



西安交通大学  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

# 半导体物理与器件

**任课教师: 赵小龙**  
**电信学部微电子学院**  
**zhaoxiaolong@xjtu.edu.cn**

# 目录

---

- 前沿——课程信息

## 第一部分：半导体物理

- 第一章 半导体中的电子状态
- 第二章 半导体中载流子的统计分布
- 第三章 半导体的导电性
- 第四章 非平衡载流子
- **第五章 金属和半导体的接触**

## 第二部分：p-n结

## 第三部分：双极晶体管

## 第四部分：金属-氧化物-半导体场效应晶体管

# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.1金属半导体接触及其能带图

**金半接触(金属半导体接触)**也是半导体器件中重要的界面。由于半导体自身材料导电类型及掺杂浓度等具体情况不同,可以形成整流接触及欧姆接触

整流接触: 肖特基势垒二极管用于高速电路及微波技术领域

欧姆接触: 用于半导体电极、集成电路电极制作

# 第五章 金属和半导体的接触

- 5.1 金属半导体接触及其能带图

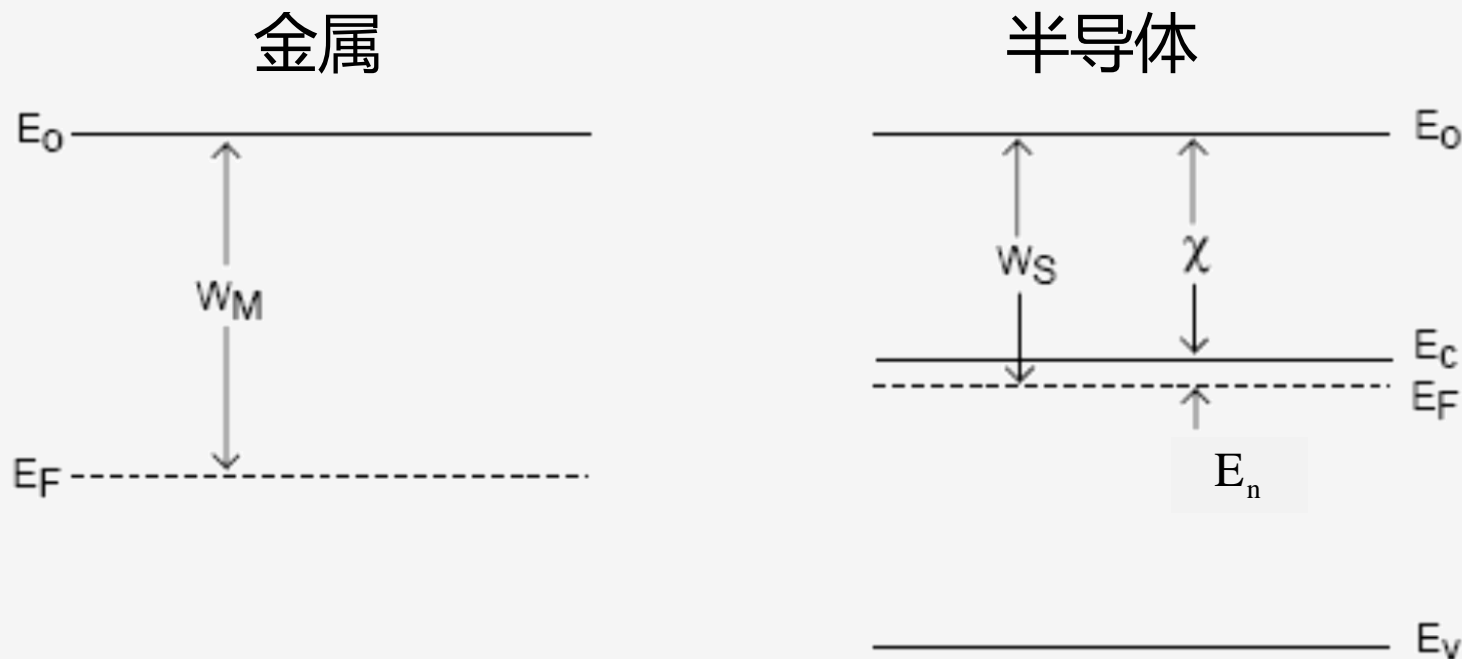
- 5.1.1 金属、半导体功函数

- ◆ 真空中静止电子的能级：真空中静止电子所具有的能量 $E_0$
- ◆ 金属功函数：金属中的电子从金属中逸出成为真空自由电子所需要的最低能量

# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.1 金属半导体接触及其能带图

### 5.1.1 金属、半导体功函数



# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.1 金属半导体接触及其能带图

### 5.1.1 金属、半导体功函数

◆ 金属的功函数：真空能级与金属材料的费米能级之差；

$$W_m = E_0 - (E_F)_m$$

金属功函数约为几个eV，例如铯：1.93eV，铂：5.36eV

◆ 半导体的功函数：真空能级与半导体的费米能级之差

$$W_s = E_0 - (E_F)_s = \chi + E_n$$

◆ 电子亲和能  $\chi$ ：导带底  $E_c$  到真空能级的能量间隔；

$$\chi = E_0 - E_c$$

# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.1金属半导体接触及其能带图

### 5.1.1 金属、半导体功函数

半导体的功函数随着半导体的导电类型及掺杂浓度而变

1.已知掺杂浓度 $N_D$ ,全部电离, 半导体材料的亲合能  $\chi$  求半导体的功函数 $W_s$

$$W_s = \chi + E_n \quad E_n = E_c - E_F \quad N_D = n_0 = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{k_0 T}\right)$$

