# 3.3.4 费米能级的位置

费米能级的位置与温度有关

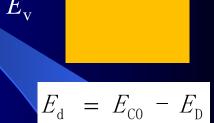
- 低温弱电离区
- 中间电离区
- 强电离区
- 过渡区
- 高温本征激发区

## 低温弱电离区

- 大部分的施主杂质能级仍为电子占据,少量电离;
- 本征激发到导带的电子可以忽略不计;
- 导带电子由电离施主杂质提供

电中性条件 
$$N_c \exp(-\frac{E_{c0} - E_F}{k_B T}) = \frac{N_c exp(-\frac{E_D - E_F}{k_B T})}{1 + 2 \exp(-\frac{E_D - E_F}{k_B T})}$$





$$E_{\rm d} = E_{\rm CO} - E_{\rm D}$$

玻尔兹曼近似 
$$E_{\rm F}(T) = \frac{1}{2}(E_{\rm CO} + E_{\rm D}) + \frac{1}{2}k_{\rm B}T\ln\left(\frac{N_{\rm D}}{2N_{\rm C}}\right)$$
  $n = \sqrt{N_{\rm C}N_{\rm D}/2}\exp\left(-\frac{E_{\rm d}}{2k_{\rm B}T}\right)$ 

$$E_{\rm F}(T=0) = \frac{1}{2}(E_{\rm C0} + E_{\rm D})$$

- $\bullet E_{\mathrm{F}}$ 一般在导带底与施主杂质能级之间;
- T = 0 K,  $E_{\mathbb{F}}$ 在导带底与施主杂质能级的中部;
- T > 0 K, $E_{\rm F}$ 先上升后下降

 $N_{\rm C} \propto T^{3/2}$ 

载流子浓度: 
$$p = \sqrt{N_{\rm V}N_{\rm A}/2} \exp\left[-\frac{E_{\rm a}}{2k_{\rm B}T}\right]$$

费米能级:

$$E_{\rm F}(T) = \frac{1}{2} (E_{\rm V0} + E_{\rm A}) - \frac{1}{2} k_{\rm B} T \ln \left( \frac{N_{\rm A}}{2N_{\rm V}} \right)$$

$$E_{\rm F}(T = 0 \text{K}) = (E_{\rm V0} + E_{\rm A})/2$$



- • $E_{\mathbb{F}}$ 一般在价带顶与受主杂质能级之间;
- T = 0 K, $E_{\text{F}}$ 在价带顶与受主杂质能级的中部;
- $\bullet T > 0$  K,受主杂质浓度增加时, $E_{\rm F}$ 向价带顶方向移动

## 强电离区

- 大部分的施主杂质都电离了
- 载流子浓度由掺杂浓度决定

#### n型半导体

p型半导体

载流子浓度: 费米能级:

$$n_0 = N_C \exp \left(-\frac{E_{C0} - E_{F0}}{k_B T}\right)$$

$$n = N_D$$

$$E_F(T) = E_{C0} + k_B T \ln \left(\frac{N_D}{N_C}\right)$$

$$p_0 = N_{\text{V}} \exp \left(-\frac{E_{\text{F0}} - E_{\text{V0}}}{k_{\text{B}}T}\right)$$

$$p = N_{\text{A}}$$

$$E_{\text{F}}(T) = E_{\text{V0}} - k_{\text{B}}T \ln \left(\frac{N_{\text{A}}}{N_{\text{V}}}\right)$$

#### n型半导体:

- ho 温度一定时,  $N_{
  m D}$ 越大, $E_{
  m F}$ 向导带底移动。重掺杂:  $N_{
  m D}>N_{
  m C}$ , $E_{
  m F}>E_{
  m C0}$ , $E_{
  m F}$ 进入导带。
- P 一般情况下, $N_{\rm D}$  <  $N_{\rm C}$ ,  $E_{\rm F}(T)$  <  $E_{\rm C0}$ 。  $E_{\rm F}$ 在靠近导带底的禁带中。温度升高,费米能级下降, 向本征费米能级运动。

