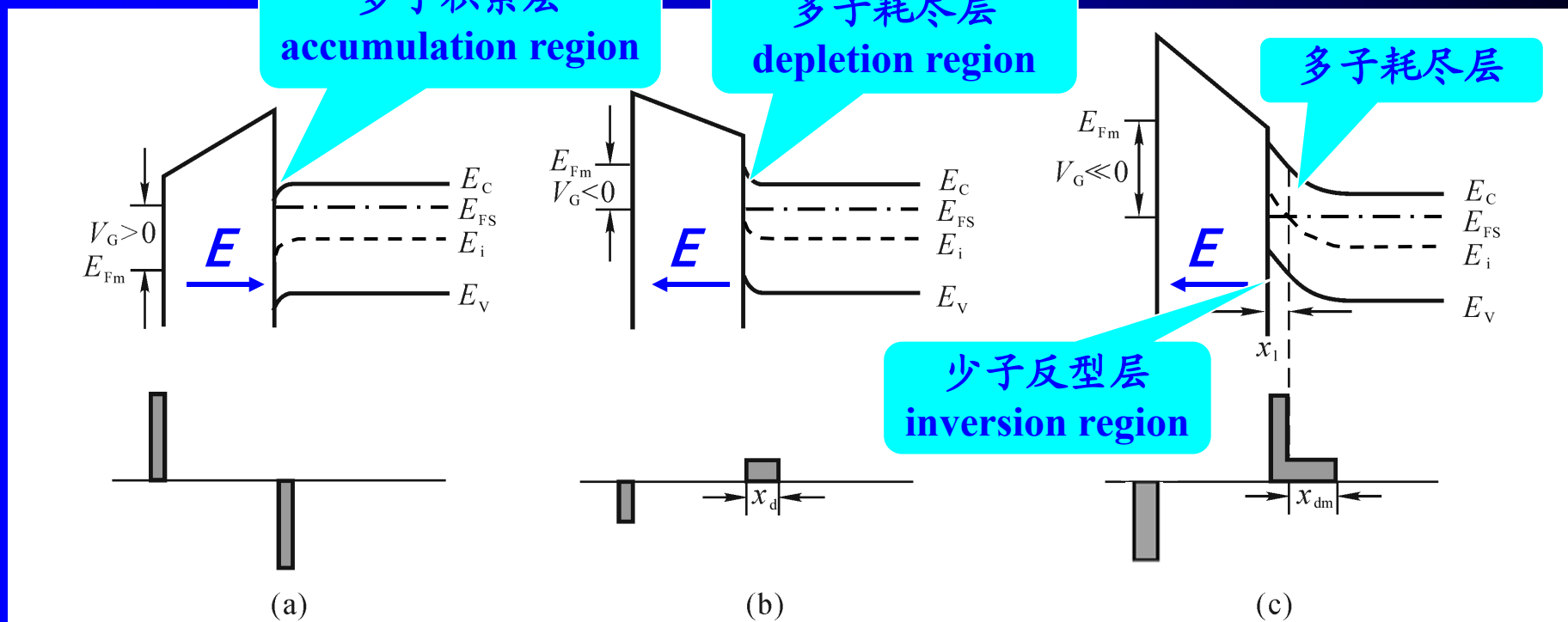


# 金属—氧化物—n型半导体场效应管



### 4.5.3 肖特基势垒栅场效应晶体管

#### MESFET: metal-semiconductor FET

肖特基势垒取代JFET的pn结势垒，形成肖特基势垒栅场效应管



不需要绝缘层和pn结（适合有高表面态和难以形成PN结的材料）

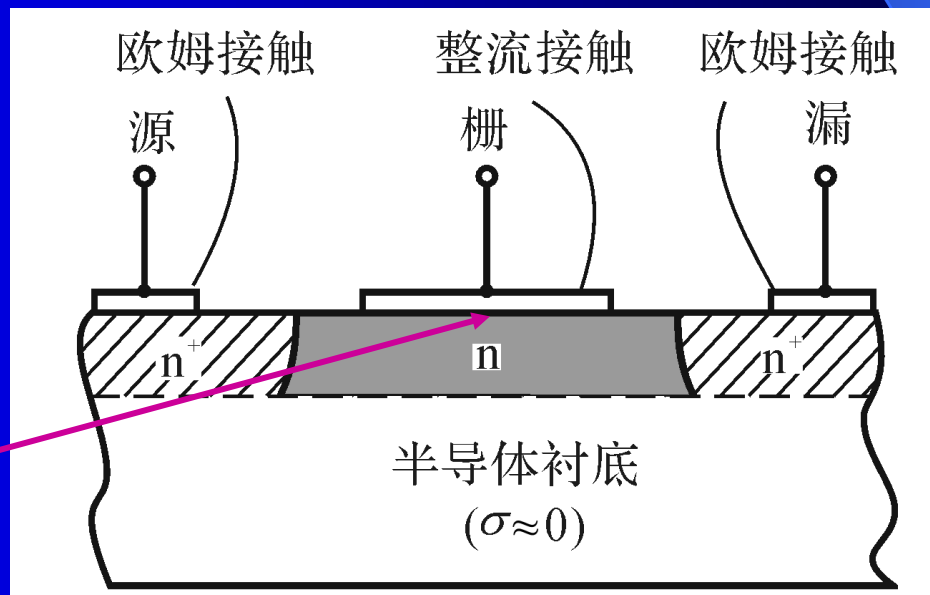


可以采用电子迁移率很高的材料（如：GaAs、InP）



n沟道MESFET

肖特基势垒接触



肖特基势垒栅场效应管兼有JFET和MOSFET的优点:

- ✓ 器件制作类似MOSFET
  - ✓ 电学性质类似JFET
  - ✓ 避免表面态的影响
  - ✓ 电子迁移率很高
  - ✓ 特点: 高频(微波)、低噪声、较高的功率
- 实际MESFET的栅长为微米数量级, 出现强场效应, 在沟道尚未夹断之前, 电子速度已经达到饱和漂移速度
- GaAs短栅MESFET出现耿氏效应, 临界电场 $E_C=3.2 \text{ kV/cm}$
- GaAs-MESFET, 结构简单、制作过程少, 因此寄生电容小,
- 噪声系数低, 而且噪声随频率变化趋势比双极型晶体管慢得多
- 较高的功率增益

# 几种场效应晶体管(FET)的异同

共性:

栅电压调制沟道电导，从而调制沟道电流

垂直的电场控制半导体的导电能力

差异:

- JFET: pn结，nnp为p沟道、pnp为n沟道
- MOSFET: MOS结，反型（nnp为n沟道、pnp为p沟道）
- MESFET: 肖特基结，不需要绝缘层和pn结