2.已知掺杂浓度 $N_A$ ,全部电离, 半导体材料的亲合能  $\chi$  求半导体的功函数 $W_s$

$$W_s = \chi + E_n \quad E_n = E_g - (E_F - E_v) \quad N_A = p_0 = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{k_0 T}\right)$$

# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.1金属半导体接触及其能带图

### 5.1.2 接触势垒的形成及能带图

分4 种情况:

金属与n型半导体:  $W_m > W_s$

$$W_m < W_s$$

金属与p型半导体:  $W_m > W_s$

$$W_m < W_s$$

形成不同的接触，界面处具有不同的能带弯曲，具有不同的能带图，因此金属半导体接触的导电特性不一样。可以分为**阻挡层**及**反阻挡层**。

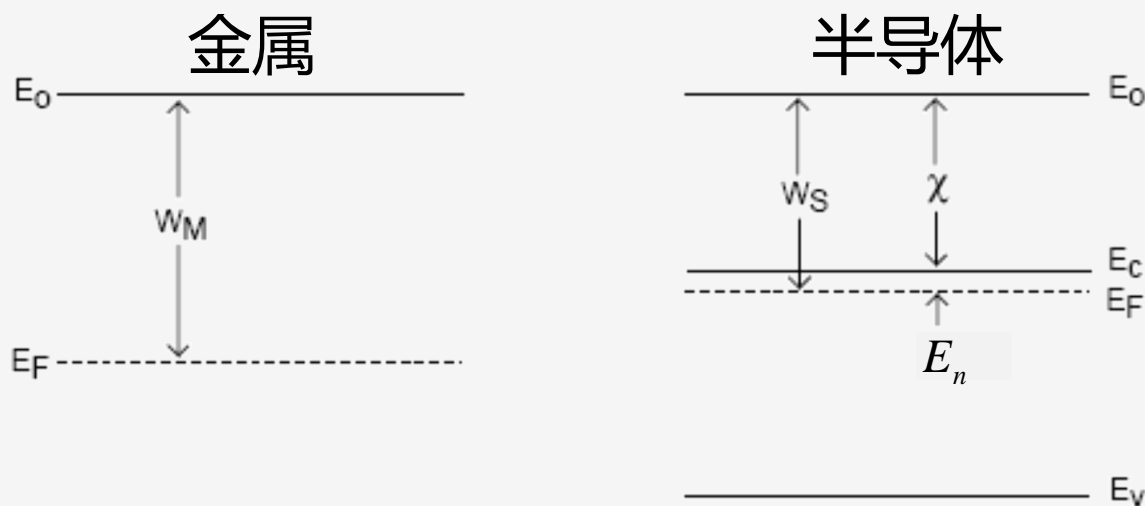


# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.1 金属半导体接触及其能带图

### 5.1.2 接触势垒的形成及能带图

#### 1. 金属与n型半导体接触，且 $W_m > W_s$ , 电子阻挡层



电子流向金属，半导体一侧展开空间电荷区，电离施主构成，构成内建电场，阻止电子的流动

# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.1 金属半导体接触及其能带图

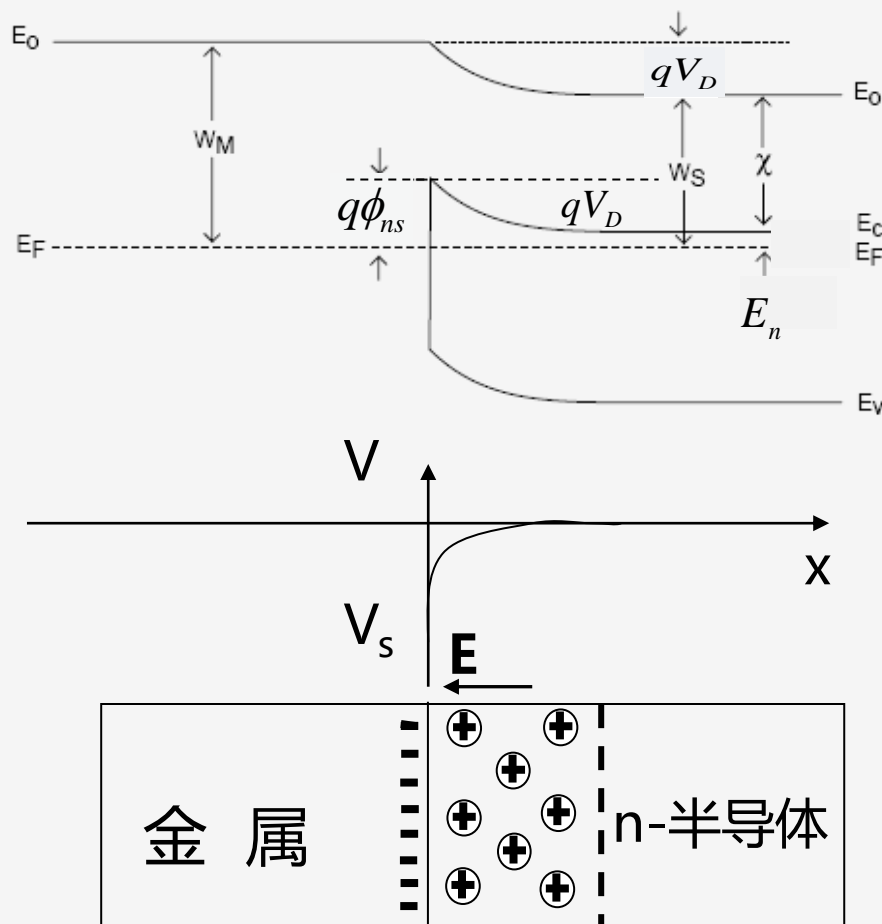
### 5.1.2 接触势垒的形成及能带图

半导体中电子的势垒高度：