#### p型半导体:

- ho 温度一定时, $N_A$ 越大, $E_{
  m F}$ 向价带顶移动。重掺杂: $N_A > N_{
  m V}$ , $E_{
  m F} < E_{
  m V0}$ , $E_{
  m F}$  进入价带。
- 一般情况下, $N_{\rm D}$  <  $N_{\rm V}$ ,  $E_{\rm F}$  >  $E_{\rm V0}$ .  $E_{\rm F}$  在靠近价带顶的禁带中。温度升高,费米能级上升,向本征费米能级运动。

#### • 高温本征区:

随着温度进一步上升,本征激发产生的载流子数远大 于杂质电离产生的载流子数: n,>>N,, n,>>N,

p型半导体和n型半导体都具有本征半导体的特性:

$$E_{F}(T) = E_{i} + \frac{3}{4} k_{B} T \ln \left| \frac{m_{p}^{*}}{m_{n}^{*}} \right|$$

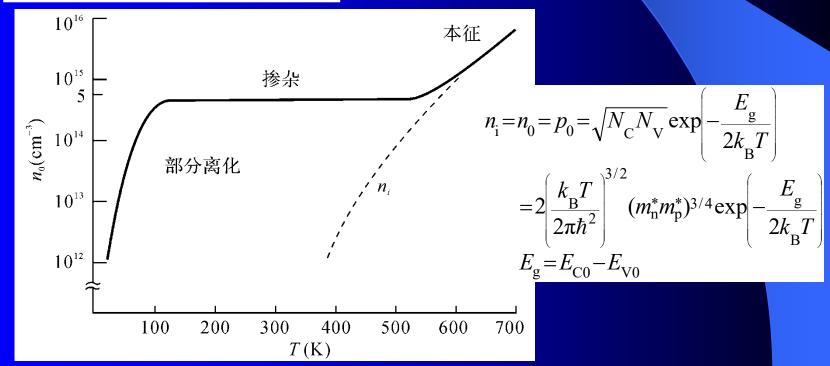
#### n型半导体载流子浓度:

$$n = \sqrt{N_{\rm C}N_{\rm D}/2} \exp\left[-\frac{E_{\rm d}}{2k_{\rm B}T}\right]$$

$$n = N_{\rm D}$$

$$n = \sqrt{N_{\rm C}N_{\rm V}} \exp\left[-\frac{E_{\rm g}}{2k_{\rm B}T}\right]$$

- · 低温弱电离partial ionization
- · 强电离 extrinsic
- ·高温本征区intrinsic



# 3.3.6 非平衡载流子与准费米能级

- 半导体中的电子系统处于热平衡状态时,单位时间、单位 体积电子空穴对的产生数等于复合数,载流子浓度不变;
- 热平衡时, 电子和空穴浓度都由统一的费米能级描述。

$$n_0 = N_C \exp\left(-\frac{E_{C0} - E_{F0}}{k_B T}\right)$$

$$p_0 = N_{\rm V} \exp\left(-\frac{E_{\rm F0} - E_{\rm V0}}{\kappa_{\rm B} T}\right)$$

$$E_{\rm c}$$
 $E_{\rm F0}$  — — — —

$$n_0 p_0 = n_i^2$$

 $E_{\mathbf{v}}$ 

统一的费米能级是热平衡状态的标志!

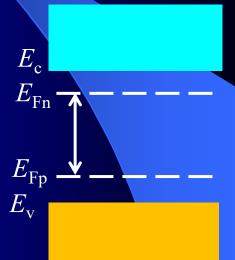
# 3.3.6 非平衡载流子与准费米能级

- 外界的影响破坏热平衡:  $n=n_0+\Delta n$ ,  $p=p_0+\Delta p$ ;
- 平衡打破后,电子和空穴的费米能级不再统一,需引入各自 的准费米能级计算浓度。

