

---

# 半导体物理学



# 半导体物理学

---

- 教材:

- 《半导体物理学》(第六版), 刘恩科等编著, 电子工业出版社

- 参考书:

- 《半导体物理与器件》(第三版), Donald A. Neamen 著, 电子工业出版社



# 半导体物理学

---

## ■ 课程考核办法：

- 本课采用开卷笔试的考核办法。第九周安排一次期中考试。
- 总评成绩构成比例为：平时成绩10%；期中考试45%；期末考试45%



# 半导体物理学

---

- ✓ 半导体中的电子状态
- ✓ 半导体中杂质和缺陷能级
- ✓ 半导体中载流子的统计分布
- ✓ 半导体的导电性
- ✓ 非平衡载流子
- ✓ pn结
- ✓ 金属和半导体的接触
- ✓ 半导体表面与MIS结构

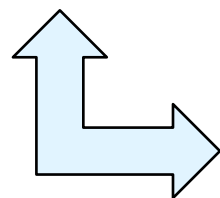
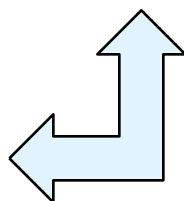


# 半导体概要

微电子学简介:

固态电子学分支之一

微电子学



光电子学

研究在固体（主要是半导体）材料上构成的微小型化器件、电路、及系统的电子学分支学科



# 半导体概要

## 微电子学研究领域

- 半导体器件物理
- 集成电路工艺
- 集成电路设计和测试

## 微电子学发展的特点

向高集成度、低功耗、高性能高可靠性电路方向发展

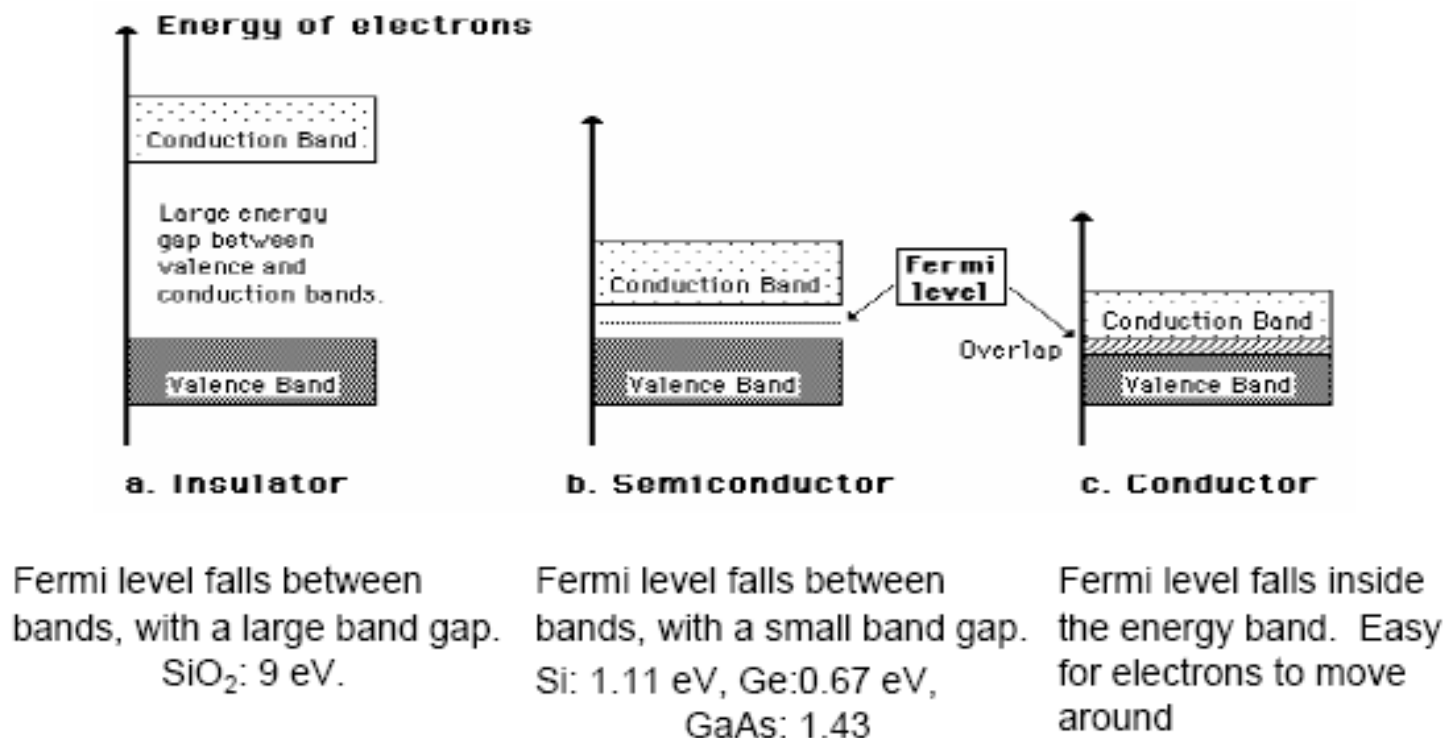
与其它学科互相渗透，形成新的学科领域：  
光电集成、MEMS、生物芯片



# 半导体及其基本特性

## 什么是半导体？

固体材料分成：超导体、导体、半导体、绝缘体



# What are semiconductors

Roman numeral  
gives valence

	1A																0	
1	1 H	IIA															2 He	
2	3 Li	4 Be																
3	11 Na	12 Mg	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	VIII	VII	IB	IIB	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 Y	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57 *La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89 +Ac	104 Rf	105 Ha	106 Sg	107 Ns	108 Hs	109 Mt	110 110	111 111	112 112	113 113					

## Periodic Table of the Elements

Elements: Si, Ge, C

Binary: GaAs, InSb, SiC, CdSe, etc.

Ternary+: AlGaAs, InGaAs, etc.



# 半导体物理学

---

- ✓ 半导体中的电子状态
- ✓ 半导体中杂质和缺陷能级
- ✓ 半导体中载流子的统计分布
- ✓ 半导体的导电性
- ✓ 非平衡载流子
- ✓ pn结
- ✓ 金属和半导体的接触
- ✓ 半导体表面与MIS结构

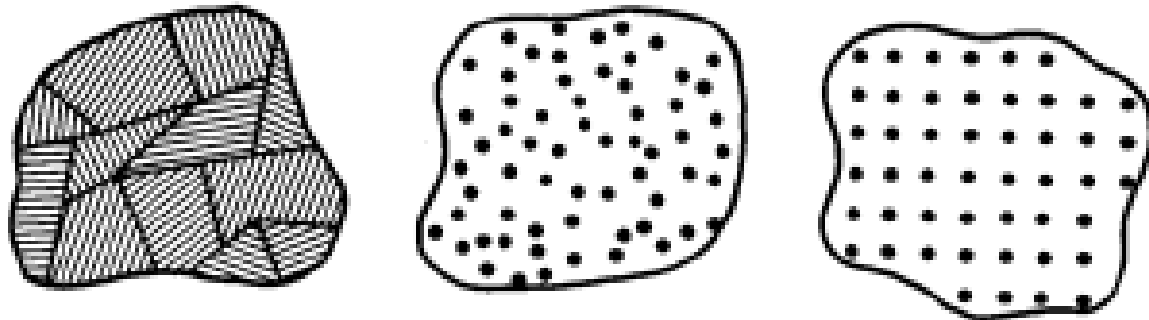


# 半导体的纯度和结构

- 纯度

- 极高，杂质  $< 10^{13} \text{ cm}^{-3}$

- 结构



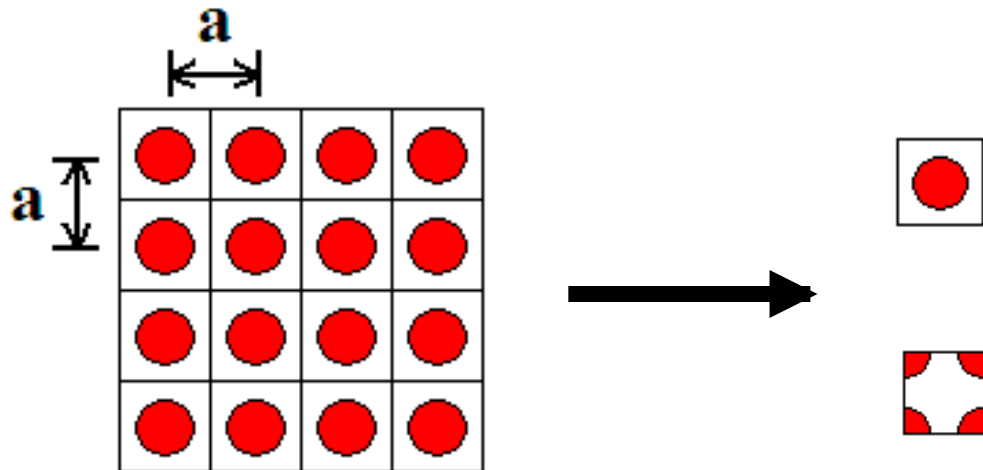
Polycrystalline    amorphous    crystalline



# 晶体结构

## ■ 单胞

- 对于任何给定的晶体，可以用来形成其晶体结构的最小单元



注：(a) 单胞无需是唯一的  
(b) 单胞无需是基本的



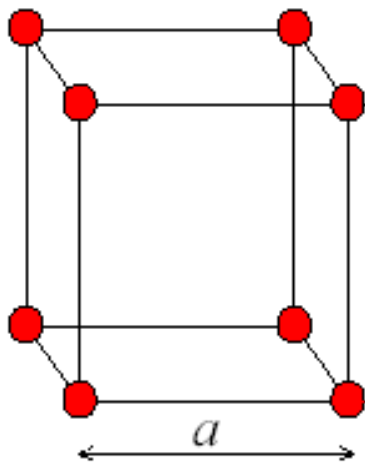
# 晶体结构

## ■ 三维立方单胞

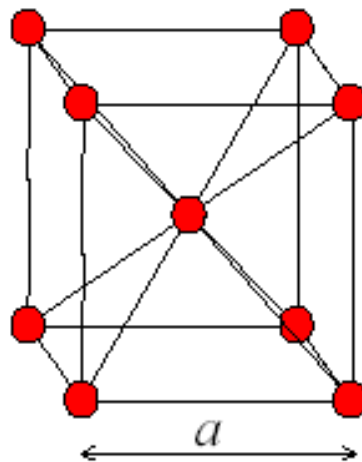
➤ 简立方、

体心立方、

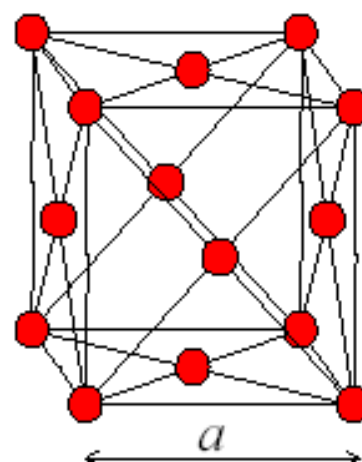
面立方



(a)



(b)



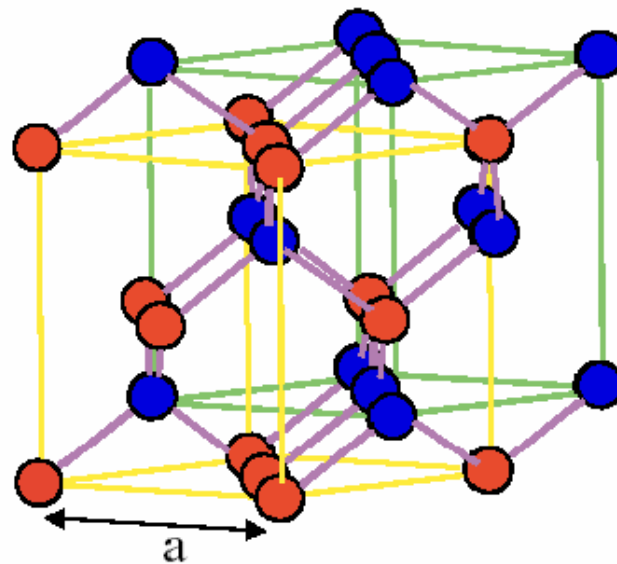
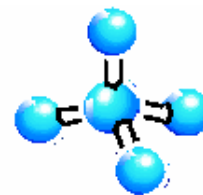
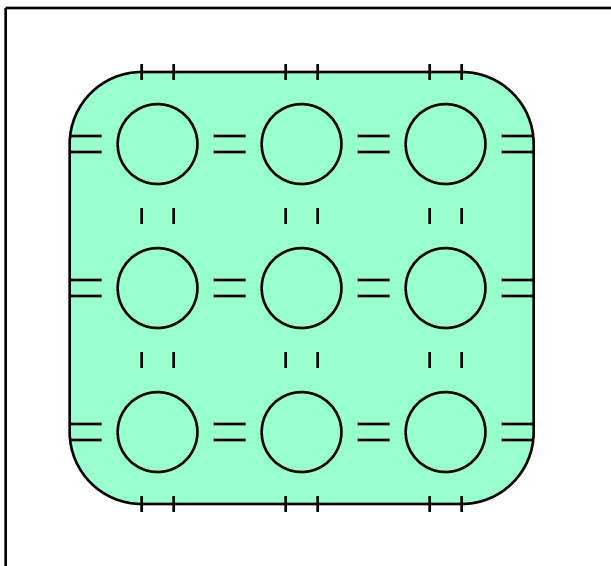
(c)



# 金刚石晶体结构

原子结合形式：共价键

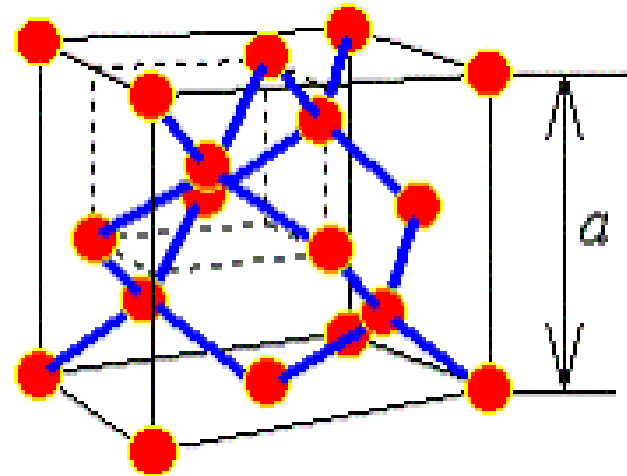
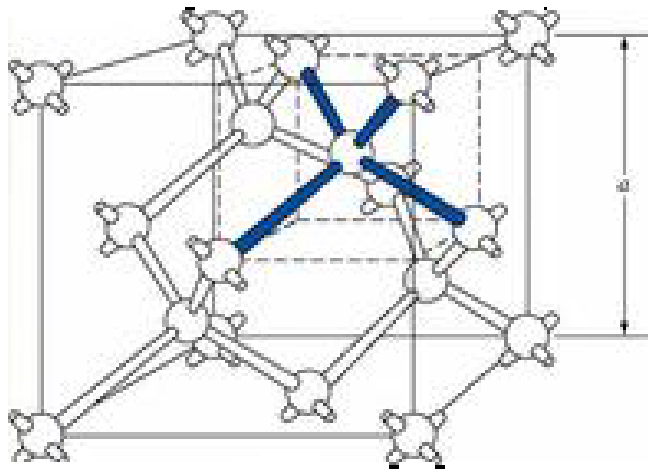
形成的晶体结构：构成一个正四面体，具有**金刚石晶体结构**



金刚石结构



# 金刚石晶体结构

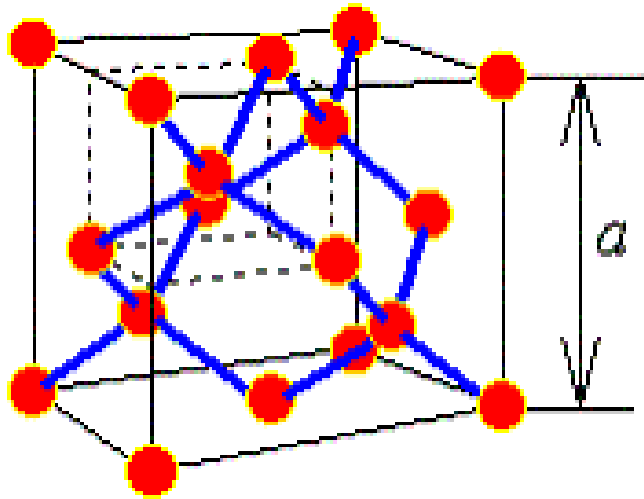


半导体有: 元素半导体如Si、Ge

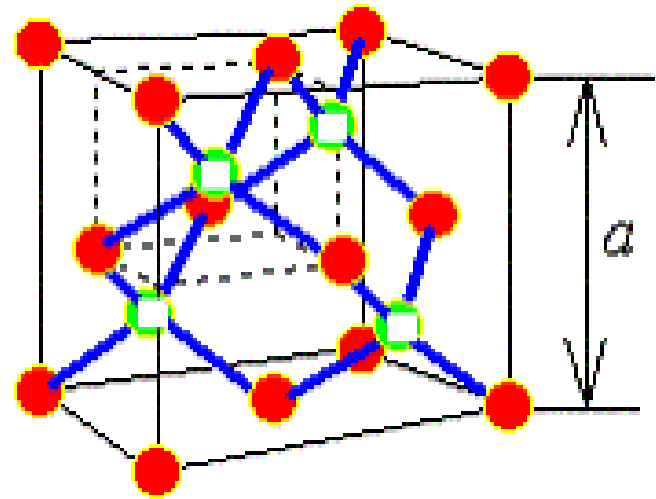


# 闪锌矿晶体结构

金刚石型



闪锌矿型



半导体有: 化合物半导体如GaAs、InP、ZnS



# 练习

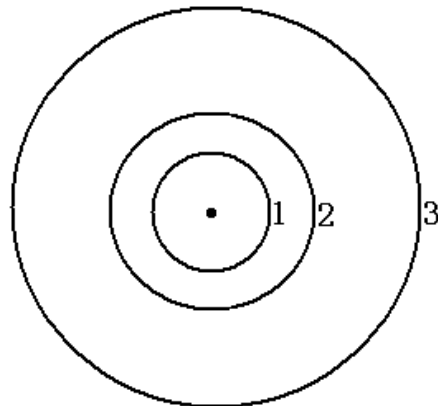
---

- 1、单胞是基本的、不唯一的单元。( )
- 2、按半导体结构来分，应用最为广泛的是( )。
- 3、写出三种立方单胞的名称，并分别计算单胞中所含的原子数。
- 4、计算金刚石型单胞中的原子数。



# 原子的能级

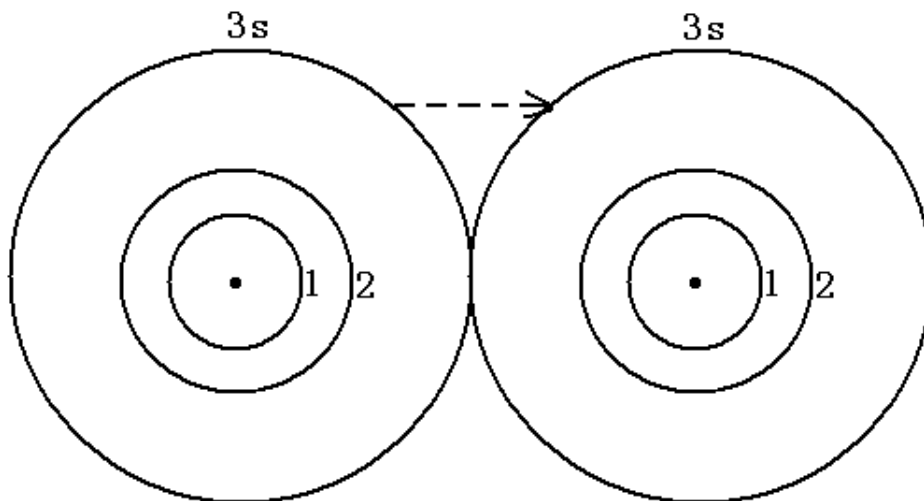
- 电子壳层



- 不同支壳层电子

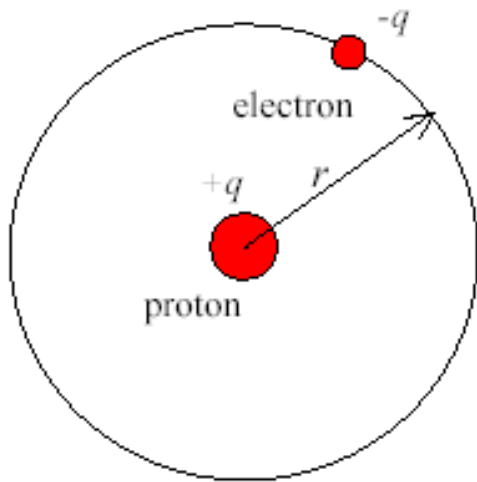
➤  $1s$  ;  $2s$  ,  $2p$  ;  $3s$  ,  $2p$  ,  $3d$  ; ...

- 共有化运动

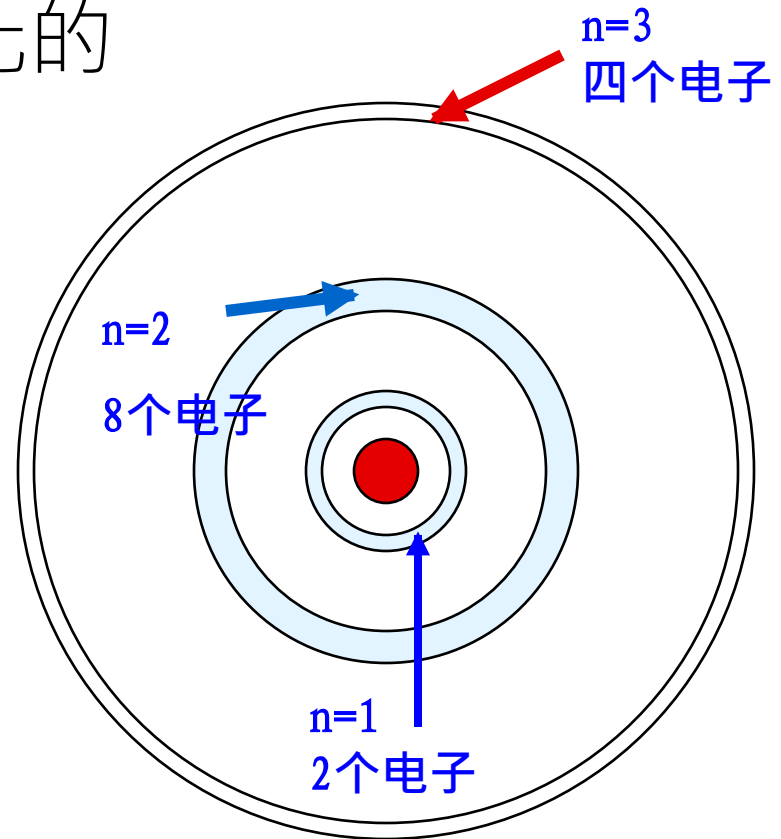


# Si原子的能级

- 电子的能级是量子化的



H

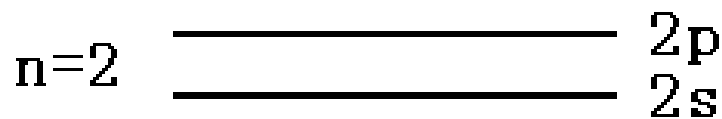


Si

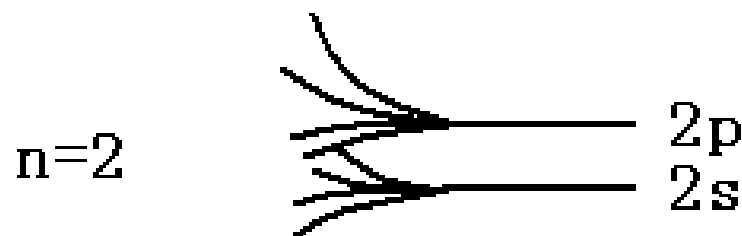


# 原子的能级的分裂

## 孤立原子的能级

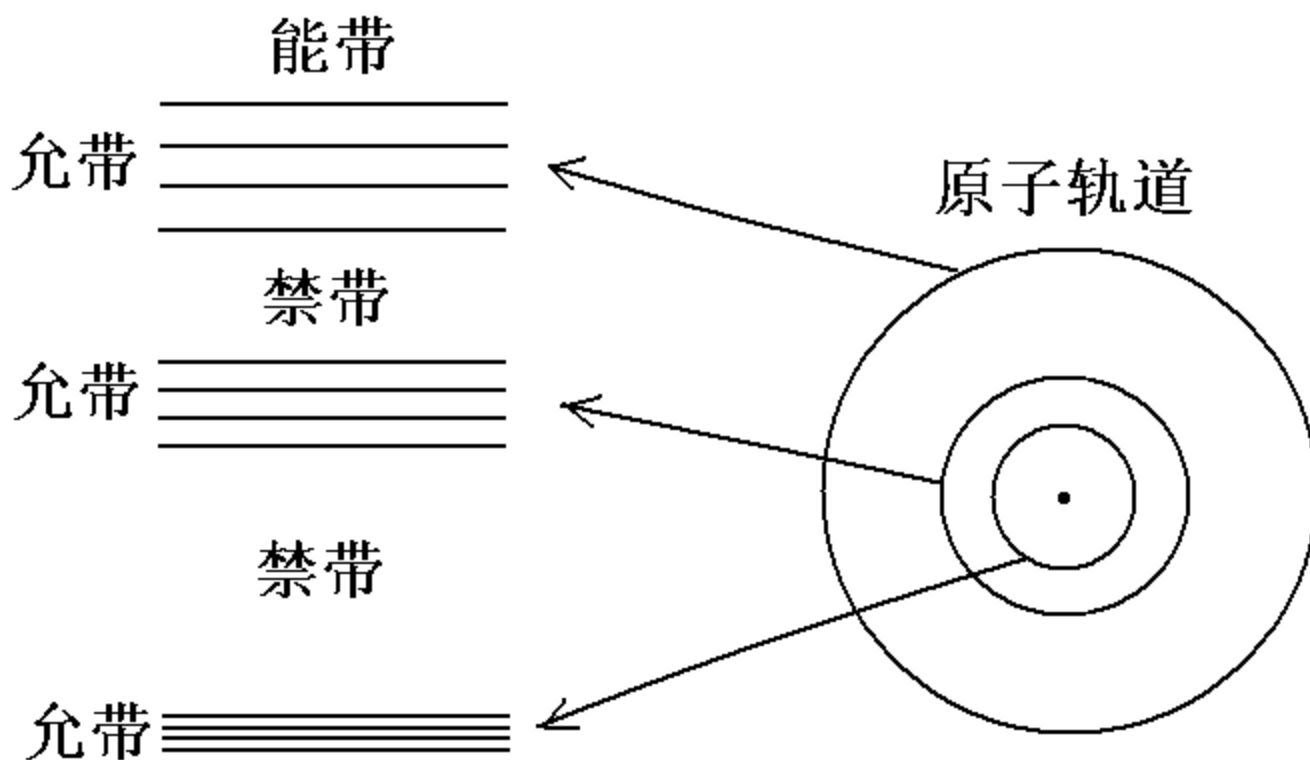


## 4个原子能级的分裂

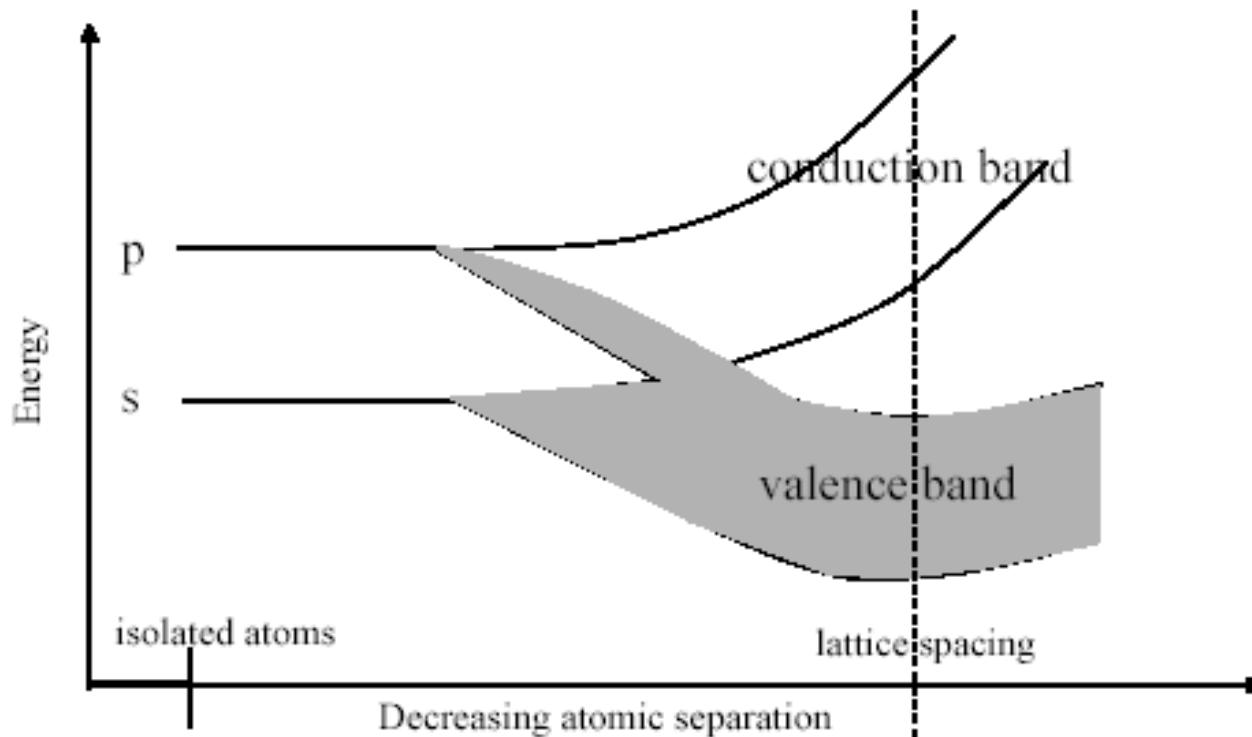


# 原子的能级的分裂

## 原子能级分裂为能带



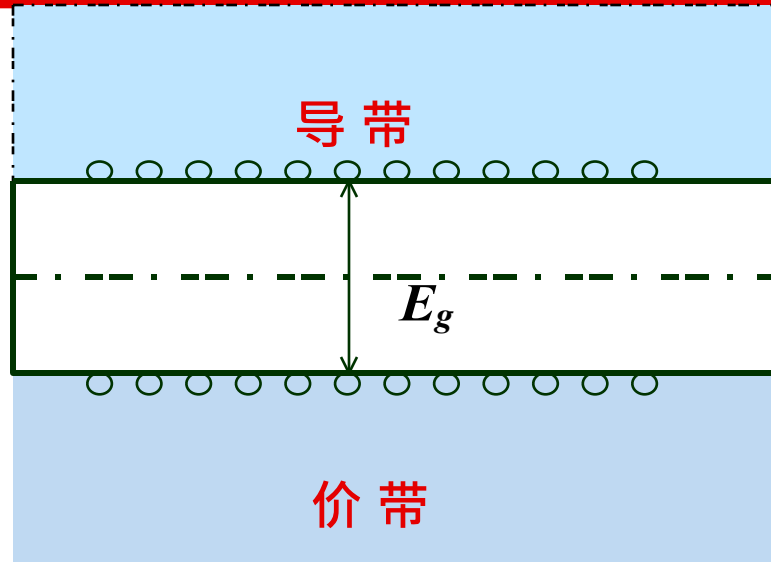
# Si的能带 ( 价带、导带和带隙 )



- Energy states of Si atom (a) expand into energy bands of Si crystal (b).
- The lower bands are filled and higher bands are empty in a semiconductor.
- The highest filled band is the *valence band*.
- The lowest empty band is the *conduction band*.



# 半导体的能带结构



价带：0K条件下被电子填充的能量的能带

导带：0K条件下未被电子填充的能量的能带

带隙：导带底与价带顶之间的能量差



# 自由电子的运动

---

微观粒子具有波粒二象性

$$\begin{aligned} p = m_0 u \quad E = \frac{p^2}{2m_0} &\quad \longrightarrow \quad p = \mathbf{h}K \\ \Phi(r, t) = A e^{i(K \cdot r - \omega t)} &\quad E = h\nu = \mathbf{h}\omega \end{aligned}$$



# 半导体中电子的运动

## 薛定谔方程及其解的形式

$$V(x) = V(x + sa)$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m_0} \frac{d^2\Psi(x)}{dx^2} + V(x)\Psi(x) = E\Psi(x)$$

$$\Psi_k(x) = u_k(x)e^{ikx}$$



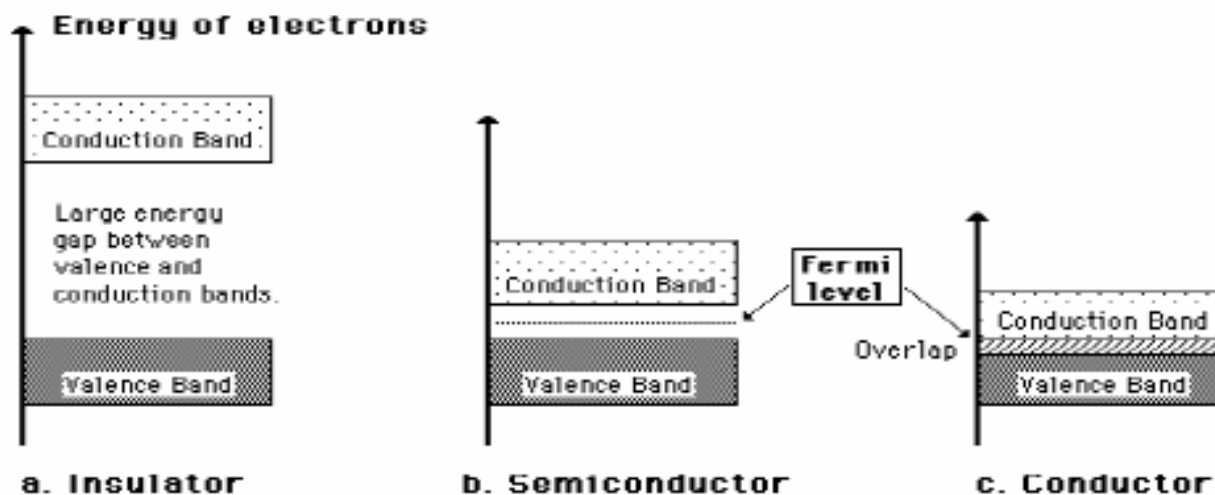
$$u_k(x) = u_k(x + na)$$

布洛赫波函数



# 固体材料的能带图

固体材料分成：超导体、导体、半导体、绝缘体



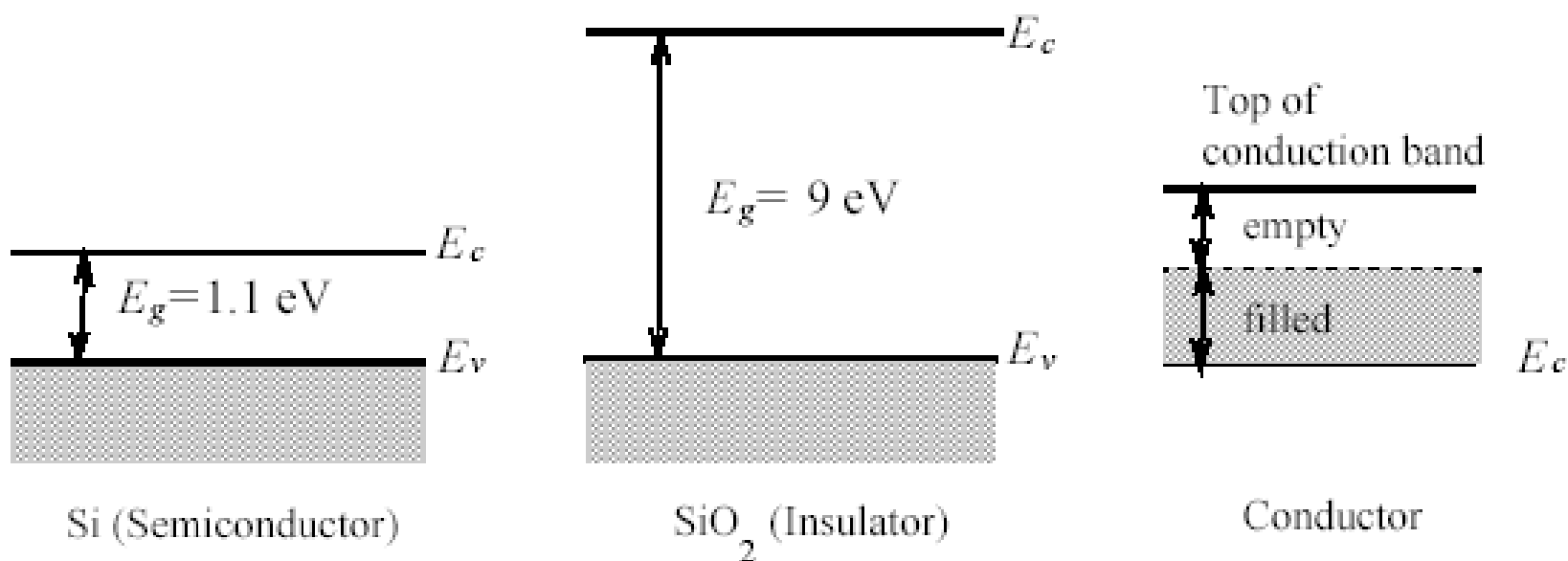
Fermi level falls between bands, with a large band gap.  
SiO<sub>2</sub>: 9 eV.