## 4.6 异质结heterojunction及其器件

### 4.6.1 异质结的材料

两种不同半导体材料接触，形成异质结

- 同型isotype（高低）异质结（pP、nN）：杂质类型相同
- 异型anisotype（反型）异质结（pN、Pn）：杂质类型相反

↓ 单晶材料不同

禁带宽度、介电系数、晶格常数、热膨胀系数不同

✓ 晶格失配率： $2 | a_1 - a_2 | / (a_1 + a_2)$

✓ 异质结界面形成悬挂键和界面态

构成异质结的两种材料的晶格常数要匹配： $a_1 \approx a_2$ ，如

✓ Ge和GaAs的失配率 $\approx 0.13\%$

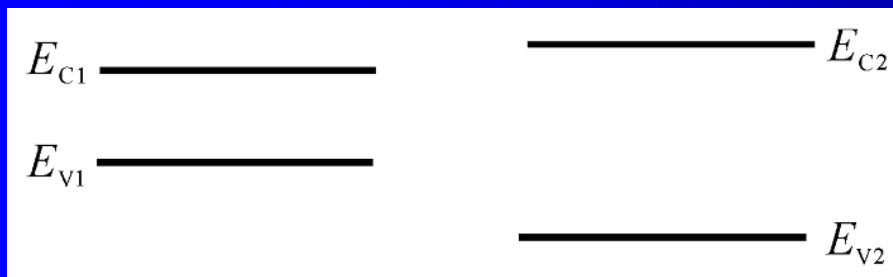
✓ GaAs和AlGaAs的晶格常数的失配率 $< 0.14\%$

## 4.6.2 异质结的能带结构

异质结:

窄能带隙材料 (p或n)  $\oplus$  宽能带隙材料 (P或N):

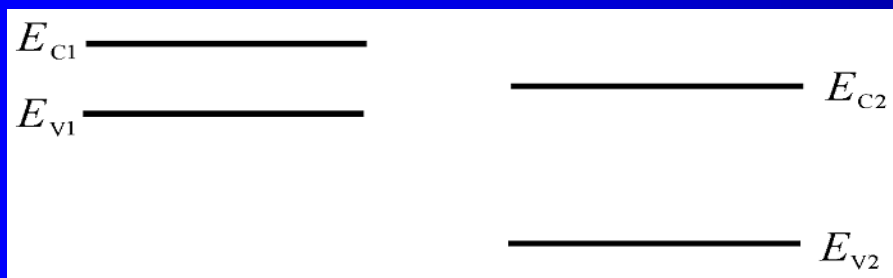
pN异质结、Pn异质结, nN异质结、pP异质结



包纳straddling:

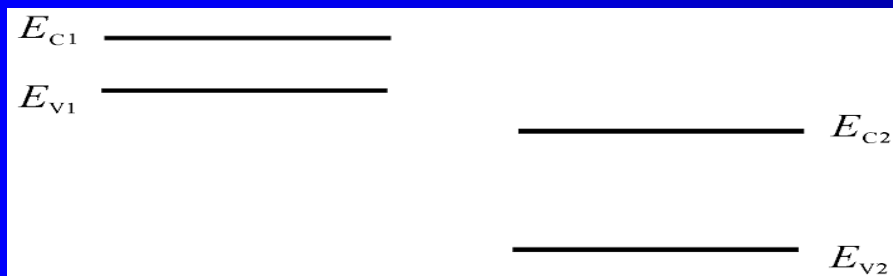
宽带隙wide-bandgap包纳

窄带隙narrow-bandgap



交替错开staggered:

宽带隙与窄带隙交替错开



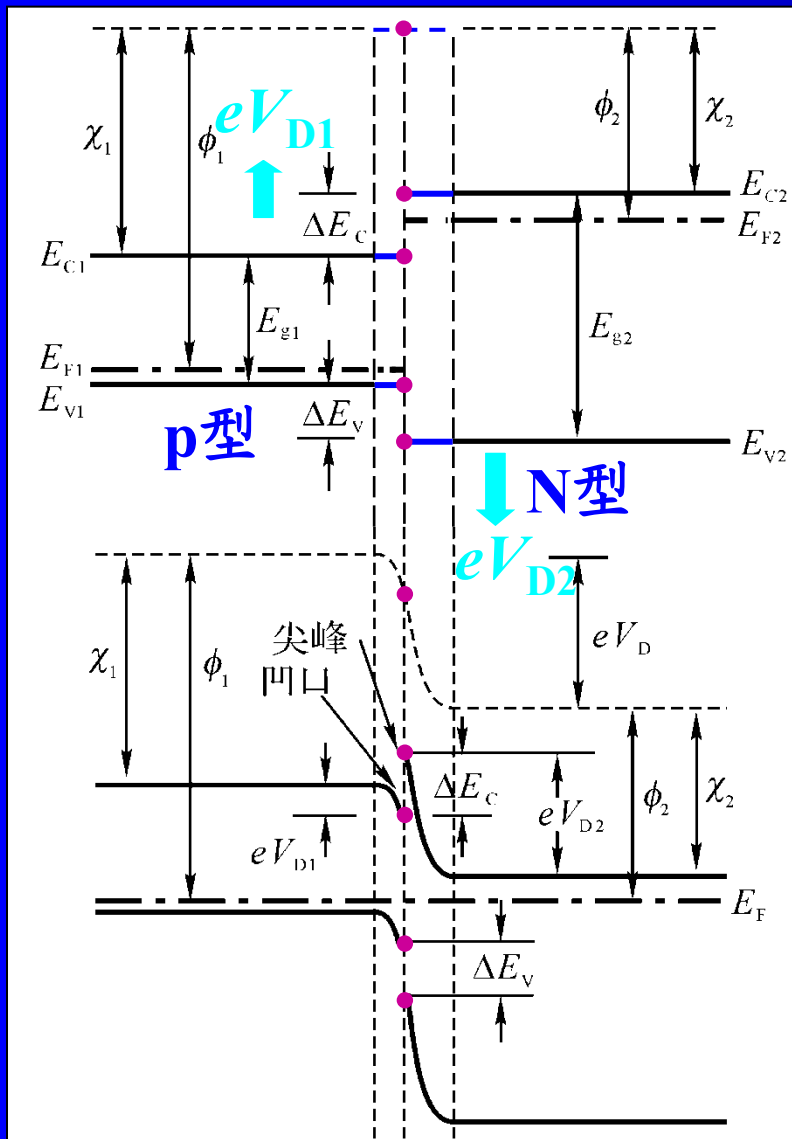
完全错开broken gap:

宽带隙与窄带隙完全错开

### 4.6.3 异质结特性

## 首先确定中性区和空间电荷区的位置

## 理想pN异质结热平衡能带图

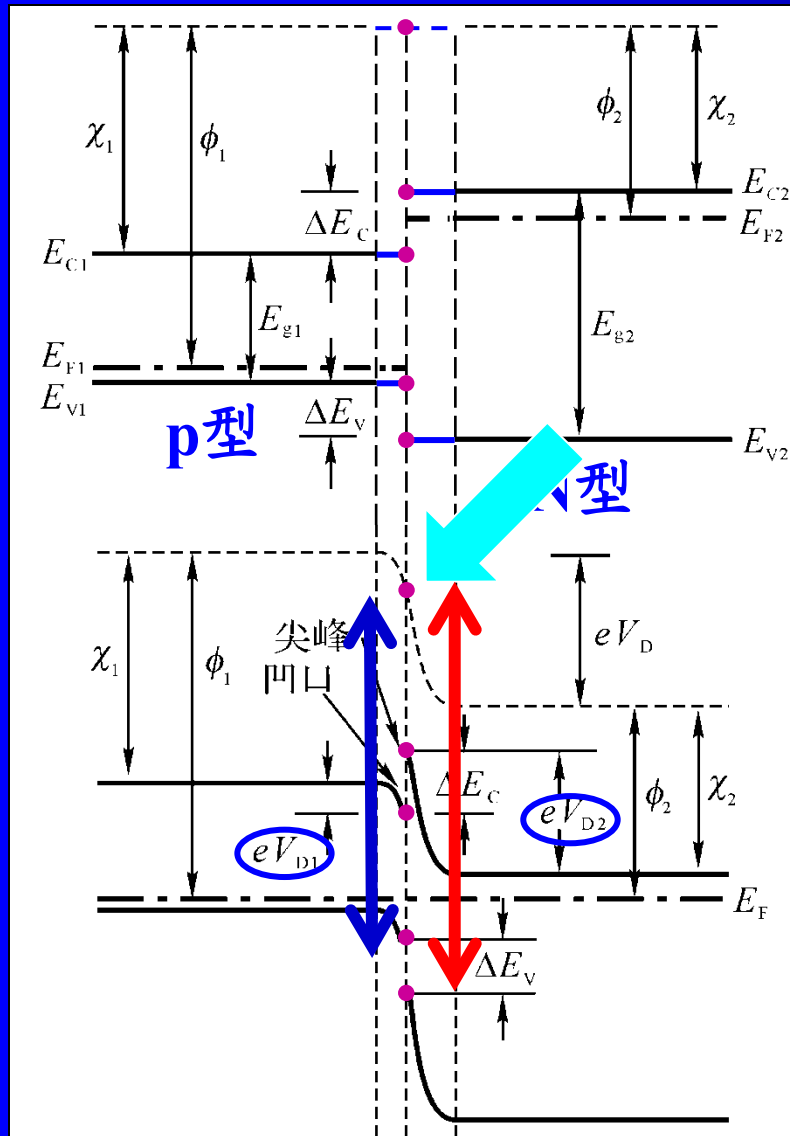


- 热平衡态，统一的费米能级
- 真空能级:  $E_0$  连续
- 耗尽层部分能级弯曲
- 中性区 (N区、p区) 能级不弯曲
- 电子亲和势  $\chi$  始终不变 electron affinity rule

- 兰线弯曲
- 黑线上下平移

- N区能级向下平移 $eV_{D2}$
- p区能级向上平移 $eV_{D1}$
- $eV_D = eV_{D1} + eV_{D2}$

# 热平衡能带图 energy-band diagram at thermal equilibrium



$$eV_D = eV_{D1} + eV_{D2}$$

$$= E_{F2} - E_{F1}$$

$$= \phi_1 - \phi_2 \quad \text{功函数之差}$$

$$\Delta E_C = \chi_1 - \chi_2$$

$$\Delta E_V = \chi_2 + E_{g2} - (\chi_1 + E_{g1})$$

$$= (E_{g2} - E_{g1}) - (\chi_1 - \chi_2)$$

$$= \Delta E_g - \Delta E_C$$

$$\Delta E_g = E_{g2} - E_{g1}$$

真空能级连续，价带和导带的不连续

计算时选好基准点很重要！



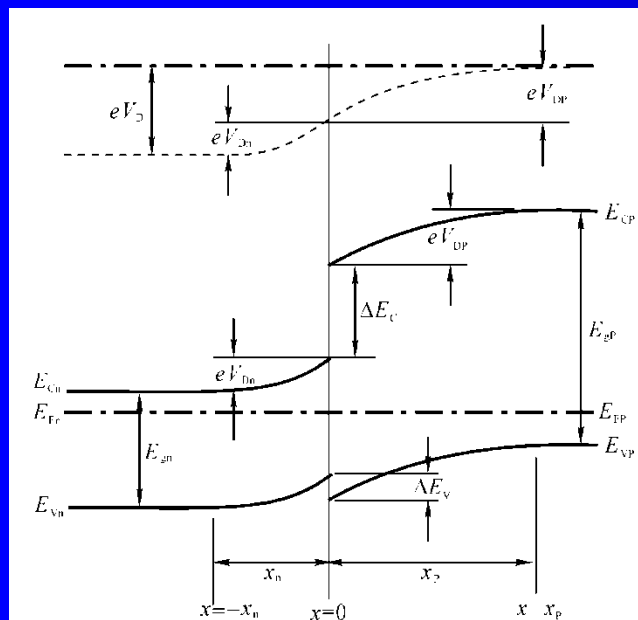
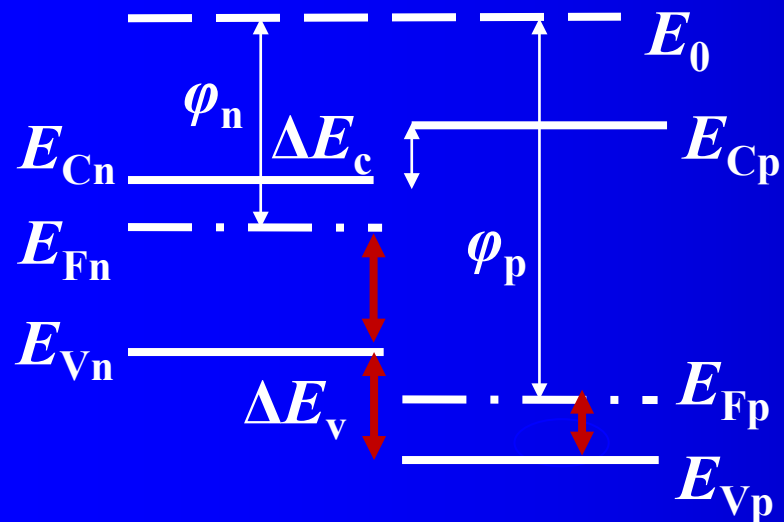
# 理想Pn异质结热平衡能带图

