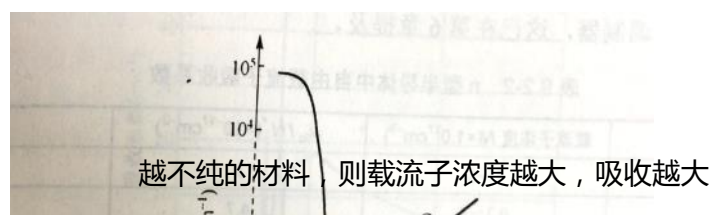
在同一个带内的自由载流子的跃迁



可用于长波长高速探测

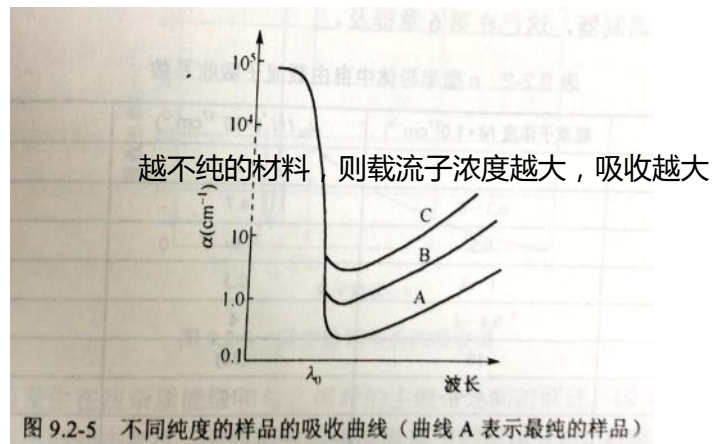
自由载流子吸收正比于：

- 波长的平方
- 载流子浓度



可用于长波长高速探测  
自由载流子吸收正比于：

- 波长的平方
- 载流子浓度



自由载流子吸收对LD,LED不利

- 一主要的内部光损耗机制。
- Why LD,LED有源区中一般不掺杂?

自由载流子吸收应用在高速红外探测器中。

- Why 高速?
  - 带内跃迁过程比带间跃迁过程迅速得多。
- Why 红外?
  - 带间跃迁对应的能量变化很小

#### 4, 杂质吸收

(4) 杂质吸收

- ❑ 束缚在杂质能级上的电子、空穴引起的光吸收。
- ❑ 光子能量 $<E_g$ 时, 发生杂质吸收
- ❑ P183 图7.2-7
- ❑ 杂质吸收对LD、LED不利。
- ❑ 杂质吸收引起的光电导效应, 可以应用在长波长红外探测器中。

—— 施主

—— 受主

—— 杂质

#### 5, 晶格振动吸收

透明窗口：既不对光子吸收，也不对光子增益  
短波限由禁带宽度决定，长波限由晶格振功决定

常用半导体光电探测器材料  
直接带隙材料&间接带隙材料  
多数用本征吸收，少数用其他吸收（中红外，远红外）

## PD的性能参数

- (1) 量子效率
- (2) 响应度
- (3) 光谱响应曲线
- (4) 暗电流和噪声
- (5) 响应速度
- (6) 灵敏度

### 1, 量子效率

$$\eta = \frac{\text{产生的e-h对数}}{\text{入射的光子数}}$$

- 要减小反射率，所以要在表面对目标波长段镀增透膜
- 减小前端表面接触层对光的吸收，所以减小厚度，选用禁带宽度大的材料
- 在吸收有源区增大对光的吸收系数

$$\eta = (1-R_1) \exp(-\alpha_1 d) [1 - \exp(-\alpha_2 W)]$$

### 2, 响应度

$$R = \frac{\text{光生电流}}{\text{入射光功率}} = \eta \frac{e\lambda}{hc}$$

推导

### 3, 光谱响应曲线

#### (3) 光谱响应曲线——波长

- 截止波长——发生本征吸收的最大波长
- 用较大 $E_g$ 的材料作为“透明窗口”。
- 光子能量小于 $E_g$ ，不能发生本征吸收。

$h\nu \geq E_g$

$\lambda \leq \frac{1.24(\mu m)}{E_g(eV)}$  ----- 截止波长 $\lambda_c$

$\Rightarrow \lambda \leq \lambda_c$  的光子可以被本征吸收

$\lambda > \lambda_c$  的光子不能被本征吸收

异质结的应用

#### 如何提高光电转换效率?

$$\eta = (1-R_1) \exp(-\alpha_1 d) [1 - \exp(-\alpha_2 W)]$$

- 减小表面反射率
  - 镀增透膜
- 减少在前端表面接触层的吸收
  - 表面层很薄。
  - 利用 $E_g >$ 光子能量的材料作为“透明窗口”
- 增加耗尽区宽度
  - PIN
- 利用内部电流倍增效应——APD
- 采用量子阱作有源区：增大 $\alpha$
- .....