$$n = N_{\rm C} \exp\left(-\frac{E_{\rm C0} - E_{\rm Fn}}{k_{\rm B}T}\right)$$

$$p = N_{\text{V}} \exp\left(-\frac{E_{\text{Fp}}}{k_{\text{B}}T}\right)$$

$$np = n_i^2 \exp\left(\frac{E_{\rm Fn} - E_{\rm Fp}}{k_{\rm B}T}\right)$$



## $E_{\text{fn}}$ 与 $E_{\text{fp}}$ 的能级差反映了半导体偏离热平衡的程度

# 3.4 金属中的自由电子

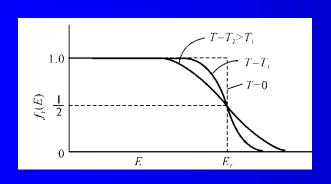
金属中的价电子像电子气一样自由运动 = 势阱中运动的粒子

## 3.4.1 电子气能量状态与费米面

单位空间体积中金属的能态密度:  $g(E) = 4\pi (2m_0/h^2)^{3/2} E^{1/2}$ 

单位体积中的电子数(电子浓度):  $n = \int_0^{E_F} g(E) f(E) dE$ 

$$n = \int_0^{E_F} g(E) f(E) dE$$



当
$$T = 0$$
 K时, $E < E_F$   $\longrightarrow f(E) = 1$ 

$$E > E_F$$
  $\longrightarrow f(E) = 0$ 

$$E_{\rm F} \approx \frac{h^2}{2m_0} \left(\frac{3n}{8\pi}\right)^{2/3}$$

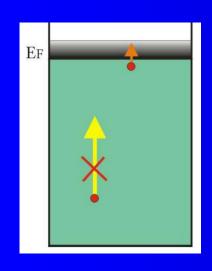
费米能级

$$n_{|T=0K} = \frac{8\pi}{3} \left( \frac{2m_0}{h^2} \right)^{3/2} E_F^{3/2}$$

金属中电子浓度已知

费米温度 $T_{\rm F}$ :  $E_{\rm F} = k_{\rm B}T_{\rm F}$   $T_{\rm F} = E_{\rm F}/k_{\rm B}$ 

例: Na的费米能级:  $E_{\rm F} = 3.12 \text{ eV}$ 



 $T_{\rm E}({
m Na}) = 37000~{
m K}$  (很高)

费米温度TF很高



- •一般情况,温度上升对电子分布的影响较小
- •在费米能级 $E_{\rm F}$ 附近,温度上升对电子分布的影响较大

 $E = E_F$ 的等能面为费米面

- •自由电子的费米面:理想时为球面
- •实际的费米面:与球面有较大区别
- T = 0 K:

 $E > E_{\rm F}$ , 完全没有电子

 $E < E_{\rm F}$ , 完全由电子占据(电子占满能态)

• T > 0 K:

金属不像半导体,没有禁带

 $E_{\rm F}$  -  $k_{\rm B}T < E < E_{\rm F}$ 的电子跃迁到

 $E_{\rm F} < E < E_{\rm F} + k_{\rm B}T$ 的能态上

电子的费米面对金属的物理特性有较大影响

## 3.4.2 电阻率和温度的关系

金属中电子在外电场下做漂移运动,平均速度与电场强度成正比

金属中的电子



外电场杂质、缺陷、晶格振动使载流子收到散射

外电场力: F = -eE

- 散射使载流子恢复无规则热运动
  - 平均漂移速度消失

两次散射之间自由时间的平均值,称为弛豫时间τ

动量守恒 
$$-eE\tau = m_n^* V_d$$
 
$$V_d = -\frac{e\tau}{m_n^*} E$$
 
$$\mu_n = \frac{e\tau}{m_n^*}$$
 
$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m_n^*}$$

实际上,载流子速度不同,因而弛豫时间不同,迁移率也不同。 若考虑载流子速度统计分布的性质,需用统计理论计算τ。

#### 在费米面附近的电子对电导有贡献:

$$\sigma = \frac{ne^2 \tau(E_F)}{m_n^*} = (ne) \frac{e}{m_n^*} \tau(E_F)$$

总自由电荷量 荷质比

费米面附近的电子受晶格散射的弛豫时间

定量分析需要考虑载流子速度的统计分布,

求解玻尔兹曼输运方程

## 金属电阻率和温度的关系

热激发 晶格振动 (声子)、

实际金属

杂质、晶格缺陷

$$au_{
m ph}^{-1}$$
 +  $au_{
m i}^{-1}$  =  $au^{-1}$ 

$$\rho = \sigma^{-1}$$

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m_{\rm n}^*}$$

电阻率 
$$\rho = \rho_{\rm i} + \rho_{\rm ph}(T) = \frac{m_{\rm n}^*}{ne^2} \frac{1}{\tau_{\rm i}} + \frac{m_{\rm n}^*}{ne^2} \frac{1}{\tau_{\rm ph}(T)}$$