Fermi level falls between bands, with a small band gap.  
Si: 1.11 eV, Ge: 0.67 eV,  
GaAs: 1.43

Fermi level falls inside the energy band. Easy for electrons to move around

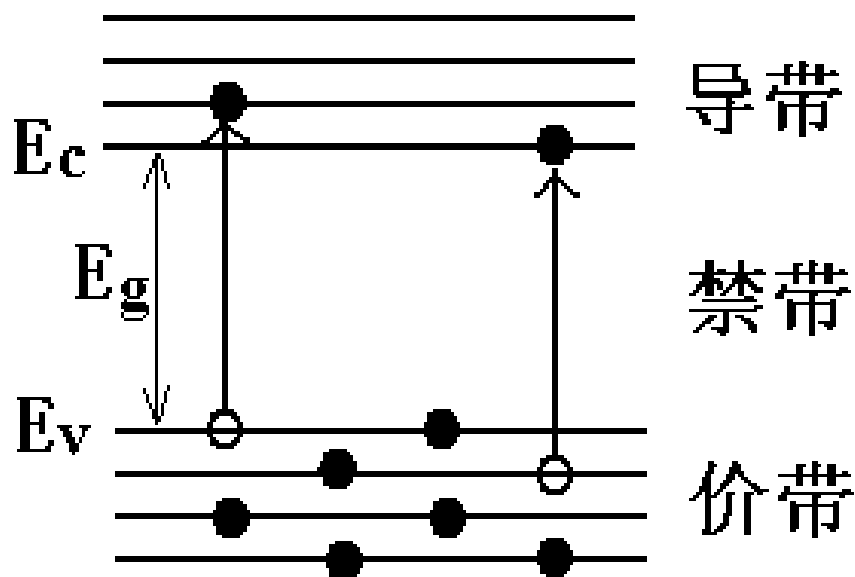


# 半导体、绝缘体和导体



# 半导体的能带

## 本征激发



# 练习

---

- 1、什么是共有化运动？
- 2、画出Si原子结构图（画出s态和p态并注明该能级层上的电子数）
- 3、电子所处能级越低越稳定。（      ）
- 4、无论是自由电子还是晶体材料中的电子，他们在某处出现的几率是恒定不变的。（      ）
- 5、分别叙述半导体与金属和绝缘体在导电过程中的差别。



# 半导体中E ( K ) 与K的关系

在导带底部，波数  $k = 0$  附近  $k$  值很小，将在  $E(k)$  附近泰勒展开

$$E(k) = E(0) + \left(\frac{dE}{dk}\right)_{k=0} k + \frac{1}{2} \left(\frac{d^2E}{dk^2}\right)_{k=0} k^2 + \dots$$

$$\longrightarrow E(k) - E(0) = \frac{1}{2} \left(\frac{d^2E}{dk^2}\right)_{k=0} k^2$$



# 半导体中E ( K ) 与K的关系

---

$$E(k) - E(0) = \frac{1}{2} \left( \frac{d^2 E}{dk^2} \right)_{k=0} k^2$$

令  $\frac{1}{\hbar^2} \left( \frac{d^2 E}{dk^2} \right)_{k=0} = \frac{1}{m_n^*}$  代入上式得

$$E(k) - E(0) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_n^*}$$



# 自由电子的能量

## 微观粒子具有波粒二象性

$$p = m_0 u \quad E = \frac{p^2}{2m_0}$$

$$\Phi(r, t) = A e^{i(K \cdot r - \omega t)}$$



$$p = \mathbf{h}K$$

$$E = h\nu = \mathbf{h}\omega$$



$$E = \frac{\mathbf{h}^2 k^2}{2m_0}$$



# 半导体中电子的平均速度

在周期性势场内，电子的平均速度u可表示为波包的群速度

$$u = \frac{dv}{dk} \quad \xrightarrow{E = h\nu} \quad u = \frac{1}{h} \frac{dE}{dk}$$

$$E(k) - E(0) = \frac{h^2 k^2}{2m_n^*} \quad \xrightarrow{\quad} \quad u = \frac{hk}{m_n^*}$$



# 自由电子的速度

微观粒子具有波粒二象性

$$p = m_0 u \quad E = \frac{p^2}{2m_0}$$

$$\Phi(r, t) = A e^{i(K \cdot r - \omega t)}$$



$$p = \mathbf{h}K$$

$$E = h\nu = \mathbf{h}\omega$$



$$u = \frac{\mathbf{h}k}{m_0}$$



# 半导体中电子的加速度

半导体中电子在一强度为  $E$  的外加电场作用下，外力对电子做功为电子能量的变化

$$dE = f ds = f u dt \quad \xrightarrow{u = \frac{1}{\hbar} \frac{dE}{dk}} \quad dE = \frac{f}{\hbar} \frac{dE}{dk} dt$$

$$\xrightarrow{\quad} \quad f = \hbar \frac{dk}{dt}$$

$$a = \frac{du}{dt} = \frac{1}{\hbar} \frac{d}{dt} \left( \frac{dE}{dk} \right) = \frac{1}{\hbar} \frac{d^2 E}{dk^2} \frac{dk}{dt} = \frac{f}{\hbar^2} \frac{d^2 E}{dk^2}$$



# 半导体中电子的加速度

---

$$\text{令 } \frac{1}{m_n^*} = \frac{1}{\hbar^2} \frac{d^2 E}{dk^2} \quad \text{即} \quad m_n^* = \frac{\hbar^2}{\frac{d^2 E}{dk^2}}$$

$$\longrightarrow \quad a = \frac{f}{m_n^*}$$



# 有效质量的意义

---

自由电子只受外力作用；半导体中的电子不仅受到外力的作用，同时还受半导体内部势场的作用

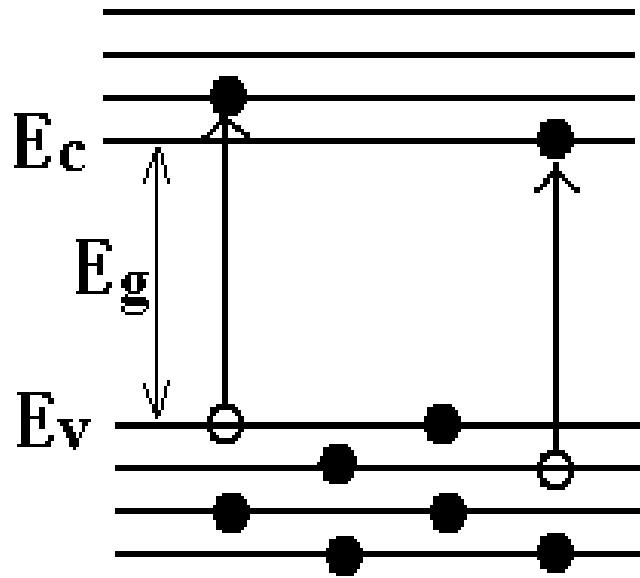
意义：有效质量概括了半导体内部势场的作用，使得研究半导体中电子的运动规律时更为简便（有效质量可由试验测定）



# 空穴

只有非满带电子才可导电

导带电子  
负电  $-q$  (顶)



导带

禁带

价带

生；电子带  
 $-q$  (价带)



# K空间等能面

在 $k=0$ 处为能带极值

$$E(k) - E(0) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_n^*}$$

导带底附近

$$E(k) - E(0) = -\frac{\hbar^2 k^2}{2m_p^*}$$

价带顶附近



# K空间等能面

以  $k_x$   $k_y$   $k_z$  为坐标轴构成  $k$  空间， $k$  空间任一矢量代表波矢  $k$

导带底附近  $k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$

$$E(k) - E(0) = \frac{\hbar^2}{2m_n^*} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$$



# K空间等能面

---

对应于某一  $E(k)$  值，有许多组不同的  $(k_x, k_y, k_z)$ ，这些组构成一个封闭面，在这个面上能量值为一恒值，这个面称为等能量面，简称等能面。  
等能面为一球面（理想）

$$E(k) - E(0) = \frac{\hbar^2}{2m_n^*} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$$



# 半导体物理学

---

- ✓ 半导体中的电子状态
- ✓ 半导体中杂质和缺陷能级
- ✓ 半导体中载流子的统计分布
- ✓ 半导体的导电性
- ✓ 非平衡载流子
- ✓ pn结
- ✓ 金属和半导体的接触
- ✓ 半导体表面与MIS结构



# 与理想情况的偏离

---

晶格原子是振动的

材料含杂质

晶格中存在缺陷

点缺陷（空位、间隙原子）

线缺陷（位错）

面缺陷（层错）



# 与理想情况的偏离的影响

极微量的杂质和缺陷，会对半导体材料的物理性质和化学性质产生决定性的影响，同时也严重影响半导体器件的质量。

1个B原子/ 10<sup>10</sup>个Si原子

在室温下电导率提高 10<sup>3</sup> 倍  
Si单晶位错密度要求低于 10<sup>3</sup> cm<sup>-2</sup>



# 与理想情况的偏离的原因

---

理论分析认为，杂质和缺陷的存在使得原本周期性排列的原子所产生的周期性势场受到破坏，并在禁带中引入了能级，允许电子在禁带中存在，从而使半导体的性质发生改变。



# 硅、锗晶体中的杂质能级

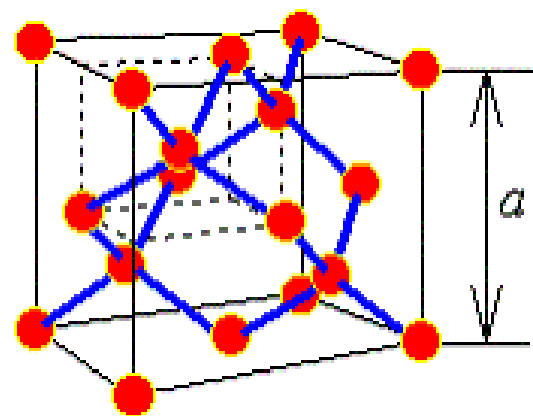
例：如图所示为一晶格常数为 $a$ 的Si晶胞，求：

(a) Si原子半径

(b) 晶胞中所有Si原子占据晶胞的百分比

解：(a) 
$$r = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{4} \times \sqrt{3}a \right) = \frac{\sqrt{3}}{8} a$$

(b) 
$$\frac{8 \times \frac{4}{3} \pi r^3}{a^3} = \frac{\sqrt{3}}{16} \pi = 0.34$$



# 间隙式杂质、替位式杂质

杂质原子位于晶格原子间的间隙位置，该杂质称为**间隙式杂质**。

间隙式杂质原子一般比较小，如Si、Ge、GaAs材料中的离子锂（0.068nm）。

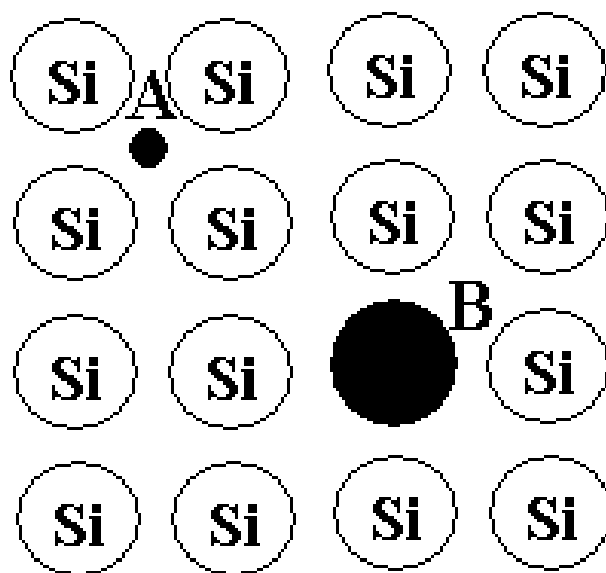
杂质原子取代晶格原子而位于晶格点处，该杂质称为**替位式杂质**。

替位式杂质原子的大小和价电子壳层结构要求与被取代的晶格原子相近。如III、V族元素在Si、Ge晶体中都为替位式杂质。



# 间隙式杂质、替位式杂质

单位体积中的杂质原子数称为杂质浓度



# 练习

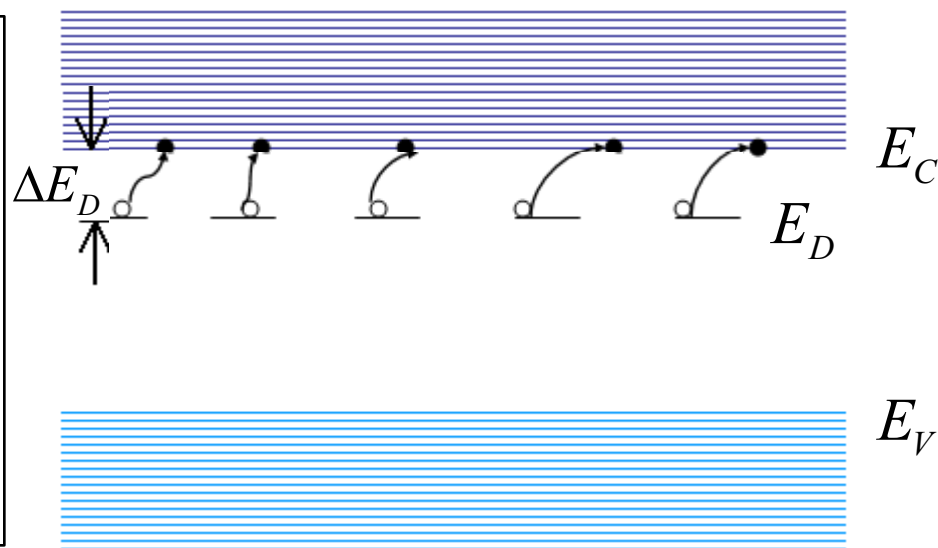
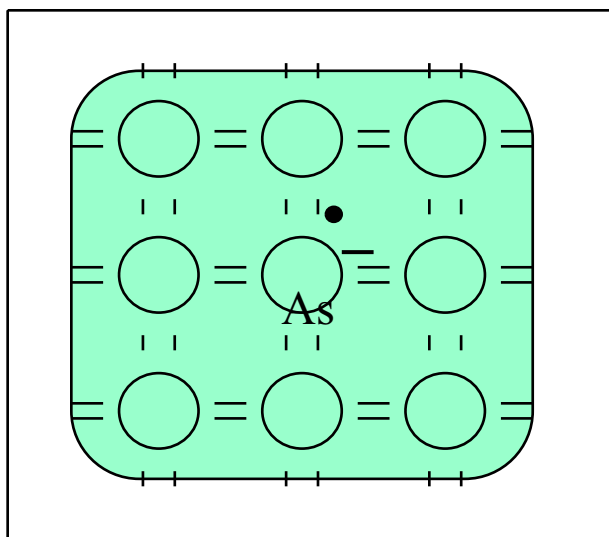
---

- 1、实际情况下 $k$ 空间的等能面与理想情况下的等能面分别是如何形状的？它们之间有差别的原因？
- 2、实际情况的半导体材料与理想的半导体材料有何不同？
- 3、杂质和缺陷是如何影响半导体的特性的？



# 半导体的掺杂

**施主**：掺入在半导体中的杂质原子，能够向半导体中提供导电的电子，并成为带正电的离子。如Si中的P 和As



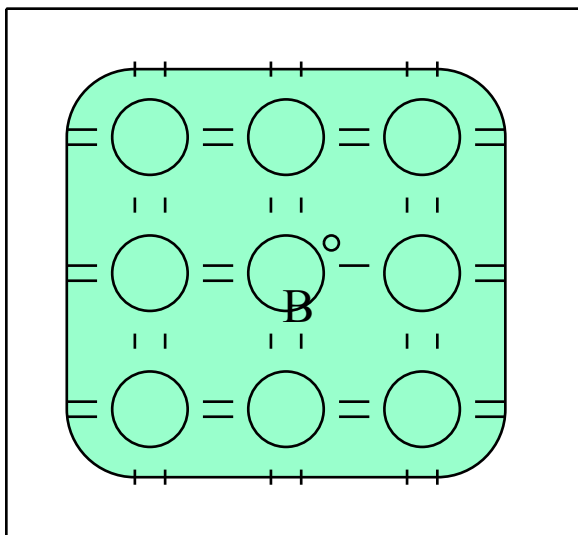
N型半导体

施主能级

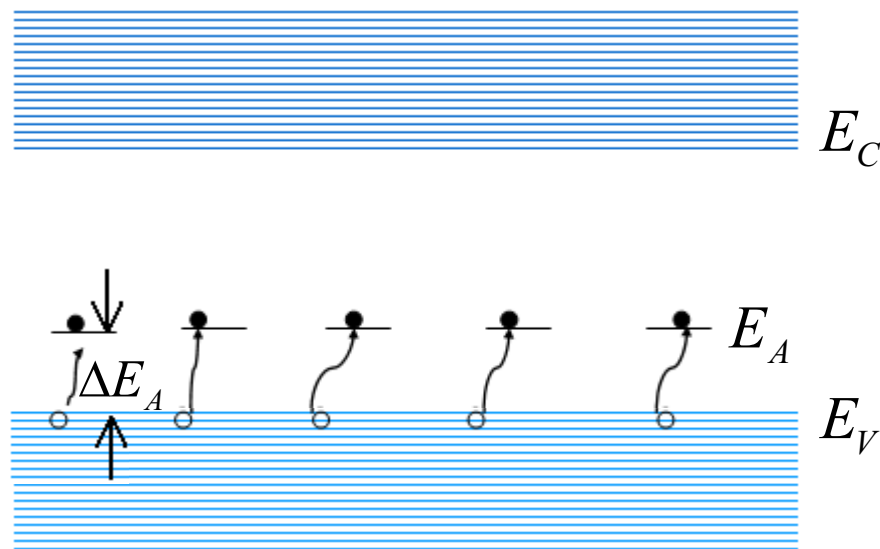


# 半导体的掺杂

**受主**：掺入在半导体中的杂质原子，能够向半导体中提供导电的空穴，并成为带负电的离子。如Si中的B



P型半导体



受主能级



# 半导体的掺杂

Ⅲ、Ⅴ族杂质在Si、Ge晶体中分别为受主和施主杂质，它们在禁带中引入了能级；受主能级比价带顶高 $E_A$ ，施主能级比导带底低 $E_D$ ，均为浅能级，这两种杂质称为浅能级杂质。

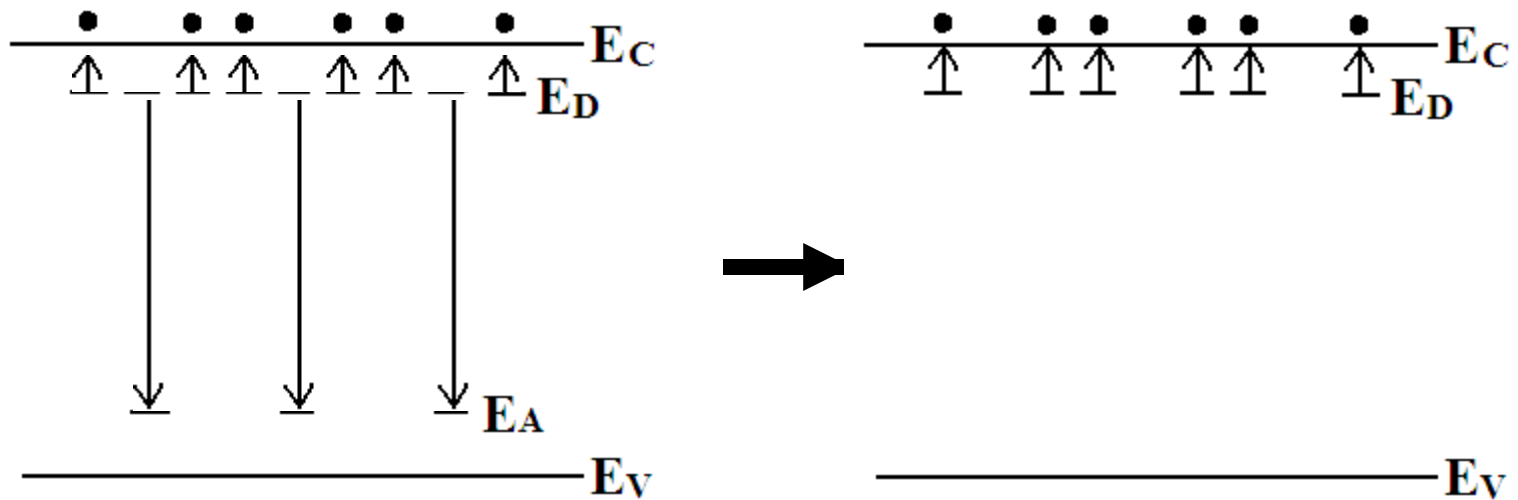
杂质处于两种状态：中性态和离化态。当处于离化态时，施主杂质向导带提供电子成为正电中心；受主杂质向价带提供空穴成为负电中心。



$$N_D \gg N_A$$

半导体中同时存在施主和受主杂质，且

- $N_D \gg N_A$



N型半导体

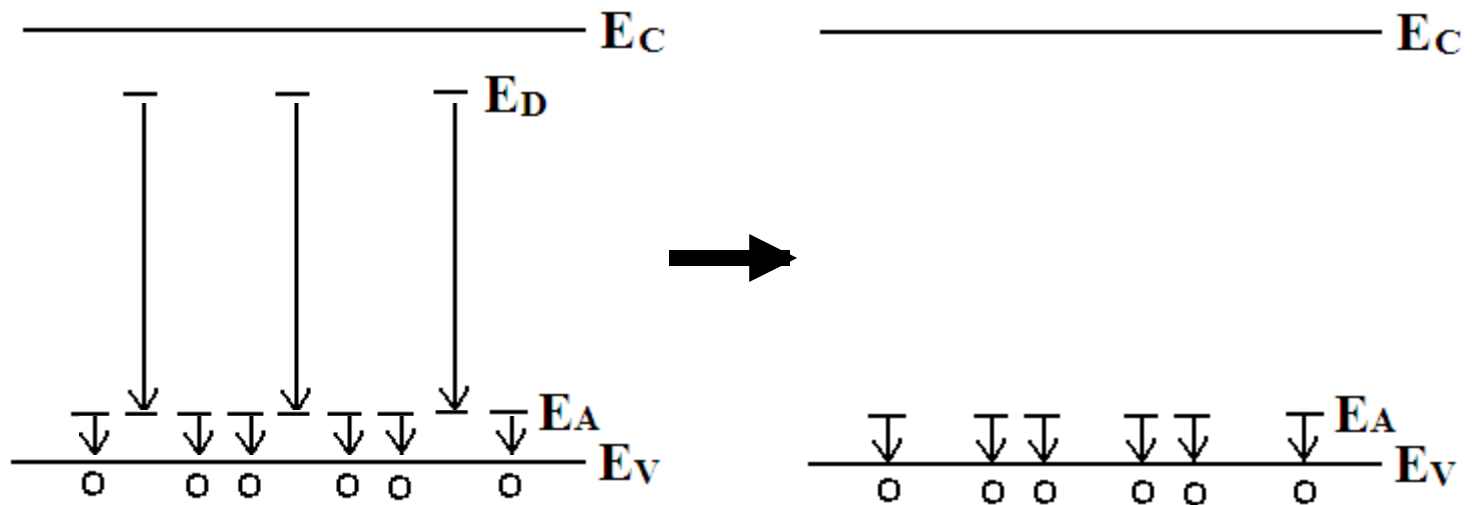
N型半导体



$$N_A \gg N_D$$

半导体中同时存在施主和受主杂质，且

- $N_A \gg N_D$



P型半导体

P型半导体



# 杂质的补偿作用

半导体中同时存在施主和受主杂质时，半导体是N型还是P型由杂质的浓度差决定

半导体中净杂质浓度称为有效杂质浓度（有效施主浓度；有效受主浓度）  
杂质的高度补偿（ ）

$$N_A \approx N_D$$



# 点缺陷

---

## 弗仑克尔缺陷

间隙原子和空位成对出现

## 肖特基缺陷

只存在空位而无间隙原子

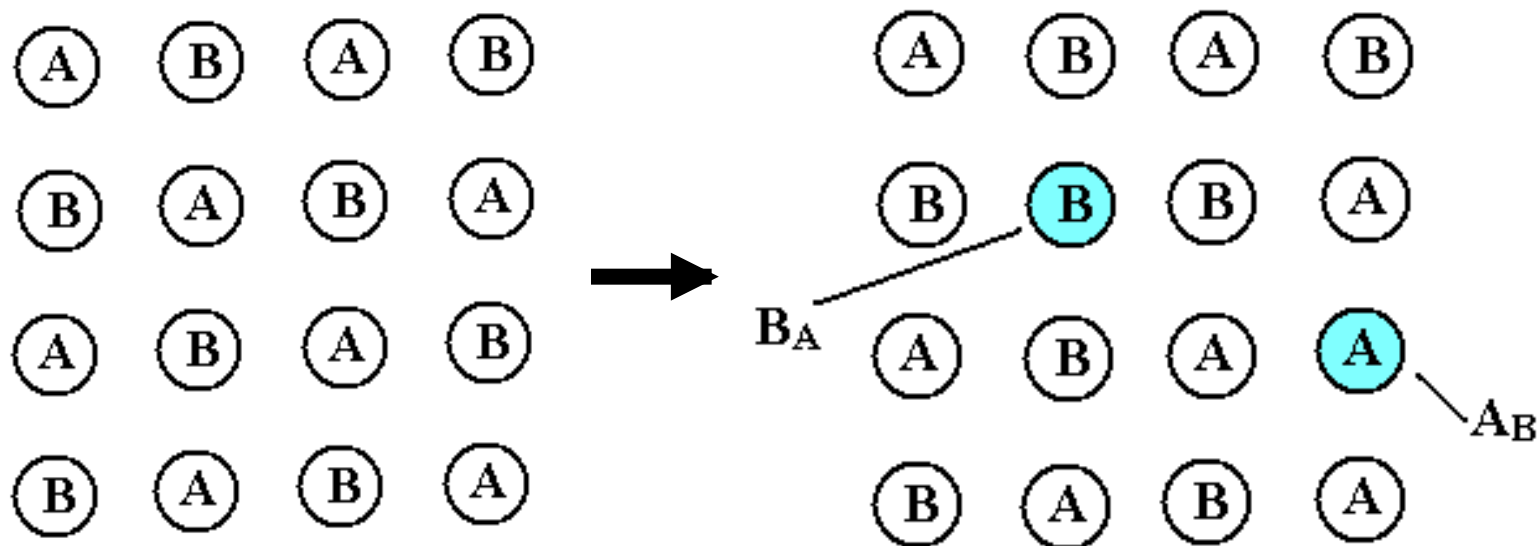
间隙原子和空位这两种点缺陷受温度影响较大，为**热缺陷**，它们不断产生和复合，直至达到动态平衡，总是**同时存在**的。

**空位**表现为**受主作用**；**间隙原子**表现为**施主作用**



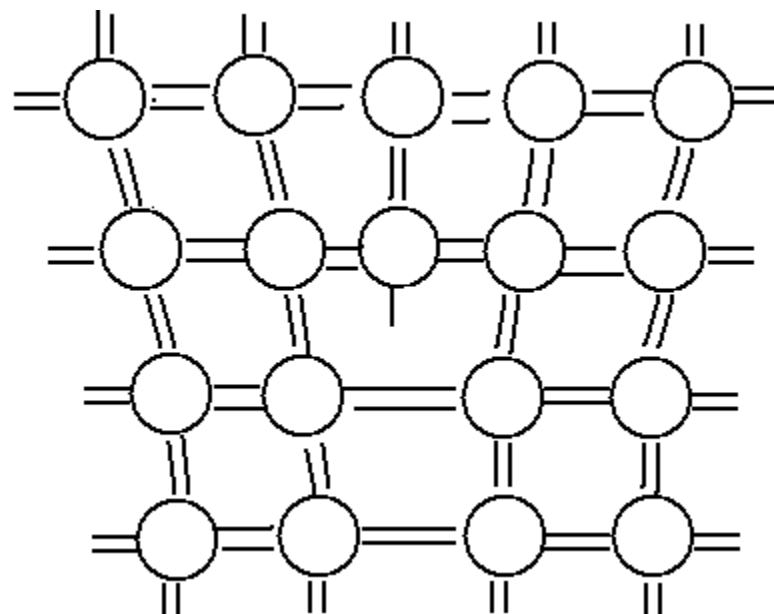
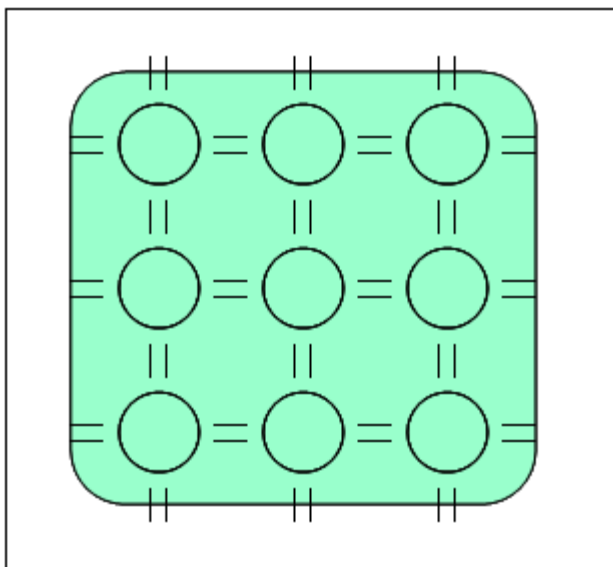
# 点缺陷

## 替位原子（化合物半导体）



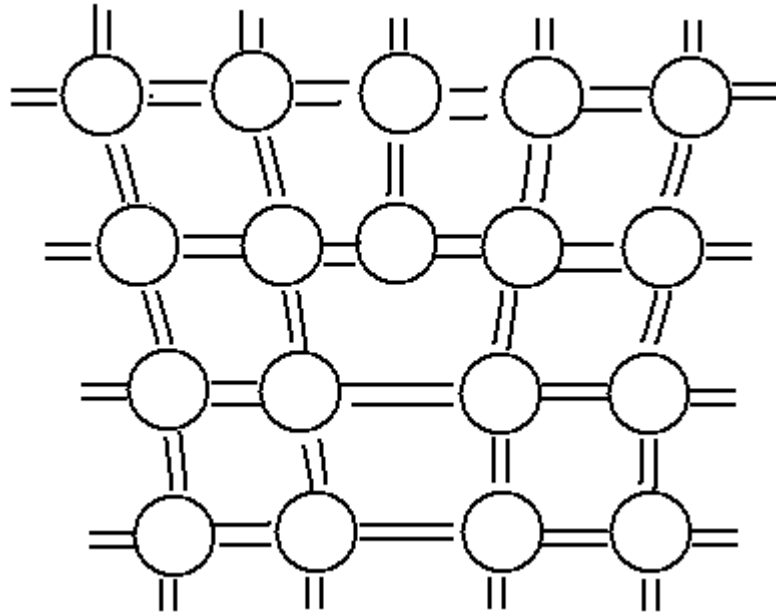
# 位错

位错是半导体中的一种缺陷，它严重影响材料和器件的性能。

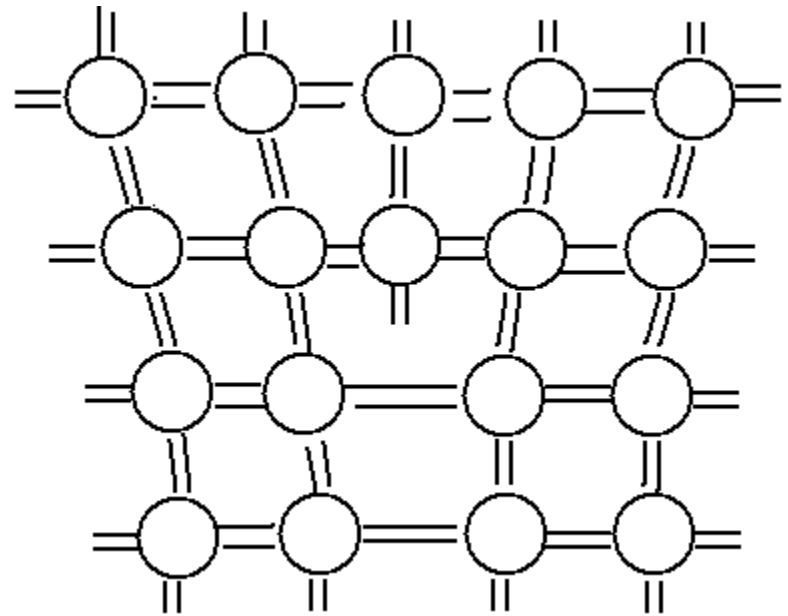


# 位错

施主情况



受主情况



# 练习

- 1、Ⅲ、V族杂质在Si、Ge晶体中为深能级杂质。  
( )
- 2、受主杂质向价带提供空穴成为正电中心。( )
- 3、杂质处于两种状态：( )和( )。
- 4、空位表现为( )作用，间隙原子表现为( )作用。
- 5、以Si在GaAs中的行为为例，说明IV族杂质在Ⅲ—V化合物中可能出现的双性行为。



# 半导体物理学

---

- ✓ 半导体中的电子状态
- ✓ 半导体中杂质和缺陷能级
- ✓ 半导体中载流子的统计分布
- ✓ 半导体的导电性
- ✓ 非平衡载流子
- ✓ pn结
- ✓ 金属和半导体的接触
- ✓ 半导体表面与MIS结构



# 热平衡状态

---

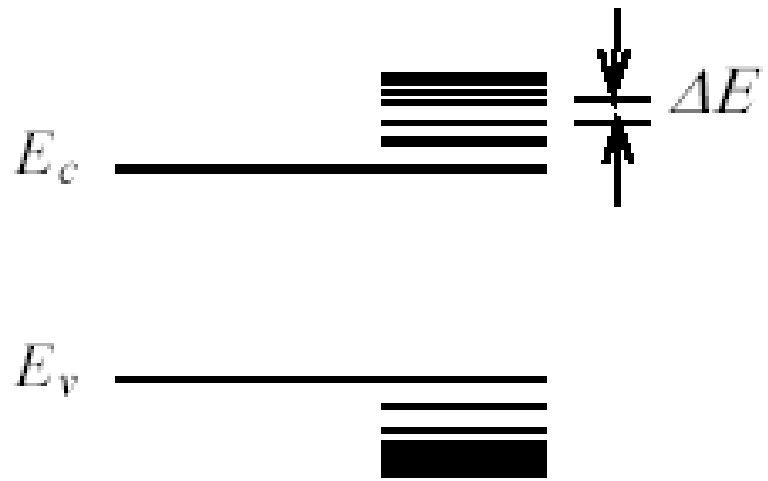
- 在一定温度下，载流子的产生和载流子的复合建立起一动态平衡，这时的载流子称为热平衡载流子。
- 半导体的热平衡状态受温度影响，某一特定温度对应某一特定的热平衡状态。
- 半导体的导电性受温度影响剧烈。



# 态密度的概念

- 能带中能量  $E$  附近每单位能量间隔内的量子态数。
- 能带中能量为  $E$  : ( $E + dE$ ) 无限小的能量间隔内有个量子态，则状态密度为  $g(E)$

$$g(E) = \frac{dz}{dE}$$



# 态密度的计算

- 状态密度的计算
  - 单位  $k$ 空间的量子态数
  - 能量  $E$  :  $(E + \Delta E)$  空间中对应的体积
  - 前两者相乘得状态数  $dz$
  - 根据定义公式求得态密度  $g(E)$



# $k$ 空间中的量子态

- 在  $k$ 空间中，电子的允许能量状态密度为  $V / (8\pi^3)$  考虑电子的自旋情况，电子的允许量子态密度为  $V / (4\pi^3)$ ，每个量子态最多只能容纳一个电子。

$$k_x = 2\pi \frac{n_x}{L} \quad (n_x = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

$$k_y = 2\pi \frac{n_y}{L} \quad (n_y = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

$$k_z = 2\pi \frac{n_z}{L} \quad (n_z = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$



# 态密度

- 导带底附近状态密度（理想情况）

$$dz = \frac{V}{4\pi^3} \times 4\pi k^2 dk$$

$$E(k) = E_C + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_n^*} \longrightarrow kdk = \frac{m_n^* dE}{\hbar^2}$$

$$dz = \frac{V}{2\pi^2} \frac{(2m_n^*)^{3/2}}{\hbar^3} (E - E_C)^{1/2} dE$$



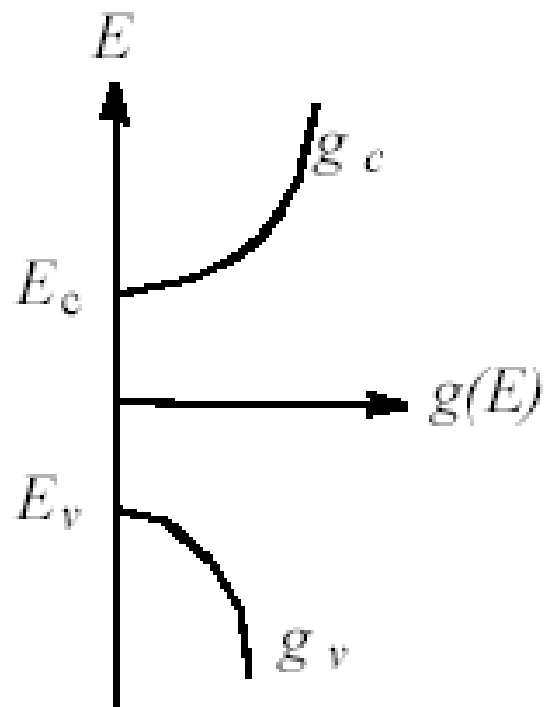
# 态密度

$$g_c(E) = \frac{dz}{dE} = \frac{V}{2\pi^2} \frac{(2m_n^*)^{3/2}}{\hbar^3} (E - E_c)^{1/2}$$

( 导带底 )

$$g_v(E) = \frac{dz}{dE} = \frac{V}{2\pi^2} \frac{(2m_p^*)^{3/2}}{\hbar^3} (E_v - E)^{1/2}$$

( 价带顶 )