$$qV_D = (E_F)_s - (E_F)_m = W_m - W_s$$

金属一侧电子势垒高度（肖特基势垒高度）：

$$\begin{aligned} q\phi_{ns} &= qV_D + E_n \\ &= W_m - \chi \end{aligned}$$



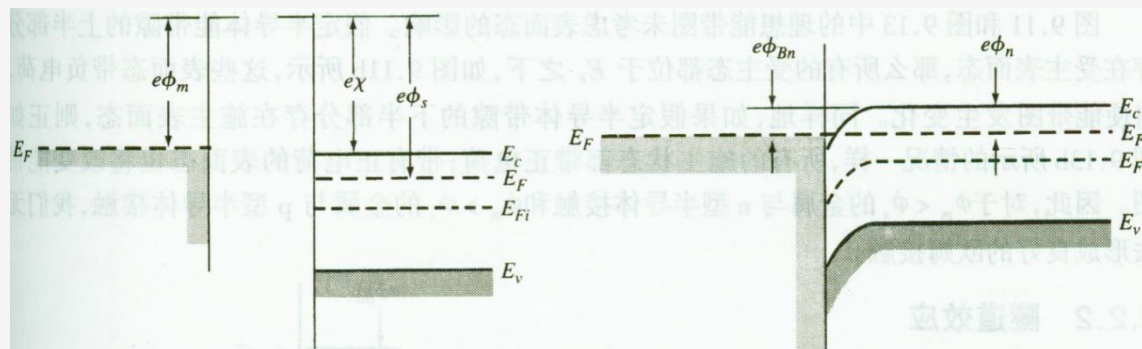
# 第五章 金属和半导体的接触

## 5.1 金属半导体接触及其能带图

### 5.1.2 接触势垒的形成及能带图

#### 2. 金属-n型接触

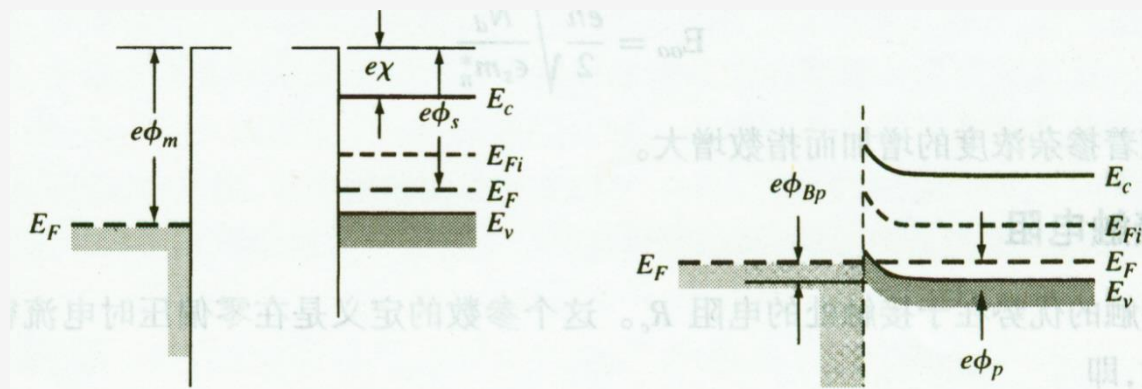
$$W_m < W_s$$



表面电子积累 - - 高导电层，欧姆接触，**电子反阻挡层**

#### 3. 金属-p型接触

$$W_m > W_s$$



表面空穴积累 - - 高电导层，欧姆接触，**空穴反阻挡层**

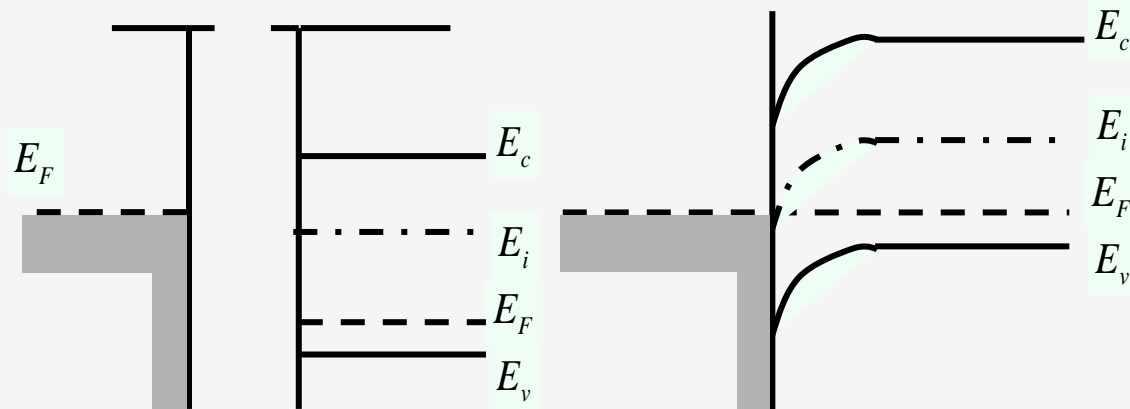
# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.1 金属半导体接触及其能带图

### 5.1.2 接触势垒的形成及能带图

#### 4. 金属-p型接触

$$W_m < W_s$$



表面空穴耗尽 - - 电离受主产生内建电势, **空穴阻挡层**

# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.1金属半导体接触及其能带图

### 5.1.3 表面态对接触势垒的影响

#### 1.实验现象 $q\phi_{ns} = W_m - \chi$

$q\phi_{ns}$ 应该随 $W_m$ 变化, 然而实际测量结果为:

半导体	金属	$\phi_{ns} (V)$	半导体	金属	$\phi_{ns} (V)$
$n-Ge$	$Au$ (4.8)	0.45	$n-GaAs$	$Au$ (4.8)	0.95
	$Al$ (4.25)	0.48		$Ag$ (4.4)	0.93
	$W$ (4.5)	0.48		$Al$ (4.25)	0.80
$n-Si$	$Au$ (4.8)	0.79		$W$ (4.5)	0.71
	$W$ (4.5)	0.67		$Pt$ (5.4)	0.94

大量测量表明: 不同金属即使功函数相差很大, 金属与半导体材料的接触势垒高度差别比理论预期的少得多, 即功函数对势垒高度影响不大

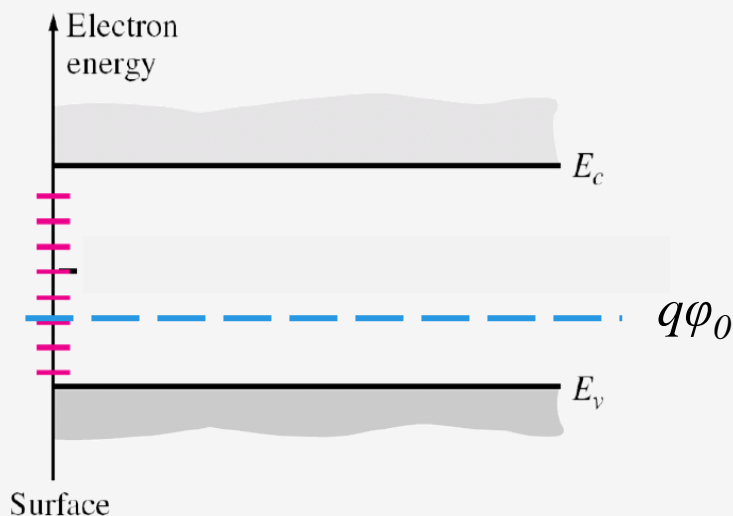
# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.1 金属半导体接触及其能带图

### 5.1.2 接触势垒的形成及能带图

2.实验解释：由于半导体表面存在表面态

**表面能级：**在半导体表面处禁带中存在表面态，对应的能级为表面能级



# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.1 金属半导体接触及其能带图

### 5.1.2 接触势垒的形成及能带图

- 1) **施主型**: 能级被电子占据呈电中性, 释放电子带正电
- 2) **受主型**: 能级被空穴占据 (不被电子占据) 呈电中性, 释放空穴 (接受电子) 带负电
- 3) 能级  $q\phi_0$ : 存在一个距价带顶  $q\phi_0$  的能级,  
特点: a) 电子正好填满  $q\phi_0$  以下的能级表面电中性  
b)  $q\phi_0$  以下的能级空时, 表面带正电 - - 施主型  
c) 电子填充  $q\phi_0$  以上的能级, 表面带负电 - - 受主型
- 4)  $q\phi_0$  约为禁带宽度的  $1/3$

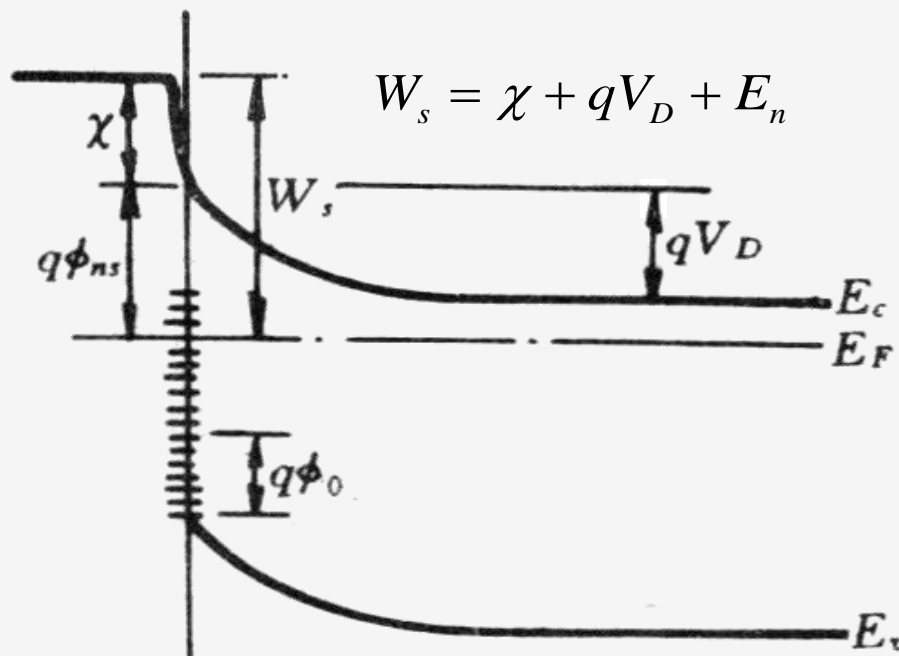
# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.1 金属半导体接触及其能带图

### 5.1.2 接触势垒的形成及能带图

#### 表面态对n型半导体的影响

对于n型半导体，费米能级高于 $q\phi_0$ ，则费米能级与 $q\phi_0$ 之间的受主能级被电子填充，**受主型表面态带负电**，则表面带负电，为了维持电中性，在表面附近出现**正电荷**，由**电离施主提供**，电子耗尽，形成电子的势垒，表面功函数增加。