低温:  $\rho_{\rm ph}(T) \propto T^5$ 

高温:  $\rho_{\rm ph}(T) \propto T$ 

$$T \to 0$$
,  $\rho_{\rm ph}(T) = 0 \Longrightarrow \rho \approx \rho_{\rm i}$ 



Pi为剩余电阻,可以用于衡量金属的纯度

## 半导体电阻率和温度的关系

半导体中含有两种类型载流子  $\sigma = ne\mu_n + pe\mu_p$ 

n型半导体



p型半导体

 $\sigma = ne\mu_n$ 

 $\sigma = pe\mu_{\rm p}$ 

载流子迁移率和浓度都是温度的函数

迁移率:  $\mu = \mu_L + \mu_I$ 

晶格振动

电离杂质散射

T/→晶格振动/→对载流子散射/

T/→载流子速度/→ 电离杂质对载流子散射\

 $\mu_{\rm L}$   $\mu_{\rm L} \propto T^{-3/2}$  主导高温区

主导低温区  $\mu_{\rm I}$   $\mu_{\rm I}$   $\mu_{\rm I}$   $\mu_{\rm I}$   $\mu_{\rm I}$ 

迁移率:  $\mu = \mu_{L} + \mu_{I}$   $\mu_{L} \propto T^{-3/2}$   $\mu_{I} \propto T^{3/2}$ 

低温,T/,迁移率由 出主导,迁移率/ 中温,T//,迁移率由 出主导,迁移率/

2个物理量同时变化。都会影响结果。如何定性分析?

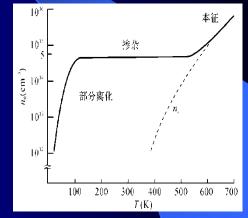
$$\sigma = ne\mu_n + pe\mu_p$$

载流子浓度n或p

低温 T

本征激发很小,主要由杂质电离增加载流子

中温T



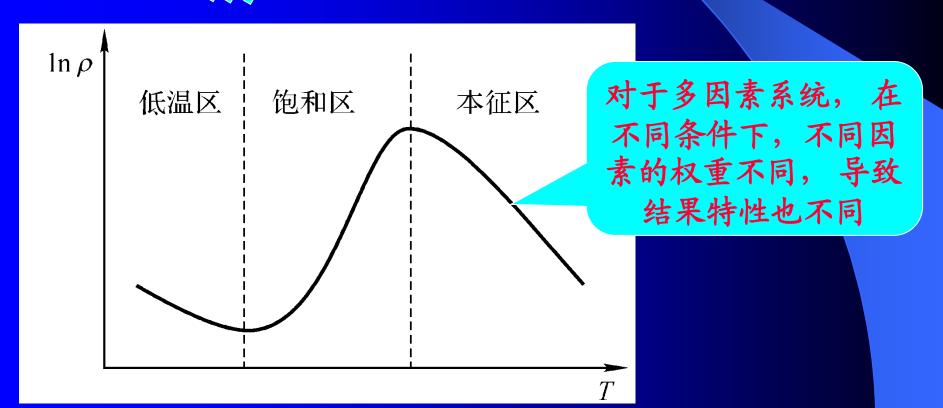
本征激发增加,杂质电离恒定,载流子浓度变化不大

高温 T///

本征激发大幅度增加,杂质电离恒定,大幅度增加载流子

# 半导体电阻率与载流子浓度和迁移率都成反比 $\rho=1/\sigma=1/(ne\mu_{\rm n}+pe\mu_{\rm p})$

低温电离区,T//,载流子浓度 $\rightarrow$ ,迁移率 $\rightarrow$ ,电阻率 $\rightarrow$ 。 饱和电离区,T//,载流子浓度 $\rightarrow$ ,迁移率 $\rightarrow$ ,电阻率 $\rightarrow$ 。 高温本征区,T//,载流子浓度 $\rightarrow$ ,迁移率 $\rightarrow$ ,电阻率