如何从载流子浓度计算接触电势差  
从真空能级 $E_0$ 算起:

$$eV_D = \phi_P - \phi_n$$

从p区价带顶算起:

$$eV_D = \Delta E_V + (E_{Fn} - E_{Vn}) - (E_{FP} - E_{VP})$$



$$p_{n0} = N_{Vn} \exp\left(-\frac{E_{Fn} - E_{Vn}}{k_B T}\right)$$

$$p_{p0} = N_{VP} \exp\left(-\frac{E_{FP} - E_{VP}}{k_B T}\right)$$

$$eV_D = \Delta E_V + k_B T \ln(N_{Vn} p_{p0} / N_{VP} p_{n0})$$

$$\Delta E_V = \Delta E_g - \Delta E_C$$

$$eV_D = -\Delta E_C + \Delta E_g + k_B T \ln(N_{Vn} p_{p0} / N_{VP} p_{n0})$$

势垒高度用P型和n型材料空穴浓度表示

# 界面态surface state对能带的影响:

晶格常数不同



即使在某温度时晶格常数相同  
热膨胀系数不同

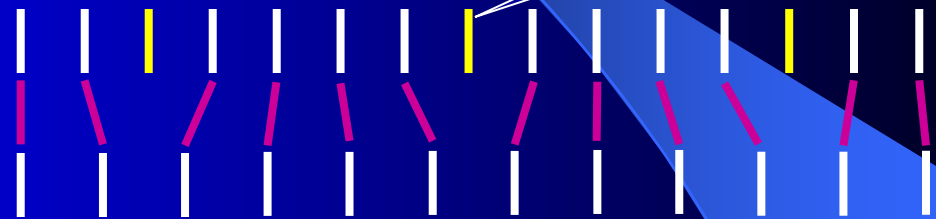


温度变化使晶格常数不同



晶格失配lattice mismatch:  $2 | a_1 - a_2 | / (a_1 + a_2)$

悬挂键



晶格常数小的半导体材料界面产生悬挂键（不饱和价键）



在界面两侧形成载流子势垒:

- ✓ 受主型界面态: 电子势垒
- ✓ 施主型界面态: 空穴势垒



能带弯曲

## 4.6.4 异质结的电流输运机构

突变异型异质结的电流输运机构:

- 扩散模型: 假定载流子以扩散运动方式通过势垒



用同质pn结中肖克莱理论

- 发射模型: 假定足够的热运动



载流子克服势垒, 从界面的一侧进入另一侧

肖特基势垒热电子发射理论

- 发射—复合模型：假定热运动导致载流子越过界面



界面态

电子与空穴在界面态复合，形成界面态复合电流

- 隧道模型：假定势垒尖峰的厚度很小，电子可以穿透隧道



形成隧道电流

- 隧道—复合模型：界面复合效应、隧道复合效应

实际异质结电流输运很复杂，是多种电流机构的组合

## 肖克莱方程

总电流:  $J = J_n + J_p$

电子电流密度:  $J_n = \frac{eD_n n_{p0}}{L_n} \left[ \exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right]$

空穴电流密度:  $J_p = \frac{eD_p p_{N0}}{L_p} \left[ \exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right]$

爱因斯坦关系:  $\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{k_B T}{e}$

p型:  $p_p$  (多子)  $= N_A$

N型:  $n_N$  (多子)  $= N_D$

$n_{p0}$  (少子)  $= n_{i1}^2 / N_A$

$p_{N0}$  (少子)  $= n_{i2}^2 / N_D$

高掺杂

## 同质结肖克莱方程:

$$J = J_S \left[ \exp\left(\frac{eV_F}{k_B T}\right) - 1 \right]$$
$$J_S = \frac{eD_n n_{p0}}{L_n} + \frac{eD_p p_{n0}}{L_p}$$

电子注入比:

$$\gamma = \frac{J_n}{J_p} = \frac{D_n L_p}{D_p L_n} \bullet \frac{n_{p0}}{p_{N0}}$$

$$\gamma = \frac{D_n L_p N_D}{D_p L_n N_A} \bullet \left( \frac{n_{i1}}{n_{i2}} \right)^2$$

电子注入比:

$$\gamma = \frac{D_n L_p N_D}{D_p L_n N_A} \bullet \left( \frac{n_{i1}}{n_{i2}} \right)^2$$

热平衡本征  
载流子浓度:

$$n_i = 2 \left( \frac{k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} (m_n^* m_p^*)^{3/4} \exp \left( -\frac{E_g}{2k_B T} \right)$$

$$\gamma = \frac{D_n L_p N_D}{D_p L_n N_A} \left( \frac{m_{p1}^* m_{n1}^*}{m_{p2}^* m_{n2}^*} \right)^{3/2} \times \exp \left( \frac{\Delta E_g}{k_B T} \right)$$

同质结:

$$\Delta E_g = 0$$

$$n_{i1} = n_{i2}$$

$$\gamma \propto (N_D / N_A)$$

异质结:

$$\Delta E_g = E_{g2} - E_{g1}$$

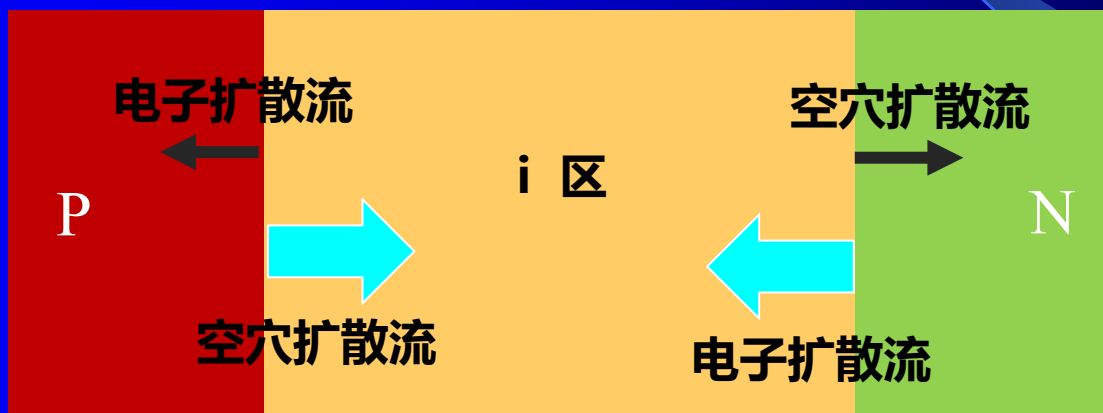
$$\gamma \propto \exp[\Delta E_g / (k_B T)] \gg 1$$

Ge-GaAs:

$$\Delta E_g = 0.76 \text{ eV} \gg k_B T$$

异质结的特点之一是高电子注入比:

- 晶体管: 高电流放大倍数
- 半导体激光器: 高注入效率、低阈值电流密度



## 4.6.5 异质结中二维电子气electron gas和超晶格superlattice

### 1. 同型Nn异质结

#### 三角形势垒近似

Nn异质结热平衡能带图

$$U(z) = eE_{\text{场}}z, z > 0$$

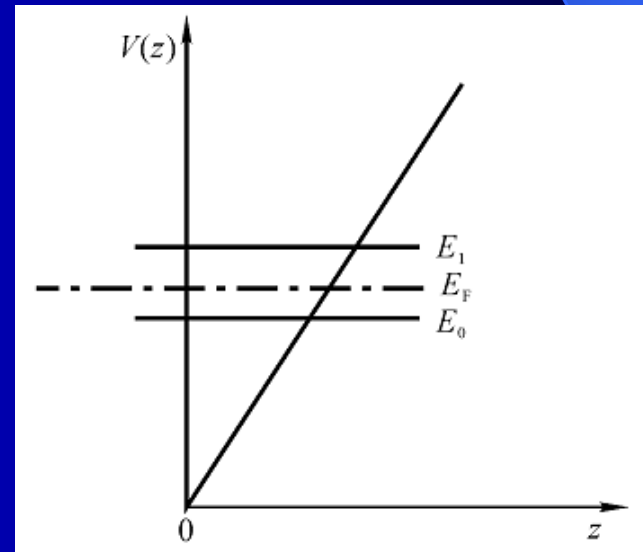
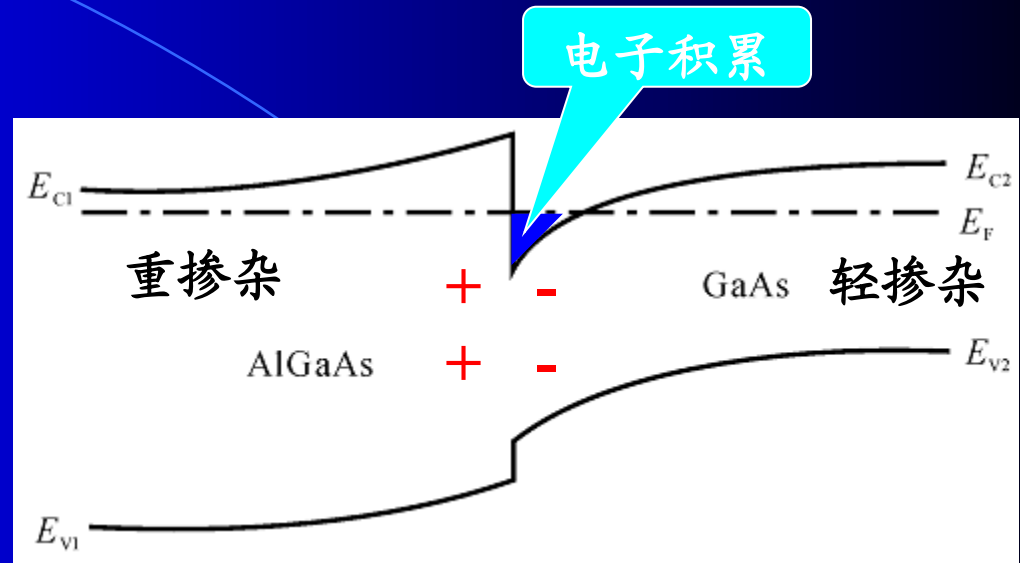
$$U(z) = \infty, z < 0$$



薛定谔方程

三角势阱热平衡能带图

分立能级 $E_0, E_1$





## 2. 异质结中二维电子气

异质结

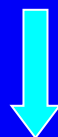


两种材料的禁带宽度不同



- 理想突变异质结;
- 忽略界面能带弯曲;
- 电子质量改有效质量。

沟道方势阱描述

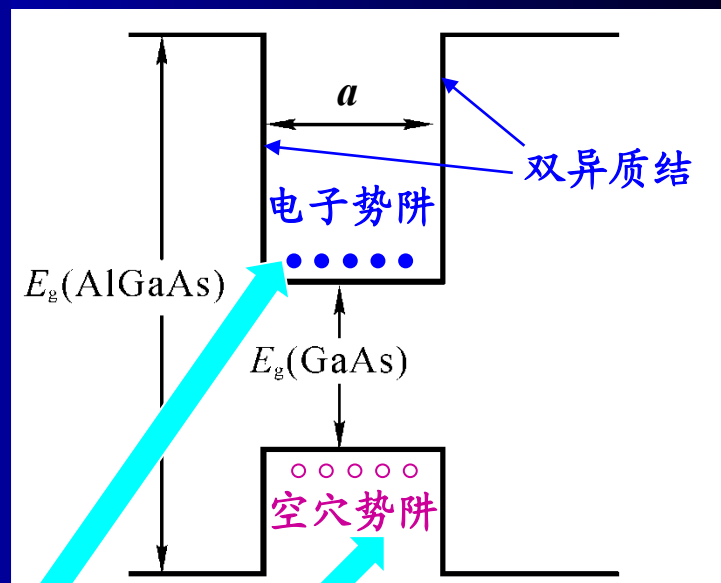


准二维电子运动



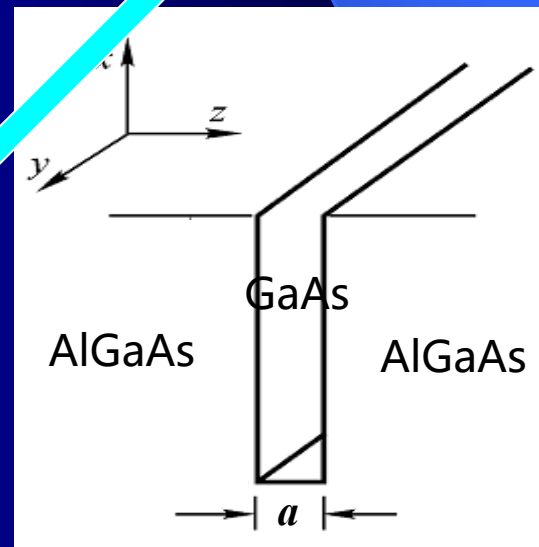
“准二维电子气”模型

不考虑界面能带弯曲时  
AlGaAs/GaAs/AlGaAs  
双异质结能带图:



形象比喻:

电子 (石头) 下沉  
空穴 (气泡) 冒泡



在 $x, y$ 方向 ( $z$ 截面) 无势阱; 沿 $z$ 方向: 宽 $a$ , 高 $V_0$ 的单一势阱

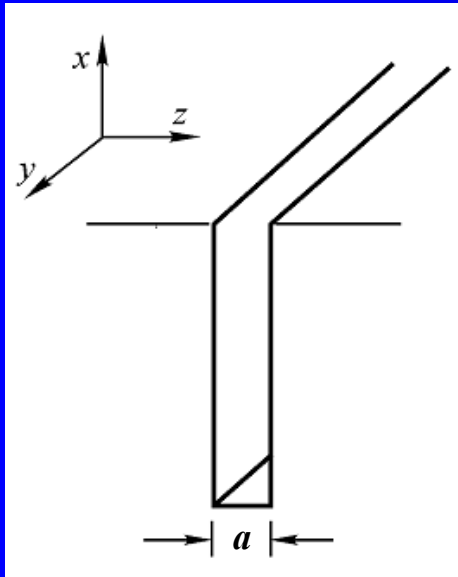
在 $x, y$ 方向

沿 $z$ 方向

任一截面内电子自由运动:

电子近似为自由电子

电子能量:  $E = [\hbar^2 / (2m^*)](k_x^2 + k_y^2)$



连续能量

薛定谔方程:

$$\begin{aligned} -\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2\psi}{dz^2} &= E\psi, & |z| \leq \frac{a}{2} \\ -\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2\psi}{dz^2} + V(z)\psi &= E\psi, & |z| \geq \frac{a}{2} \end{aligned}$$

$V(z) = V_0 \rightarrow \infty$

$$\begin{aligned} \psi(z) &= \sqrt{2/a} \sin[(n\pi/a)(z + a/2)] \\ E_n &= \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^* a^2} n^2, \quad n=1,2,3,\dots \end{aligned}$$

分立能量 (量子化)

总能量: 二维电子气 (能量在 $z$ 方向量子化, 在 $x, y$ 方向连续)

总能量（二维电子气）：

$$E = [\hbar^2 / (2m^*)][k_x^2 + k_y^2 + (n\pi/a)^2]$$



同一子带内，能量连续分布：

$$\begin{aligned} n=1: & \quad E \geq [\hbar^2 / (2m^*)](\pi/a)^2 = E_1 \\ n=2: & \quad E \geq 4[\hbar^2 / (2m^*)](\pi/a)^2 = 4E_1 \\ n=3: & \quad E \geq 9[\hbar^2 / (2m^*)](\pi/a)^2 = 9E_1 \end{aligned}$$

$$E = E_1$$

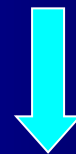
每一个子带（某个量子数）， $z$ 截面单位面积能态密度： $g_0 = m^* / (\pi \hbar^2)$



总态密度=每个子带态密度乘以×子带数目

$$z\text{截面单位面积的能态密度: } g = \sum g_0 = n g_0 = n [m^* / (\pi \hbar^2)]$$

金属



自由电子近似

总能量连续分布：

$$E = [\hbar^2 / (2m^*)](k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$$