# 练习

---

1、推导价带顶附近状态密度  $g_v(E)$



# 费米能级

- 根据量子统计理论，服从泡利不相容原理的电子遵循费米统计律
- 对于能量为 $E$ 的一个量子态被一个电子占据的概率 $f(E)$ 为

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{k_0 T}}}$$

- $f(E)$ 称为电子的费米分布函数
- 空穴的费米分布函数？ $1 - f(E)$



# 费米分布函数

- $E_F$ 称为费米能级或费米能量
  - 温度
  - 导电类型
  - 杂质含量
  - 能量零点的选取

$$\sum_i f(E_i) = N \quad E_F = \mu = \left( \frac{dF}{dN} \right)_T$$

- 处于热平衡状态的电子系统有统一的费米能级



# 费米分布函数

## ■ 当 $T = 0$ 时

➤ 若  $E < E_F$  则  $f(E) = 1$

➤ 若  $E > E_F$  则  $f(E) = 0$

● 在热力学温度为0度时，费米能级  $E_F$  可看成量子态是否被电子占据的一个界限

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{k_0 T}}}$$

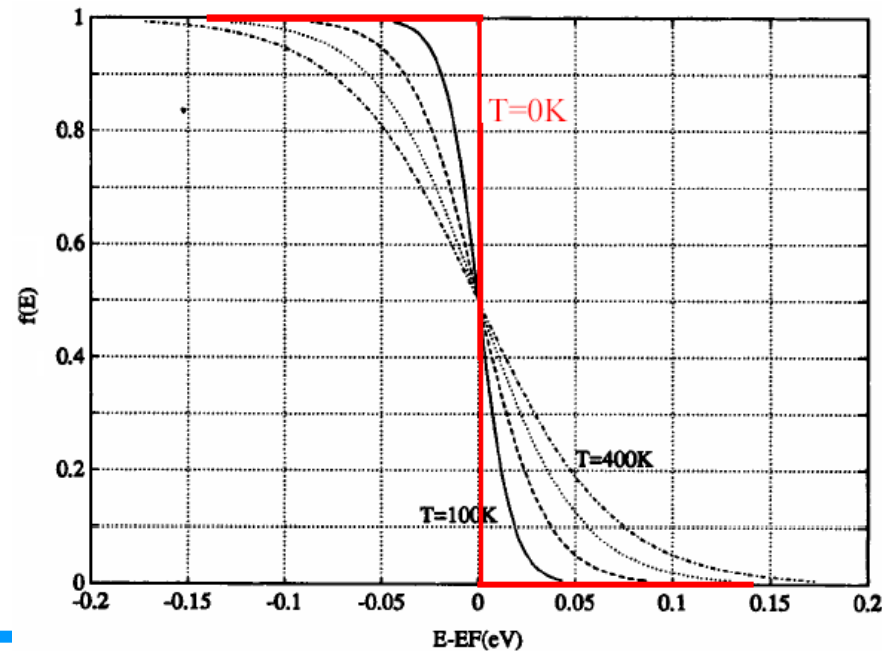
## ■ 当 $T > 0$ 时

➤ 若  $E < E_F$  则  $f(E) > 1/2$

➤ 若  $E = E_F$  则  $f(E) = 1/2$

➤ 若  $E > E_F$  则  $f(E) < 1/2$

● 费米能级是量子态基本上被电子占据或基本上是一个空的一个标志



# 玻尔兹曼分布函数

- 当  $E - E_F \gg k_0 T$  时, 由于  $\exp(\frac{E - E_F}{k_0 T}) \gg 1$  所以

$$1 + \exp(\frac{E - E_F}{k_0 T}) \approx \exp(\frac{E - E_F}{k_0 T})$$

费米分布函数转化为

$$f_B(E) = \exp(-\frac{E - E_F}{k_0 T}) \approx \exp(\frac{E_F}{k_0 T}) \exp(-\frac{E}{k_0 T}) = A \exp(-\frac{E}{k_0 T})$$

- $f_B(E)$  称为电子的玻尔兹曼分布函数



# 玻尔兹曼分布函数

- 空穴的玻尔兹曼分布函数  $1 - f_B(E)$

$$1 - f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E_F - E}{k_0 T}}} \approx \exp\left(-\frac{E_F - E}{k_0 T}\right) = \exp\left(-\frac{E_F}{k_0 T}\right) \exp\left(\frac{E}{k_0 T}\right) = B \exp\left(\frac{E}{k_0 T}\right)$$



# 玻尔兹曼分布函数

- 导带中电子分布可用电子的玻尔兹曼分布函数描写（**绝大多数电子分布在导带底**）；价带中的空穴分布可用空穴的玻尔兹曼分布函数描写（**绝大多数空穴分布在价带顶**）
- 服从**费米统计律**的电子系统称为**简并性系统**；服从**玻尔兹曼统计律**的电子系统称为**非简并性系统**
- 费米统计律与玻尔兹曼统计律的主要差别：**前者受泡利不相容原理的限制**



# 练习

---

- 1、空穴占据费米能级的概率在各种温度下总是 $1/2$ 。  
( )
- 2、费米能级位置较高，说明有较多的能量较高的量子态上有电子。  
( )
- 3、能量为 $E$ 的一个量子态被一个空穴占据的概率为  
( )。
- 4、为什么电子分布在导带底，空穴分布在价带顶？



# 导带中的电子浓度 $n_0$

- 在导带上的  $E \sim (E + dE)$  间有  $f(E)g_c(E)dE$  个电子
- 从导带底到导带顶对  $f(E)g_c(E)$  进行积分，得到能带中的电子总数  $N$  (除以半导体体积，就得到了导带中的电子浓度

$$n_0$$

$$dN = f_B(E)g_c(E)dE$$



# 导带中的电子浓度 $n_0$

$$dN = \frac{V}{2\pi^2} \frac{(2m_n^*)^{3/2}}{\mathbf{h}^3} e^{-\frac{E-E_F}{k_0T}} (E-E_C)^{1/2} dE$$

$$dn = \frac{dN}{V} = \frac{(2m_n^*)^{3/2}}{2\pi^2 \mathbf{h}^3} e^{-\frac{E-E_F}{k_0T}} (E-E_C)^{1/2} dE$$

$$n_0 = \int_{E_C}^{E_C'} dn = \int_{E_C}^{E_C'} \frac{(2m_n^*)^{3/2}}{2\pi^2 \mathbf{h}^3} e^{-\frac{E-E_F}{k_0T}} (E-E_C)^{1/2} dE$$

$$n_0 = \frac{(2m_n^* k_0 T)^{3/2}}{2\pi^2 \mathbf{h}^3} e^{-\frac{E_C-E_F}{k_0T}} \int_0^{x'} x^{1/2} e^{-x} dx \quad x = (E-E_C)/(k_0T)$$



# 导带中的电子浓度 $n_0$

$$\int_0^{\infty} x^{1/2} e^{-x} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$$

导带宽度的典型值一般  $1 \sim 2eV$   $T \leq 5$  所以  
· 因此  $k_0T \leq 0.043K$ , 积分上限改为  $x \geq 1/0.043 \approx 23$  并不影响  
结果。由此可得导带中电子浓度为

$$n_0 = \frac{(2m_n^* k_0 T)^{3/2}}{4\pi^{3/2} h^3} e^{-\frac{E_c - E_F}{k_0 T}} \rightarrow n_0 = N_C e^{-\frac{E_c - E_F}{k_0 T}}$$



# 价带中的空穴浓度 $n_0$

同理得价带中的空穴浓度

$$p_0 = \frac{(2m_p^* k_0 T)^{3/2}}{4\pi^{3/2} \mathbf{h}^3} e^{\frac{E_V - E_F}{k_0 T}} \rightarrow p_0 = N_V e^{\frac{E_V - E_F}{k_0 T}}$$



# 载流子浓度乘积

同理得价带中的空穴浓度

$$n_0 p_0 = N_C N_V e^{-\frac{E_C - E_V}{k_0 T}} = N_C N_V e^{-\frac{E_g}{k_0 T}}$$

热平衡状态下的非简并半导体中，在一定的温度下，乘积  $(m_n^* m_p^*)^{3/2} (k_0 T)^3 e^{-\frac{E_g}{k_0 T}}$  是一定的，如果电子浓度增大，空穴浓度就会减小；反之亦然

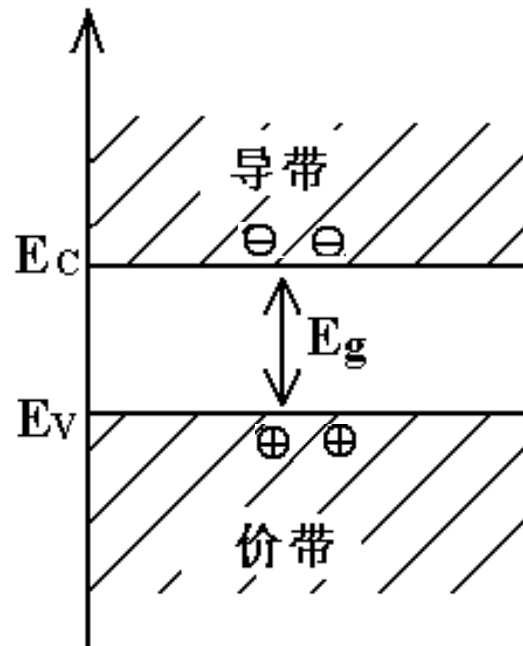
$$n_0 p_0$$



# 本征半导体载流子浓度

## 本征半导体

无任何杂质和缺陷的半导体



$$n_0 = p_0$$



# 本征费米能级

$$n_0 = p_0$$

$$N_C e^{-\frac{E_C - E_F}{k_0 T}} = N_V e^{-\frac{E_F - E_V}{k_0 T}}$$

$$E_i = E_F = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{k_0 T}{2} \ln \frac{N_V}{N_C}$$

$$E_i = E_F = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{3k_0 T}{4} \ln \frac{m_p^*}{m_n^*}$$



# 本征载流子浓度

---

$$n_0 = p_0$$

$$n_i = n_0 = p_0 = (N_C N_V)^{1/2} e^{-\frac{E_g}{2k_0 T}}$$

$$n_0 p_0 = n_i^2$$

( 既适用于本征半导体，也适用于非简并的杂质半导体 )



# 杂质半导体载流子浓度

一个能级能容纳自旋方向相反的两个电子  
杂质能级只能是下面两种情况之一  
被一个有任一自旋方向的电子占据  
不接受电子

$$f_D(E) = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} e^{\frac{E_D - E_F}{k_0 T}}} \quad f_V(E) = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} e^{\frac{E_V - E_F}{k_0 T}}}$$



# 杂质半导体载流子浓度

施主能级上的电子浓度（没电离的施主浓度）

$$n_D = N_D f_D(E) = \frac{N_D}{1 + \frac{1}{2} e^{\frac{E_D - E_F}{k_0 T}}}$$

受主能级上的电子浓度（没电离的受主浓度）

$$p_A = N_A f_A(E) = \frac{N_A}{1 + \frac{1}{2} e^{\frac{E_F - E_A}{k_0 T}}}$$



# 杂质半导体载流子浓度

电离施主浓度

$$n_D^+ = N_D - n_D = N_D [1 - f_D(E)] = \frac{N_D}{1 + 2e^{-\frac{E_D - E_F}{k_0 T}}}$$

电离受主浓度

$$p_A^- = N_A - n_A = N_A [1 - f_A(E)] = \frac{N_A}{1 + 2e^{-\frac{E_F - E_A}{k_0 T}}}$$



# n和p的其他变换公式

- 本征半导体时， $n = p = n_i$

$$\begin{array}{l} n_i = N_C e^{(E_i - E_C)/kT} \\ n_i = N_V e^{(E_C - E_i)/kT} \end{array} \quad \longrightarrow \quad \begin{array}{l} N_C = n_i e^{(E_C - E_i)/kT} \\ N_V = n_i e^{(E_i - E_V)/kT} \end{array}$$

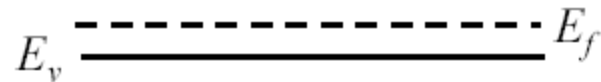
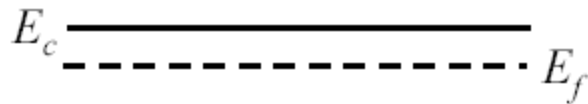
$$n = n_i e^{(E_F - E_i)/kT}$$

$$p = n_i e^{(E_i - E_F)/kT}$$



# 费米能级

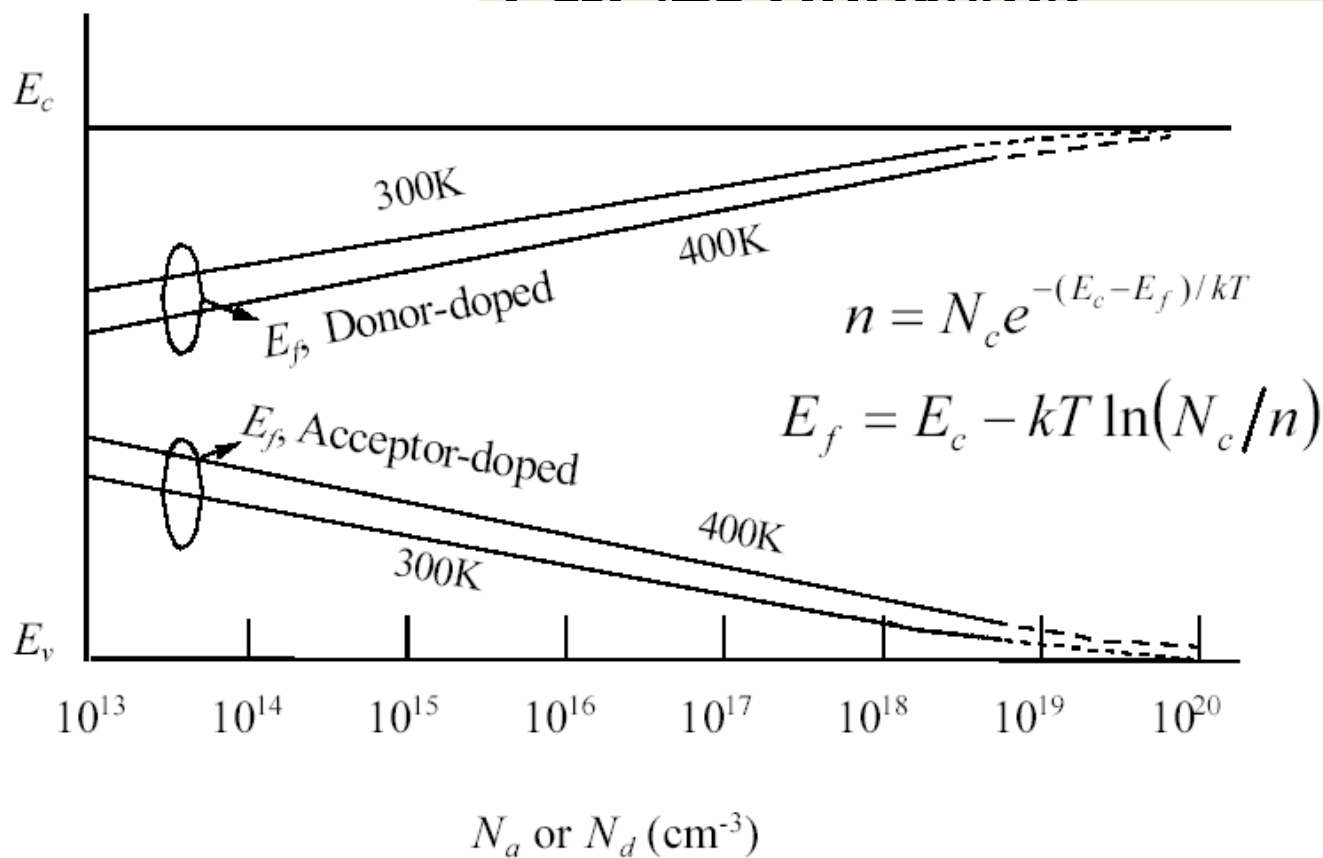
- 对掺杂半导体，
$$E_F - E_i = kT \ln\left(\frac{n}{n_i}\right)$$



# 费米能级

- 接近室温时

$$E_c - E_f = kT \ln(N_c/n_i)$$

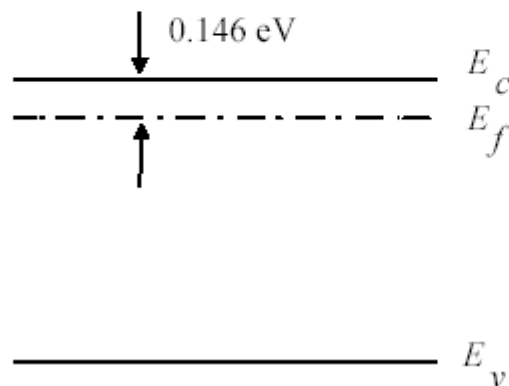


# 练习

Where is  $E_f$  for  $n = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ?

**Solution:** 
$$n = N_c e^{-(E_c - E_f)/kT}$$

$$E_c - E_f = kT \ln(N_c/n) = 0.026 \ln(2.8 \times 10^{19} / 10^{17}) = 0.146 \text{ eV}$$



# 半导体物理学

---

- ✓ 半导体中的电子状态
- ✓ 半导体中杂质和缺陷能级
- ✓ 半导体中载流子的统计分布
- ✓ 半导体的导电性
- ✓ 非平衡载流子
- ✓ pn结
- ✓ 金属和半导体的接触
- ✓ 半导体表面与MIS结构



# 载流子运输

---

- 半导体中载流子的运输有三种形式：
  - 漂移
  - 扩散
  - 产生和复合



# 欧姆定律

- 金属导体外加电压  $V$ ，电流强度为

$$I = \frac{V}{R}$$

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad \sigma = \frac{1}{\rho}$$

- 电流密度为

$$J = \frac{\Delta I}{\Delta s}$$



# 欧姆定律

- 均匀导体外加电压  $V$ ，电场强度为

$$|E| = \frac{V}{l}$$

- 电流密度为

$$J = \frac{I}{S}$$

$$J = \sigma |E|$$

- 欧姆定律的微分形式



# 漂移电流

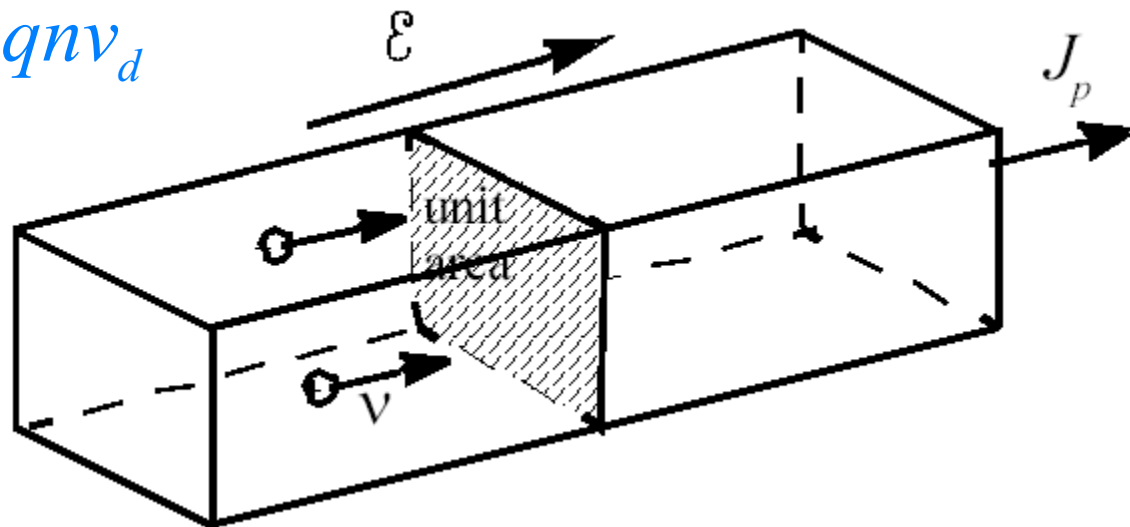
## ■ 漂移运动

- 当外加电压时，导体内部的自由电子受到电场力的作用而沿电场的反方向作定向运动（定向运动的速度称为漂移速度）

电流密度

$$I = -qnv_d A$$

$$J = -qnv_d$$



# 漂移速度

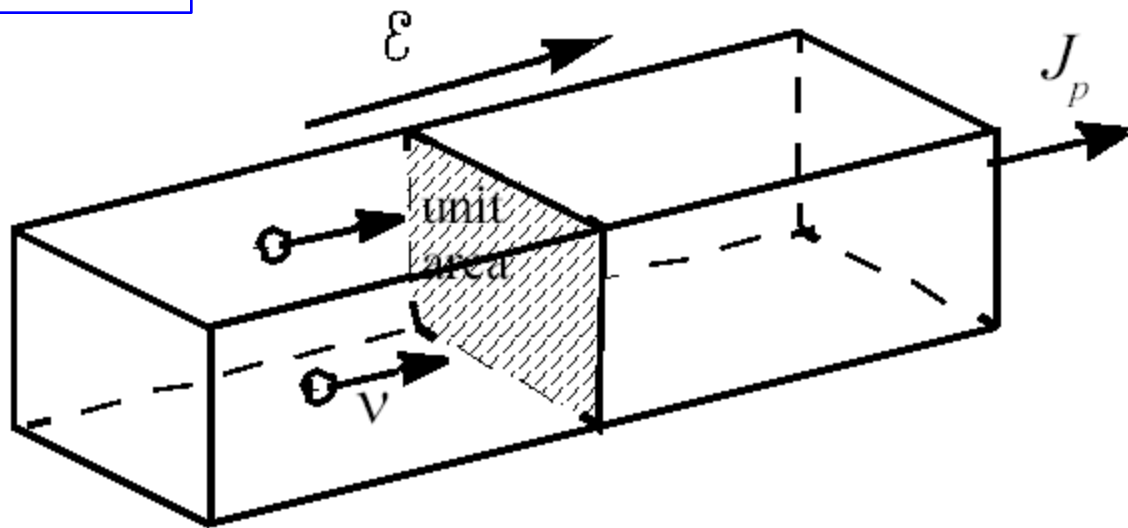
- 漂移速度  $v_d = \mu |E|$

$$J_{p,drift} = qp v = qp \mu_p \mathcal{E}$$

$$J_{n,drift} = -qn v = qn \mu_n \mathcal{E}$$

$$(J = \sigma |E|)$$

$$\sigma = nq\mu$$



# 半导体的电导率和迁移率

- 半导体中的导电作用为电子导电和空穴导电的总和

$$J = J_n + J_p = (nq\mu_n + pq\mu_p)|E|$$

- 当电场强度不大时，满足  $J = \sigma |E|$ ，故可得半导体中电导率为

$$\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p$$



# 半导体的电导率和迁移率

$$\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p$$

- N型半导体  $n \gg p$

$$\sigma = nq\mu_n$$

- P型半导体  $p \gg n$

$$\sigma = pq\mu_p$$

- 本征半导体  $n = p = n_i$

$$\sigma = n_i q (\mu_n + \mu_p)$$



# Question

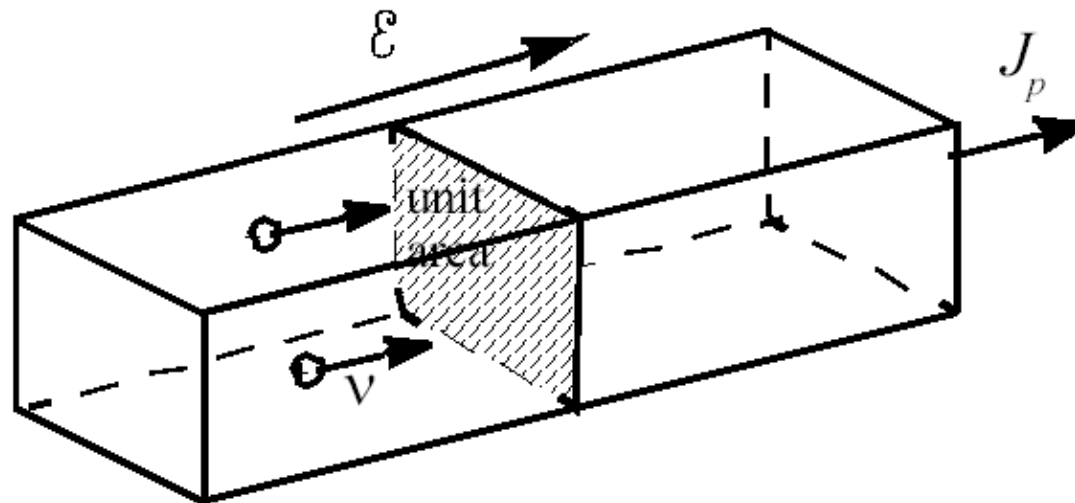
- 导体在外加电场作用下，导体内载流子的漂移电流有两种表达形式

$$J = \sigma |E|$$

恒定

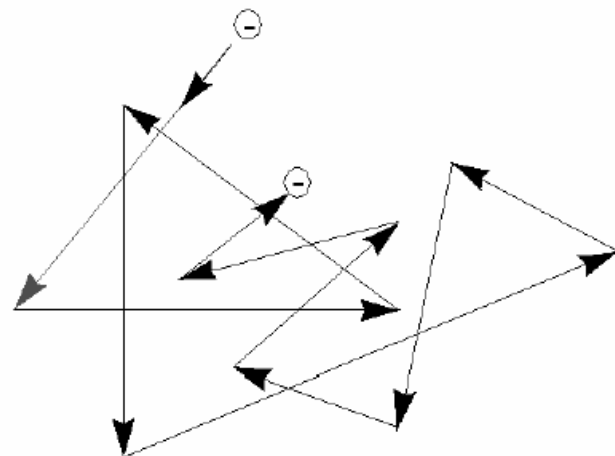
$$J = -qnv_d$$

不断增大



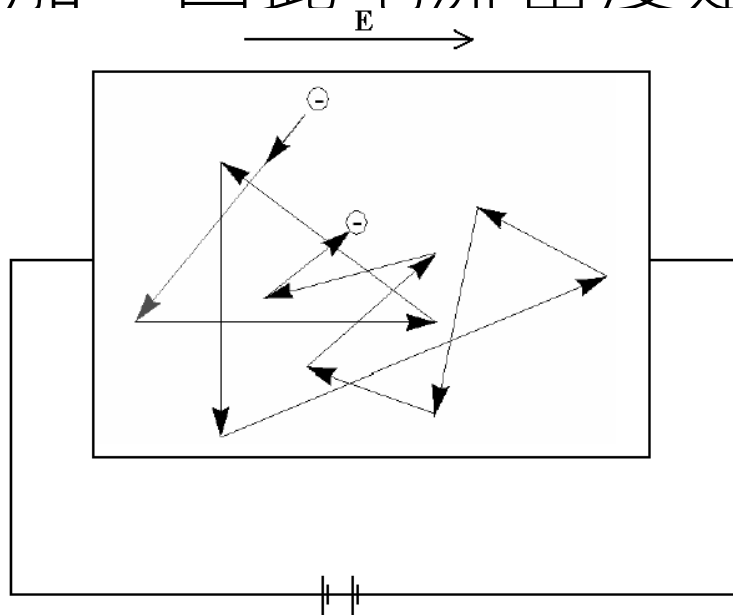
# 热运动

- 在无电场作用下，载流子永无停息地做着无规则的、杂乱无章的运动，称为热运动
- 晶体中的碰撞和散射引起
- 净速度为零，并且净电流为零
- 平均自由时间为  $\tau_m \sim 0.1ps$



# 热运动

- 当有外电场作用时，载流子既受电场力的作用，同时不断发生散射
- 载流子在外电场的作用下为热运动和漂移运动的叠加，因此电流密度是恒定的



# 散射的原因

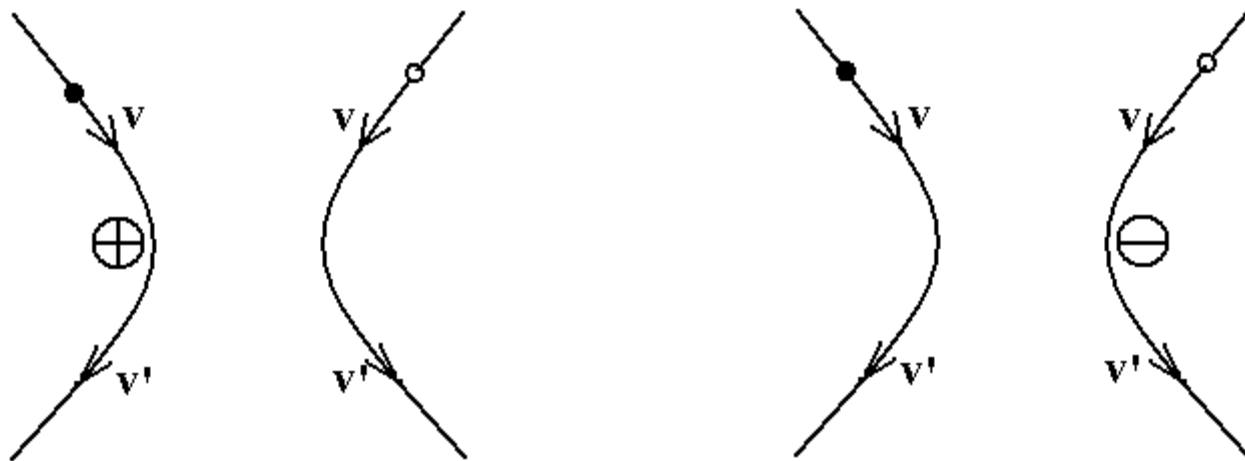
---

- 载流子在半导体内发生散射的**根本原因**是**周期性势场遭到破坏**
- **附加势场  $\Delta V$** 使得能带中的电子在不同  $k$  状态间跃迁，并使得载流子的运动速度及方向均发生改变，发生散射行为。



# 电离杂质的散射

- 杂质电离的带电离子破坏了杂质附近的周期性势场，它就是使载流子散射的附加势场



电离施主散射

电离受主散射

- 散射概率  $P$  代表单位时间内一个载流子受到散射的次数

$$P_i \propto N_i T^{-3/2}$$



# 晶格振动的散射

## ■ 格波

- 形成原子振动的基本波动
- 格波波矢  $q = 1/\lambda$
- 对应于某一 $q$ 值的格波数目不定，一个晶体中格波的总数取决于原胞中所含的原子数
- Si、Ge半导体的原胞含有两个原子，对应于每一个 $q$ 就有六个不同的格波，频率低的三个格波称为声学波，频率高的三个为光学波
- 长声学波（声波）振动在散射前后电子能量基本不变，称为弹性散射；光学波振动在散射前后电子能量有较大的改变，称为非弹性散射



# 晶格振动的散射

## ■ 声学波散射

- 在能带具有单一极值的半导体中起主要散射作用的是长波
- 在长声学波中，只有纵波在散射中起主要作用，它会引起能带的波形变化
- 声学波散射概率  $P_s \propto T^{3/2}$

## ■ 光学波散射

- 在低温时不起作用，随着温度的升高，光学波的散射概率迅速增大



# 练习

---

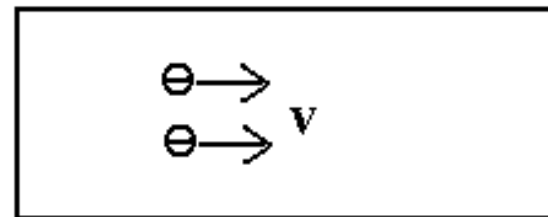
- 1、载流子的热运动在半导体内会构成电流。( )
- 2、在半导体中，载流子的三种输运方式为( )、( )和( )。
- 3、载流子在外电场的作用下是( )和( )两种运动的叠加，因此电流密度大小( )。
- 4、什么是散射



# $\tau$ 与 $P$ 的关系

- $N$ 个电子以速度  $v$  沿某方向运动，在  $t$  时刻未遭到散射的电子数为  $N(t)$ ，则在  $t \sim (t + \Delta t)$  时间内被散射的电子数为

$$N(t)P\Delta t$$



因此 
$$N(t) - N(t + \Delta t) = N(t)P\Delta t$$



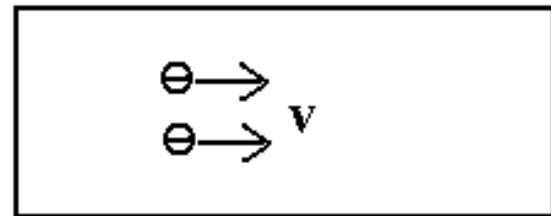
# $\tau$ 与 $P$ 的关系

$$N(t) - N(t + \Delta t) = N(t)P\Delta t$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{N(t + \Delta t) - N(t)}{\Delta t} = -PN(t)$$

上式的解为

$$N(t) = N_0 e^{-Pt}$$



则  $t \sim (t + dt)$  被散射的电子数为

为 
$$N_0 e^{-Pt} P dt$$



# $\tau$ 与 $P$ 的关系

- 在  $t \sim (t + dt)$  时间内被散射的所有电子的自由时间为  $t$ ，这些电子自由时间的总和为  $tN_0e^{-Pt}Pdt$ ，则  $N_0$  个电子的平均自由时间可表示为

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} tN_0e^{-Pt}Pdt}{N_0} = \frac{1}{P}$$



# $\sigma$ 、 $\mu$ 与 $\tau$ 的关系

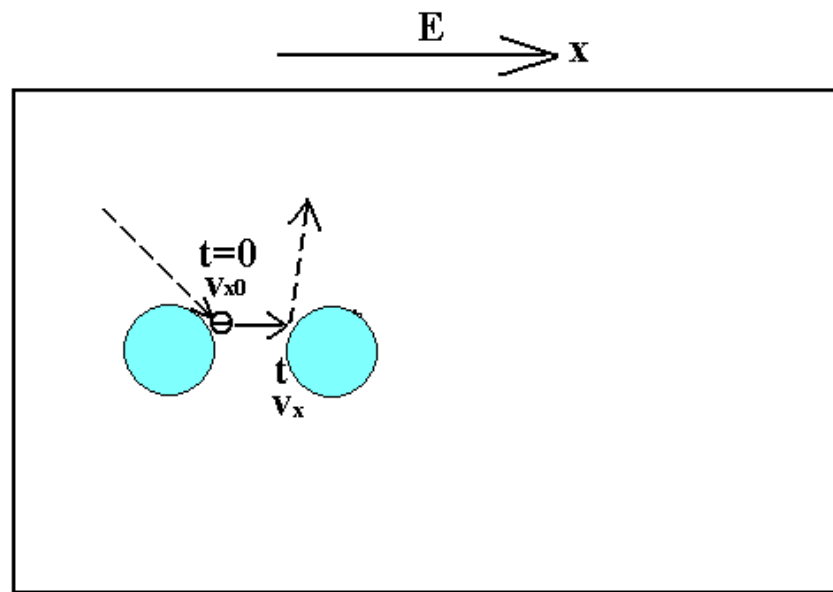
$$v_x = v_{x0} - \frac{q\varepsilon}{m_n^*} t$$

平均漂移速度为

$$\bar{v}_x = \bar{v}_{x0} - \frac{\int_0^{\infty} \left( \frac{q\varepsilon}{m_n^*} t \right) \cdot (N_0 e^{-Pt} P dt)}{N_0}$$

$$= -\frac{q\varepsilon}{m_n^*} \tau_n \quad (|\bar{v}_x| = \mu\varepsilon)$$

$$\longrightarrow \mu_n = \frac{q\tau_n}{m_n^*} \quad \mu_p = \frac{q\tau_p}{m_p^*}$$



# $\sigma$ 、 $\mu$ 与 $\tau$ 的关系

N型半导体

$$n \gg p$$

$$\sigma_n = nq\mu_n = \frac{nq^2\tau_n}{m_n^*}$$

P型半导体

$$p \gg n$$

$$\sigma_p = pq\mu_p = \frac{pq^2\tau_p}{m_p^*}$$

本征半导体

$$n = p = n_i$$

$$\sigma = n_i q^2 \left( \frac{\tau_n}{m_n^*} + \frac{\tau_p}{m_p^*} \right)$$



# $\tau$ 与 $N_i$ 及 $T$ 的关系

- 电离杂质散射  $\tau_i \propto N_i^{-1} T^{3/2}$

- 声学波散射  $\tau_s \propto T^{-3/2}$

- 光学波散射  $\tau_o \propto e^{\frac{\hbar\omega}{k_0T}} - 1$

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_i} + \frac{1}{\tau_s} + \frac{1}{\tau_o}$$



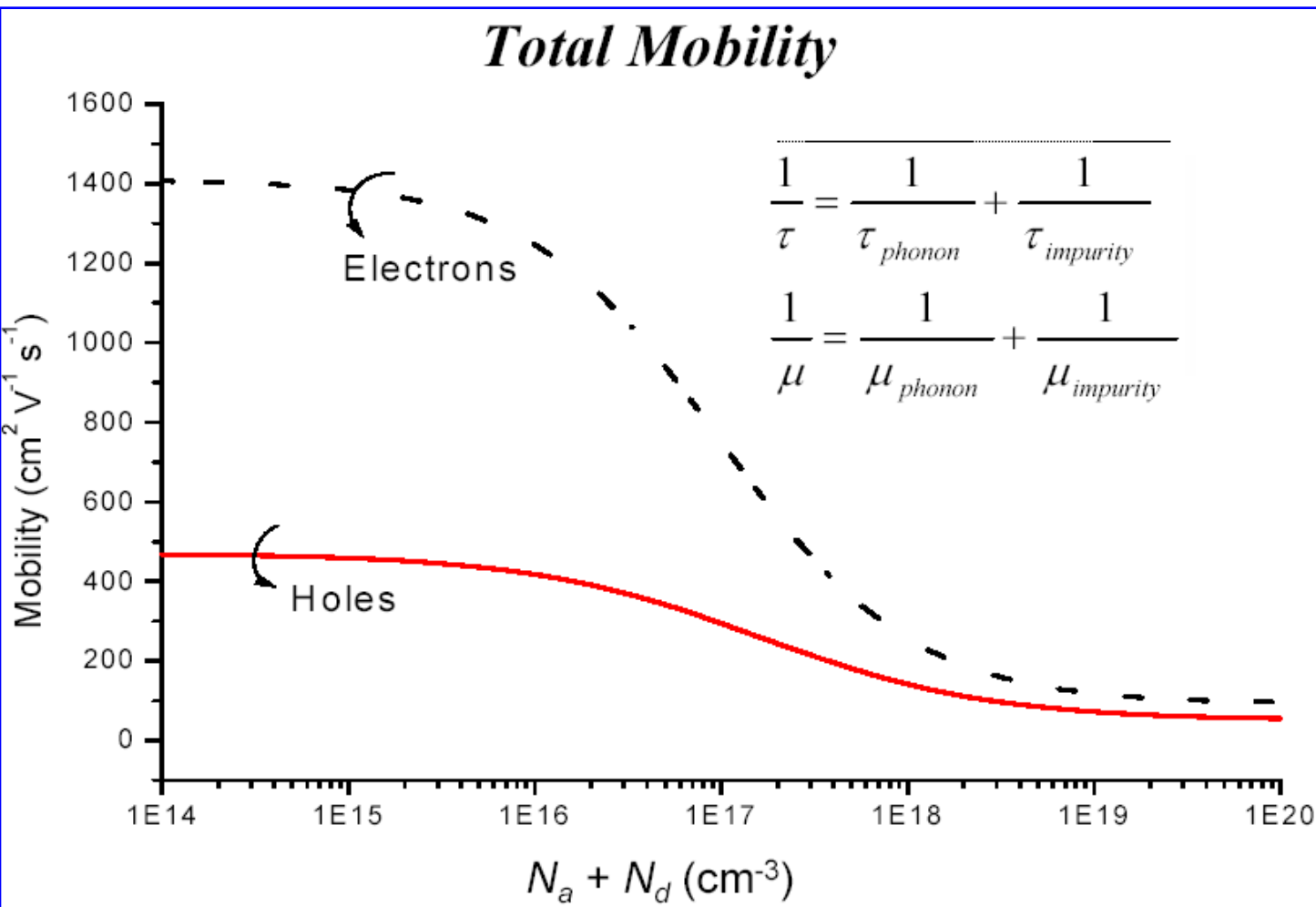
# $\mu$ 与 $N_i$ 及 $T$ 的关系

- 电离杂质散射  $\mu_i \propto N_i^{-1} T^{3/2}$
- 声学波散射  $\mu_s \propto T^{-3/2}$
- 光学波散射  $\mu_o \propto e^{\frac{\hbar\omega}{k_0 T}} - 1$