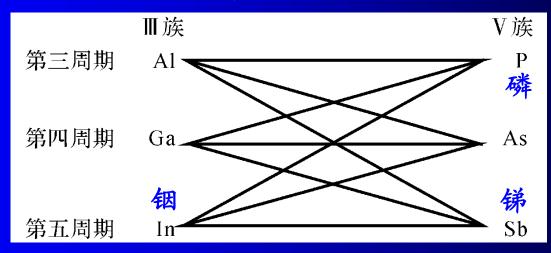
## 3.5 半导体材料

#### 半导体材料:

- · 元素半导体: Si、Ge、Se(硒)、Te(碲).....
- 化合物半导体: 晶态、非晶态无机、有机化合物、氧化物

## 3.5.1 III-V族化合物半导体

III-V族化合物半导体的化学键:共价键和极性键构成的混合键 III-V族双元素化合物半导体有9种组成:



GaAs (砷化镓)单晶材料:闪 锌矿晶体结构,第二代半导体 材料,继Si后发展最快、应用 最广的半导体材料

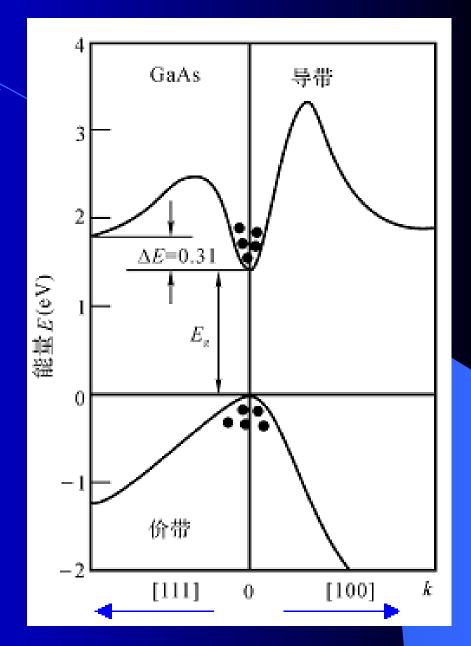
直接带隙



光电子器件、光电储存器件

InP(磷化铟)单晶材料:

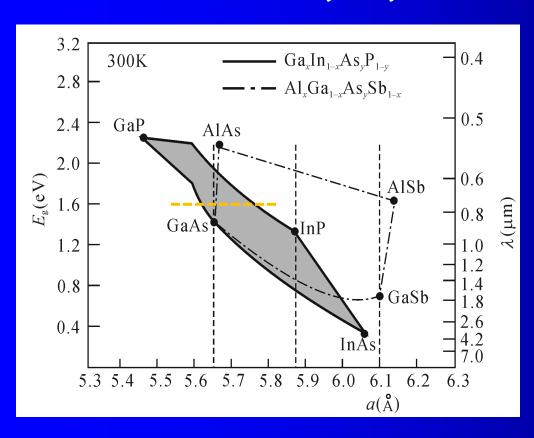
在某些性能上比GaAs更优异



#### III-V族多元素化合物半导体(合金半导体):

例如:  $GaP_xAs_{1-x}$  (三元素, 0 < x < 1)

 $Al_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$  (四元素,0 < x < 1,0 < y < 1)



黑点处:

二元化合物半导体

黑点间连线上点:

三元合金半导体

连线包围的面上点:

四元合金半导体

横坐标: 晶格常数

纵坐标:禁带宽度、波长

化合物半导体需要与衬底晶格常数匹配

## 3.5.2 II-VI族化合物半导体

II族半导体: Zn(锌)、Cd(镉)、Hg(汞)

VI族半导体: S(硫)、Se(硒)、Te(碲)

II-VI族化合物半导体的化学键:离子键、"自补偿"作用

自补偿:掺受主杂质的半导体材料内,由于热缺陷会出现负空位,该负离子起施主作用,补偿了受主;反之亦然。

有些II-VI族化合物半导体由于本征施主缺陷导致的自补偿效应, 只能呈现p型或n型,称为单极性半导体,如CdSe、ZnTe、CdS;