单位体积的能态密度：

$$g(E) = [(2m^*)^{3/2} / (\pi^2 \hbar^3)] E^{1/2}$$



$$E = [\hbar^2 / (2m^*)][k_x^2 + k_y^2 + (n\pi/a)^2]$$

第三子带

第二子带

第一子带

$E$

$n = 3$

$n = 2$

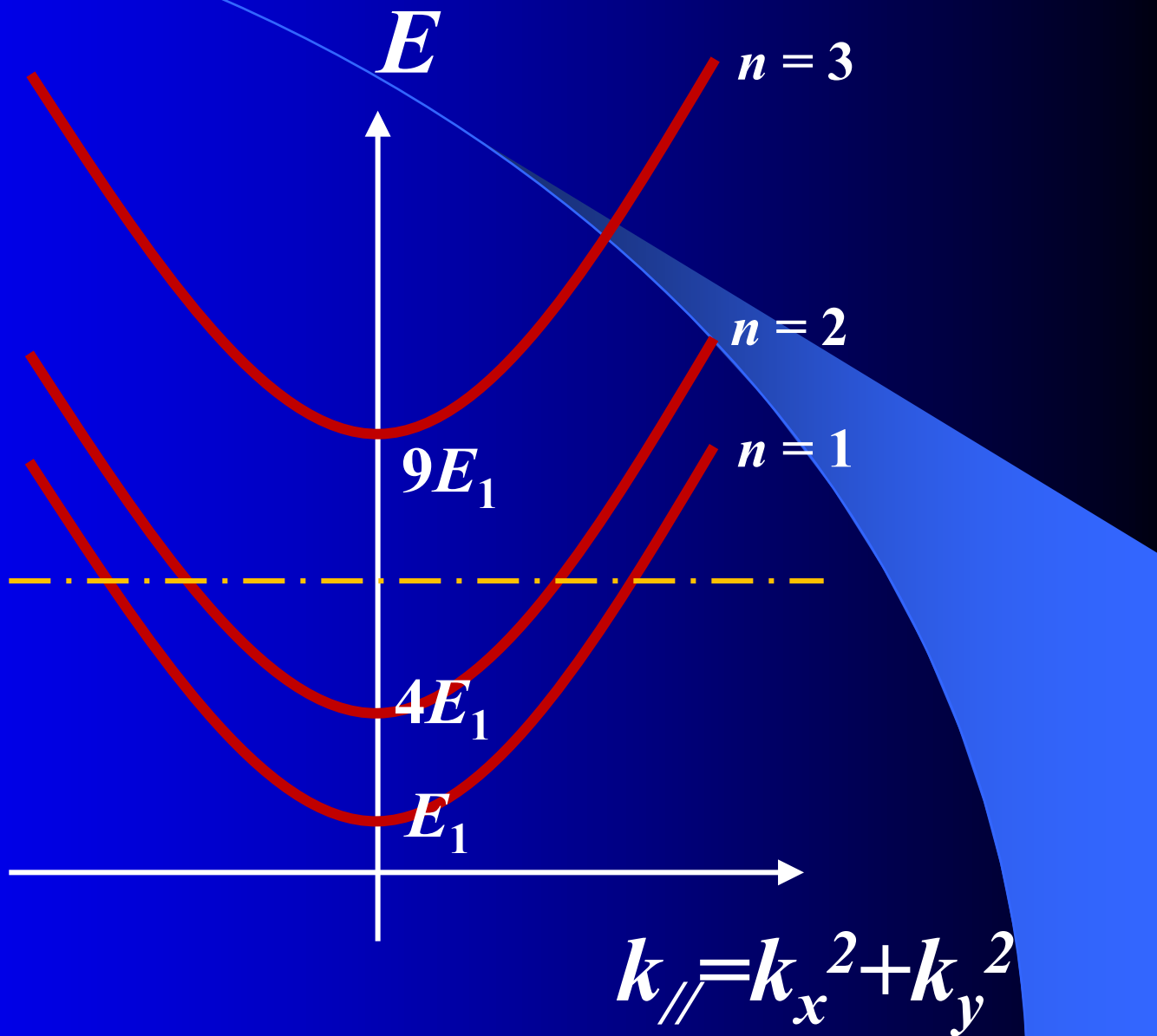
$n = 1$

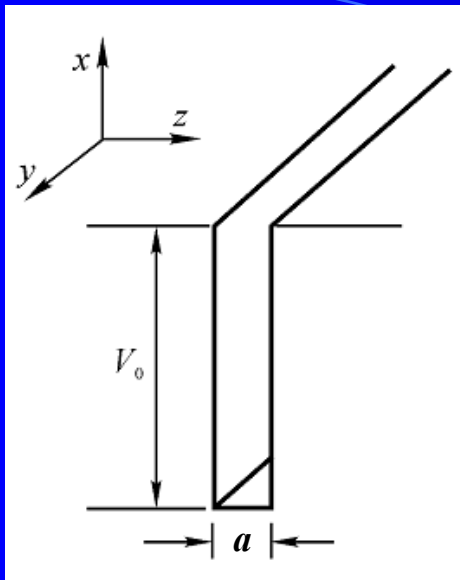
$9E_1$

$4E_1$

$E_1$

$k_{//} = k_x^2 + k_y^2$





$z$ 截面单位面积的能态密度:

$$g = n [m^*/(\pi \hbar^2)]$$

子能带能量:  $E_n \geq n^2 [\hbar^2 / (2m^*)] (\pi/a)^2 = n^2 E_1$

二维电子气能态密度特点:

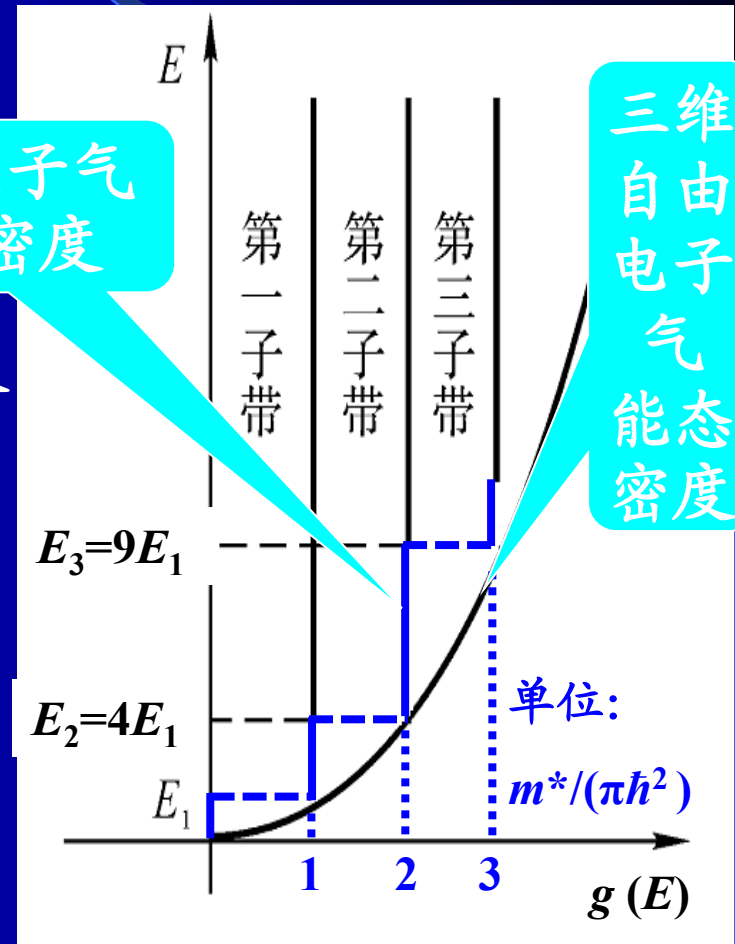
- 每过 $z$ 方向本征能量 $E_n$ , 就多一个子能带的贡献
- 同一个子能带内的态密度相等



- 台阶状的面态密度分布
- 台阶高度 =  $m^*/(\pi \hbar^2)$

二维电子气  
能态密度

三维  
自由电子气  
能态密度



### 3. 量子阱

双异质结：  
禁带宽度小于两侧材料  
中间夹层超薄  $a \approx 50 \text{ nm}$

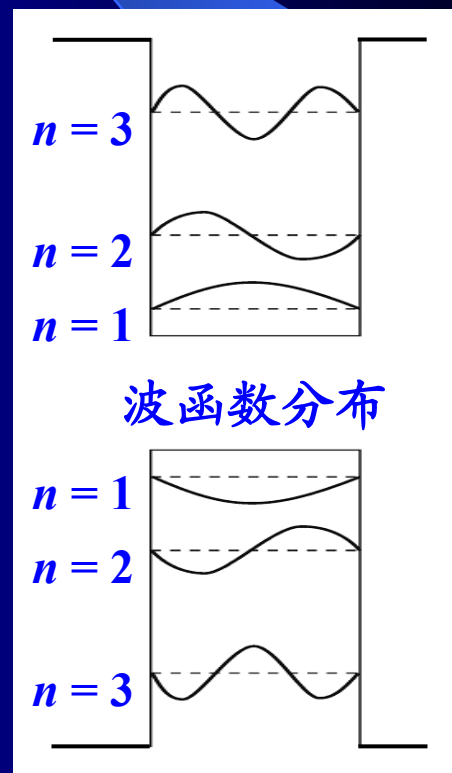
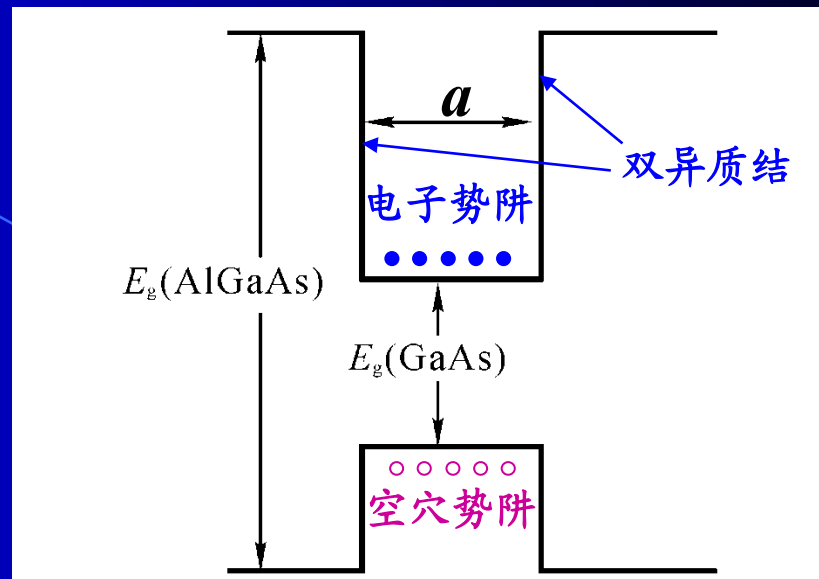
量子阱 (QW), 二维