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_i} + \frac{1}{\mu_s} + \frac{1}{\mu_o}$$



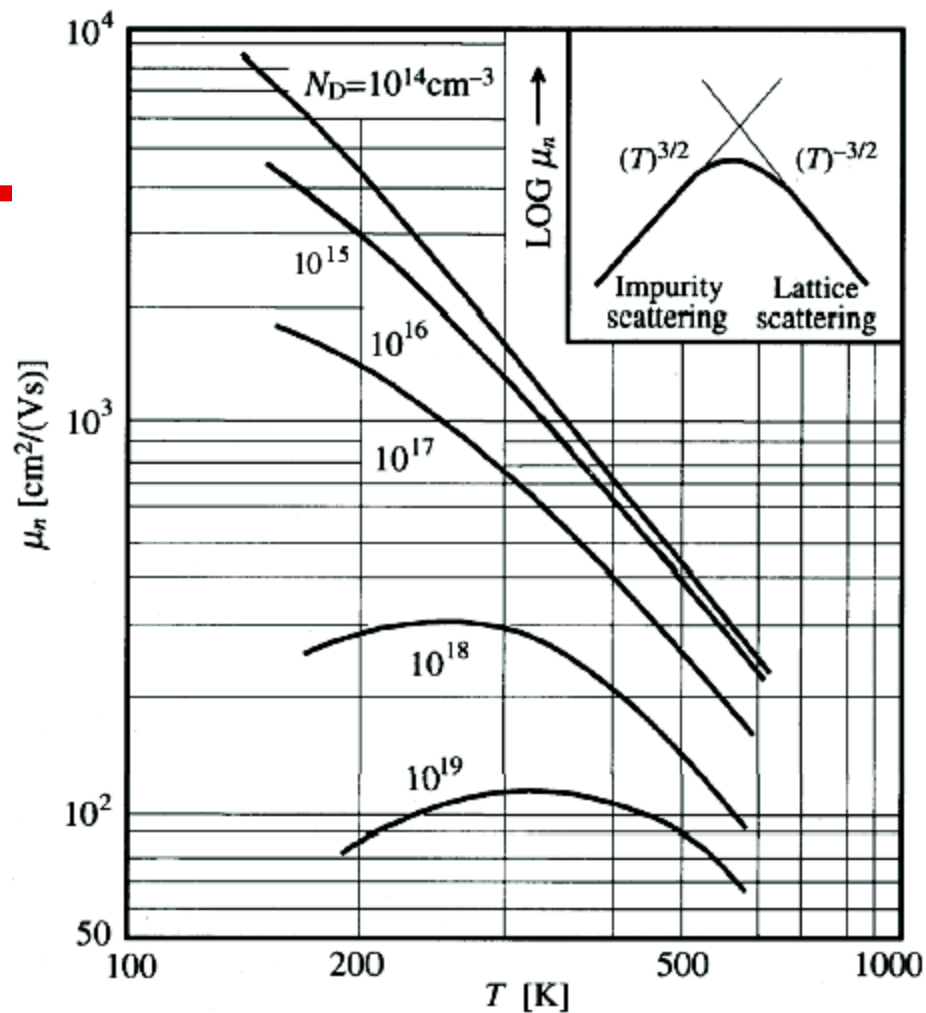
# 影响迁移率的因素



$$\mu = \frac{q\tau}{m_*}$$

- 与散射有关
  - 晶格散射
  - 电离杂质散射





	Germanium	Silicon	Gallium Arsenide
Electron mobility	$\propto T^{-1.7}$	$\propto T^{-2.4}$	$\propto T^{-1.0}$
Hole mobility	$\propto T^{-2.3}$	$\propto T^{-2.2}$	$\propto T^{-2.1}$



# 电阻率 $\rho$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{nq\mu_n + pq\mu_p}$$

- N型半导体

$$\rho = \frac{1}{nq\mu_n}$$

- P型半导体

$$\rho = \frac{1}{pq\mu_p}$$

- 本征半导体

$$\rho = \frac{1}{n_i q (\mu_n + \mu_p)}$$



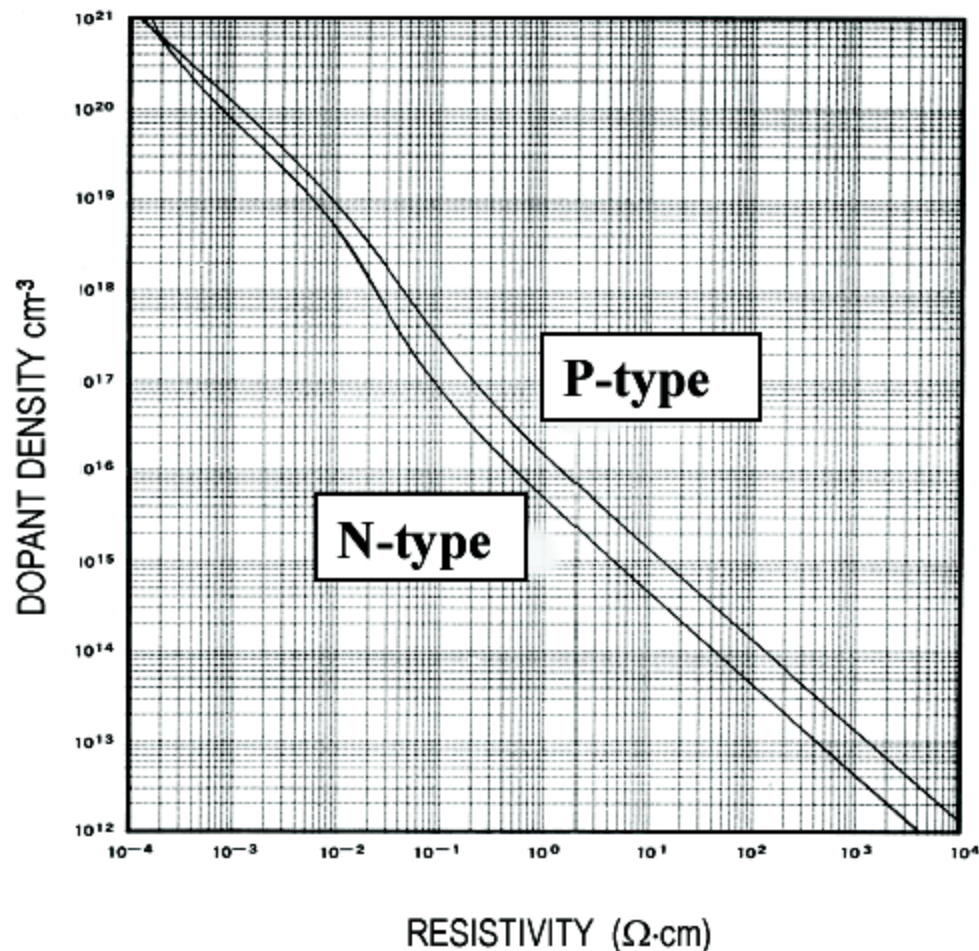
# 电阻率与掺杂的关系

- N型半导体

$$\rho = \frac{1}{q\mu_n N_D}$$

- P型半导体

$$\rho = \frac{1}{q\mu_p N_A}$$



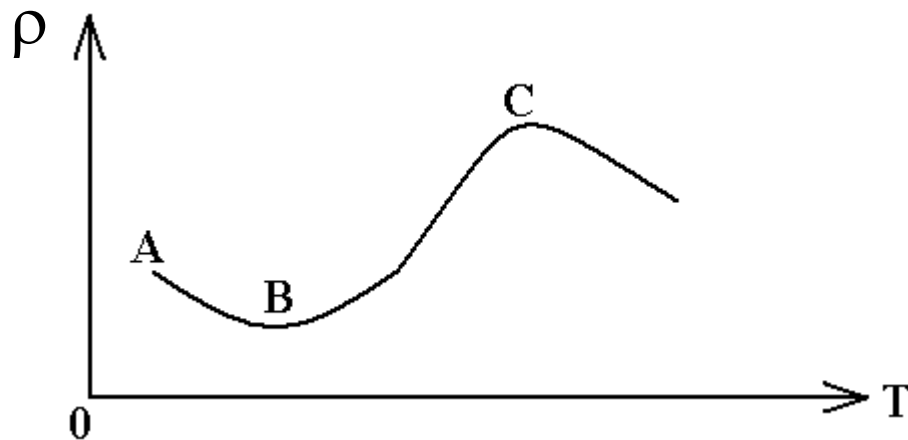
RESISTIVITY (Ω·cm)

$$\rho = 1/\sigma$$



# 电阻率与温度的关系

- 本征半导体
  - 本征半导体电阻率随温度增加而单调地下降  
(区别于金属)
- 杂质半导体



# 速度饱和

$$\bar{v}_d = \mu E$$

- 在低电场作用下，载流子在半导体中的平均漂移速度 $v$ 与外加电场强度 $E$ 呈线性关系；随着外加电场的不断增大，两者呈非线性关系，并最终平均漂移速度达到一饱和值，不随 $E$ 变化。

➤ n-Ge:  $E < 7 \times 10^2 V/cm$  ( $v_d - E$ 呈线性)

$7 \times 10^2 V/cm < E < 5 \times 10^3 V/cm$  ( $v_d$ 增缓慢  $\mu$ 降低)

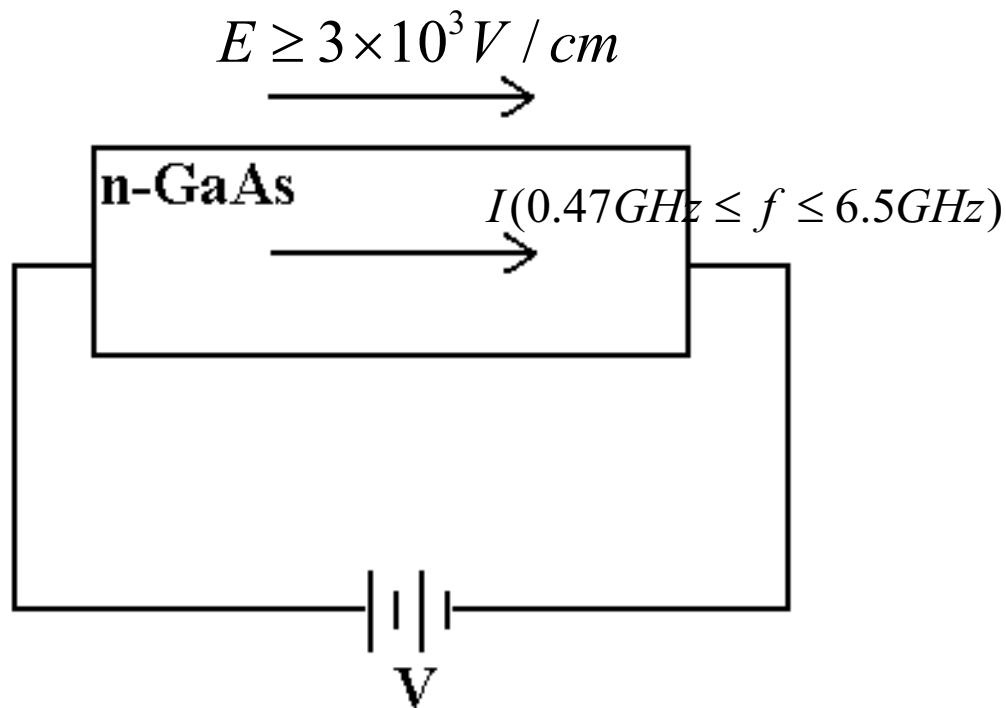
$E > 5 \times 10^3 V/cm$  ( $v_d$ 饱和)



# 耿氏效应

## ■ 耿氏效应

- n-GaAs外加电场强度超过  $3 \times 10^3 V/cm$  时，半导体内的电流以  $0.47 \sim 6.5 GHz$  的频率发生振荡



# 练习

## 一、判断

- 1、在半导体中，原子最外层电子的共有化运动最显著。 ( )
- 2、不同的k值可标志自由电子的不同状态，但它不可标志晶体中电子的共有化状态。 ( )
- 3、空位表现为施主作用，间隙原子表现为受主作用。 ( )
- 4、半导体中两种载流子数目相同的为高纯半导体。 ( )



# 练习

## 二、填空

- 1、半导体材料结构可分为 ( )、( )、( )，应用最为广泛的是 ( )。
- 2、金刚石型单胞的基础结构为 ( )，金刚石型为 ( ) 对称性，闪锌矿型结构为 ( ) 对称性，纤锌矿型为 ( ) 对称性。
- 3、导带和价带间间隙称为 ( )，**Si**的禁带宽度为 ( )，**Ge**为 ( )，**GaAs**为 ( )。
- 4、固体按其导电性可分为 ( )、( )、( )。



# 练习

- 5、杂质总共可分为两大类（ ）和（ ），施主杂质为（ ），受主杂质为（ ）。
- 6、施主杂质向（ ）带提供（ ）成为（ ）电中心；受主杂质向（ ）带提供（ ）成为（ ）电中心。
- 7、热平衡时，能级E处的空穴浓度为（ ）。
- 8、在半导体中，载流子的三种运输方式为（ ）、（ ）和（ ）。



# 练习

## 三、简答

- 1、单胞的概念及两大注意点？
- 2、三种立方单胞的名称？
- 3、引入有效质量的原因及意义？
- 4、 $1-f(E)$ 的物理含义？
- 5、费米分布函数与玻耳兹曼分布函数的最大区别？
- 6、在外加电场 $E$ 作用下，为什么半导体内载流子的漂移电流恒定，试从载流子的运动角度说明。
- 7、在室温下，热平衡时，Si半导体中  $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ， $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ，求半导体中的电子和空穴浓度。



# 半导体物理学

---

- ✓ 半导体中的电子状态
- ✓ 半导体中杂质和缺陷能级
- ✓ 半导体中载流子的统计分布
- ✓ 半导体的导电性
- ✓ 非平衡载流子
- ✓ pn结
- ✓ 金属和半导体的接触
- ✓ 半导体表面与MIS结构



# 平衡载流子

- 在某以热平衡状态下的载流子称为平衡载流子
  - 非简并半导体处于热平衡状态的判据式

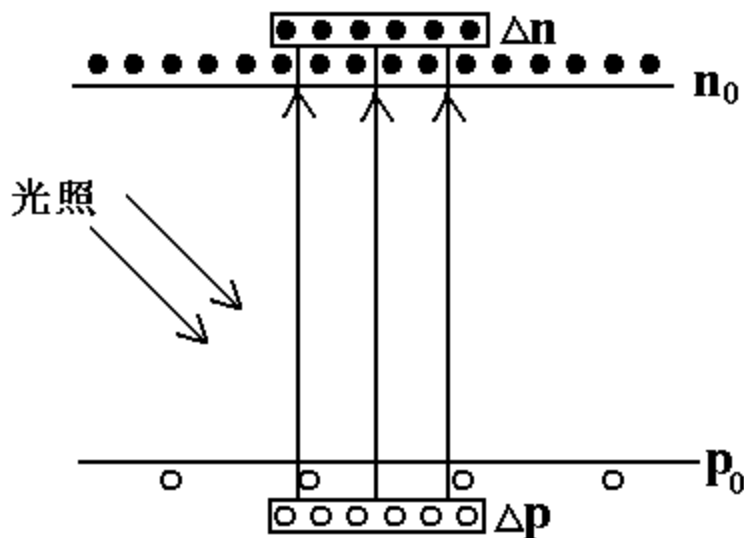
$$n_0 p_0 = n_i^2$$

( 只受温度T影响 )



# 过剩载流子

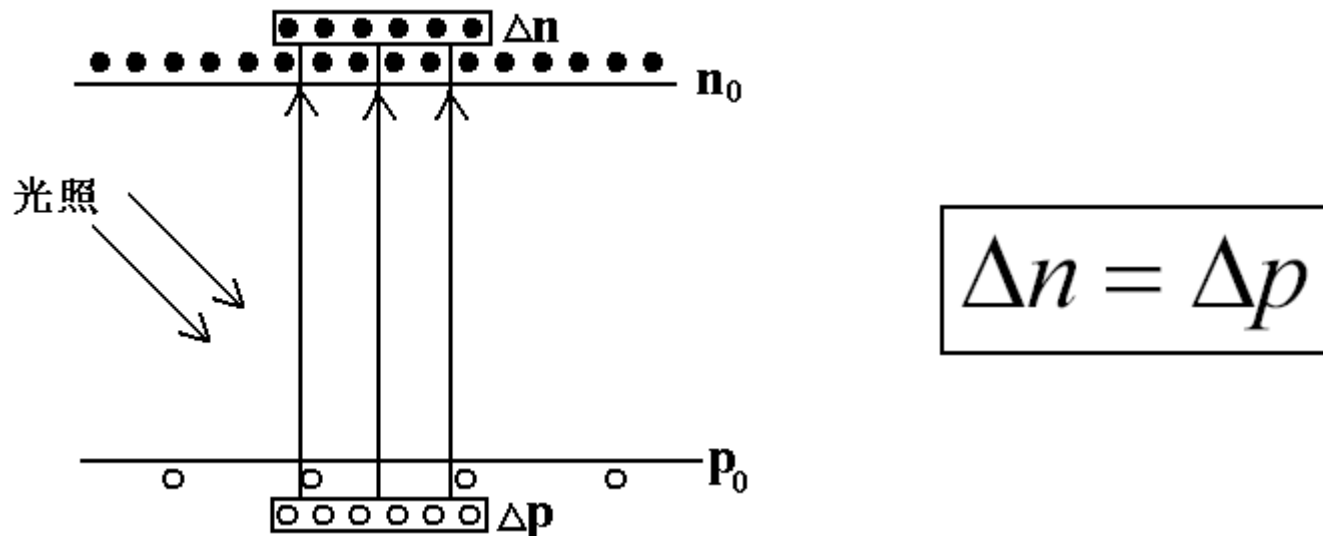
由于受外界因素如光、电的作用，半导体中载流子的分布偏离了平衡态分布，称这些偏离平衡分布的载流子为过剩载流子，也称为非平衡载流子



非平衡载流子的光注入



# 过剩载流子



载流子的产生和复合：电子和空穴增加和消失的过程  
平衡载流子满足费米 - 狄拉克统计分布  
过剩载流子不满足费米 - 狄拉克统计分布

且公式  $np = n_i^2$  不成立



# 过剩载流子和电中性

平衡时

过剩载流子

$$\begin{aligned} n &\equiv n_0 + \Delta n \\ p &\equiv p_0 + \Delta p \end{aligned}$$

电中性：

$$\Delta n = \Delta p$$



# 小注入条件

---

**小注入条件**：注入的非平衡载流子浓度比平衡时的多数载流子浓度小的多

**N型材料**

$$\mathbf{V} p \ll n_0, n ; n_0$$

**P型材料**

$$\mathbf{V} n \ll p_0, p ; p_0$$



# 小注入条件

例：室温下一受到微扰的掺杂硅， $N_D = 10^{14} / \text{cm}^3$ ，

$$\mathbf{V}n = \mathbf{V}p = 10^9 / \text{cm}^3$$

判断其是否满足小注入条件？

解： $n_0$ ； $N_D = 10^{14} / \text{cm}^3$ ， $p_0 = n_i^2 / N_D = 10^6 / \text{cm}^3$

$$n = n_0 + \mathbf{V}n$$

$n_0, \mathbf{V}p = 10^9 / \text{cm}^3 \ll n_0 = 10^{14} / \text{cm}^3$

满足小注入条件！ ( $\mathbf{V}p \gg p_0$ )

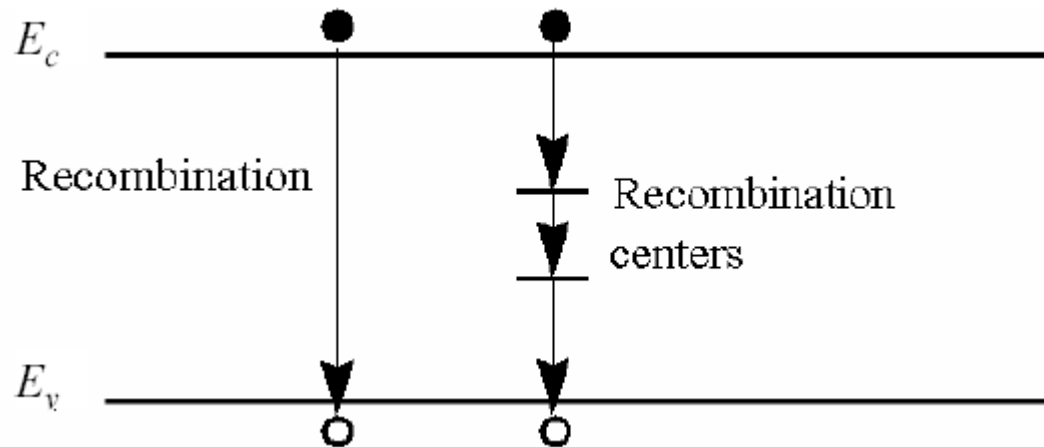
注：(1) 即使在小注入的情况下，非平衡少数载流子浓度还是可以比平衡少数载流子浓度大的多

(2) 非平衡少数载流子起重要作用，非平衡载流子都指非平衡少数载流子



# 非平衡载流子寿命

- 假定光照产生  $\Delta n$  和  $\Delta p$ ，如果光突然关闭， $\Delta n$  和  $\Delta p$  将随时间逐渐衰减直至0，衰减的时间常数称为寿命  $\tau$ ，也常称为少数载流子寿命
- $1/\tau$   $\longrightarrow$  单位时间内非平衡载流子的复合概率
- $\Delta p/\tau$   $\longrightarrow$  非平衡载流子的复合率



# 复合

n型材料中的空穴

$$\frac{d\Delta p}{dt} = -\frac{\Delta p}{\tau_p} \longrightarrow \Delta p(t) = (\Delta p)_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

当  $t = \tau$  时， $\Delta p(\tau) = (\Delta p)_0 / e$ ，故寿命标志着非平衡载流子浓度减小到原值的1/e所经历的时间；寿命越短，衰减越快



# 费米能级

热平衡状态下的非简并半导体中有统一的费米能级

$$n_0 = N_C e^{-\frac{E_C - E_F}{k_0 T}}$$

$$p_0 = N_V e^{-\frac{E_F - E_V}{k_0 T}}$$

$$n_0 p_0 = n_i^2$$

统一的费米能级是热平衡状态的标志



# 准费米能级

当半导体的热平衡状态被打破时，新的热平衡状态可通过**热跃迁**实现，但导带和价带间的热跃迁较稀少

导带和价带各自处于平衡态，因此存在导带费米能级和价带费米能级，称其为“**准费米能级**”

$$n = N_C e^{-\frac{E_C - E_{Fn}}{k_0 T}}$$

$$p = N_V e^{-\frac{E_{Fp} - E_V}{k_0 T}}$$



# 准费米能级

$$n = N_C e^{-\frac{E_C - E_{Fn}}{k_0 T}} = n_0 e^{-\frac{E_{Fn} - E_F}{k_0 T}} = n_i e^{-\frac{E_{Fn} - E_i}{k_0 T}}$$
$$p = N_V e^{-\frac{E_{Fp} - E_V}{k_0 T}} = p_0 e^{-\frac{E_F - E_{Fp}}{k_0 T}} = n_i e^{-\frac{E_i - E_{Fp}}{k_0 T}}$$

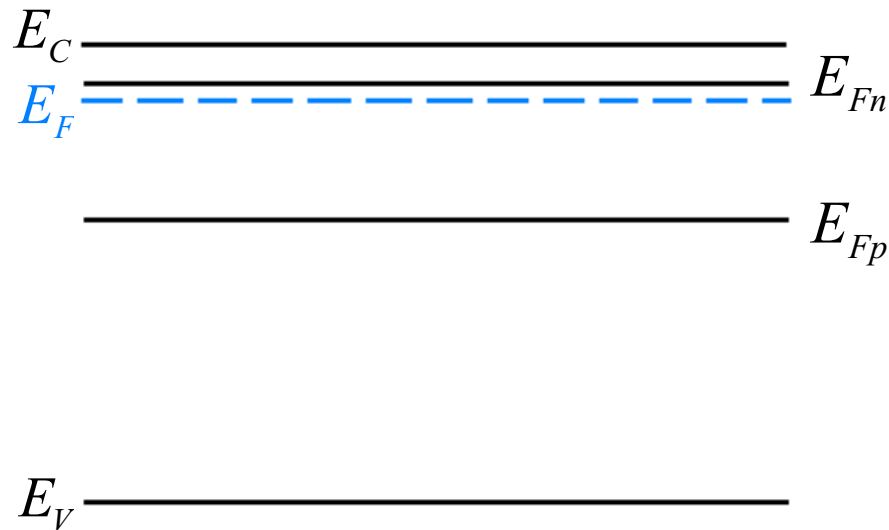
注：非平衡载流子越多，准费米能级偏离 $E_F$ 就越远。

在非平衡态时，一般情况下，少数载流子的准费米能级偏离费米能级较大



# 准费米能级

$$np = n_0 p_0 e^{\frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{k_0 T}} = n_i^2 e^{\frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{k_0 T}}$$



**注：两种载流子的准费米能级偏离的情况反映了半导体偏离热平衡状态的程度**



# 产生和复合

## ■ 产生

- 电子和空穴（载流子）被创建的过程
- **产生率（G）**：单位时间单位体积内所产生的电子—空穴对数

## ■ 复合

- 电子和空穴（载流子）消失的过程
- **复合率（R）**：单位时间单位体积内复合掉的电子—空穴对数

产生和复合会改变载流子的浓度，从而间接地影响电流



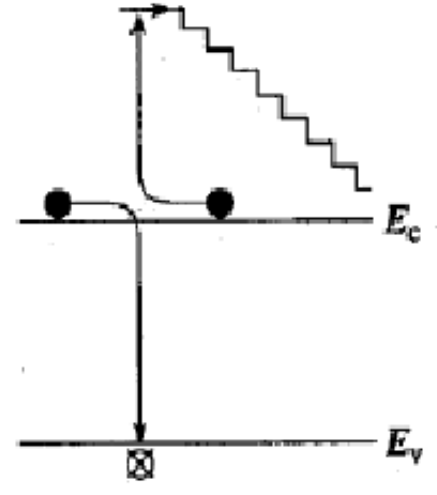
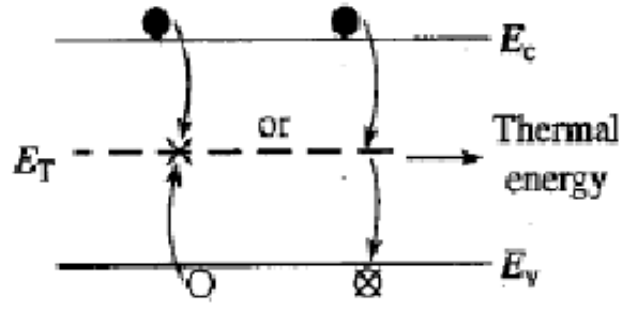
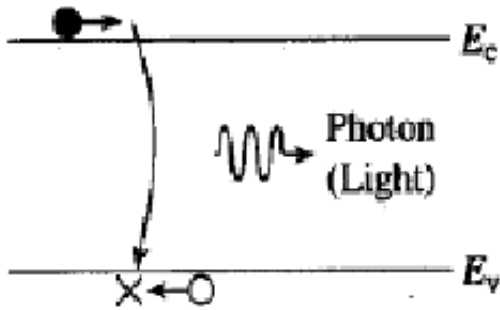
# 复合

直接复合

间接复合

Auger复合

$$R = rnp$$



(禁带宽度小的半导体材料)

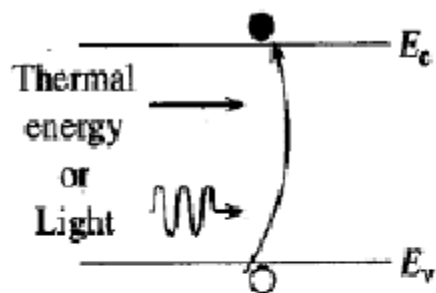
(具有深能级杂质的半导体材料)

(窄禁带半导体及高温情况下)

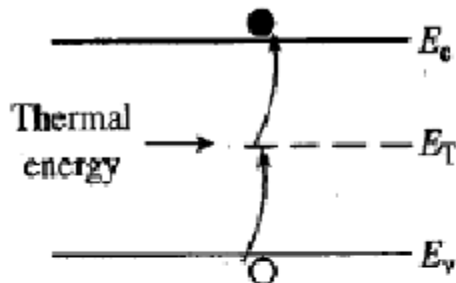


# 产生

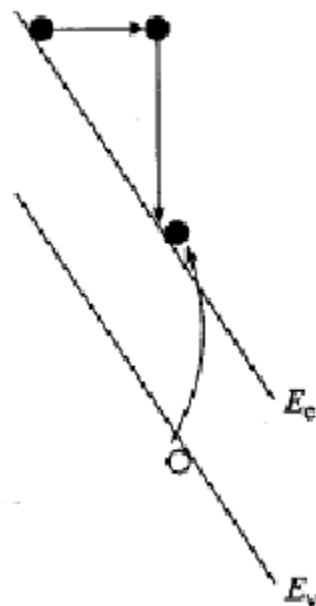
直接产生



R-G中心产生



载流子产生  
与碰撞电离



# 练习

- 1、一般情况下，满足小注入条件的非平衡载流子浓度比平衡载流子浓度小。（ ）
- 2、寿命标志着非平衡载流子浓度减小到原值的（ ）所经历的时间。
- 3、简述小注入条件
- 4、处于非平衡态的p型半导体中， $E_{Fn}$  和  $E_{Fp}$  哪个距  $E_F$  近？为什么？



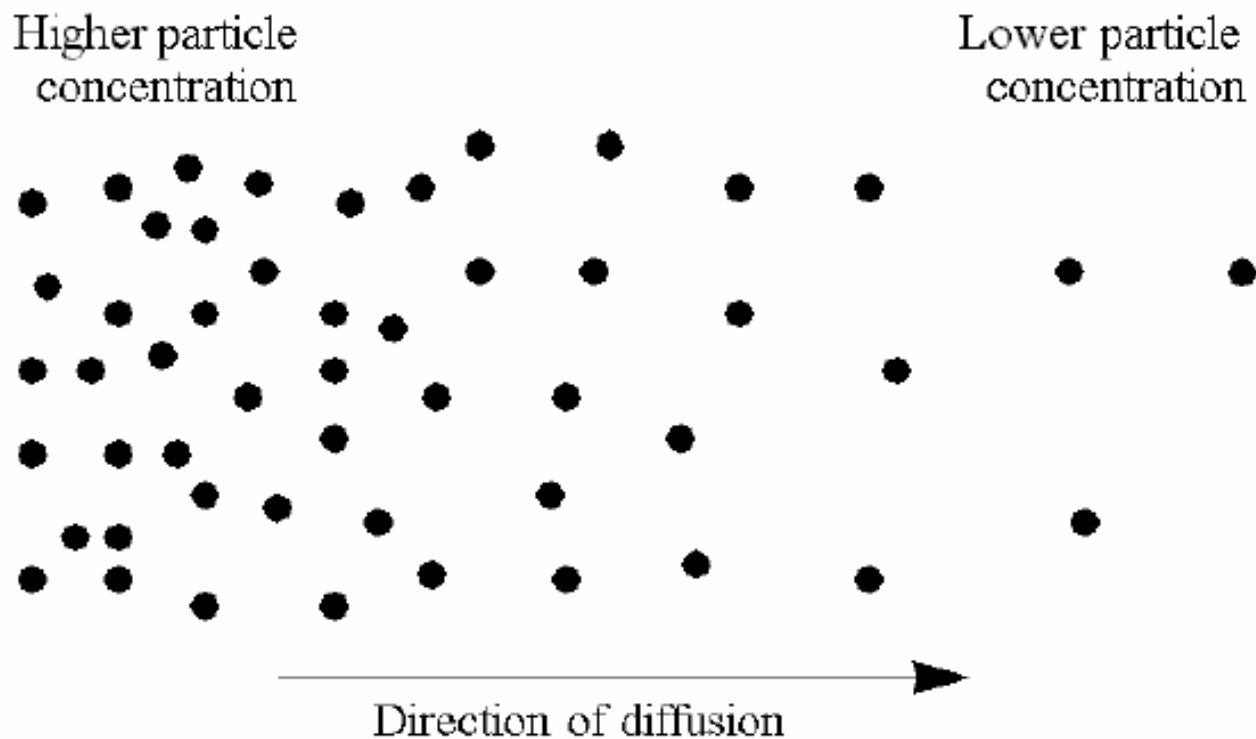
# 陷阱效应

- 当半导体处于非平衡态时，杂质能级具有积累非平衡载流子的作用，即具有一定的**陷阱效应**
  - 所有杂质能级都具有陷阱效应
  - 具有显著陷阱效应的杂质能级称为**陷阱**；相应的杂质和缺陷称为**陷阱中心**
  - 杂质能级与平衡时的费米能级重合时，最有利于陷阱作用



# 扩散

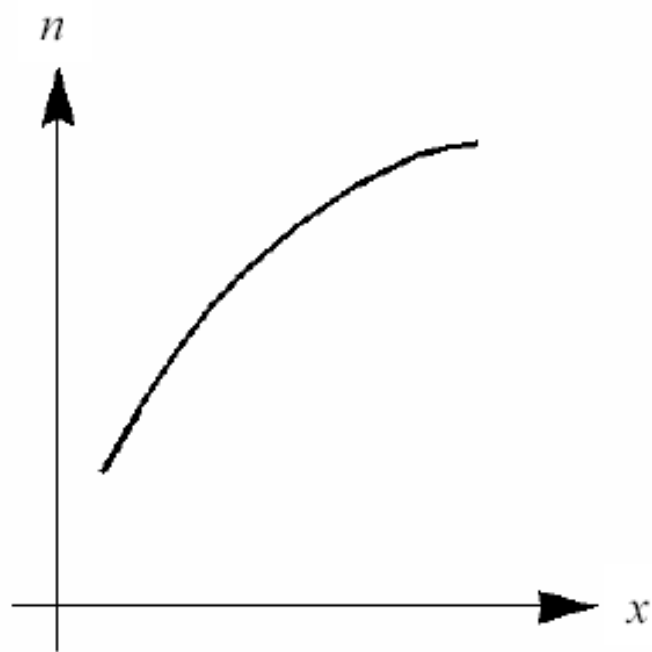
- 粒子从高浓度向低浓度区域运动



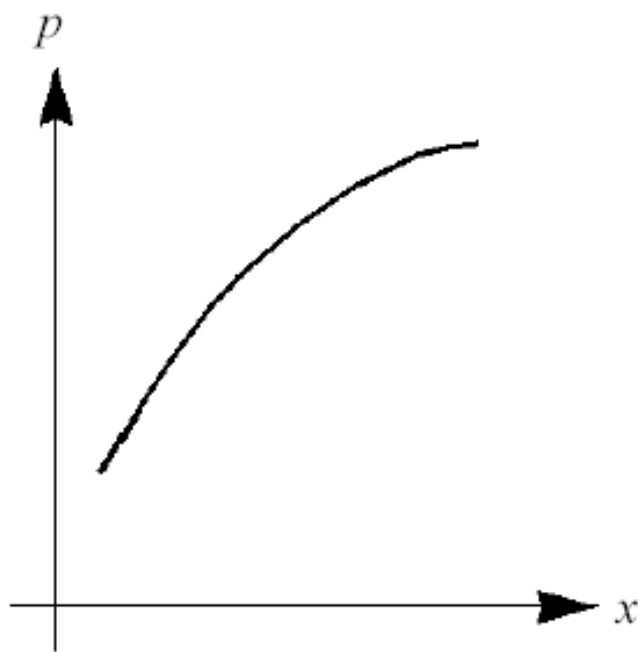
# 扩散电流

$$J_{n,diffusion} = qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_{p,diffusion} = -qD_p \frac{dp}{dx}$$



← electron flow  
current flow →



← hole flow  
← current flow



# 半导体内总电流

- 扩散+漂移

$$J_{TOTAL} = J_n + J_p$$

$$J_n = J_{n,drift} + J_{n,diffusion} = qn\mu_n\mathcal{E} + qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_p = J_{p,drift} + J_{p,diffusion} = qp\mu_p\mathcal{E} - qD_p \frac{dp}{dx}$$