即使n型半导体与金属不接触，由于表面态的作用也会形成电子势垒！



# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.1 金属半导体接触及其能带图

### 5.1.2 接触势垒的形成及能带图

#### 势垒高度表面态钉扎

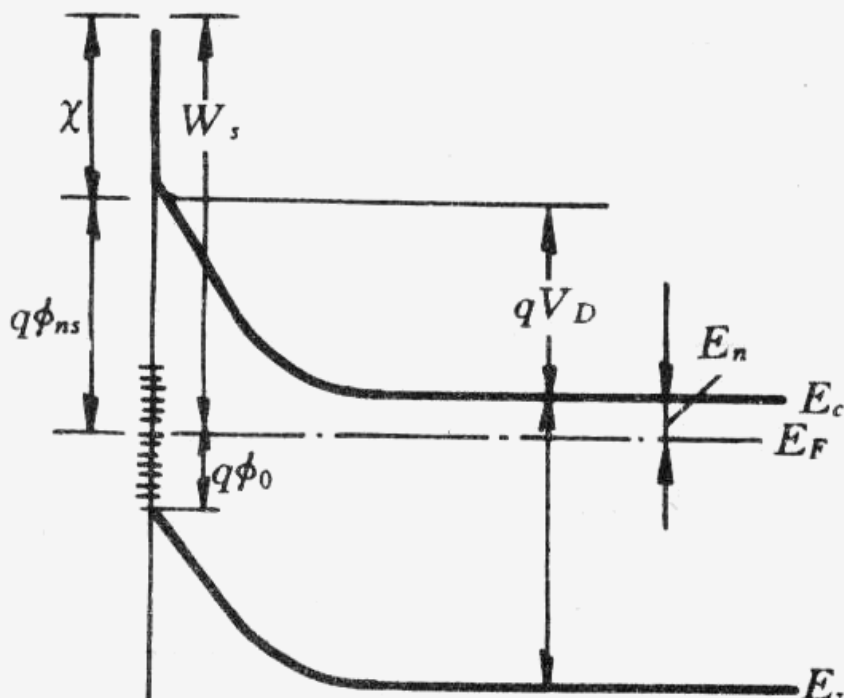
若表面态密度很大，表面处费米能级( $E_f$ )<sub>s</sub>接近 $q\phi_0$ ，称为势垒高度被高表面态密度钉扎 (pinned)，半导体表面功函数增加为：

$$W_s = \chi + \boxed{E_g - q\phi_0} \text{ (钉扎)}$$

$$W_s = \chi + qV_D + E_n$$

$$qV_D = E_g - q\phi_0 - E_n$$

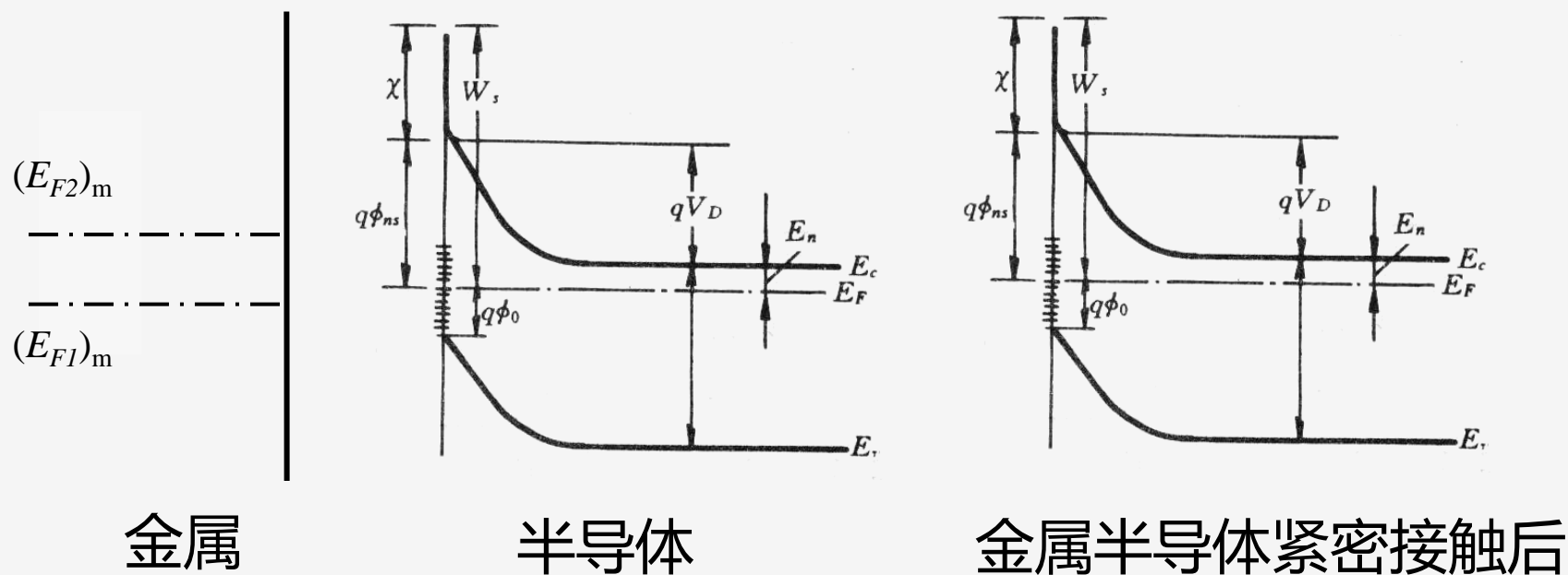
表面态很高时，半导体表面的功函数与施主浓度无关



# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.1 金属半导体接触及其能带图

### 5.1.2 接触势垒的形成及能带图



半导体内的势垒高度和金属的功函数几乎无关，而基本上由半导体的表面性质决定。

# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.1 金属半导体接触及其能带图

### 5.1.2 接触势垒的形成及能带图

- ◆ 当半导体表面态密度很高时，它可以屏蔽金属接触的影响，使半导体内的势垒高度和金属的功函数几乎无关，而基本上由半导体的表面性质决定。极端情况下，接触电势差全部降落在两个表面之间，半导体表面势垒没有变化。
- ◆ 一般情况下，由于表面态密度不同，紧密接触时，接触电势差有一部分降落在半导体表面以内，半导体表面势垒会受到一定的影响，即：金属功函数会有一些影响，但影响不大。
- ◆ 即使  $W_m < W_s$  也可以形成电子势垒