$U_0 \rightarrow \infty$

$$\psi(x) = \sqrt{2/a} \sin[(n\pi/a)(z + a/2)], \quad n=1, 2, 3, \dots$$

$$E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2ma^2} n^2, \quad n=1, 2, 3, \dots$$

$a$  很小, 能级间隔很大, 出现量子化效应



## 量子阱与载流子运动的自由度:

一般半导体: 载流子可以在很大范围内运动, 具有三维特性

$$E = E_C + [\hbar^2 / (2m^*)] (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2) \quad \text{三个自由度} \quad \downarrow \quad \text{自由度下降 (低维化)}$$

量子阱QW: 载流子在与势阱薄层平行的平面内运动, 二维特性

$$E = E_C + [\hbar^2 / (2m^*)] [k_x^2 + k_y^2 + (\pi/a_z)^2 n_z^2] \quad \text{二个自由度} \quad \downarrow \quad \text{自由度进一步下降}$$

量子(阱)线QWW: 载流子只在势阱线平行的方向运动, 一维特性

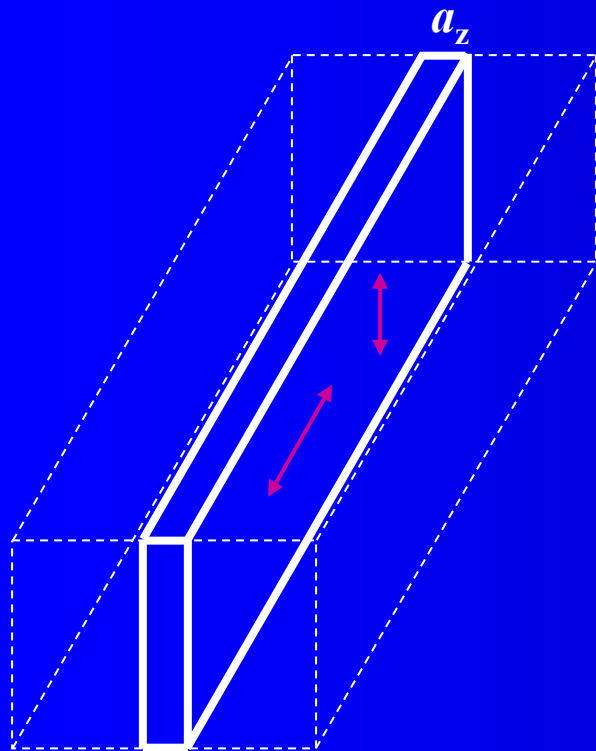
$$E = E_C + [\hbar^2 / (2m^*)] [k_x^2 + (\pi/a_y)^2 n_y^2 + (\pi/a_z)^2 n_z^2] \quad \text{一个自由度} \quad \downarrow \quad \text{自由度进一步下降}$$

量子(阱)箱/点QWB: 载流子限制在长方体势阱中运动, 0维特性

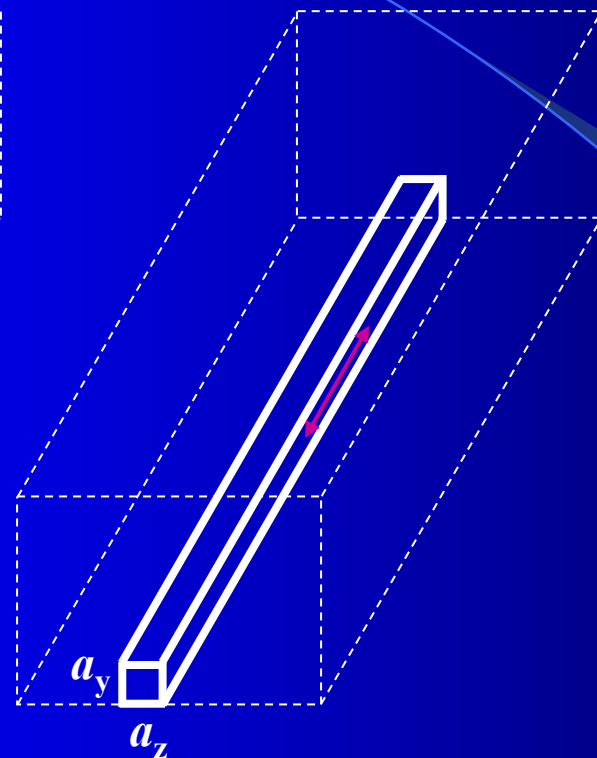
$$E = E_C + [\hbar^2 / (2m^*)] [(\pi/a_x)^2 n_x^2 + (\pi/a_y)^2 n_y^2 + (\pi/a_z)^2 n_z^2] \quad \text{0个自由度}$$

$$E = E_C + [\hbar^2 / (2m^*)][k_x^2 + (\pi/a_y)^2 n_y^2 + (\pi/a_z)^2 n_z^2]$$

量子阱线QWW



量子阱QW



量子阱箱 谐振腔?

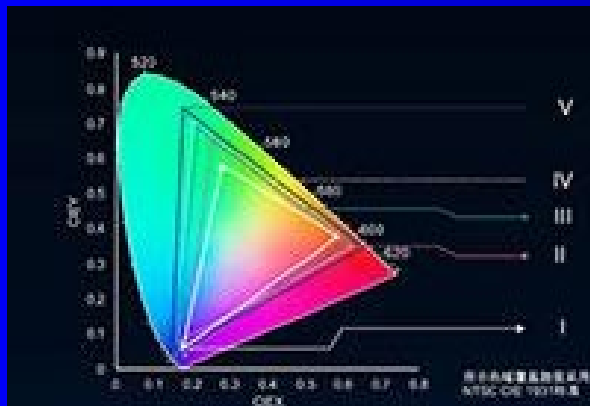
$$E = E_C + [\hbar^2 / (2m^*)][k_x^2 + k_y^2 + (\pi/a_z)^2 n_z^2]$$

量子阱点QWB

$$E = E_C + [\hbar^2 / (2m^*)][(\pi/a_x)^2 n_x^2 + (\pi/a_y)^2 n_y^2 + (\pi/a_z)^2 n_z^2]$$



# 量子点发光



产品代次	I	II	III	IV	V
标准色域	普通LED电视	第一代高色域电视	第二代高色域电视	OLED电视	量子点电视 Quantum Dot TV
NTSC	72%	82%	96%	89%	110%
sRGB色域标准	102%	117%	135%	126%	159%