元素半导体、III-V族化合物半导体既能掺杂为p型、也能掺杂为n型,称为双极性半导体。

窄禁带宽度半导体,用于远红外探测器(波长40 μm):

II-VI族三元化合物半导体: Cd, Hg<sub>1-x</sub>Te

II - IV -VI族化合物半导体: Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te

## 3.5.3 非晶态半导体

- 非晶Si (α-Si) 半导体: 太阳电池、场效应管(驱动液晶显示,逻辑电路和图像传感器)
- · 硫属玻璃半导体: 奥氏(Ovshinsky) 效应(奥氏阈值开关、 奥氏记忆开关)
- · 氧化物玻璃半导体: ITO导电玻璃

## 3.5.4 有机半导体

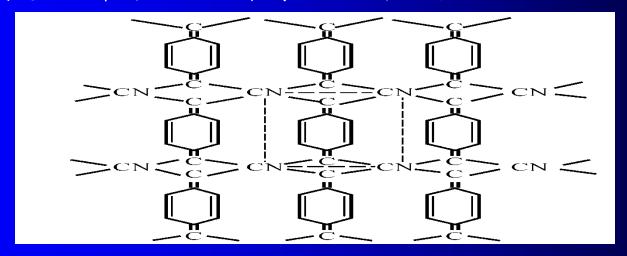
有机半导体: π键(两个π键: 双轭双键)

π键电子在整个分子中运动

$$-C = C - C = C - H H H H$$

有机半导体的种类:分子晶体、络合物和电荷转移络合物、长键或聚合物、有机染料和一些生物学分子晶体(如荼、蒽、蓖嵌二萘、酞菁)

例如:四氰基二甲苯 (n型半导体电荷转移络合物)



#### 导电塑料 (聚合物)



## 3.6 几种固态电子的体效应

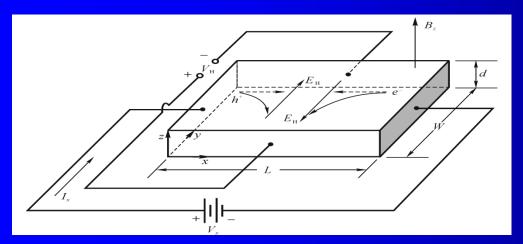
固态电子效应(电、磁、声、光、热、力):

- · 耿氏(Gunn)效应(强电)
- 磁电效应
- 光电效应
- 热电效应
- 压电效应
- 声电效应
- 磁光效应
- 光磁电效应
- 热磁电效应
- 光磁热效应

#### 3.6.1 磁电效应

主要有霍耳(Hall)效应: 电场力与磁场洛伦兹力平衡

N型的P型半导体霍尔电场方向相反



## N型半导体

$$J = -nev_d = \sigma E$$

$$v_x = -\frac{J_x}{en} = -\frac{I_x}{enWd}$$

$$F = e(E_{B} + v \times B) = 0$$

霍耳电压Hall voltage:  $V_{\rm H} = -(I_{\rm x}B_{\rm z})/(end)$ 

可用于确定<mark>载流子</mark> 浓度和类型

霍耳迁移率:  $J_x = en\mu_H E_x \Rightarrow \mu_H = (I_x L)/(enV_x W d)$ 

霍尔迁移率严格计算需考虑电磁场中的运动以及载流子速度的统计分布

· 测定霍耳系数R<sub>H</sub>(单位电流密度和单位磁感应强度产生的霍尔电场):

$$R_{\rm H} = E_{\rm y}/(J_{\rm x}B_{\rm z}) = (V_{\rm H}/W)/[I_{\rm x}B_{\rm z}/(Wd)] = (V_{\rm H}d)/(I_{\rm x}B_{\rm z})$$

• 确定半导体的导电类型:

n型半导体:  $R_H < 0$ ; p型半导体:  $R_H > 0$ 

- •确定半导体的禁带宽度?? (怎么测)
- 结合电导率的测量,可得到多数载流子的迁移率
- 测量磁场:迁移率较大的半导体 → 高斯计

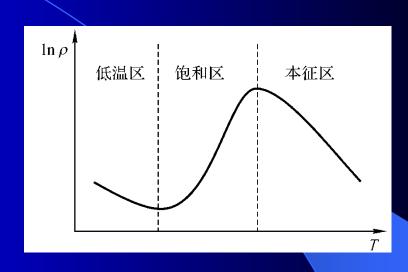
磁阻效应:磁场较强时,载流子偏转较大,沿外电场方向电流密度减小,即由于磁场的存在,使半导体的电阻增大