金属与n型半导体接触时，由于高表面态的影响，形成电子势垒，即n型阻挡层。金属与p型半导体接触后，考虑表面态的影响，情况会如何？

# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.1 金属半导体接触及其能带图

### 表面态对p型半导体的影响

- ◆ 对于p型半导体，费米能级低于 $q\phi_0$ ，则费米能级与 $q\phi_0$ 之间的施主能级不被电子填充，施主型表面态带正电，表面带正电，为了维持电中性，在表面附近出现负电荷，由电离受主提供，空穴耗尽，形成空穴的势垒。
- ◆ 即使p型半导体与金属不接触，由于表面态的作用也会形成空穴势垒

# 第五章 金属和半导体的接触

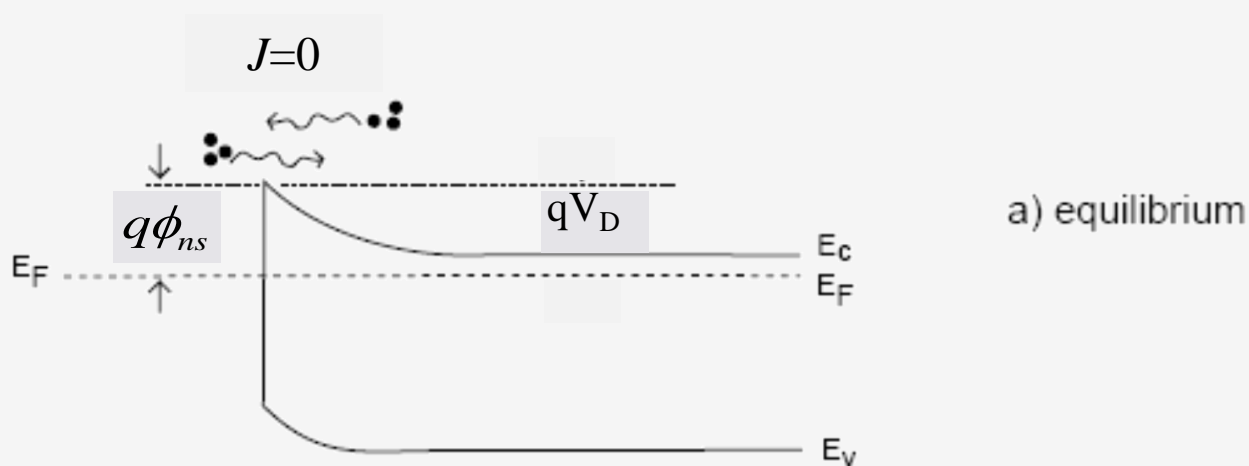
## • 5.2金半接触整流理论

### 5.2.1 定性分析

#### 1.金属和n型半导体的阻挡层接触

##### a. 不加电压, $V=0$ , 平衡态

从金属一侧到半导体的电子电流 = 半导体到金属的电子电流,  
动态平衡

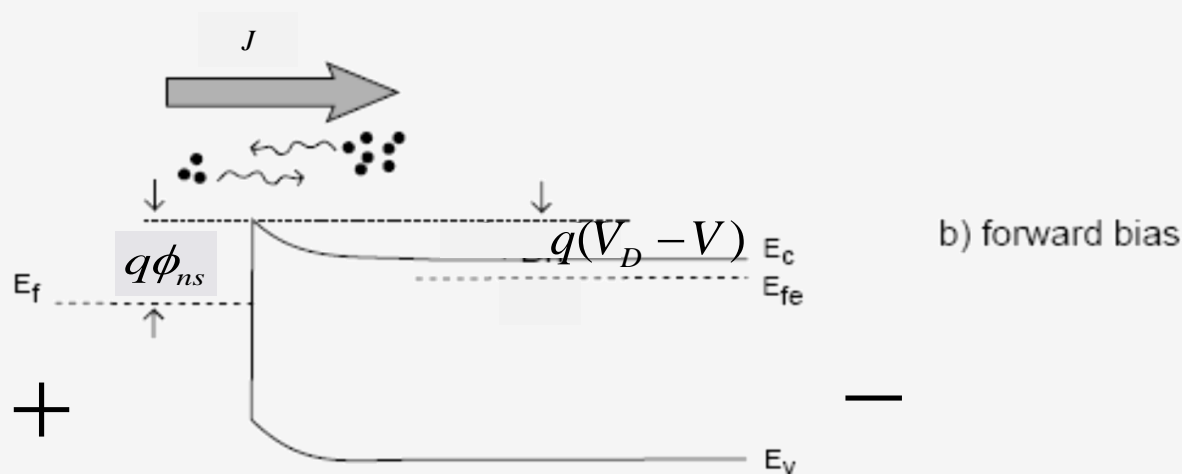


# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.2金半接触整流理论

### 5.2.1 定性分析

b. 正向电压，金属一侧为正，半导体一侧为负， $V > 0$



阻挡层为耗尽层，高阻区，电压主要降落在此区域，外电场和内建电场方向相反，势垒降低。

# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.2金半接触整流理论

### 5.2.1 定性分析

半导体到金属**电子**电流大于金属到半导体的电子电流,