# 扩散系数和迁移率的关系

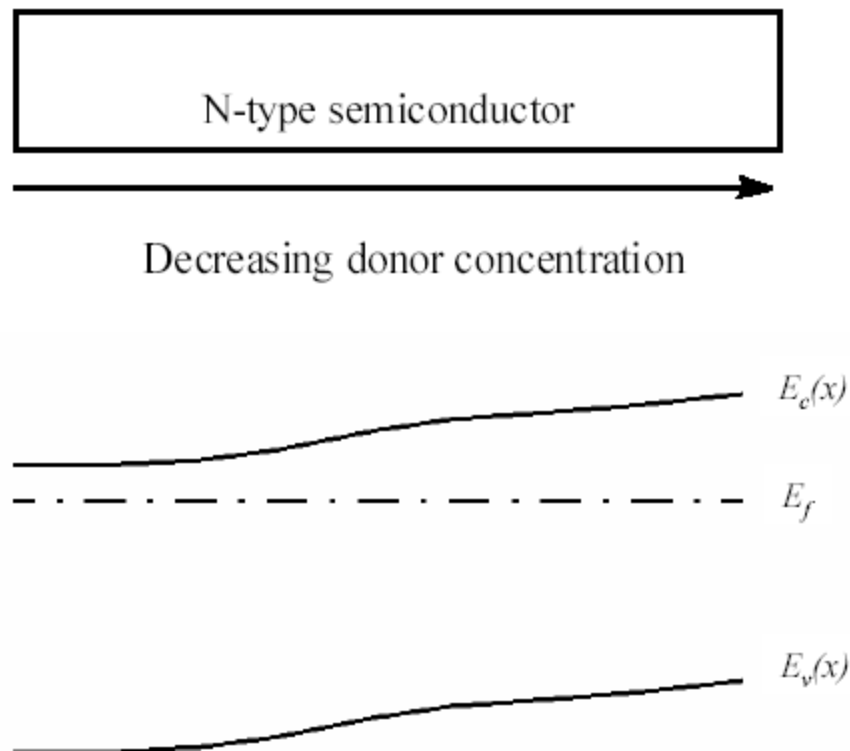
- 考虑非均匀半导体

$$n = N_c e^{-(E_c - E_f)/kT}$$

$$\frac{dn}{dx} = -\frac{N_c}{kT} e^{-(E_c - E_f)/kT} \frac{dE_c}{dx}$$

$$= -\frac{n}{kT} \frac{dE_c}{dx}$$

$$= -\frac{n}{kT} q \mathcal{E}$$



# 爱因斯坦关系

- 在平衡态时，净电流为0

$$J_n = qn\mu_n\varepsilon + qD_n \frac{dn}{dx} = 0 \quad \frac{dn}{dx} = -\frac{n}{kT} q\varepsilon$$

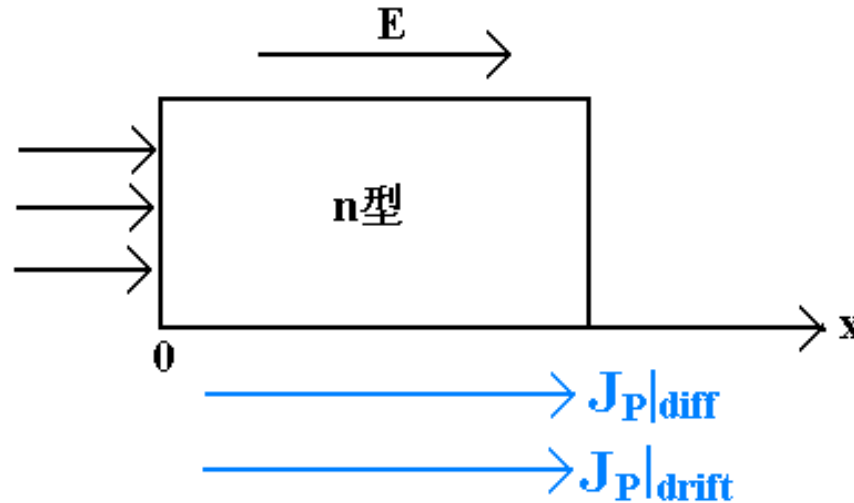
$$0 = qn\mu_n\varepsilon - qn \frac{qD_n}{kT} \varepsilon$$

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n$$

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p$$



# 连续性方程



$$-\frac{1}{q} \frac{\partial (J_P)_{\text{扩}}}{\partial x} = D_P \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad -\frac{1}{q} \frac{\partial (J_P)_{\text{漂}}}{\partial x} = -\mu_P \varepsilon \frac{\partial p}{\partial x} - \mu_P p \frac{\partial \varepsilon}{\partial x}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D_P \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \mu_P \varepsilon \frac{\partial p}{\partial x} - \mu_P p \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} - \frac{\Delta p}{\tau} + g_P$$



# 举例

- 掺杂浓度分别为(a)  $N_a = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  和  $N_d = 6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  的硅中的电子和空穴浓度? (b) 再掺杂  $6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  的  $N_a$  又是多少? ( $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ )

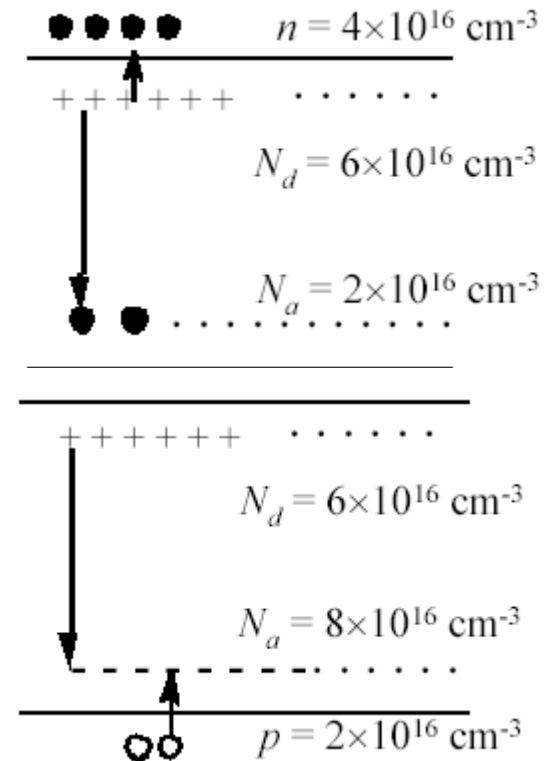
(a)  $n = N_d - N_a = 4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

$$p = n_i^2 / n = 10^{20} / 4 \times 10^{16} = 2.5 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$$

(b)  $N_a = 2 \times 10^{16} + 6 \times 10^{16} = 8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} > N_d!$

$$p = N_a - N_d = 8 \times 10^{16} - 6 \times 10^{16} = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$$n = n_i^2 / p = 10^{20} / 2 \times 10^{16} = 5 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$$



# 半导体物理学

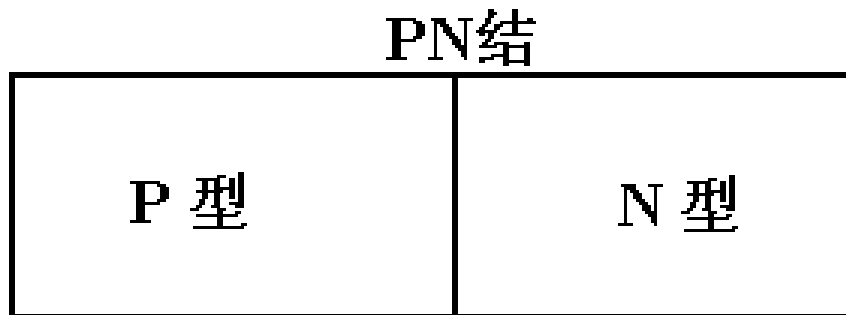
---

- ✓ 半导体中的电子状态
- ✓ 半导体中杂质和缺陷能级
- ✓ 半导体中载流子的统计分布
- ✓ 半导体的导电性
- ✓ 非平衡载流子
- ✓ **pn结**
- ✓ 金属和半导体的接触
- ✓ 半导体表面与MIS结构



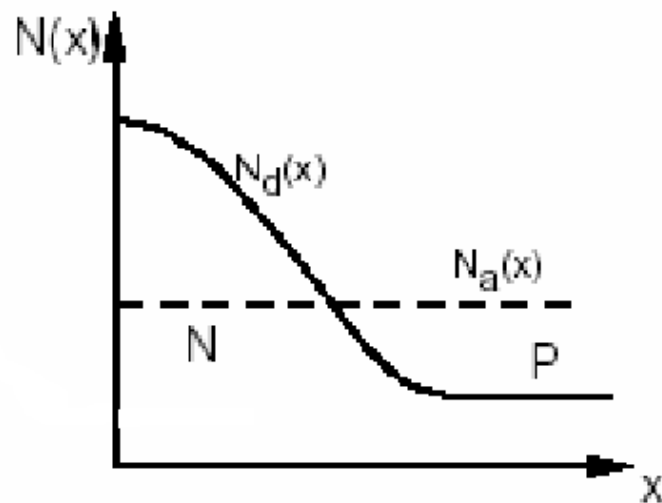
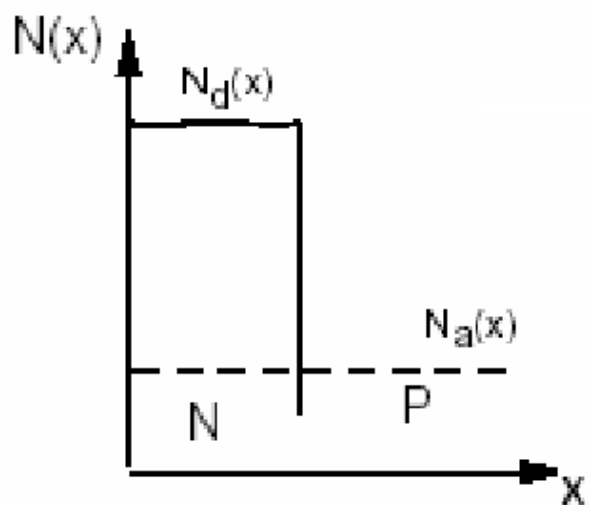
# PN结杂质分布

- PN结是同一块半导体晶体内P型区和N型区之间的边界
- PN结是各种半导体器件的基础，了解它的工作原理有助于更好地理解器件
- 典型制造过程
  - 合金法
  - 扩散法



# PN结杂质分布

- 下面两种分布在实际器件中最常见也最容易进行物理分析



突变结:

浅结、重掺杂 ( $<1\mu\text{m}$ )

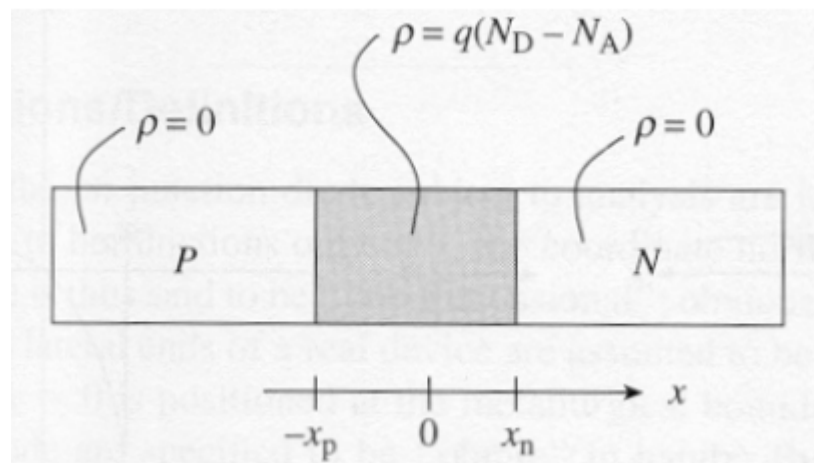
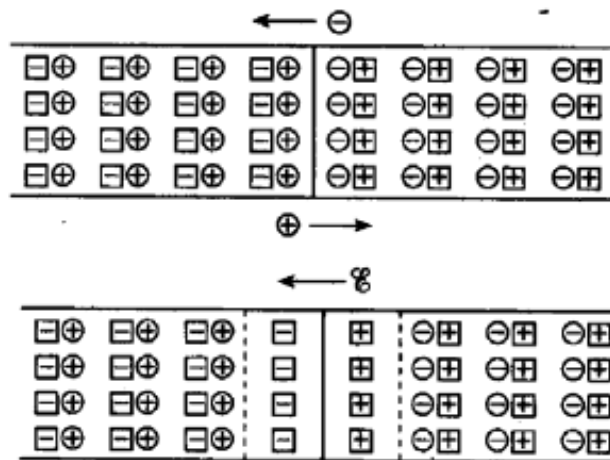
或外延的PN结

线性缓变结:

深结 ( $>3\mu\text{m}$ )

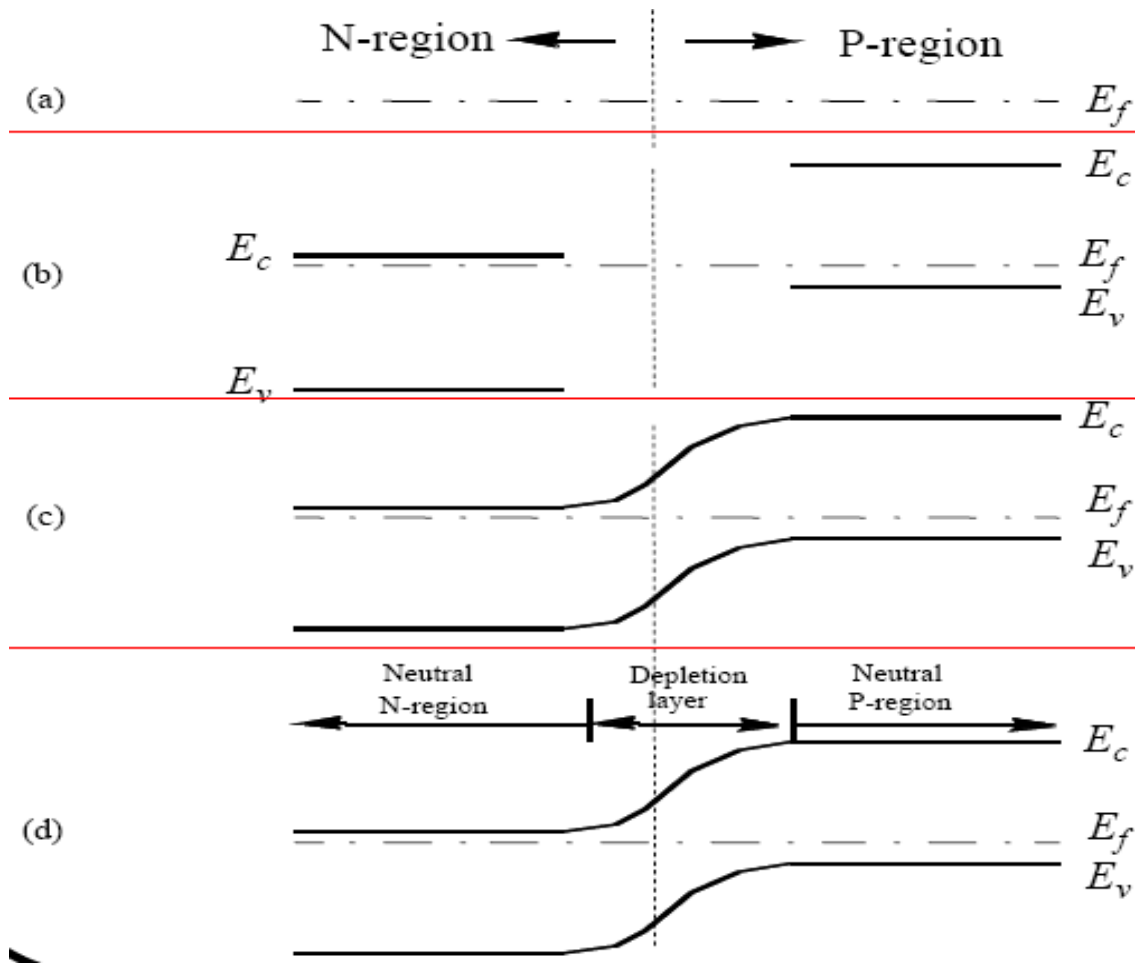


# PN结的形成

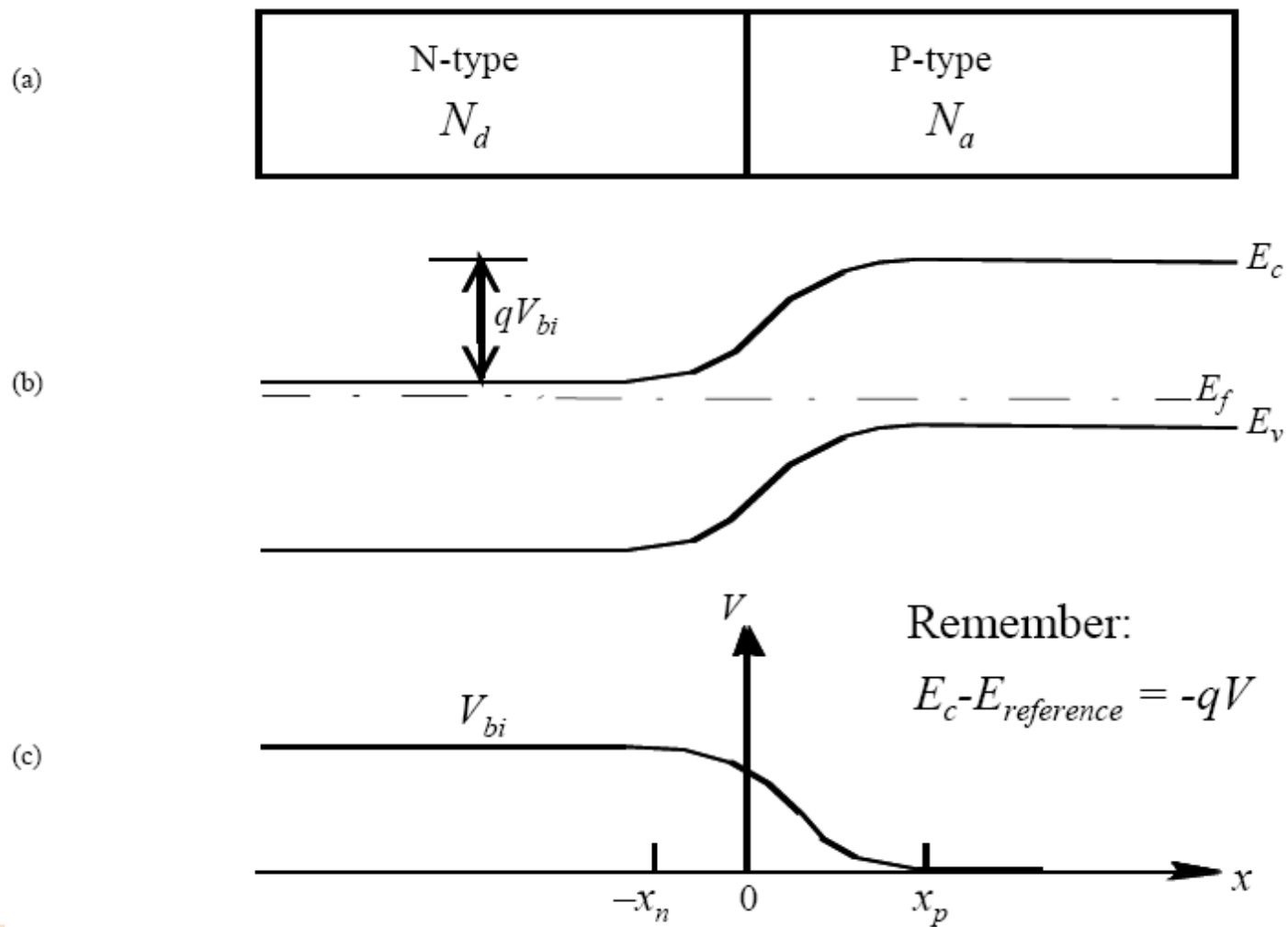


# PN结中的能带

## ■ PN



# 内建电势



# 内建电势

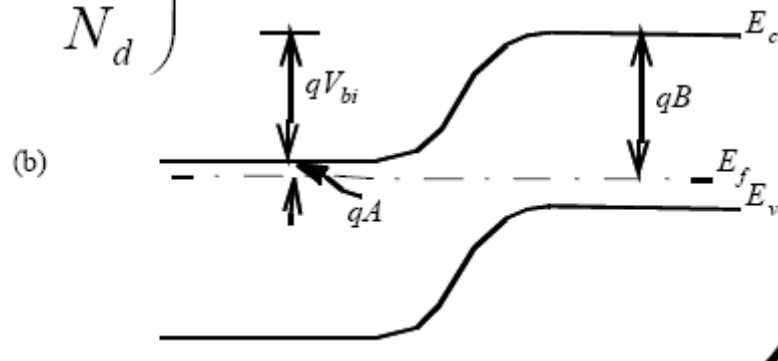
N-region  $n = N_d = N_c e^{-qA/kT} \Rightarrow A = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_c}{N_d}$

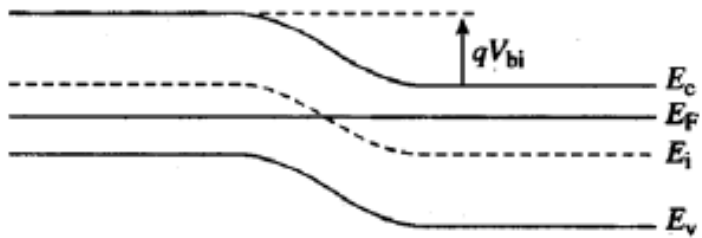
P-region  $n = \frac{n_i^2}{N_a} = N_c e^{-qB/kT} \Rightarrow B = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_c N_a}{n_i^2}$

PN结的内建电势决定于掺杂浓度 $N_D$ 、 $N_A$ 、材料禁带宽度以及工作温度

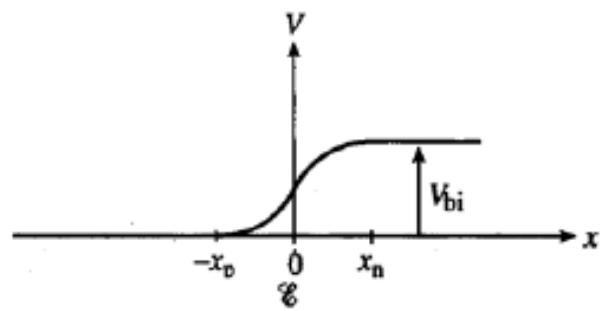
$$V_{bi} = B - A = \frac{kT}{q} \left( \ln \frac{N_c N_a}{n_i^2} - \ln \frac{N_c}{N_d} \right)$$

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_d N_a}{n_i^2}$$

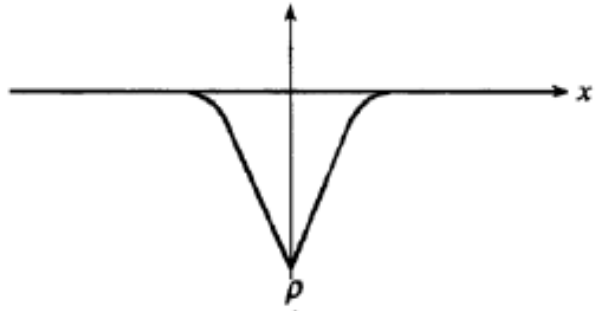




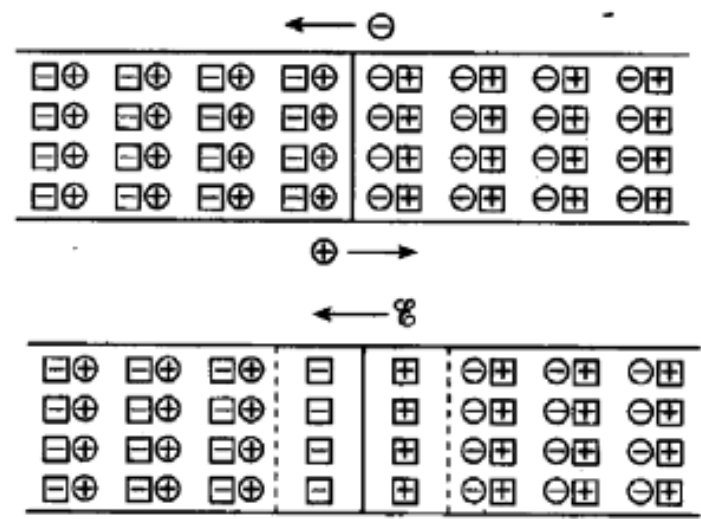
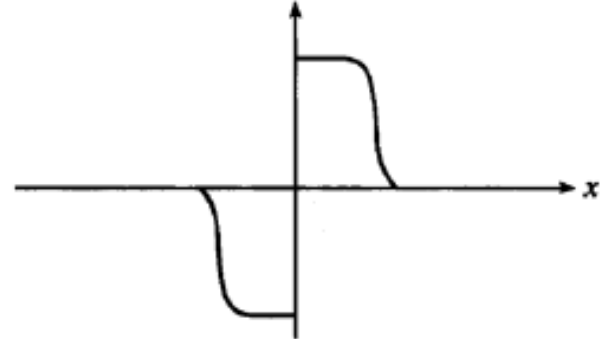
能带



内建电势

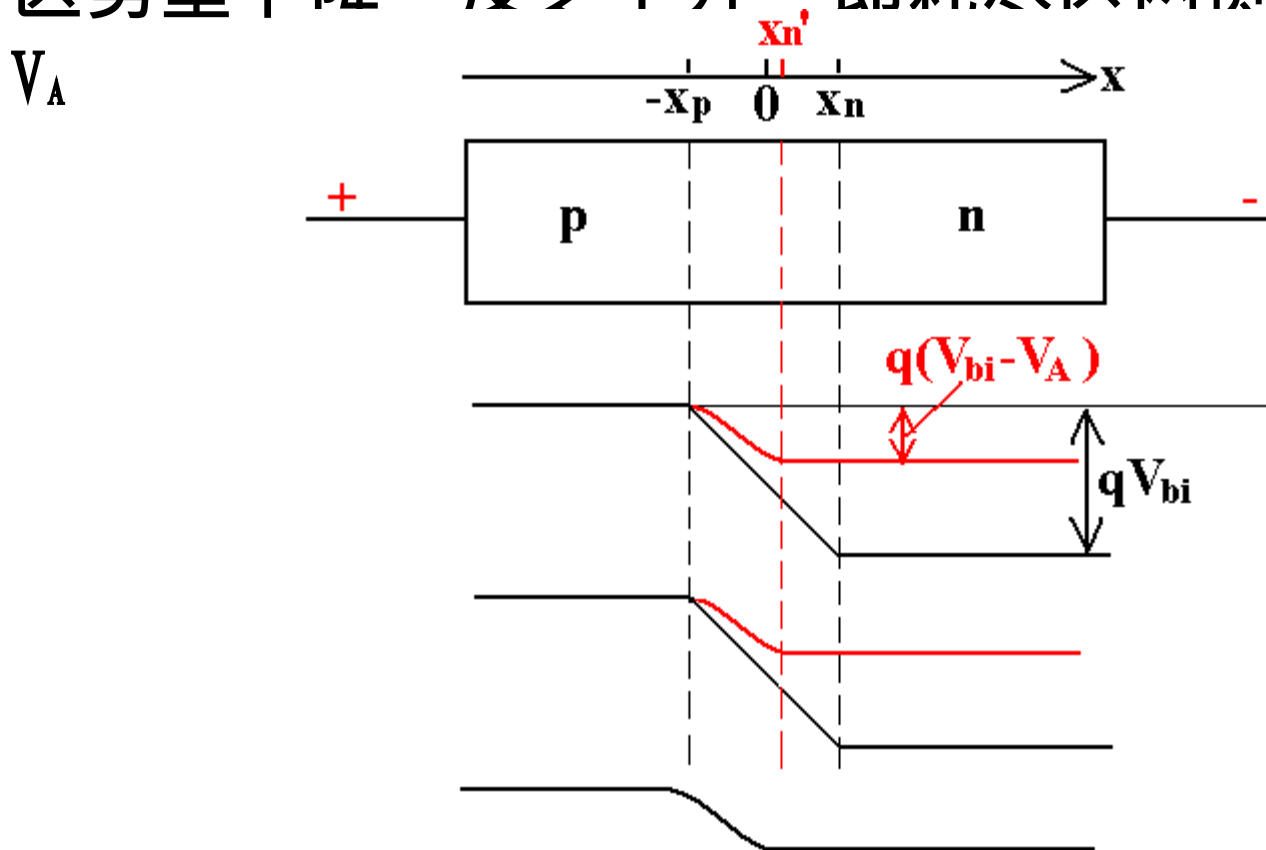


电场



# $V_A \neq 0$ 条件下的突变结

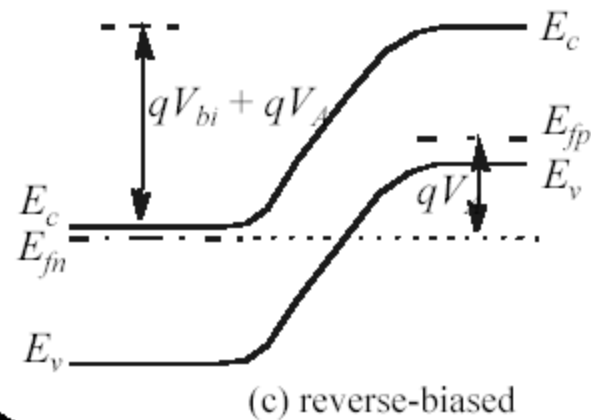
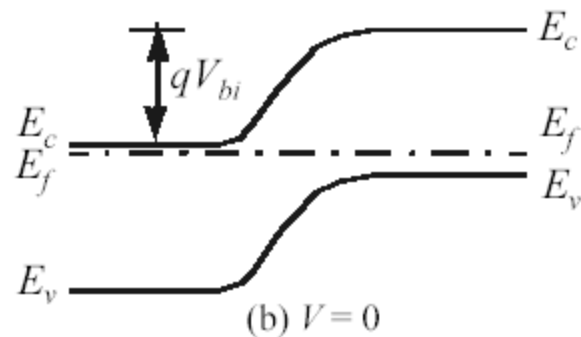
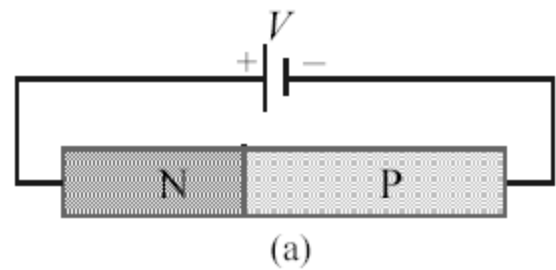
- 外加电压全部降落在耗尽区， $V_A$  大于 0 时，使耗尽区势垒下降，反之上升。即耗尽区两侧电压为  $V_{bi} - V_A$



# 反偏PN结

- 反偏电压能改变耗尽区宽度吗？

$$W_{dep} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} + |V_A|)}{qN}}$$



# 准费米能级

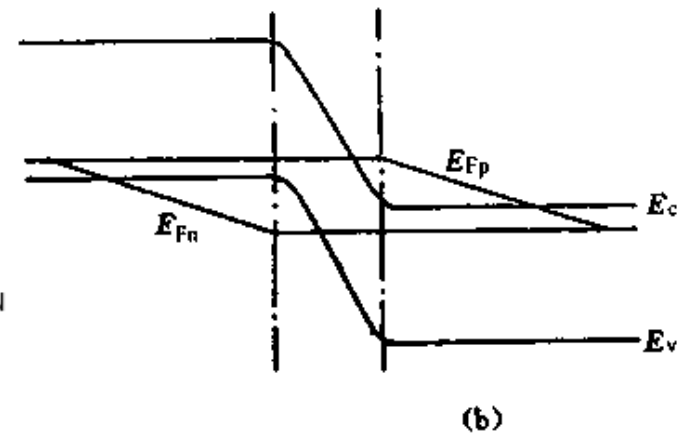
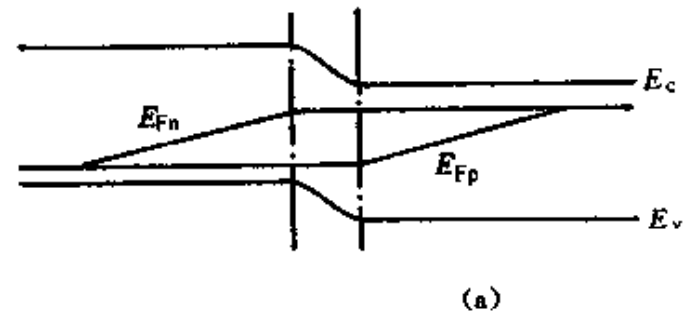
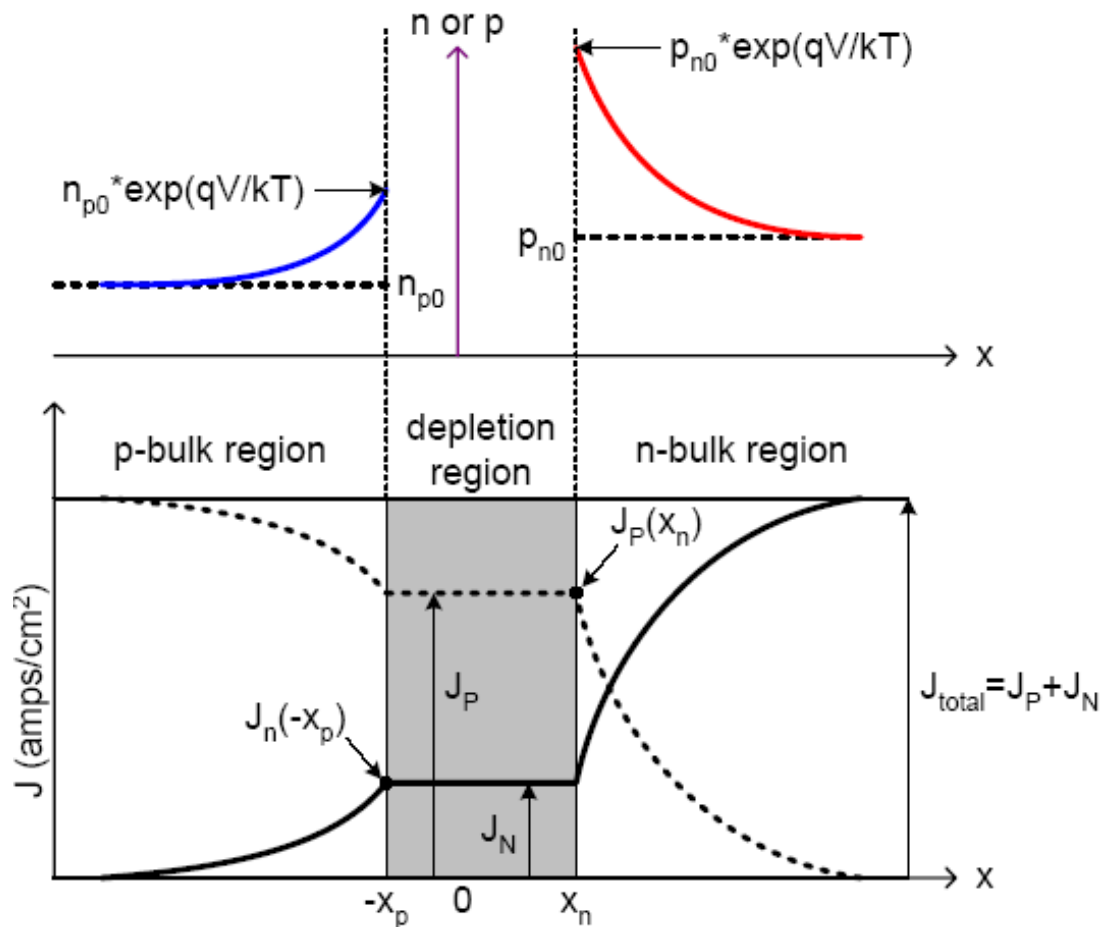
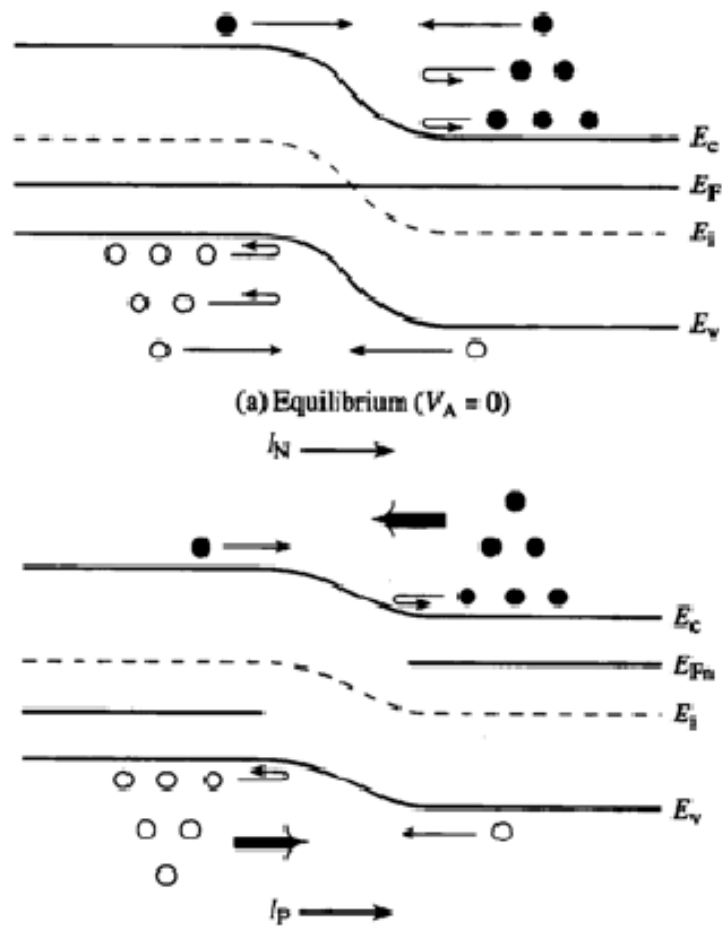