### 4, 暗电流与噪声

## 散粒噪声

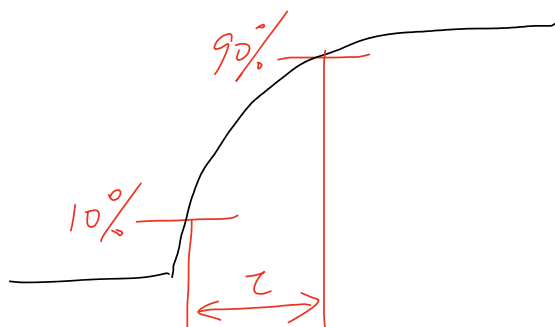
(4) 暗电流和噪声

- $I_D$  越小越好。
- 噪声越小越好。

散粒噪声  $\langle i^2 \rangle = 2eI_D B$

- 暗电流造成的噪声是主要的噪声源。
- 在APD中，还会有雪崩倍增过程引起的倍增噪声（过剩噪声）

## 5, 响应时间, 频率带宽



响应时间：RC时间，在扩散区的扩散时间，在耗尽区的漂移运动

截止频率，3dB带宽

## 6, 灵敏度

最小可探测功率：误码率达到 $10^{-9}$ 时的最小功率

# 7.4

光子入射——>电子和空穴被电场分开

通过控制pN区电荷浓度而控制电场  $\nabla^2 E = \rho$

若是异质结，则会标出材料种类

图9.4-1

- $\text{SiO}_2$  作用——
- 光从窗口进入——
- 耗尽区主要集中在N区？—— $\text{P}^+\text{N}$ 结
- 薄的 $\text{P}^+$ 层——

$\text{P}^+$ 区很薄，有利于光子进入到耗尽区。

### 吸收区、耗尽区、扩散区

- 光进入过程
  - 材料的反射率越小，越有利——表面减反射膜（增透膜）。
- 光吸收过程——发生在吸收区
  - 吸收系数 $\alpha$ ——单位距离被吸收的光子数， $1/\text{cm}$
  - 穿透深度 $d=1/\alpha$
- 光生e-h最终形成光生电流。
  - 被内部的反偏电场分开，反向漂移运动（速度较大）——**耗尽区**
  - 扩散运动（速度较低），被外部电路收集。形成光生电流——**扩散区**

希望耗尽区宽度变长，扩散区长度变短？

提高量子效率，提高响应速度

- 加反偏电场可以增大耗尽区宽度
- 降低掺杂浓度
- 在p和N之间夹一层较宽的本征区（PIN）

### 本征区的厚度

- 太大了
  - ——漂移时间增加，不利于高速响应
- 太小了
  - ——不利于量子效率
  - 使电容C增加、RC时间增加，不利于高速。
  - 使吸收区超出耗尽区（本征区）之外，不利于e-h对分开形成光电流