$$J_{n(s \rightarrow m)} > J_{n(m \rightarrow s)}$$

形成半导体到金属的**电子流**,

$$J_{n(s \rightarrow m)} + J_{n(m \rightarrow s)}$$

**电流的方向由金属到半导体 (由正电压指向负电压)**

正向电压增加,  $q(V_D - V)$ 变小,  $J_{n(s \rightarrow m)}$ 变大, 正向电流增加

# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.2金半接触整流理论

### 5.2.1 定性分析

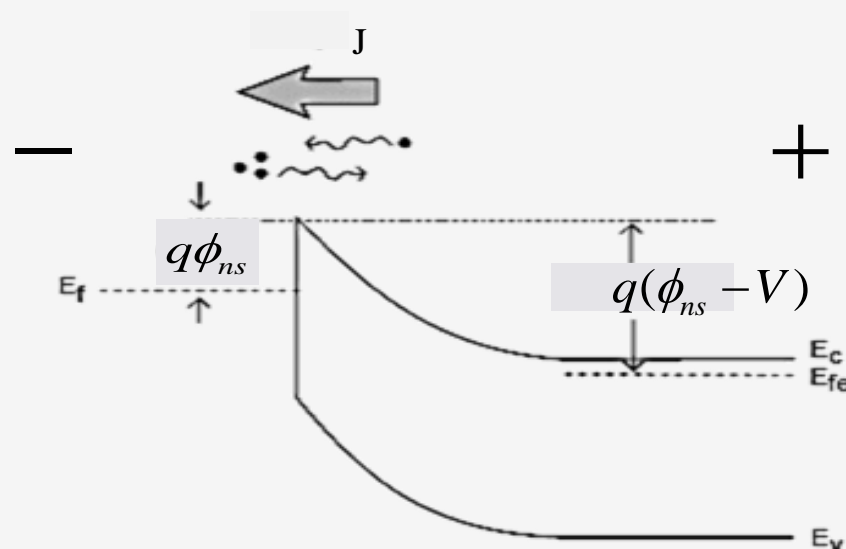
c. 反向电压，金属一侧为负，半导体一侧为正， $V < 0$ ,

外电场和内建电场方向相同，

势垒增加  $J_{n(s \rightarrow m)} < J_{n(m \rightarrow s)}$

形成金属到半导体的电子流，

电流的方向由半导体到金属



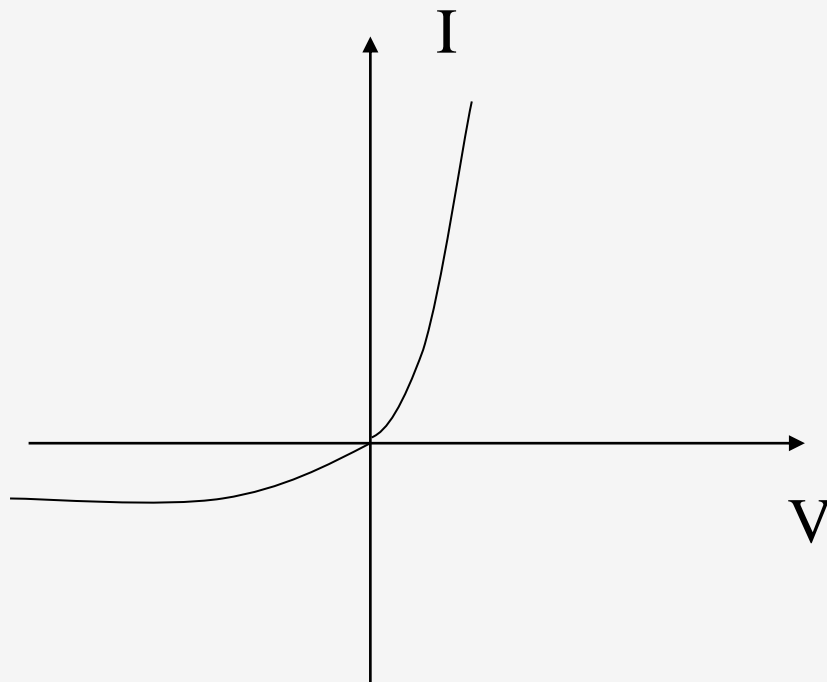


# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.2金半接触整流理论

### 5.2.1 定性分析

由于  $q\phi_{ns}$  一定,  $J_{n(m \rightarrow s)}$  一定, 而  $q(V_D - V)$  随  $V$  (为负) 增加而增加,  $J_{n(s \rightarrow m)}$  减小, 直到半导体到金属的电子电流可以忽略, 则  $J_{\text{总}} = J_{n(m \rightarrow s)}$  不变, 达到饱和, 反向饱和电流。