图 1-9 PN 结正反偏准费米能级  
(a)正偏 (b)反偏

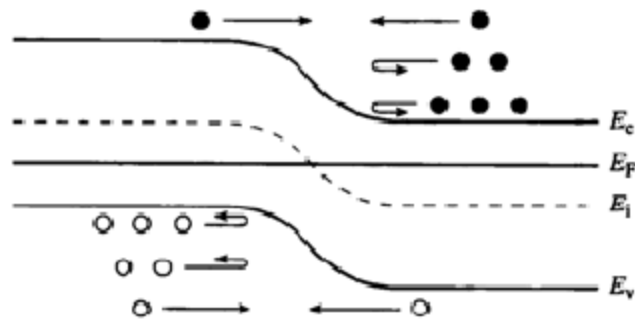


# 理想二极管方程

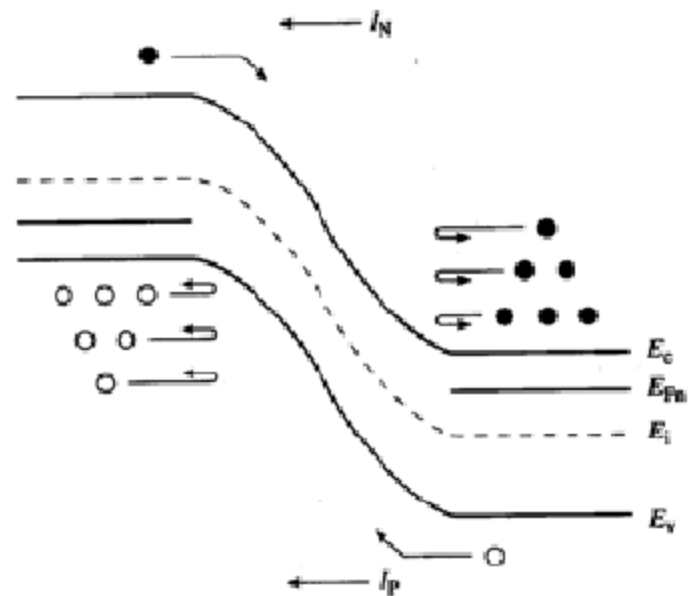
- PN结正偏时



# 理想二极管方程

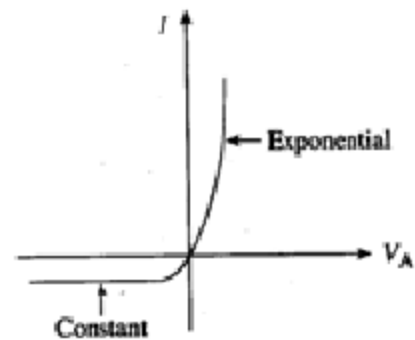


(a) Equilibrium ( $V_A = 0$ )



(c) Reverse bias ( $V_A < 0$ )

- PN结反偏时



# 定量方程

- 基本假设
  - P型区及N型区掺杂均匀分布，是突变结。
  - 电中性区宽度远大于扩散长度。
  - 冶金结为面积足够大的平面，不考虑边缘效应，载流子在PN结中一维流动。
  - 空间电荷区宽度远小于少子扩散长度，不考虑空间电荷区的产生—复合作用。
  - P型区和N型区的电阻率都足够低，外加电压全部降落在过渡区上。



# 准中性区的载流子运动情况

- 稳态时, 假设  $G_L = 0$

$$0 = D_N \frac{d^2 \Delta n_p}{dx^2} - \frac{\Delta n_p}{\tau_n} \dots \dots x \leq -x_p$$

$$0 = D_P \frac{d^2 \Delta p_n}{dx^2} - \frac{\Delta p_n}{\tau_p} \dots \dots x \geq x_n$$

- 边界条件:

➤ 图6.4

➤ 欧姆接触边界

➤ 耗尽层边界



# 边界条件

- 欧姆接触边界

$$\Delta n_p(x \rightarrow -\infty) = 0$$

$$\Delta p_n(x \rightarrow +\infty) = 0$$

- 耗尽层边界(pn结定律)

$$np = n_i^2 e^{\frac{F_N - F_P}{kT}} = n_i^2 e^{qV_A / kT}$$



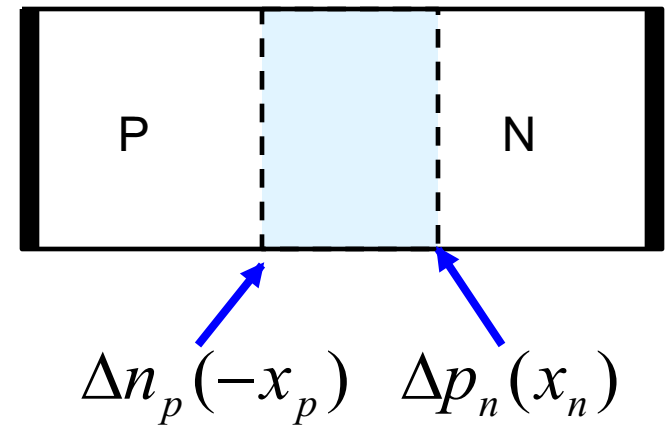
# 耗尽层边界

## ■ P型一侧

$$n(-x_p)p(-x_p) = n(-x_p)N_A = n_i^2 e^{qV_A/kT}$$

$$n(-x_p) = \frac{n_i^2}{N_A} e^{qV_A/kT}$$

$$\Delta n_p(-x_p) = \frac{n_i^2}{N_A} (e^{qV_A/kT} - 1)$$



# 耗尽层边界(续)

---

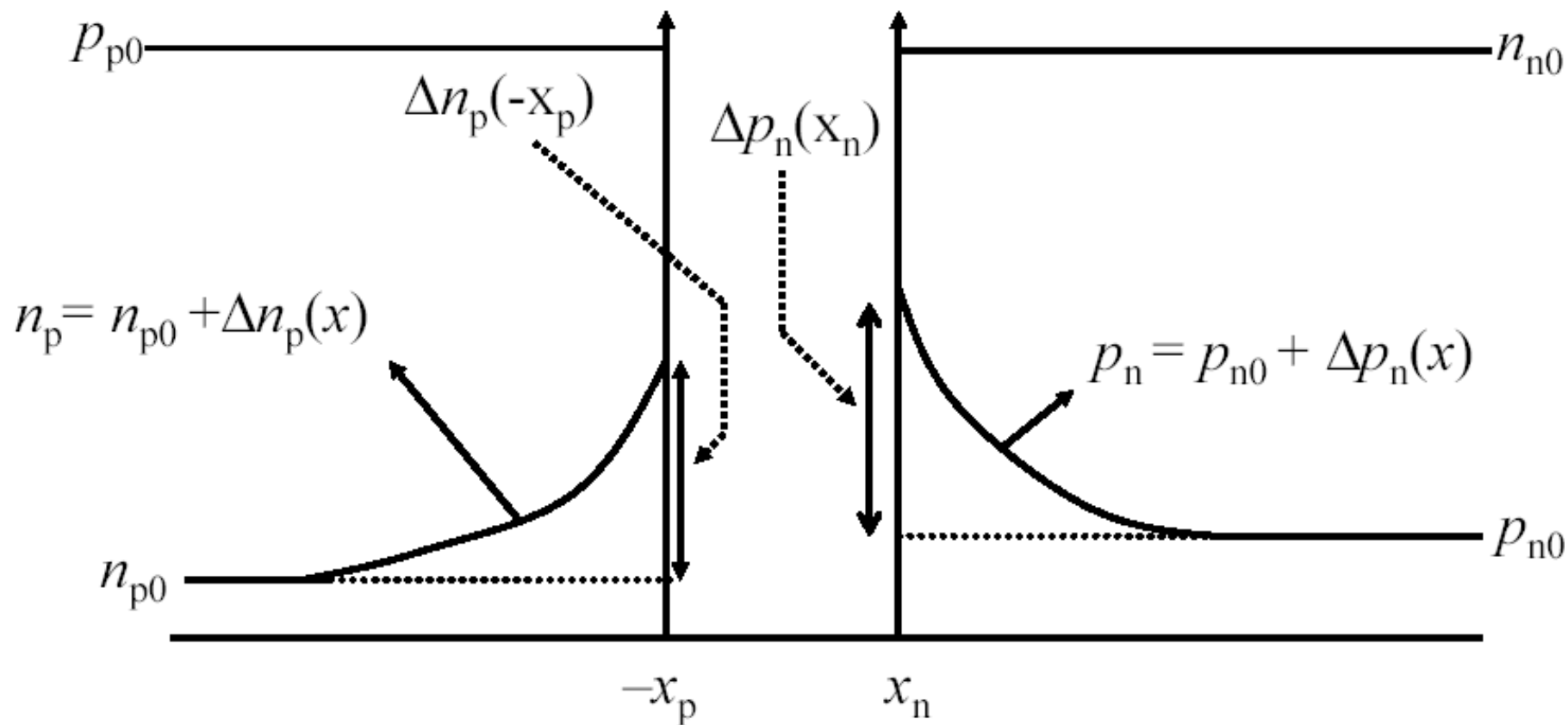
- N型一侧

$$\Delta p_n(x_n) = \frac{n_i^2}{N_D} \left( e^{qV_A/kT} - 1 \right)$$

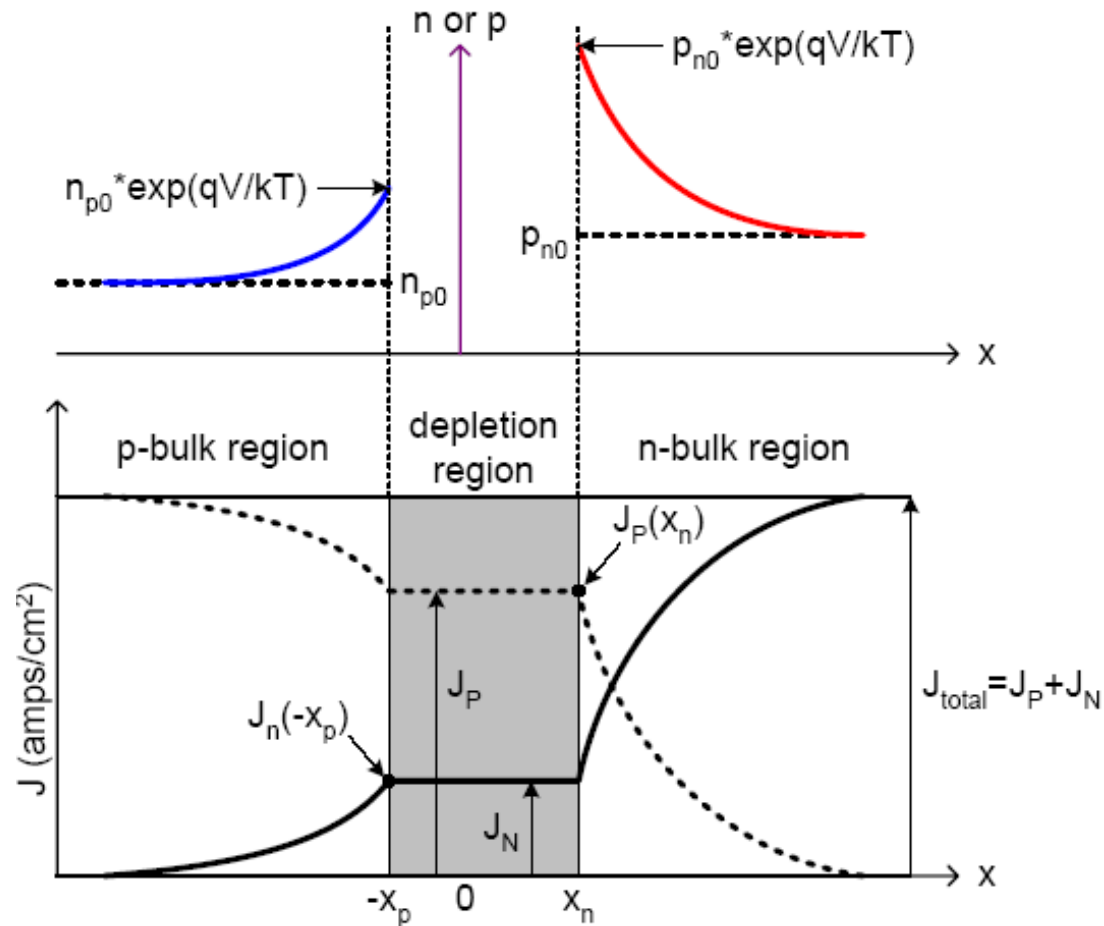
耗尽层边界处非平衡载流子浓度与外加电压有关



# 准中性区载流子浓度



# 理想二极管方程



## ■ 求解过程

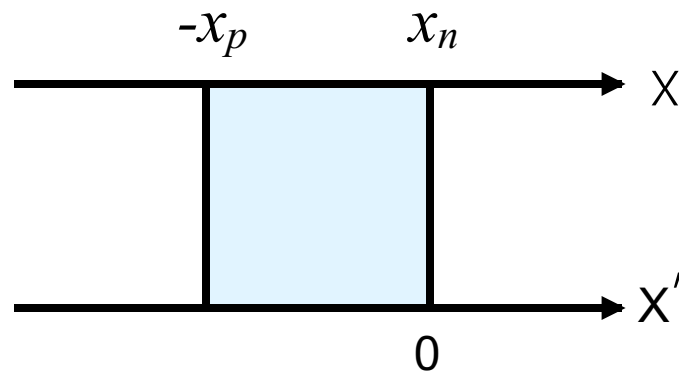
- 准中性区少子扩散方程
- 求  $J_p(x_n)$
- 求  $J_n(-x_p)$
- $J = J_p(x_n) + J_n(-x_p)$



# 理想二极管方程(1)

- 新的坐标:

$$0 = D_p \frac{d^2 \Delta p_n}{dx'^2} - \frac{\Delta p_n}{\tau_p}$$



- 边界条件:

$$\Delta p_n(x' \rightarrow \infty) = 0$$

$$\Delta p_n(x' = 0) = \frac{n_i^2}{N_D} \left( e^{qV_A/kT} - 1 \right)$$



# 空穴电流

- 一般解  $\Delta p_n(x') = A_1 e^{-x'/L_P} + A_2 e^{x'/L_P}$

其中,  $L_P = \sqrt{D_P \tau_P}$

$$\Delta p_n(x') = \frac{n_i^2}{N_D} \left( e^{qV_A/kT} - 1 \right) e^{-x'/L_P} \quad \mathbf{I} \quad x' \geq 0$$

$$J_P(x') = -qD_P \frac{d\Delta p_n}{dx'} = q \frac{D_P}{L_P} \frac{n_i^2}{N_D} \left( e^{qV_A/kT} - 1 \right) e^{-x'/L_P}$$



# 电子电流

- P型侧

$$\Delta n_p(x'') = \frac{n_i^2}{N_A} \left( e^{qV_A/kT} - 1 \right) e^{-x''/L_N} \quad \mathbf{!} \quad x'' \geq 0$$

$$J_N(x'') = -qD_N \frac{d\Delta n_p}{dx''} = q \frac{D_N}{L_N} \frac{n_i^2}{N_A} \left( e^{qV_A/kT} - 1 \right) e^{-x''/L_N}$$

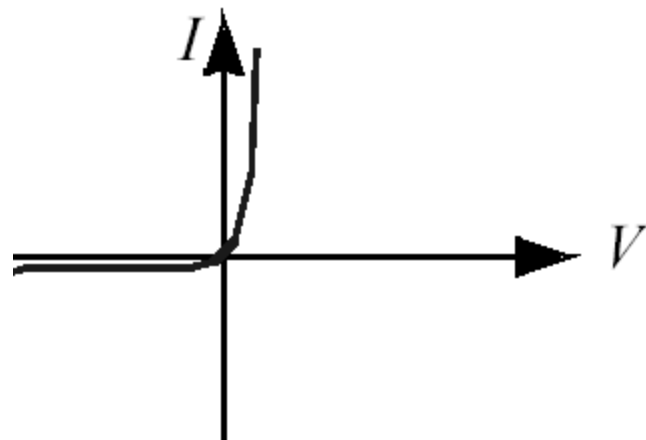


# PN结电流

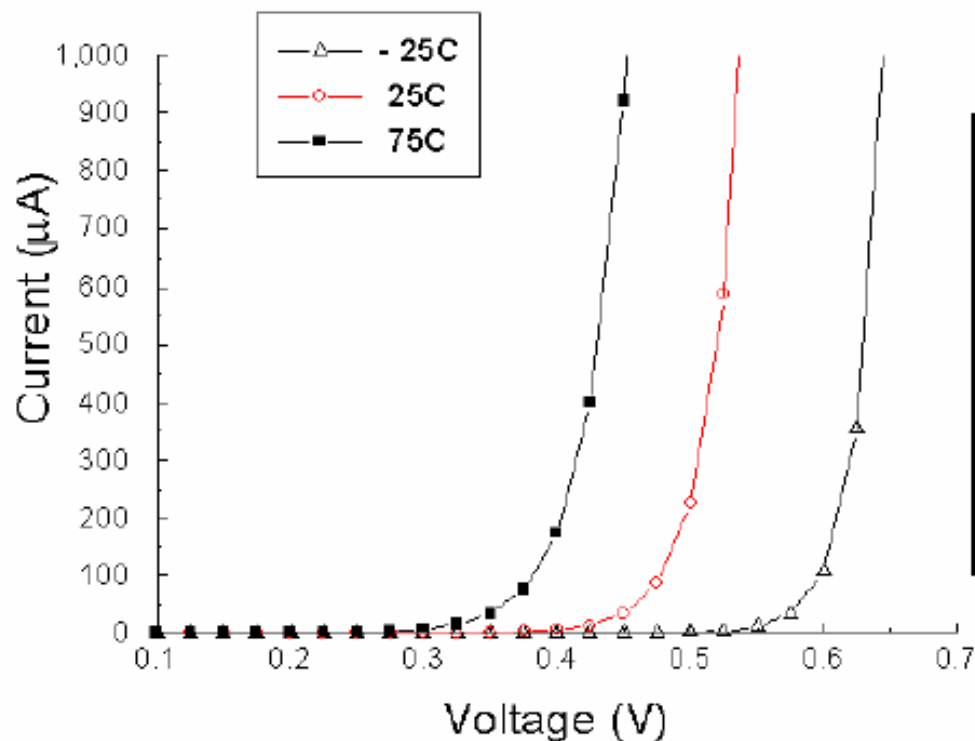
$$I = I_N + I_P = A(J_N(-x_p) + J_P(x_n))$$

$$I = qA \left( \frac{D_N n_i^2}{L_N N_A} + \frac{D_P n_i^2}{L_P N_D} \right) (e^{qV_A/kT} - 1)$$

$$I = I_0 (e^{qV_A/kT} - 1)$$



# PN结电流与温度的关系



$$I = I_0(e^{qV/kT} - 1)$$

$$I_0 = Aqn_i^2 \left( \frac{D_p}{L_p N_d} + \frac{D_n}{L_n N_a} \right)$$



# 与理想情况的偏差

- 大注入效应
- 空间电荷区的复合

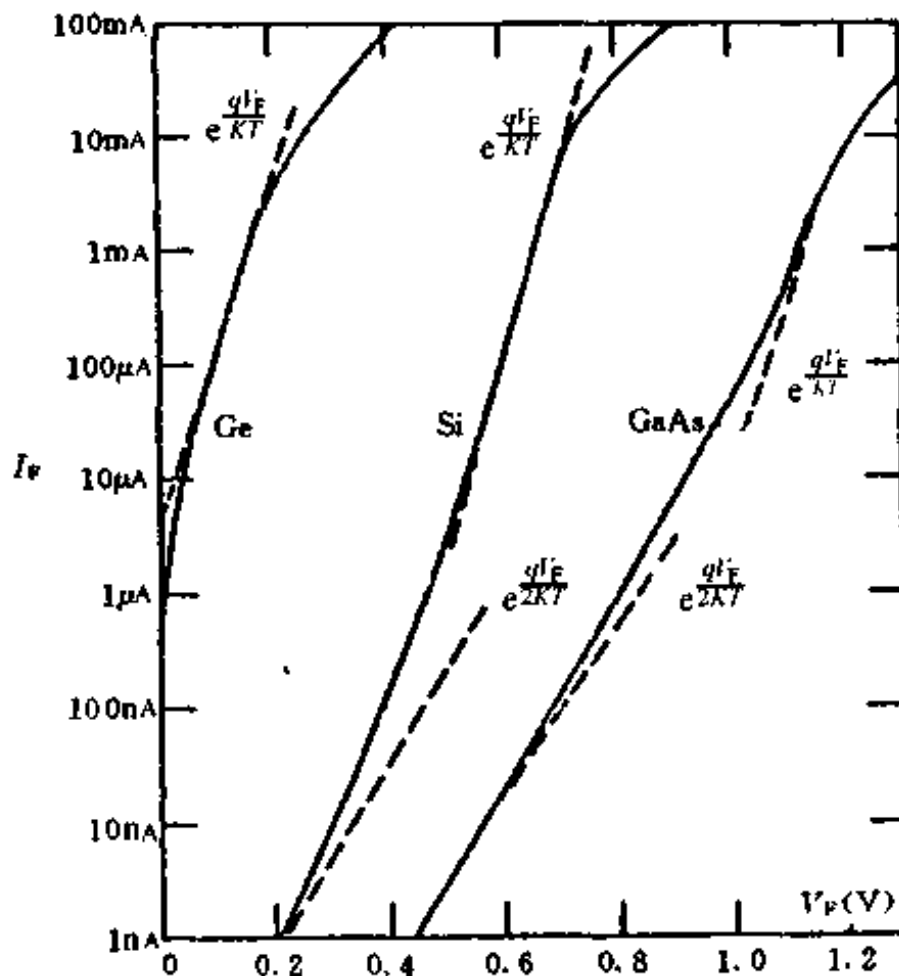


图 1-11 Ge、Si 和 GaAs 二极管的正向特性



# 空间电荷区的产生与复合

- 正向有复合电流
- 反向有产生电流

$$I_{R-G} = -qA \int_{-x_p}^{x_n} \left. \frac{\partial n}{\partial t} \right|_{R-G} dx$$

$$\left. \frac{\partial n}{\partial t} \right|_{R-G} = - \frac{np - n_i^2}{\tau_p (n + n_1) + \tau_n (p + p_1)}$$



# 空间电荷区的产生与复合-1

- 反向偏置时, 
$$I_{R-G} = -\frac{qAn_i}{2\tau_0}W$$

- 正向偏置时, 计算比较复杂

$$I_{R-G} = \frac{qAn_iW}{2\tau_0} e^{\frac{qV_A}{2kT}}$$

$V_A$ 愈低,  $I_{R-G}$ 愈是起支配作用

$$I_{DIFF} = I_0 \left( e^{\frac{qV_A}{kT}} - 1 \right)$$

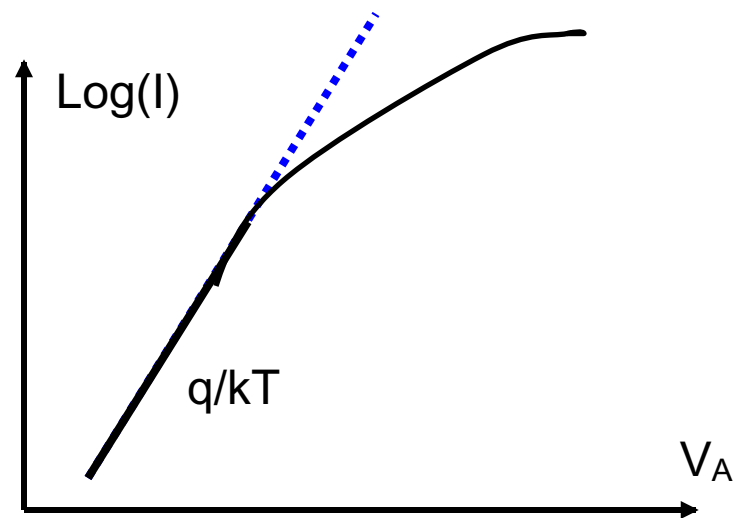
$$I = I_{DIFF} + I_{R-G}, \text{ and } \frac{I_{R-G}}{I_{DF}} = \frac{\delta L_p N_D}{2\tau D_p n_i} e^{-\frac{qV_A}{2kT}}$$



# $V_A \rightarrow V_{bi}$ 时的大电流现象

- 串联电阻效应

$$I = I_0 e^{qV_J/kT} = I_0 e^{q(V_A - IR_s)/kT}$$



# $V_A \rightarrow V_{bi}$ 时的大电流现象-1

## ■ 大注入效应

大注入是指正偏工作时注入载流子密度等于或高于平衡态多子密度的工作状态。  $p_n \geq n_{n0}$

$$J_n = q\mu_n \varepsilon_{BI} n_n + qD_n \frac{dn_n}{dx}$$
$$\varepsilon_{BI} = -\frac{D_n}{\mu_n} \frac{1}{n_n} \frac{dn_n}{dx} = -\frac{kT}{q} \frac{1}{n_n} \frac{dn_n}{dx}$$

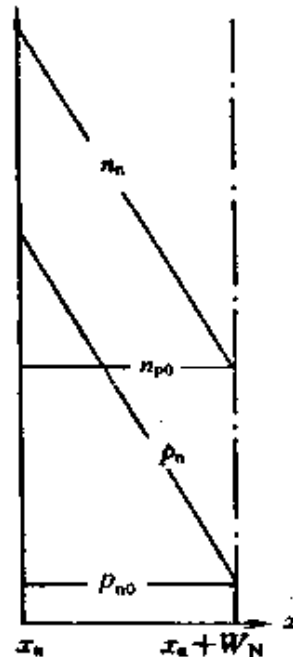


图 1-12 PN 结大注入载流子密度分布



# $V_A \rightarrow V_{bi}$ 时的大电流现象-2

$$J_p = -q\mu_p p_n \frac{kT}{q} \frac{1}{n_n} \frac{dn_p}{dx} - qD_p \frac{dp_n}{dx}$$

利用爱因斯坦关系, 及电中性条件  $\frac{dn_n}{dx} = \frac{dp_n}{dx}$ , 上式可写为:

$$J_p = -qD_p \left( 1 + \frac{p_n}{n_n} \right) \frac{dp_n}{dx}$$

定义有效扩散系数:

$$D_{peff} = \left( 1 + \frac{p_n}{n_n} \right) D_p$$

$$J_p = -qD_{peff} \frac{dp_n}{dx}$$



# $V_A \rightarrow V_{bi}$ 时的大电流现象-3

$$V_{BI} = \int_{x_n}^{x_n+W_N} \varepsilon_{BI} dx = -\frac{kT}{q} \int_{x_n}^{x_n+W_N} \frac{1}{n_n} \frac{dn_n}{dx} dx = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_n(x_n)}{n_{n0}}$$

$$V_J = \frac{V_A}{2} + \frac{kT}{q} \ln \frac{n_i}{p_{n0}}$$

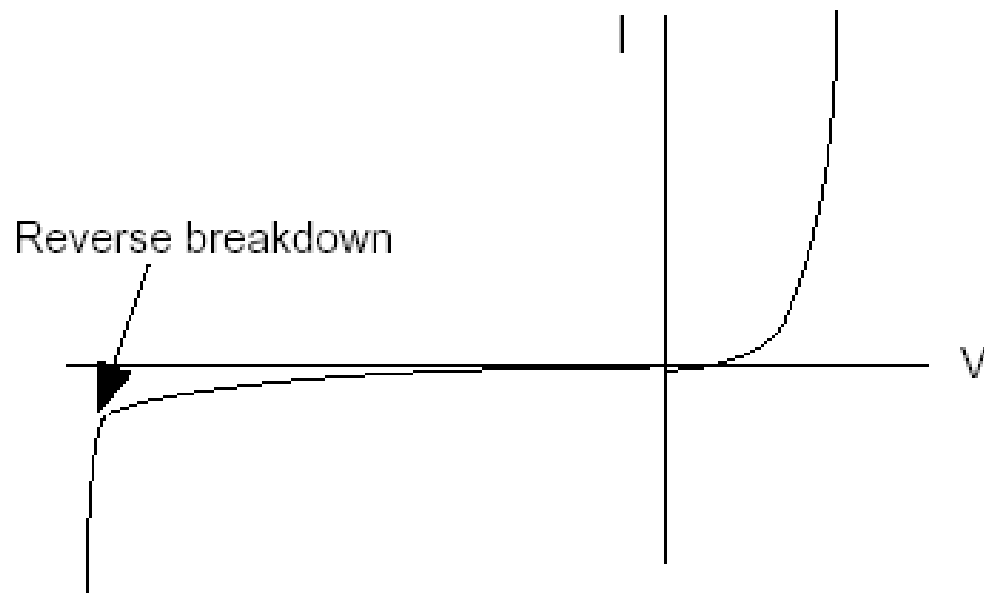
$$I_D = 2qAD_p \frac{n_i}{W_N} e^{\frac{qV_A}{2kT}}$$

$V_A$ 越大, 电流上升变缓

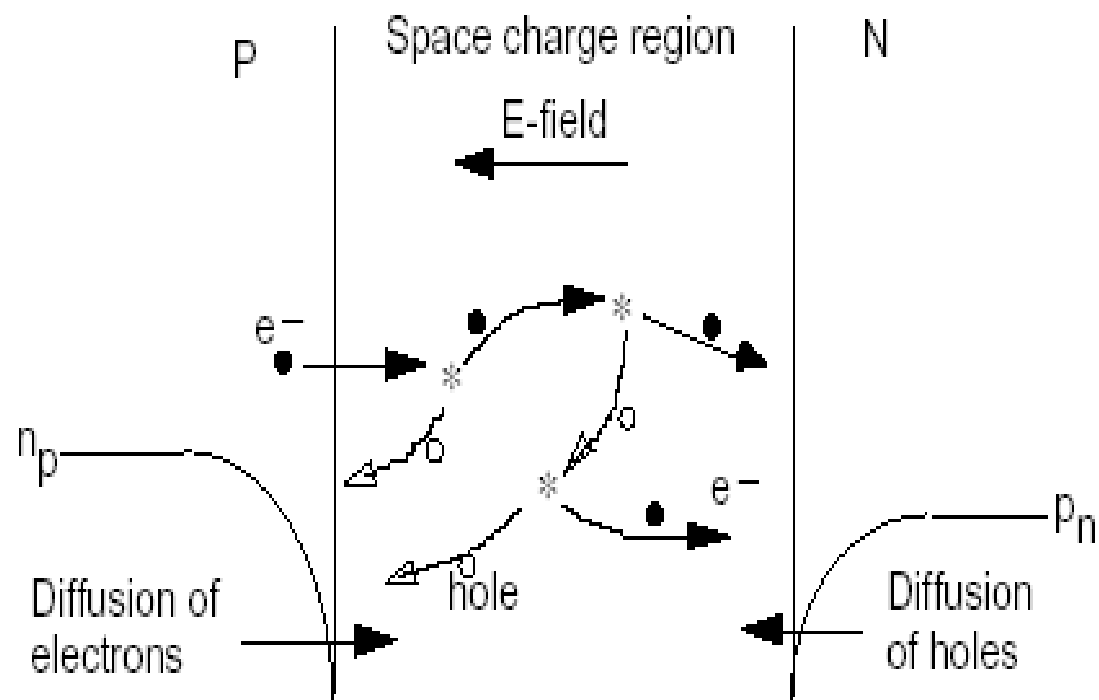


# 反向击穿

- 电流急剧增加
- 可逆
  - 雪崩倍增
  - 齐纳过程
- 不可逆
  - 热击穿



# 雪崩倍增



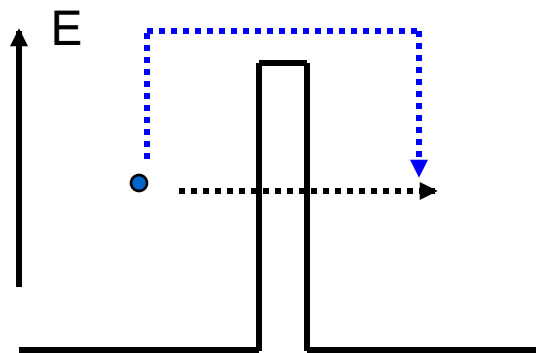
# 齐纳过程

- 产生了隧穿效应

隧道穿透几率P：

$$P = \exp\left(-\frac{4\sqrt{2m^*E_g}}{3h}L\right)$$

隧道长度： $L = \frac{E_g}{qE}$



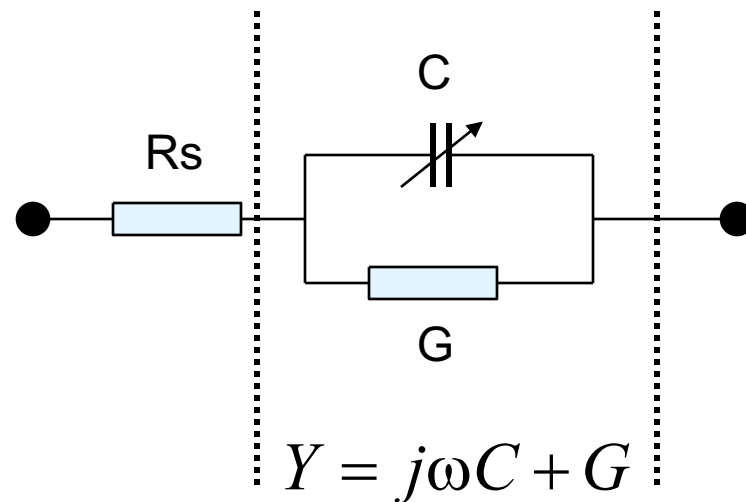
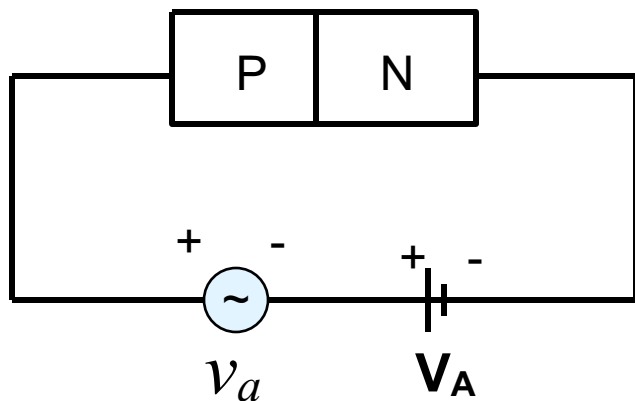
隧道击穿： $V_B < 4E_g/q$

雪崩击穿： $V_B > 6E_g/q$



# PN结二极管的等效电路

- 小信号加到PN结上

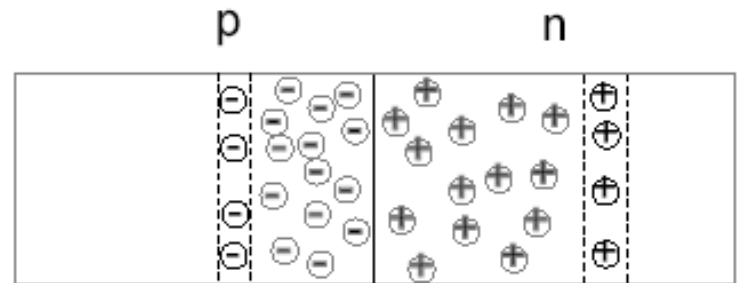
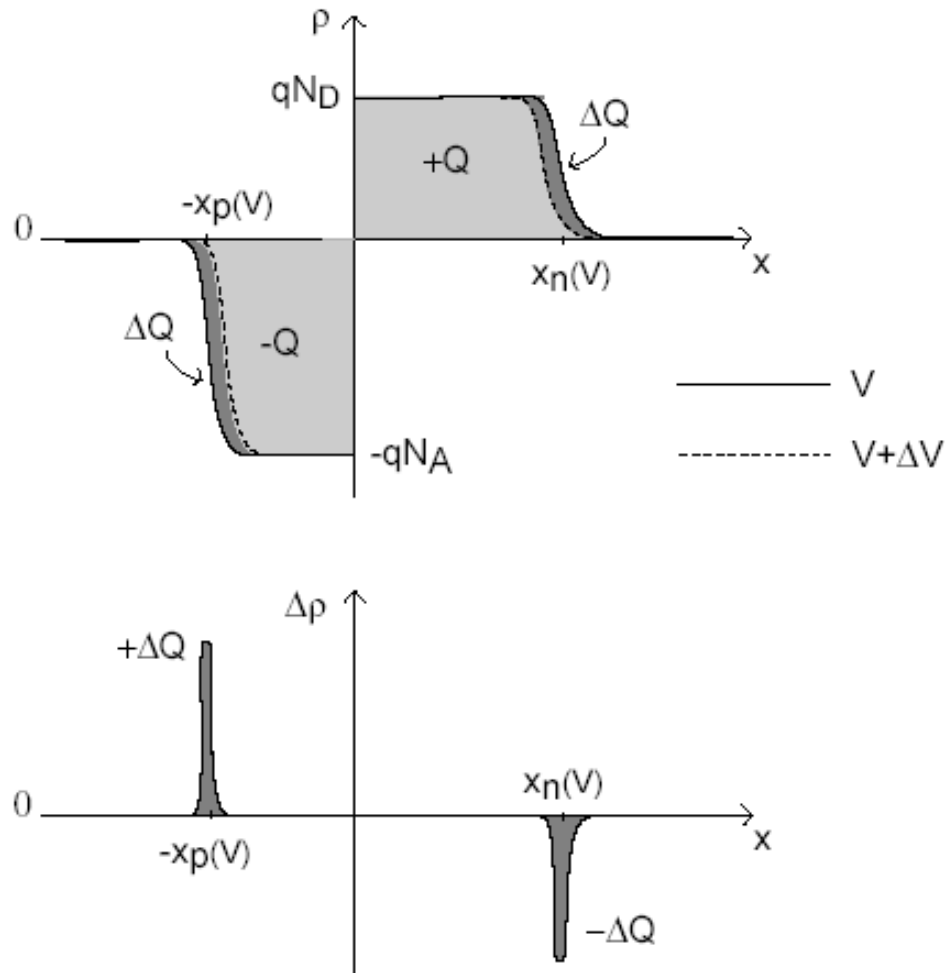


$$v_a = V_0 \sin \omega t$$



# 反向偏置结电容

也称势垒电容或过渡区电容



# 反向偏置结电容-1

$$C_T \equiv \frac{dQ_t}{dV_t}$$

考虑突变结,  $V_t = V_{bi} - V_A$

$$Q_t = qAN_Dx_n = qAN_Ax_p$$

$$C_T = A \left[ \frac{q\epsilon_s}{2(V_{bi} - V_A)} \left( \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \cdot \cdot C_T = \frac{C_{T0}}{\left( 1 - \frac{V_A}{V_{bi}} \right)^{\frac{1}{2}}}$$