#### 电场强度E(电压V)增加



电流密度J线性增加

$$J = \sigma E$$
  $\sigma = ne\mu_n + pe\mu_p$ 

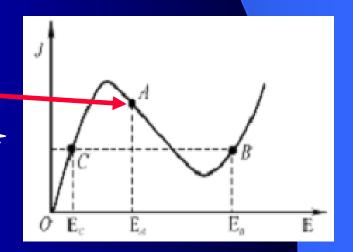


#### 是否有类似情况?

电场强度E (电压V) 增加



电流密度J不但不是线性增加,而且下降



#### 3.6.3 耿氏效应Gunn effect

$$v_{\rm d} = \mu E$$

$$J = nev_d = \sigma E$$

$$v_{d} = \mu E$$
  $J = nev_{d} = \sigma E$   $\sigma = ne\mu_{n} + pe\mu_{p}$ 

欧姆(Ohme)定律: 电场强度E增加 电流密度J线性增加 速度饱和velocity saturation: n型GaAs, 平均漂移速度vd并非一 直随电场强度上升而线型上升,有一个饱和值(电场强度3000 V/cm时,达到最大值)

E > 3000 V/cm时, $v_d$ 随电场强度上升而下降

载流子迁移率µ随电场强度

上升而下降,电导率下降

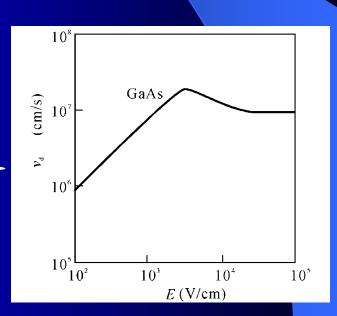


迁移率下降比场强 增加速度更快

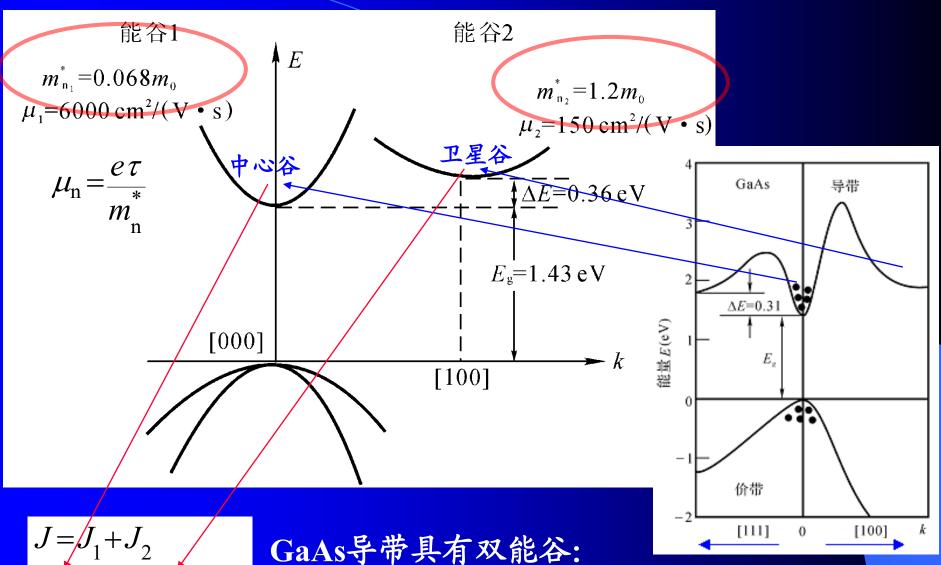
电流密度.J不但不是线性增加,而是下降



微分负电阻区



#### 负阻效应的原因



 $= n_1 e \mu_1 E + n_2 e \mu_2 E$  $=(\sigma_1+\sigma_2)E$ 

中心谷(低能谷1)、卫星谷(低能谷2