### 异质结PIN

- 9.4-6图
- InGaAs/InP异质结
- Q层为InGaAs

• InP的截止波长为  $0.96\mu\text{m}$ ，对  $1.3$ ， $1.5\mu\text{m}$  的光无本征吸收。

• 吸收区——InGaAs

• 异质结好处：

- (1) 吸收区的位置由材料类别决定。
- (2) 光生载流子不再遭受表面复合的影响。

• 为什么采用台面？

——减小电容，提高响应速度

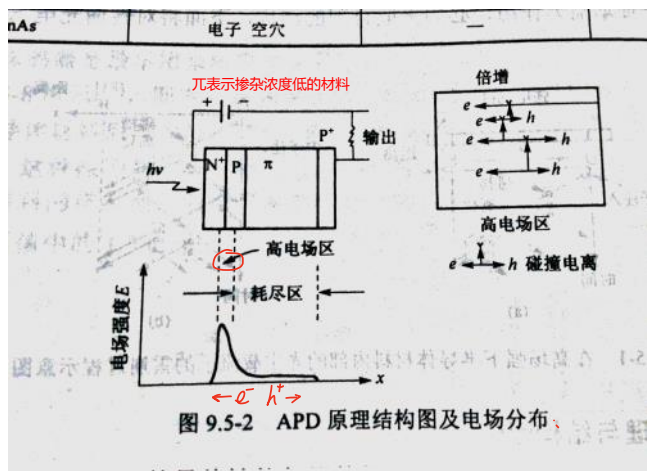
## 9.5 APD

发生光电效应，最初的e-h产生后，被后续的e-h放大

光进入半导体材料，在吸收区被吸收，产生e-h初级对，并在耗尽



区被反偏电场分离。在高电压区，电场大于发生雪崩倍增临界场强的雪崩倍增区，放大电流被外部电路收集。



性能参数：

- 离化率
- 倍增因子
- 增益—带宽积
- 过剩噪声因子F
- 响应速度

• **离化率**：载流子运动单位距离内，所产生的e - h对数  
反偏电压增加，离化率增加，雪崩增强

### 离化率

载流子运动单位距离内，所产生的平均e-h对数。

- ⊗ 离化率大，雪崩倍增效应强。
- ⊗ 反偏电压增加，离化率增加。

□ 电子的离化率 $\alpha$ 一般不等于空穴的离化率 $\beta$ 。Why?

- ⊗ 有效质量不同
- ⊗ 迁移率不同——漂移速度不同——动能不同
- ⊗ 寿命不同

用离化率大的载流子注入来发动雪崩，对APD更有利  
将高电场区设立在这种载流子的运动方向上

- **倍增因子M**

## 倍增因子 M

$$M = \frac{I_M}{I_{ph}}$$

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V_s}{V_b}\right)^n}$$

$V_s$  --- 反偏电压

$V_b$  --- 雪崩击穿电压，与材料、掺杂浓度等有关。

$n$  --- 经验参数

- 反偏电压大，M 大。
- 离化率大，M 大。
- 雪崩区宽度大，M 大。

## 过剩噪声因子 F

电流放大 M 倍，功率增大  $M^2$  倍

而散粒噪声放大了  $F \times M^2$  倍，噪声放大得更大

## 过剩噪声因子 F

- 在倍增过程中，光生电流被放大了 M 倍，APD 的输出信号功率被放大了  $M^2$  倍。
- 散粒噪声功率也被放大了，但是，它不是  $M^2$  倍，而是更大，为  $F \times M^2$  倍。
  - 散粒噪声谱密度，倍增前：为  $2qI_{ph}$
  - 倍增后：为  $F \times M^2 \times 2qI_{ph}$
- 一般 APD,  $F > 1$ 。（理想  $F = 1$ ）
- 过剩噪声来源于倍增过程的随机性。

因此 APD 的噪声性能比其他光探大

只选择一种载流子（e 或 h）发生雪崩，可以减少随机性，减噪声

- 希望 F 越小越好。
- F 与倍增区初始激励情况密切相关。
  - 纯电子注入 --- 初始激励（雪崩）由电子发动，电子注入比 = 1；
  - 纯空穴注入 --- 初始激励（雪崩）由空穴发动，电子注入比 = 0；
  - 电子空穴混合注入 --- 电子注入比在 [0, 1] 之间；

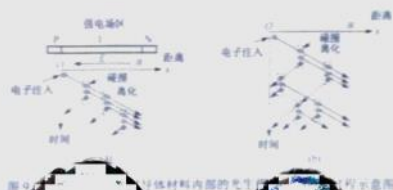


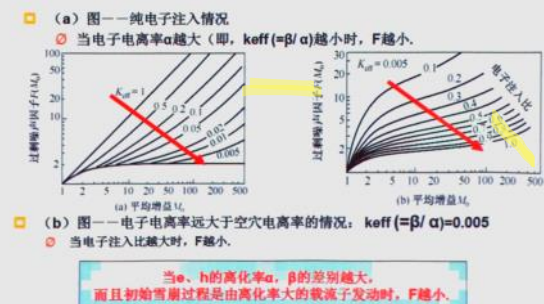
图 9 半导体内部的电子倍增示意图

- 当 e、h 的离化率  $\alpha$ 、 $\beta$  的差别越大，而且初始雪崩过程是由离化率大的载流子发动时，F 越小，M 则越大。—APD 设计指导
  - Si 中，电子离化率  $\alpha$  大一些。
  - InGaAs 中，空穴的离化率  $\beta$  大一些。
  - Ge 中，电子与空穴的离化率相差很小，所以 Ge APD 的暗电流与噪声都很大。
  - 采用量子阱或者超晶格结构可以拉开 e、h 的电离率之差。