# 反向偏置结电容-2

- 耗尽近似下线性缓变结的空间电荷区电荷总量

$$Q_t = \int_0^{x_m} 2 A q a x dx = A q a \frac{x_m^2}{8}$$

$$C_T = A \left[ \frac{q a \epsilon_s^2}{12} \frac{1}{(V_{bi} - V_A)} \right]^{\frac{1}{3}}$$

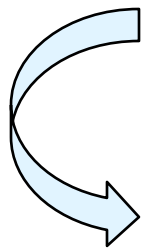
$$C_T = \frac{C_{T0}}{\left( 1 - \frac{V_A}{V_{BJ}} \right)^{\frac{1}{3}}}$$



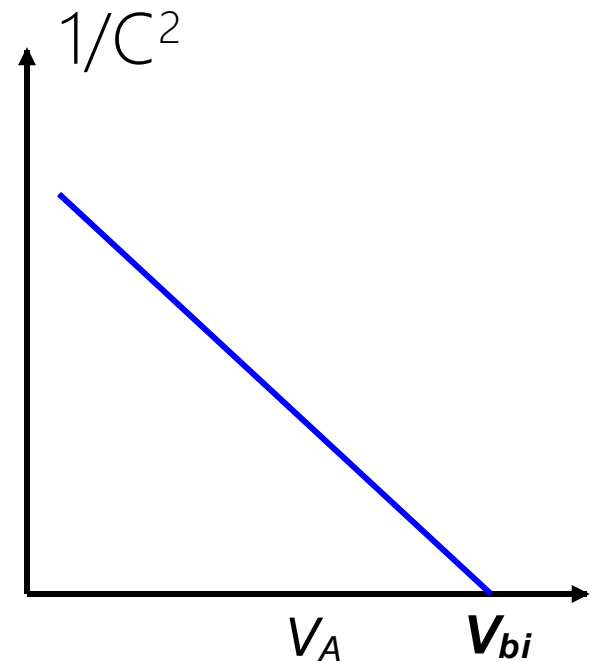
# 参数提取和杂质分布

## ■ CV测量系统

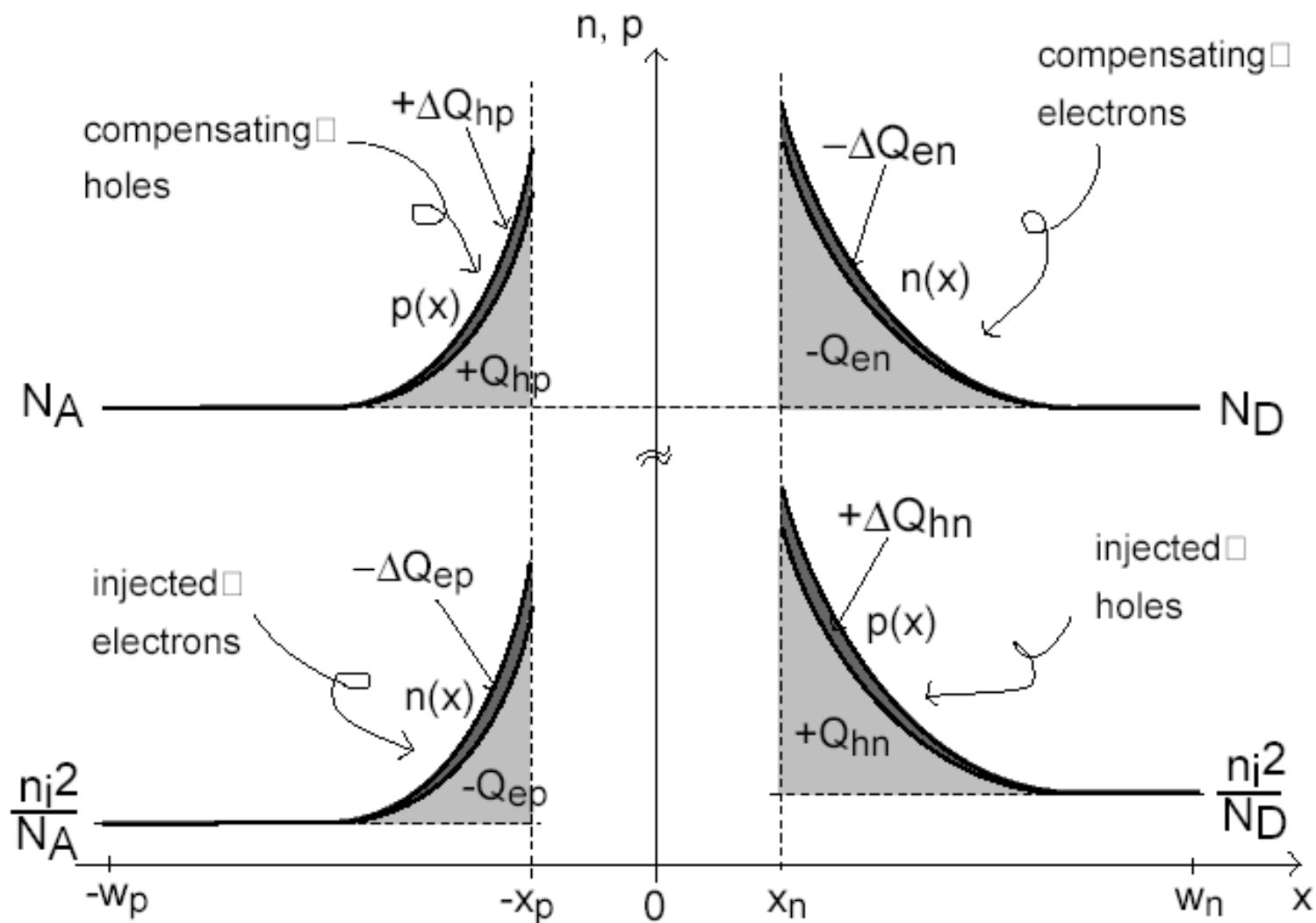
$$C_T = A \left[ \frac{q\epsilon_s}{2(V_{bi} - V_A)} \left( \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$



$$\frac{1}{C_T^2} = \frac{2}{q \left( \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right) \epsilon_s A^2} (V_{bi} - V_A)$$



# 扩散电容



# 扩散电容-1

- 表现为电容形式

$$C_d = \frac{dQ_n}{dV} + \frac{dQ_p}{dV}$$

$$Q_n = qA \int_{x_n}^{\infty} \Delta p_n(x) dx = qAL_p p_{n0} \left( e^{qV_A/kT} - 1 \right)$$

$$Q_p = qAL_n n_{p0} \left( e^{qV_A/kT} - 1 \right)$$

$$C_D = qA \frac{q}{kT} L_p p_{n0} \left( e^{qV_A/kT} - 1 \right) + qA \frac{q}{kT} L_n n_{p0} \left( e^{qV_A/kT} - 1 \right)$$



# 扩散电容-2

$$C_D = qA \frac{q}{kT} L_p p_{n0} \left( e^{qV_A/kT} - 1 \right)$$

$$I_F = \frac{qAD_p p_{n0}}{L_p} \left( e^{qV_A/kT} - 1 \right)$$

$$C_D = \frac{q}{kT} I_F \tau_p$$

- 扩散电容与正向电流成正比



# 练习

---

- 1、为什么pn结在反偏压下有一小的饱和电流
- 2、试分别描述势垒电容和扩散电容的由来



# 半导体物理学

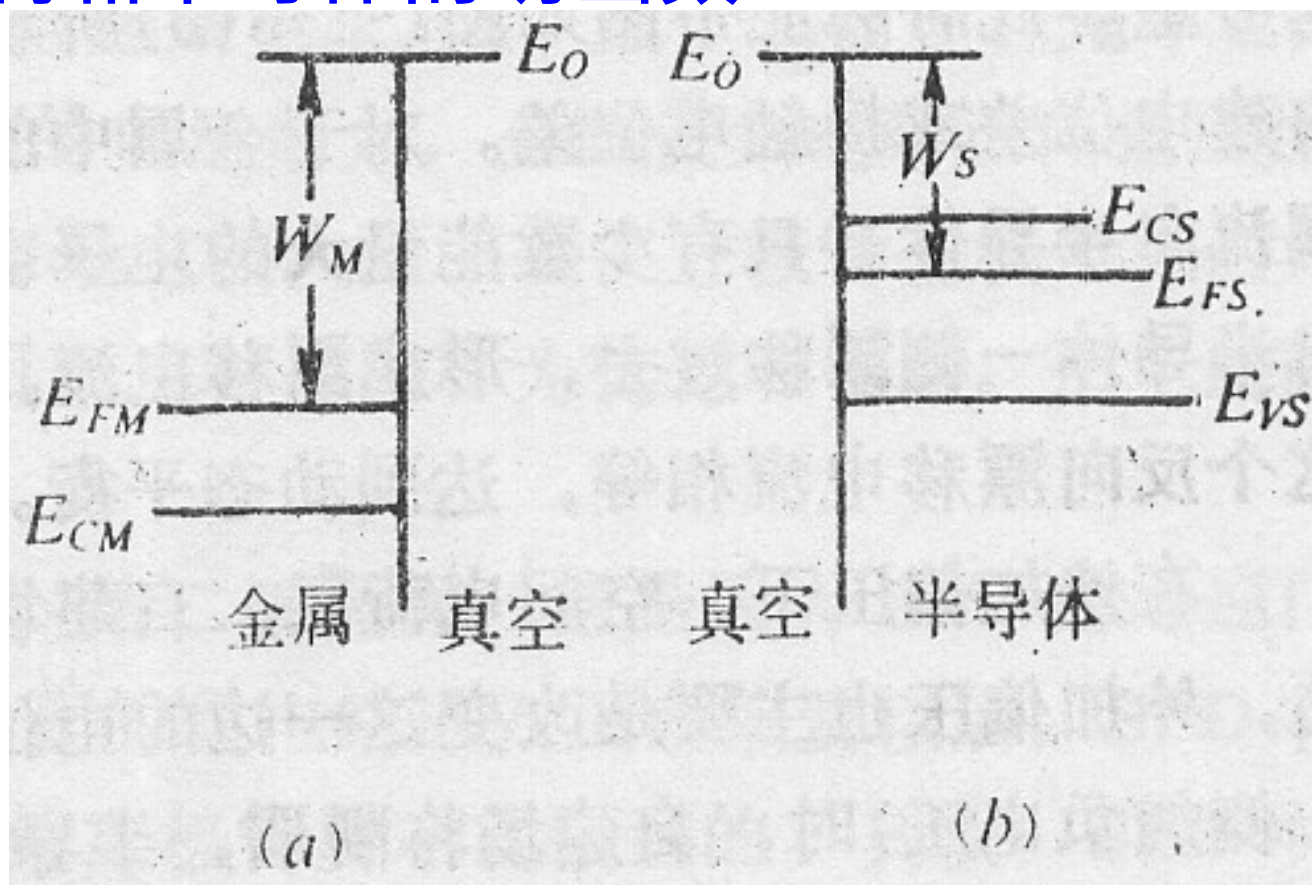
---

- ✓ 半导体中的电子状态
- ✓ 半导体中杂质和缺陷能级
- ✓ 半导体中载流子的统计分布
- ✓ 半导体的导电性
- ✓ 非平衡载流子
- ✓ pn结
- ✓ 金属和半导体的接触
- ✓ 半导体表面与MIS结构



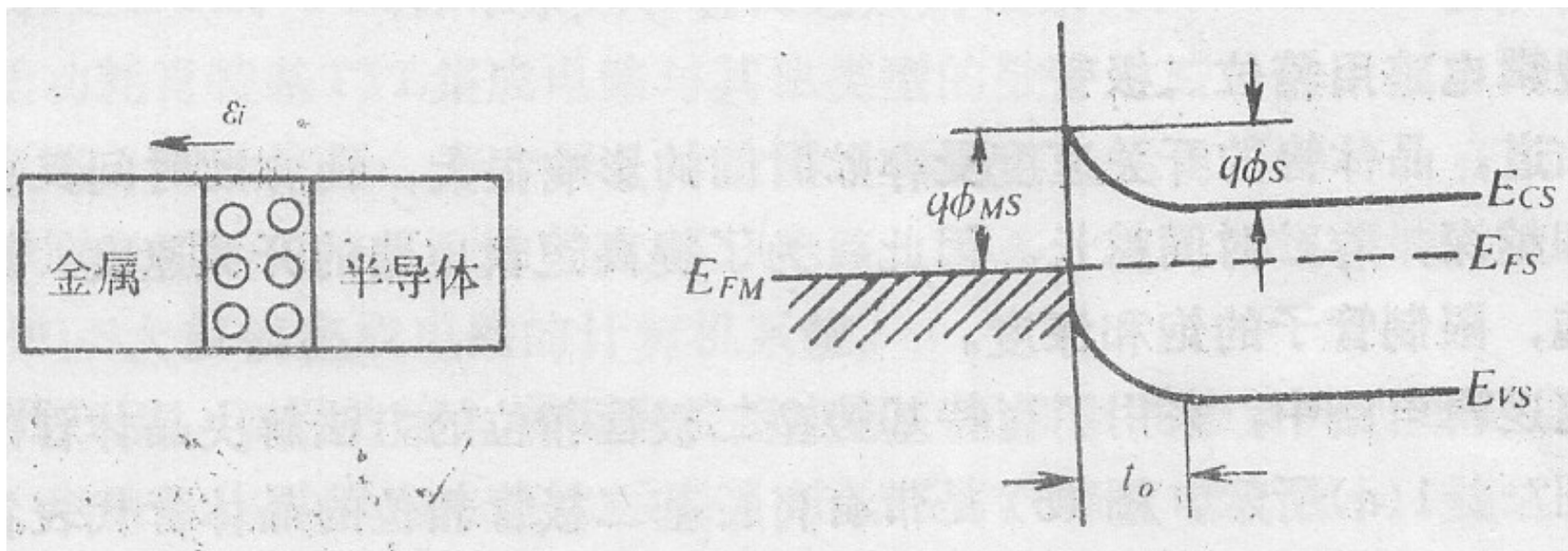
# 金属和半导体的接触

- 金属和半导体的功函数



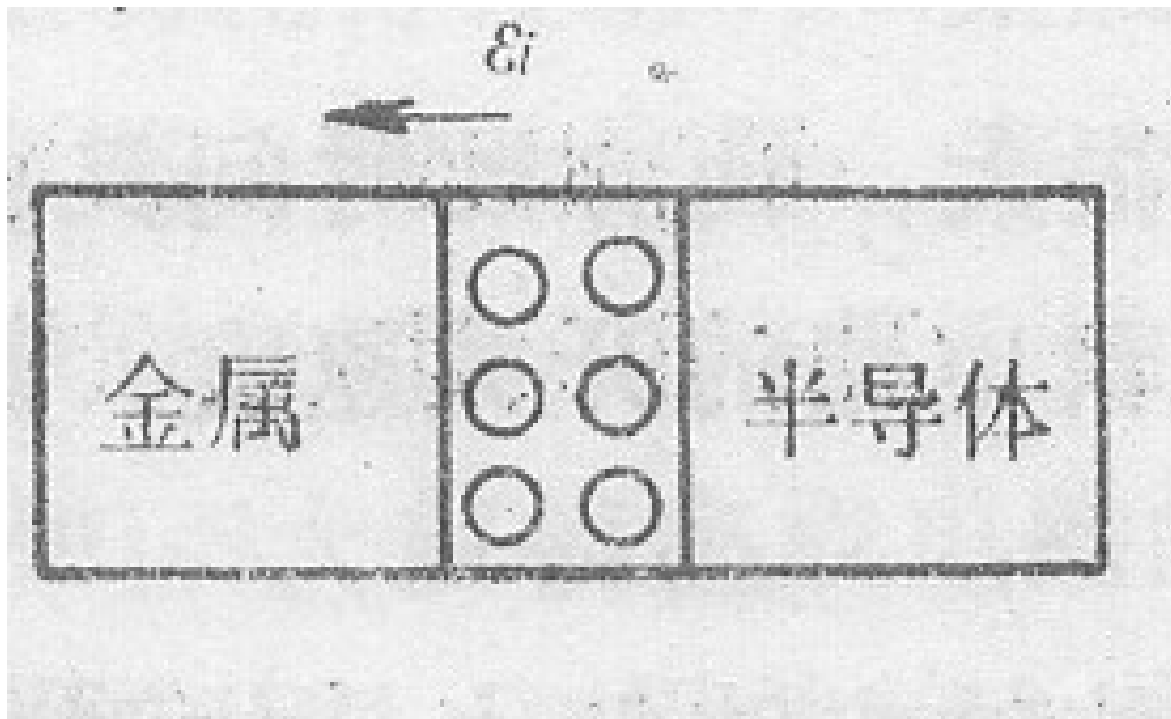
# 金属和半导体的接触

- 金属和半导体的接触



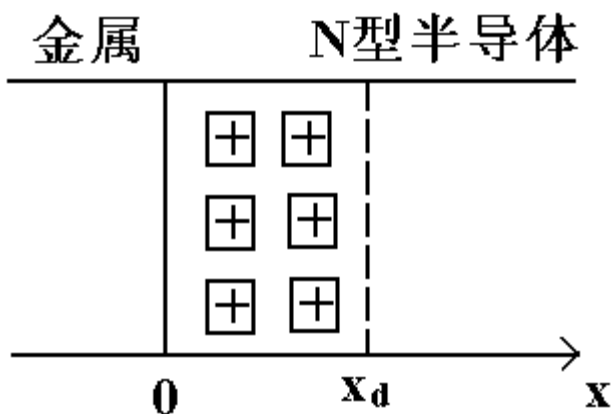
# 整流理论

- 金属和N型半导体的接触

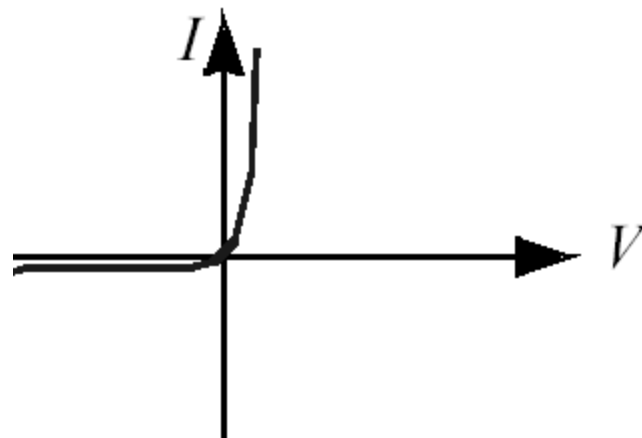


# 扩散理论

- 对于N型阻挡层，当势垒的宽度比电子的平均自由程大地多时，电子通过势垒区要发生多次碰撞，这样的阻挡层称为厚阻挡层。
- 扩散理论适用于厚阻挡



$$J = J_{drift} + J_{diff}$$



# 肖特基势垒二极管与二极管的比较

- 相同点

- 单向导电性

- 不同点

- 正向导通时，pn结正向电流由少数载流子的扩散运动形成，而肖特基势垒二极管的正向电流由半导体的多数载流子发生漂移运动直接进入金属形成，因此后者比前者具有更好的高频特性
- 肖特基势垒二极管的势垒区只存在于半导体一侧
- 肖特基势垒二极管具有较低的导通电压，一般为0.3V，pn结一般为0.7V



# 欧姆接触

## ■ 欧姆接触

- 不产生明显的附加阻抗，而且不会使半导体内部的平衡载流子浓度发生显著的改变，为非整流接触
- 若  $W_m < W_s$ ，金属和n型半导体接触可形成反阻挡层； $W_m > W_s$  时，金属和p型半导体接触也能形成反阻挡层，反阻挡层没有整流作用，可实现欧姆接触
- 实际生产中利用隧道效应的原理，把半导体一侧重掺杂形成金属—n+n或金属—p+p结构，从而得到理想的欧姆接触



# 半导体物理学

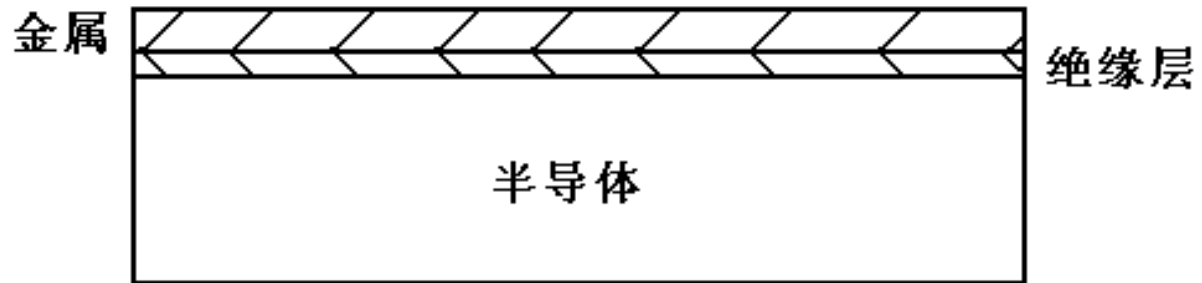
---

- ✓ 半导体中的电子状态
- ✓ 半导体中杂质和缺陷能级
- ✓ 半导体中载流子的统计分布
- ✓ 半导体的导电性
- ✓ 非平衡载流子
- ✓ pn结
- ✓ 金属和半导体的接触
- ✓ 半导体表面与MIS结构

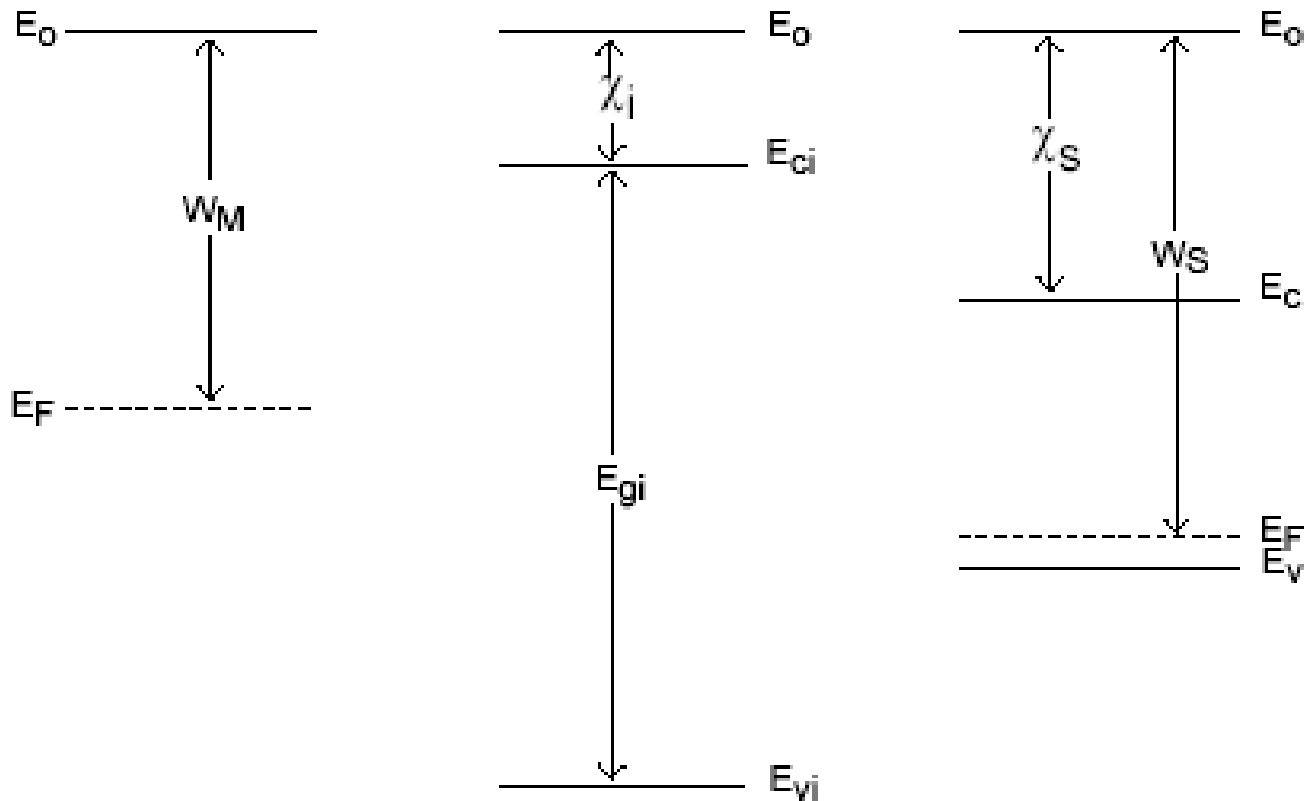


# MIS结构

---



# 能带图

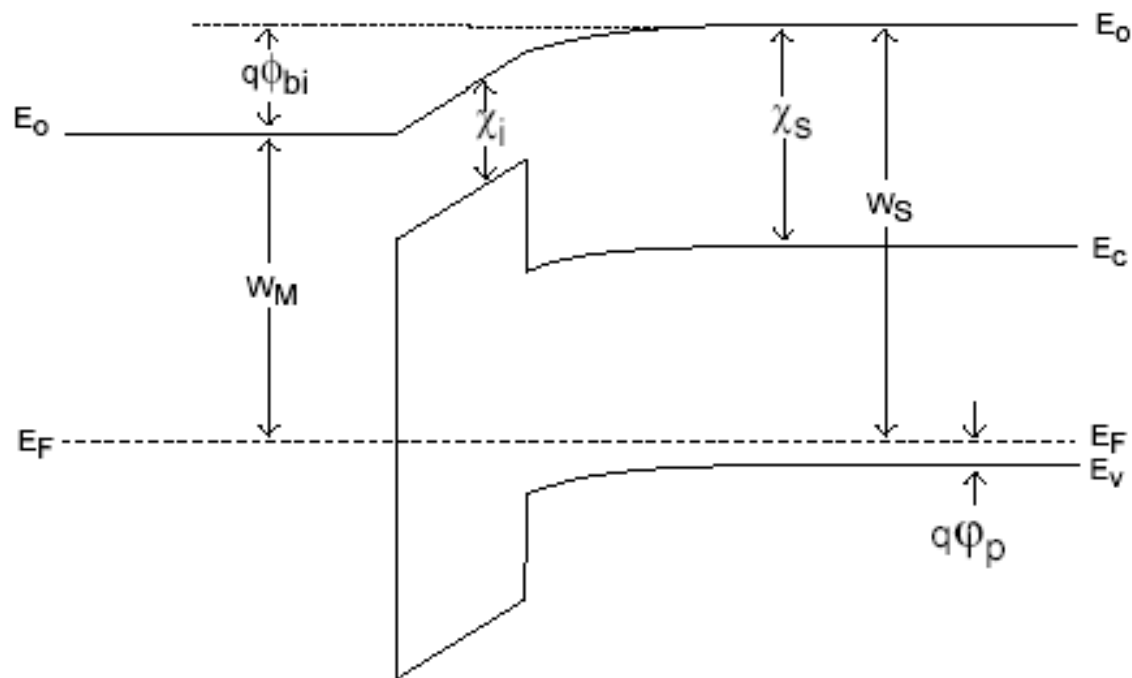


a) metal, insulator and semiconductor far apart



# 能带图-1

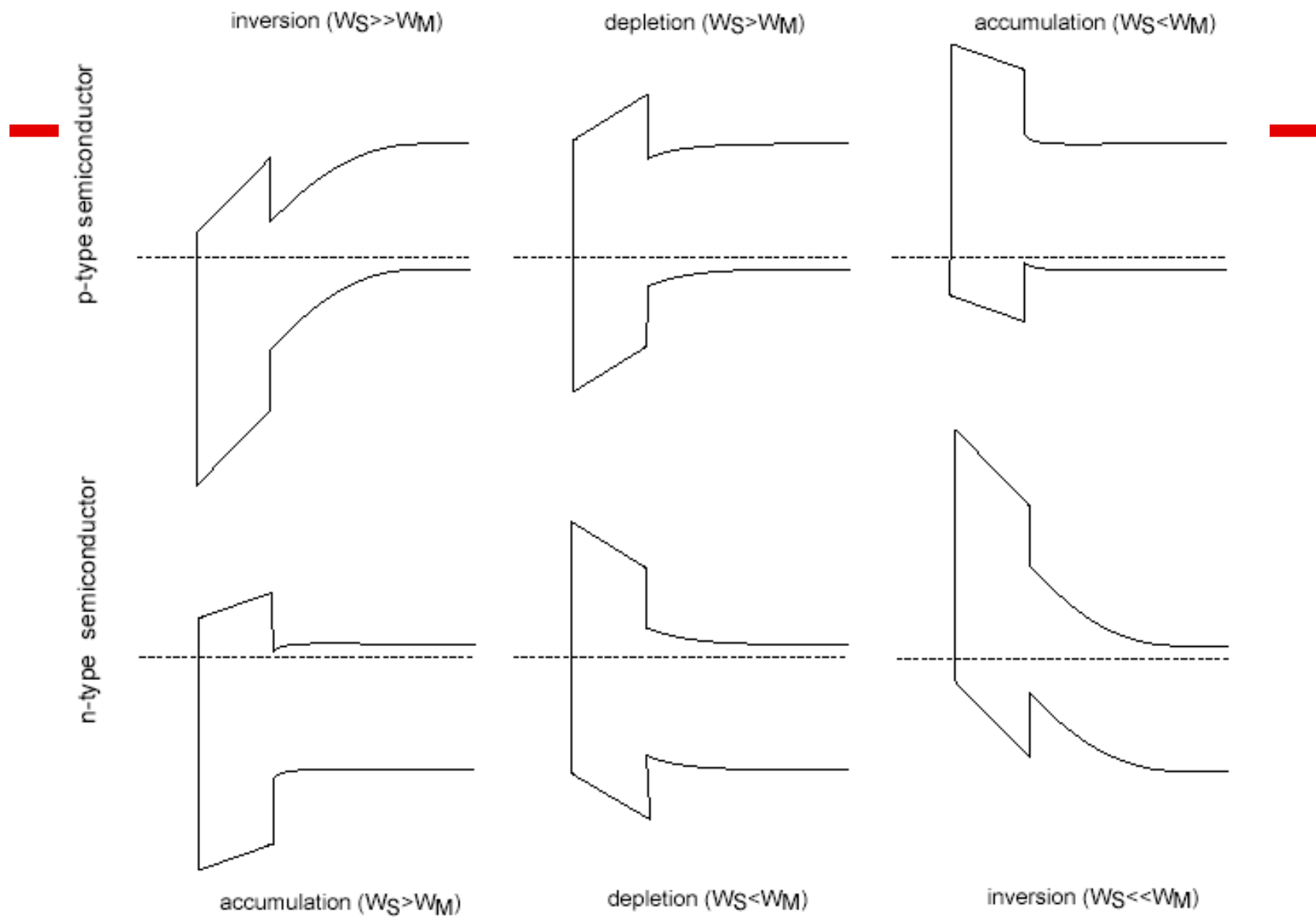
无偏压时MOS  
结构中由于功  
函数差引起的  
表面能带弯曲



b) metal, insulator and semiconductor in intimate contact

$$q\phi_{bi} = W_S - W_M$$

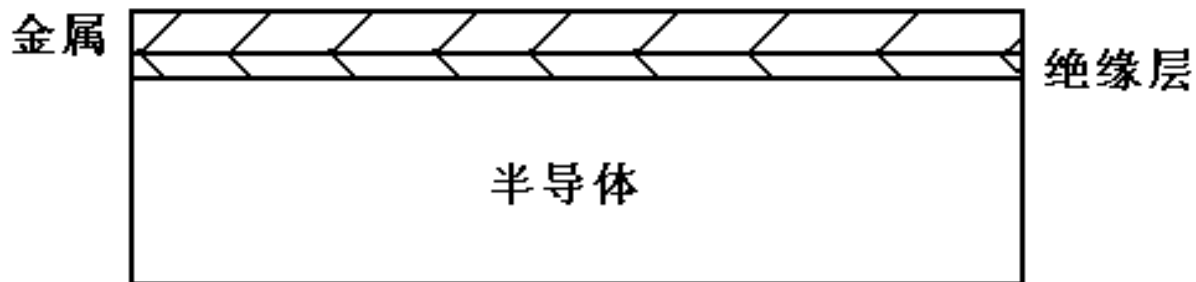




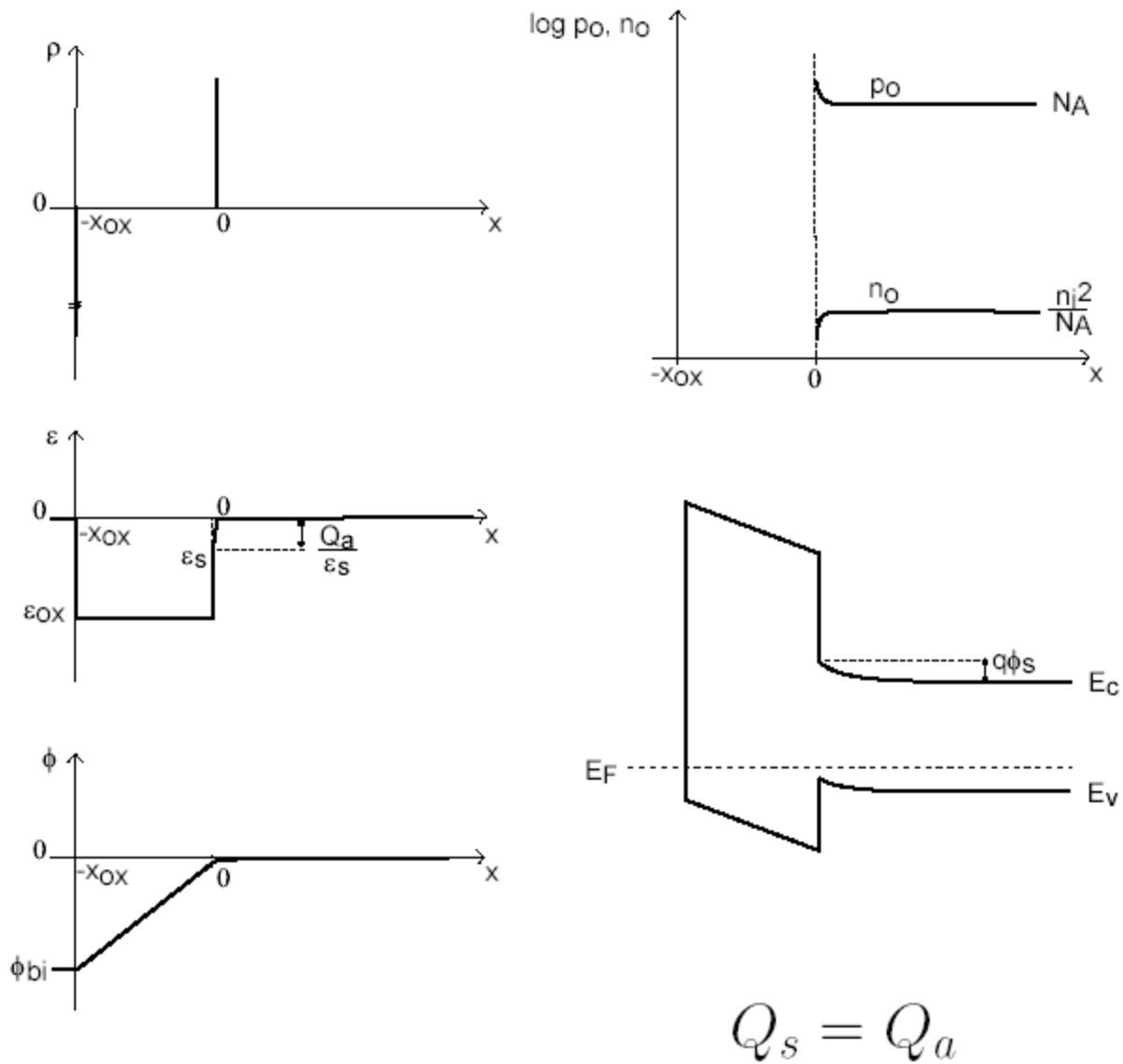
# MIS结构

- 理想情况

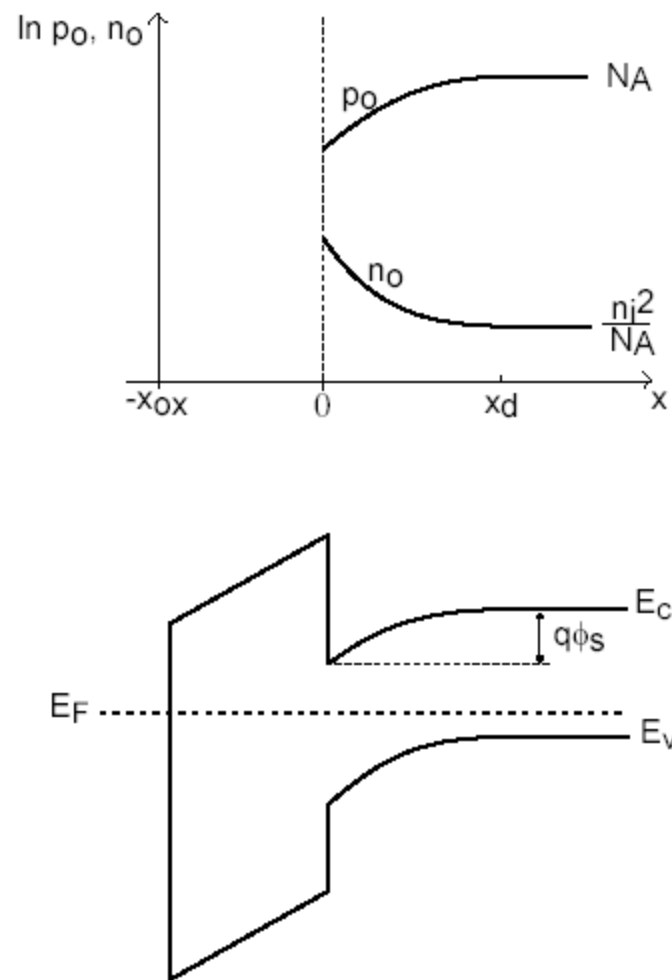
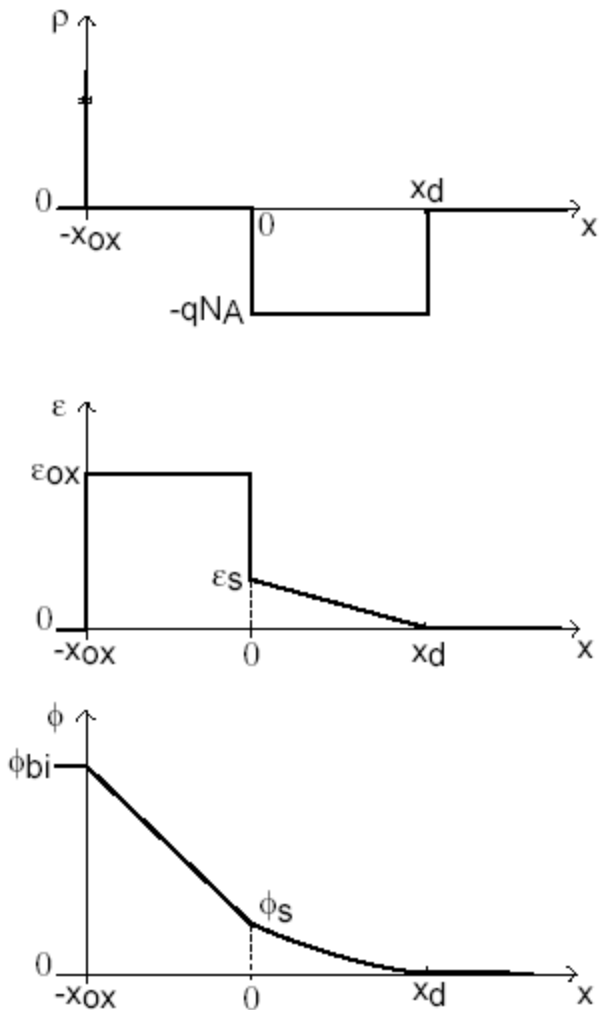
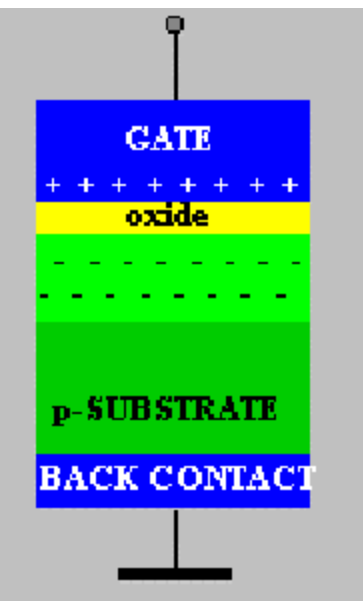
- 金属与半导体间功函数差为零
- 绝缘层内没有任何电荷且绝缘层完全不导电
- 绝缘体与半导体界面处不存在任何界面态



# ■ 积累



# 耗尽



# 耗尽-1

$$\rho(x) = q(p - n - N_a^-) = -qN_a$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s} = \frac{qN_a}{\epsilon_s}; \quad \epsilon(x) = -\frac{d\phi(x)}{dx}$$

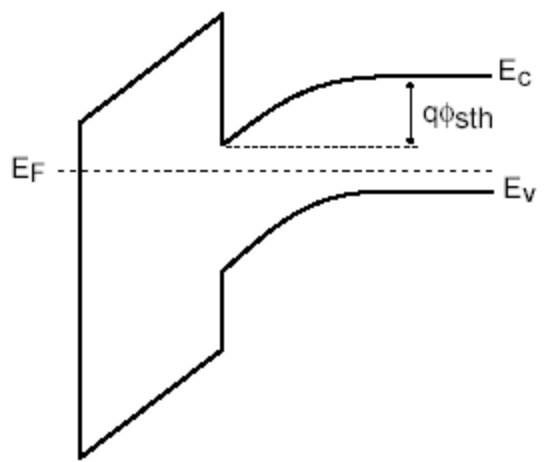
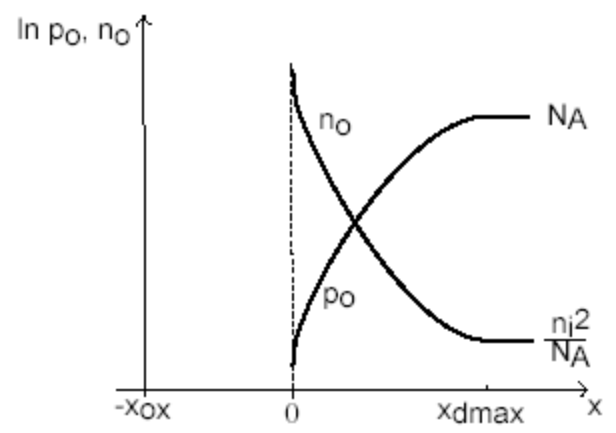
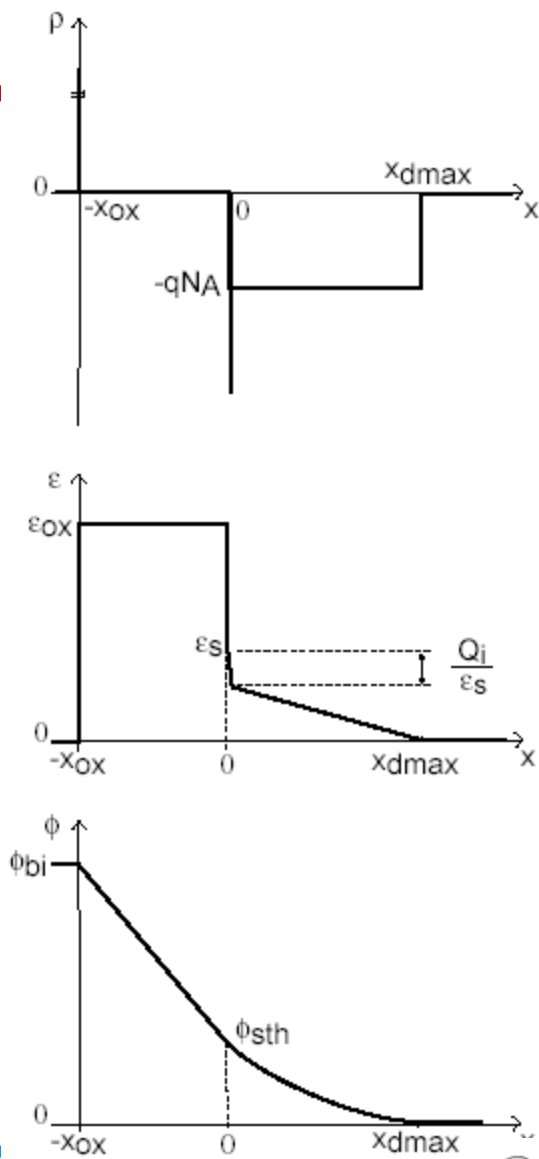
$$\epsilon(x=W) = 0; \quad \phi(x=W) = 0 \quad (\text{边界条件})$$

$$\phi(x) = \frac{qN_a(W-x)^2}{2\epsilon_s}; \quad \epsilon(x) = \frac{qN_a(W-x)}{\epsilon_s}$$

$$\phi_s = \phi(x=0) = \frac{qN_a W^2}{2\epsilon_s} \quad W = \left[ \frac{2\epsilon_s \phi_s}{qN_a} \right]^{1/2}$$



# 反型



$$Q_s = Q_d + Q_i$$



# 反型-1

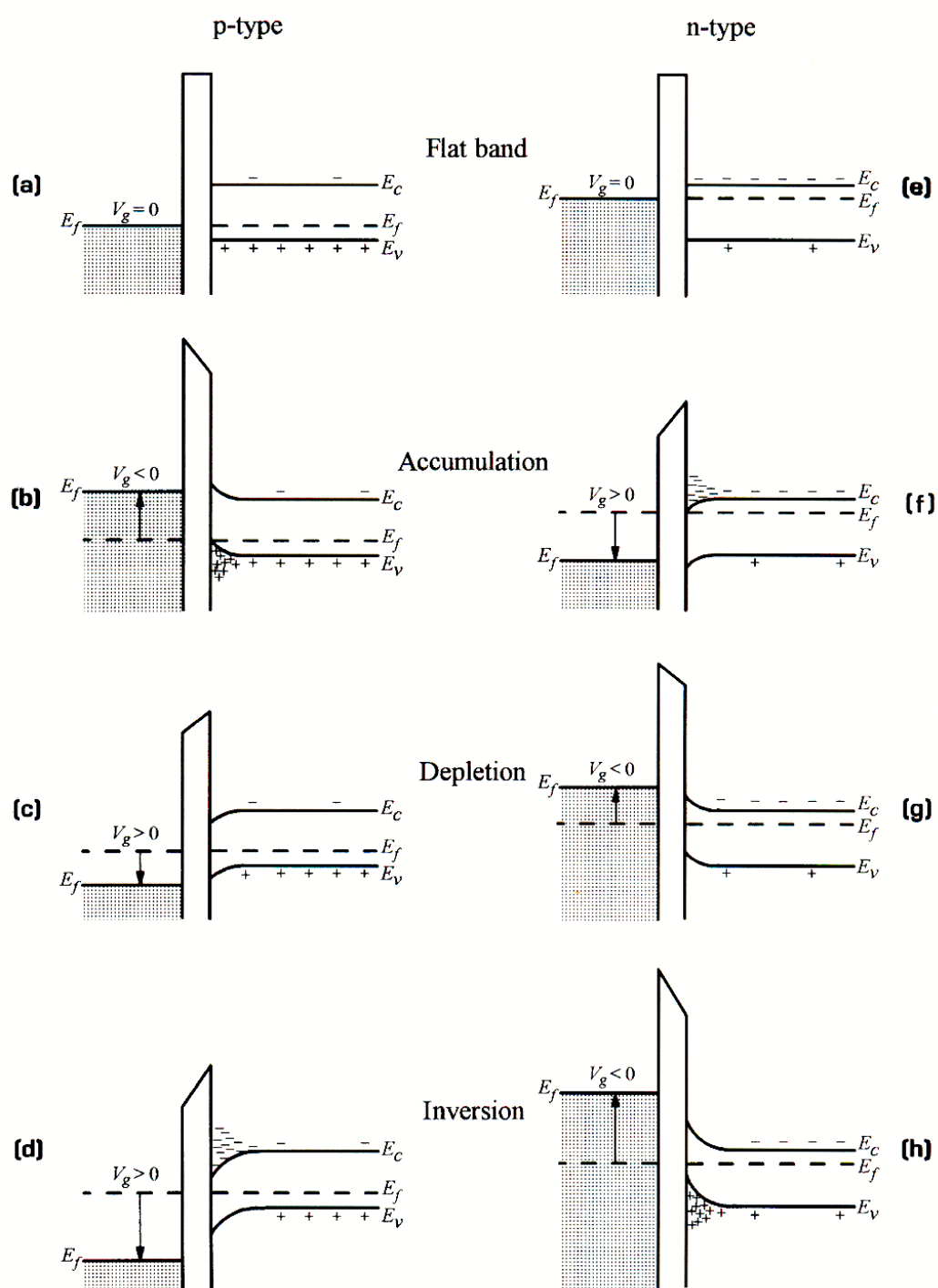
---

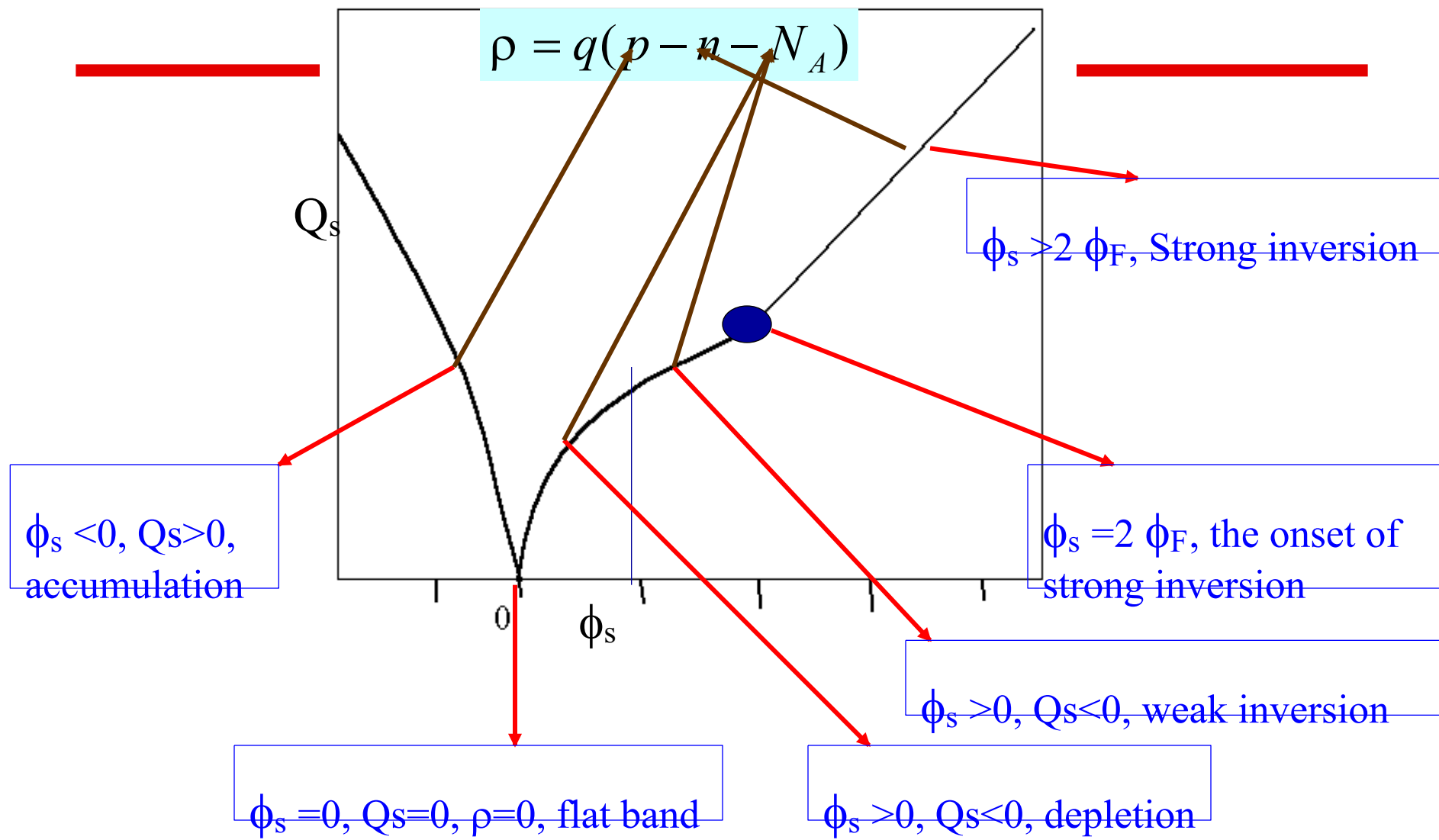
- 耗尽层电荷:  $Q_d = -qN_Ax_d \simeq -\sqrt{2\epsilon_s q N_A \phi_s}$

$$x_d \simeq x_{dmax} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \phi_{sth}}{qN_A}}$$

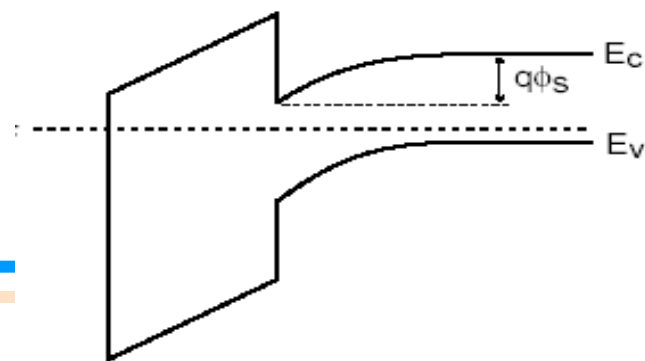
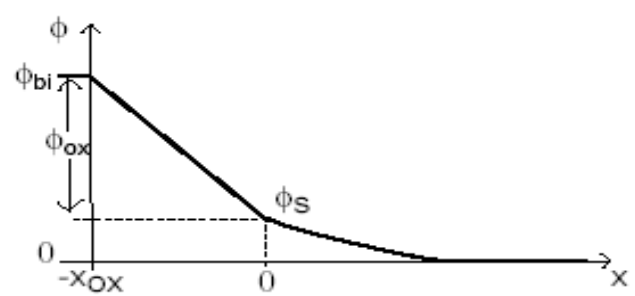
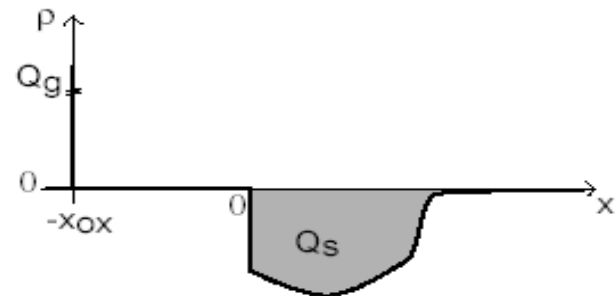
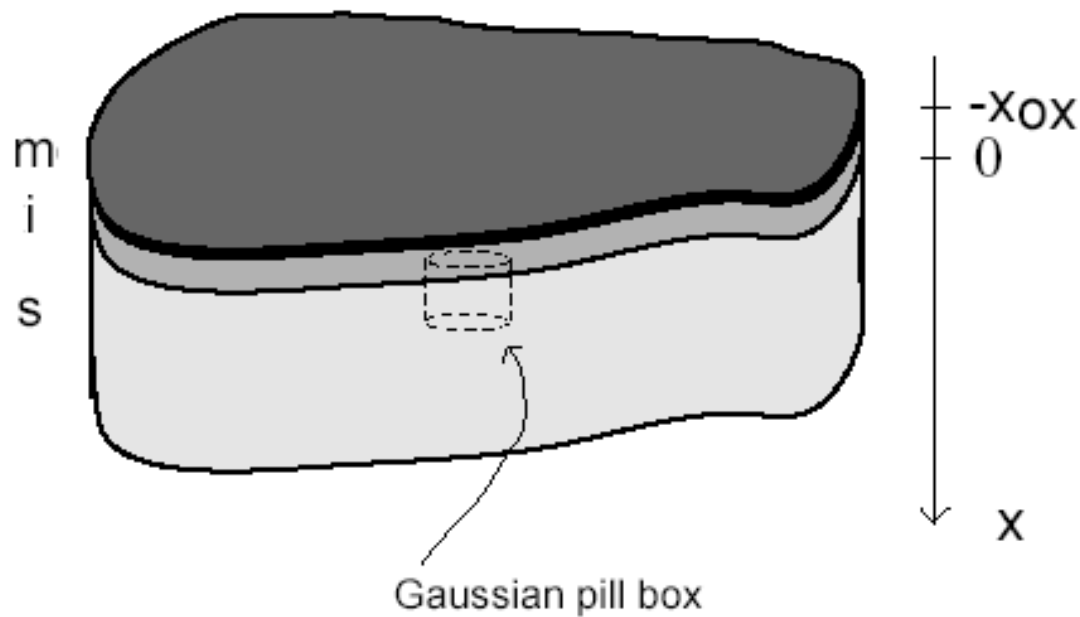


# 外加偏置





# MIS结构的基本公式



# MOS结构的基本公式-1

$$Q_g = -Q_s$$

✓ 总电势差:

$$\phi_{bi} = \phi_s + \phi_{ox}$$

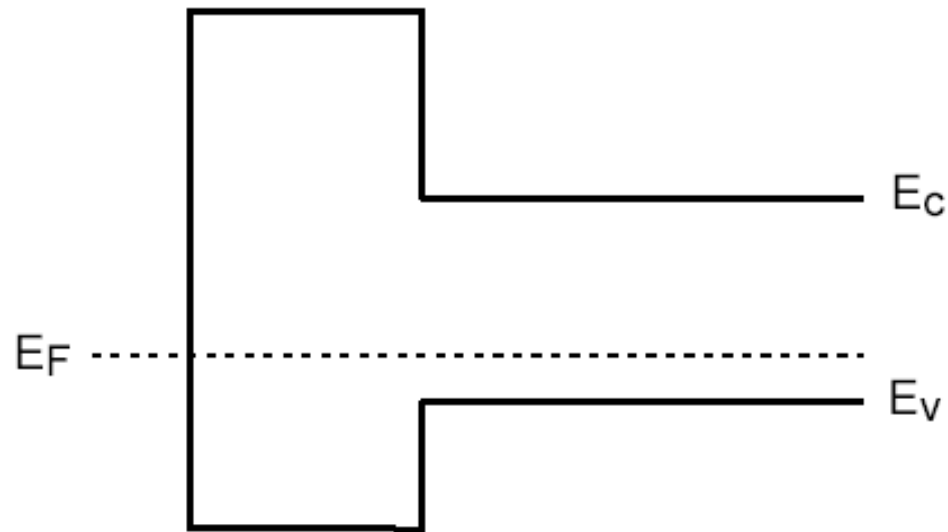
$$\mathcal{E}_{ox} = -\frac{Q_s}{\epsilon_{ox}} \quad \mathcal{E}_s = -\frac{Q_s}{\epsilon_s}$$

$$\phi_{ox} = x_{ox} \mathcal{E}_{ox}$$

$$\phi_{bi} = \phi_s - \frac{Q_s}{C_{ox}}$$



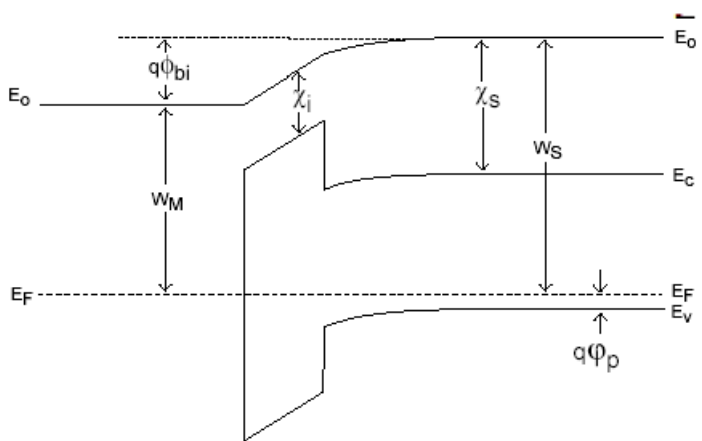
# 平带



$$\phi_{bi} = 0 \Rightarrow Q_s = 0, \mathcal{E}_s = 0, \mathcal{E}_{ox} = 0, \phi_s = 0$$

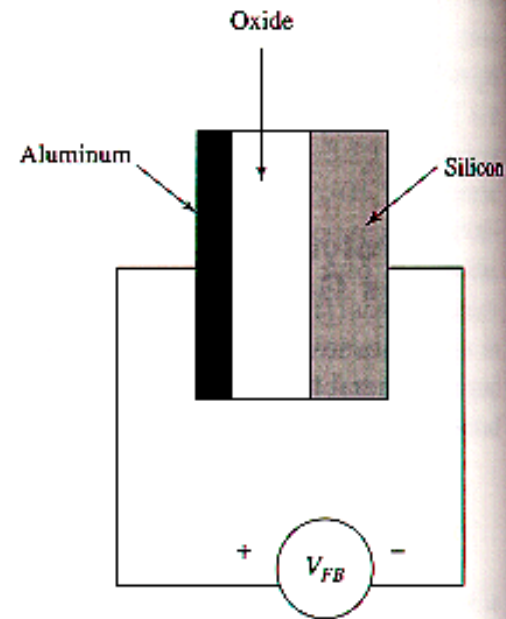
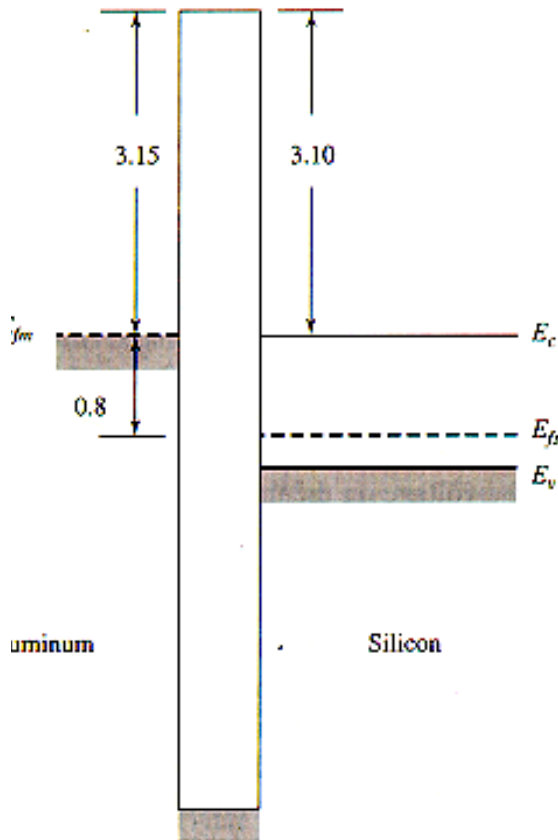


# Flat Band Voltage



b) metal, insulator and semiconductor in intimate contact

$$q\phi_{bi} = W_S - W_M$$

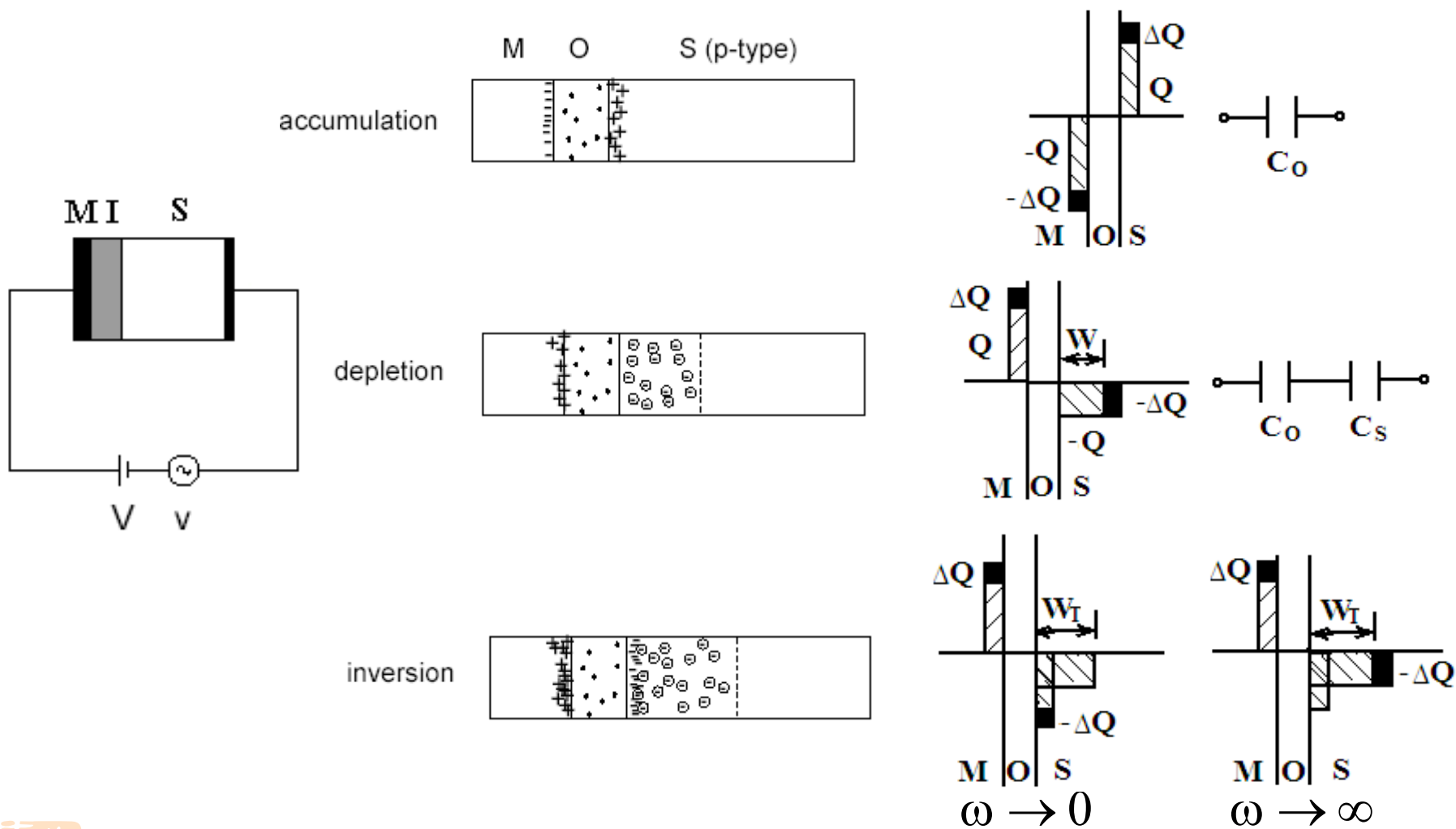


$V_{FB} = -0.8V$  for this MOS system

$$V_{FB} = \Phi_M - \Phi_S = \Phi_{MS}$$



# MIS电容

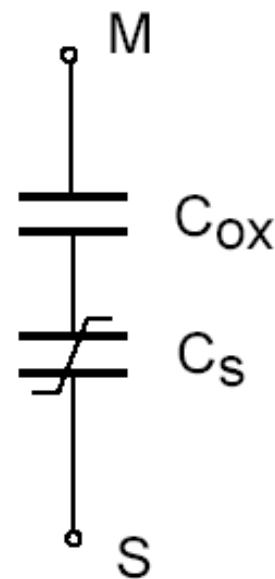


# MIS电容

- 电容的定义:  $C = \frac{dQ_g}{dV} = -\frac{dQ_s}{dV}$

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_s}}$$

$$C_s = -\frac{dQ_s}{d\phi_s}$$



# MIS电容-2

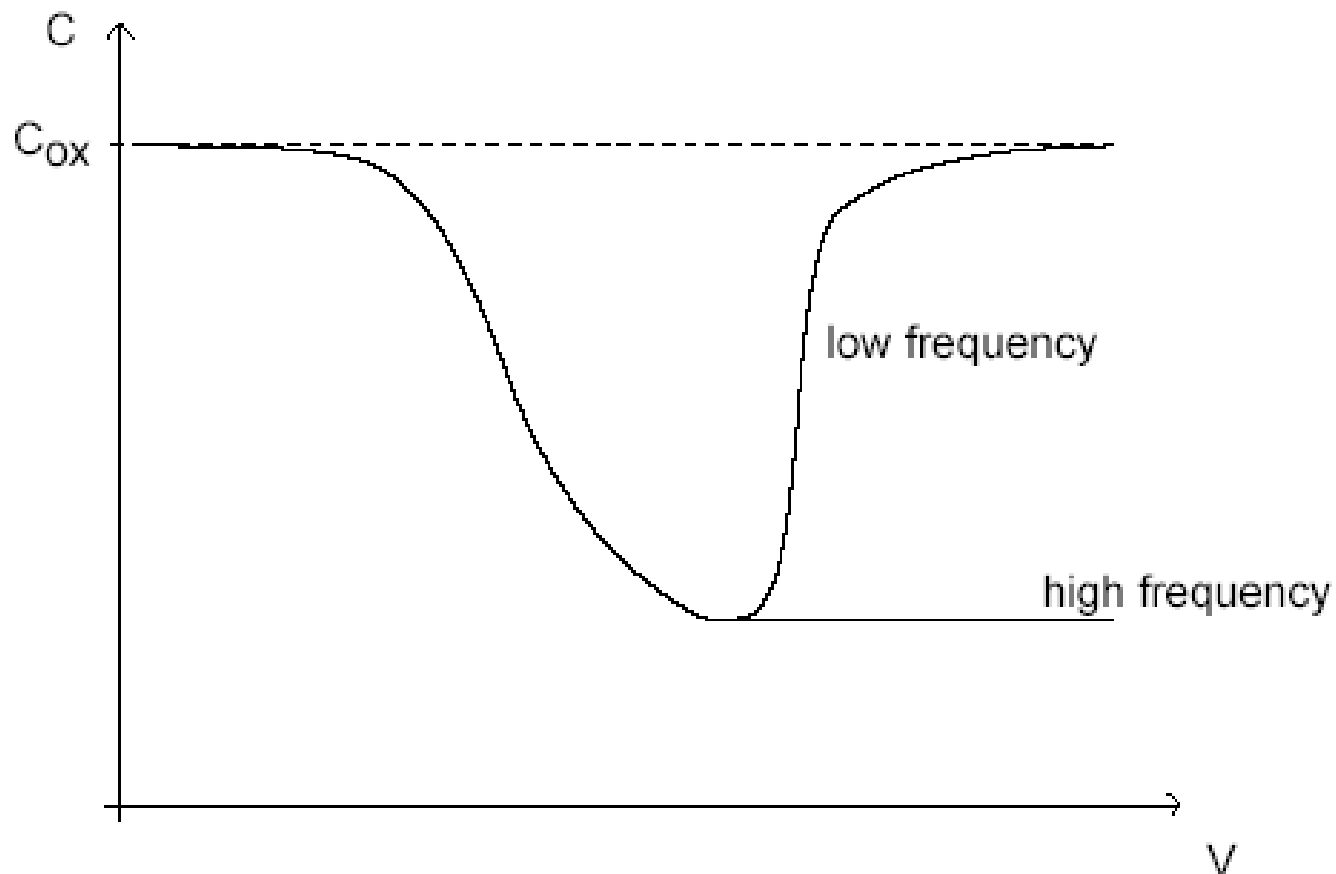
- 积累态: 
$$C \approx C_o = \frac{K_o \epsilon_0 A_G}{x_0}$$

- 耗尽态: 
$$C = \frac{C_o C_s}{C_o + C_s} = \frac{C_o}{1 + \frac{K_o W}{K_s x_0}}$$

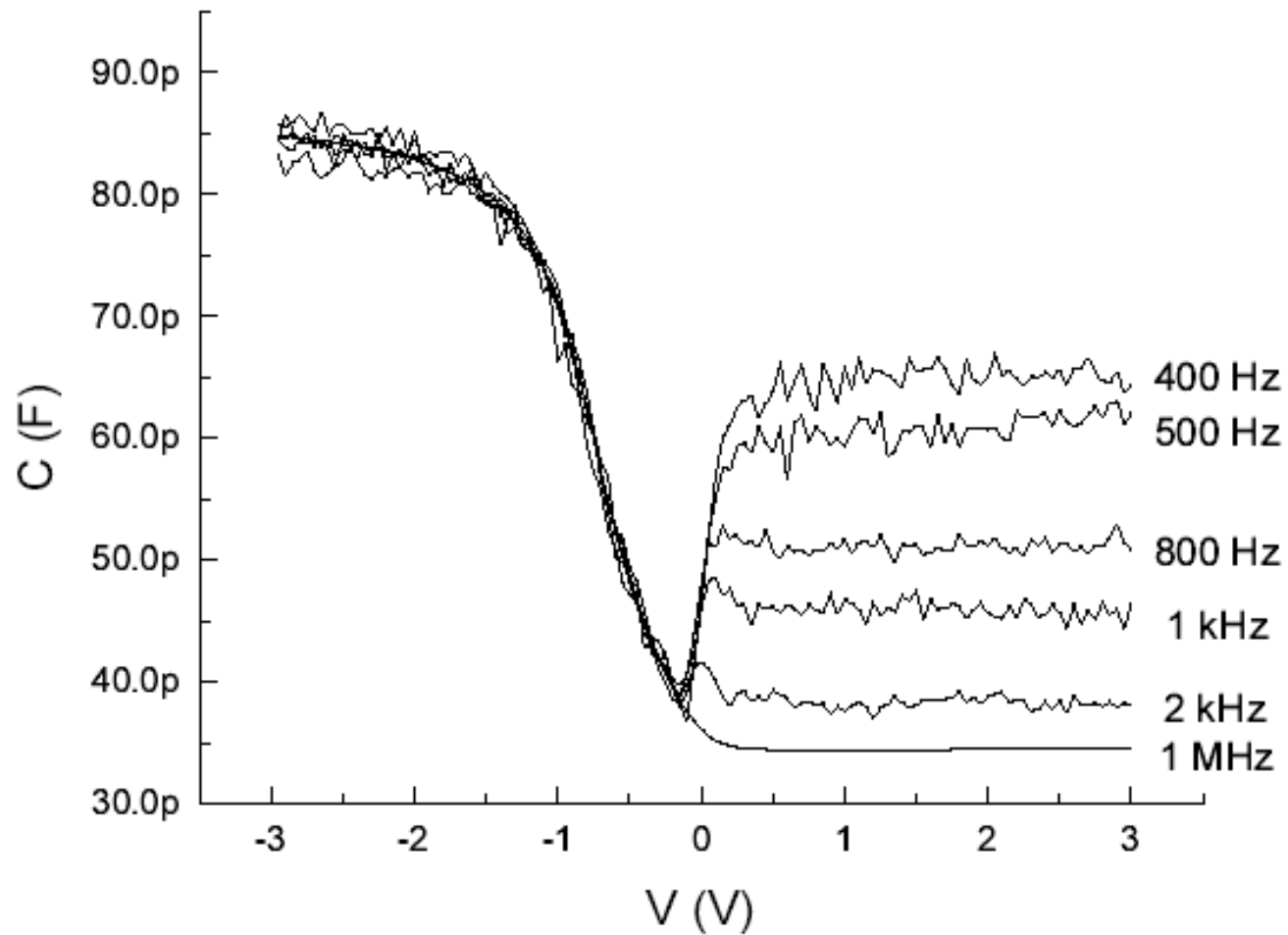


# MIS电容-3

- 反型



# 实验结果



# 深耗尽

- 从耗尽扫描到反型时 需要少子