- 当e、h的电离率 $\alpha$ 、 $\beta$ 的差别越大，而且初始雪崩过程是由电离率大的载流子发动时，F越小，M则越大。—APD设计指导
  - Si中，电子电离率 $\alpha$ 大一些。
  - InGaAs中，空穴的电离率 $\beta$ 大一些。
  - Ge中，电子与空穴的电离率相差很小，所以Ge APD的暗电流与噪声都很大。
  - 采用量子阱或者超晶格结构可以拉开e、h的电离率之差。

单载流子有利于倍增因子，减小噪声，增大增益带宽积

图9.5-12分析



## 响应速度

异质结会增大在结面的响应时间，但是将倍增区与吸收区分开，改善噪声性能

## 常用APD结构

### R-APD

- 拉通型APD Reach-through APD
- $V_0$ 很大一部分降落在 $\pi$ 区，使得倍增区电场随 $V_0$ 变化相对缓慢。
  - 保持了高电场区的电压稳定性。



## R-APD

图9.5-4

### Why 要有保护环?

- 边缘电场效应
- 边缘区采用低掺杂, 提高此区的雪崩击穿电压, 防止边缘首先发生雪崩击穿而损害器件

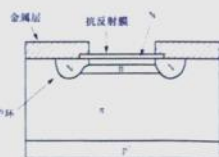


图9.5-4 带有保护环的APD

图9.5-6.

- 吸收区在何处? Why?
- 倍增区在何处? Why?
- 光子可以“透明”地通过倍增区, 来到吸收区。Why?
- 内部过程: .....
- 初始雪崩是由哪种载流子发动? 为什么? 有何好处?
- 电离率大的空穴发动, 有利于提高M, 降低F
- 不足——InP与InGaAs异质结之间 $E_g$ 差别较大, 导致电荷堆积, 使得响应速度降低, 对量子效率也有一定影响。

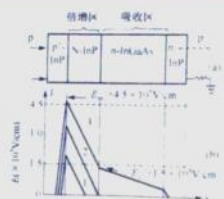


图9.5-6 SAM-APD 原理结构图

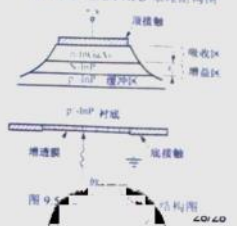


图9.5-6 SAM-APD 结构图

## SAGM APD

- S—Separated, A—Absorption
- G—Gradient, M—Multiplication
- 在InP与InGaAs之间插入一层 $E_g$ 处于它们二者之间的InGaAsP层, 使得InP与InGaAs有一个带隙过渡层。

## summary

- R-APD**
  - $V_b$ 很大一部分降落在 $\pi$ 区, 使得倍增区电场随 $V_b$ 变化相对缓慢
- SAM APD**
  - 吸收区与倍增区分开 (通过异质结作用), 有利于由电离率大的载流子注入来发动雪崩, 降低F, 增大M.
  - 可以减小高反偏下的隧道电流, 降低暗电流和噪声
- SAGM APD**
  - 插入一层带隙过渡层, 克服SAM APD中异质结 $E_g$ 差别过大带来的不足。

## SAM APD

### SAM—Separated Absorption and Multiplication

#### 吸收区与倍增区分开, Why要分开?

- 可以实现由电离率大的载流子注入来发动雪崩, 降低F, 增大M.

#### 如何分开?

- 通过异质结实现
- 不同Eg的两种材料分别充当吸收区与倍增区, 可以减小高反偏下的隧道电流, 降低暗电流和噪声

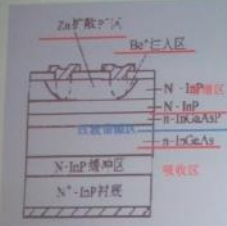
吸收区 (Eg小于光子的能量) 的场强不够大, 只发生光吸收过程, 不能发生雪崩效应.

倍增区 (Eg大于光子的能量) 场强很大, 发生雪崩倍增, 但是不会发生本征吸收——透明的光窗口.

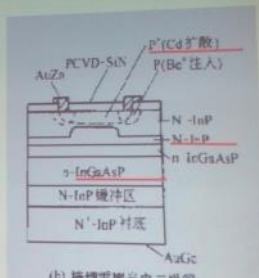
27/28

### 吸收区、倍增区、过渡区在哪里?

初始雪崩由哪种载流子发动的? hole



(a) 平面雪崩光电二极管



(b) 掩埋雪崩光电二极管

32/28