# 第五章 金属和半导体的接触

- 5.2金半接触整流理论

- 5.2.1 定性分析

- 2.金属半导体整流特点

- 正向偏置时，**载流子流动的方向**由半导体指向金属，半导体内**多数载流子形成正向电流**

**(1) 金属与n型半导体：金属接 “+”，电子流由半导体到金属，正向电流由金属到半导体**

**(2) 金属与p型半导体：金属接 “-”，空穴流由半导体到金属，正向电流由半导体到金属**

# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.2金半接触整流理论

### 5.2.1 定性分析

### 3.金属与半导体整流接触，半导体一侧的耗尽层宽度、势垒区电场及电势

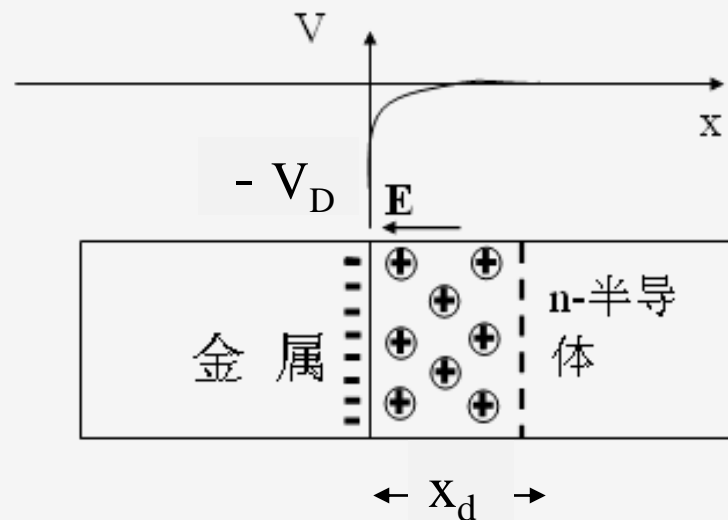
#### (1) 平衡状态

耗尽层近似：势垒高度远大于 $k_0T$ ，  
势垒区可近似为耗尽层（均匀掺杂）

$x_d$ 为耗尽层宽度

$$\rho(x) = qN_D; (0 \leq x \leq x_d)$$

$$\rho(x) = 0; (x > x_d)$$

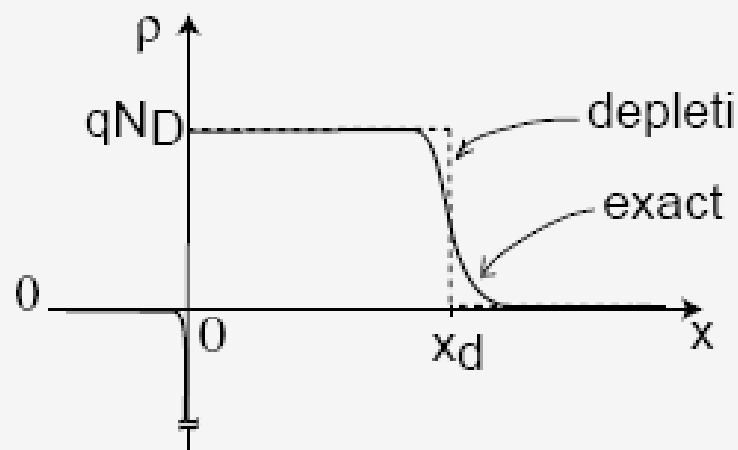


# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.2金半接触整流理论

泊松方程：

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \begin{cases} -\frac{qN_D}{\varepsilon}; (0 \leq x \leq x_d) \\ 0; (x > x_d) \end{cases}$$



边界条件：

**半导体体内电场为零**  $E(x_d) = -dV / dx|_{x=x_d} = 0;$

**半导体体内电势为零**  $V(x_d) = 0;$

解得：

$$E(x) = -\frac{dV(x)}{dx} = \frac{qN_D}{\varepsilon} (x - x_d)$$

$$V(x) = -\frac{qN_D}{2\varepsilon} (x^2 - 2xx_d + x_d^2)$$

# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.2金半接触整流理论

### 5.2.1 定性分析

由于:  $V(0) = -V_D$

耗尽层宽度  $x_d = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_D}{qN_D}}$

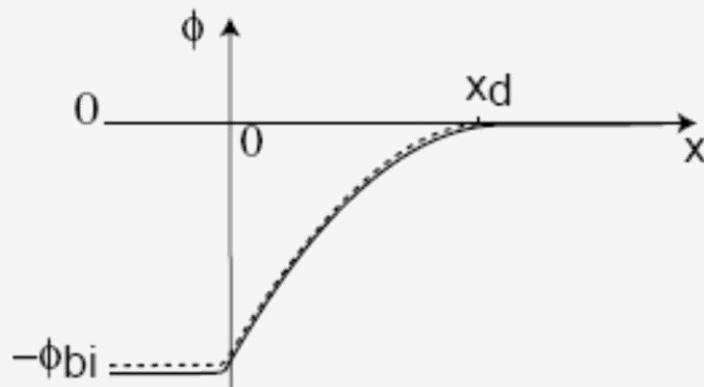
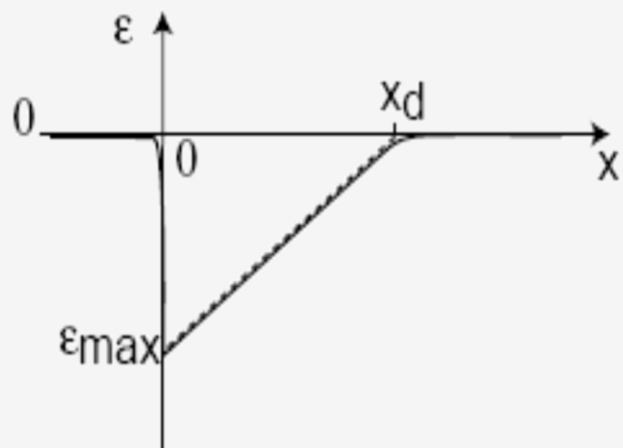
$$|\vec{E}(x)|_{\max} = |\vec{E}(0)| = \frac{qN_D x_d}{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2qN_D V_D}{\varepsilon}}$$

$$N_D \uparrow, x_d \downarrow, |E_{\max}| \uparrow;$$

$$V_D \uparrow, x_d \uparrow, |E_{\max}| \uparrow;$$

$$E(x) = -\frac{dV(x)}{dx} = \frac{qN_D}{\varepsilon}(x - x_d)$$

$$V(x) = -\frac{qN_D}{2\varepsilon}(x^2 - 2xx_d + x_d^2)$$



# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.2金半接触整流理论

### 5.2.1 定性分析

(2) **加电压**  $V_D$  替换为  $V_D - V$

$$x_d = \sqrt{\frac{2\varepsilon(V_D - V)}{qN_D}}$$

$$|\vec{E}(x)|_{\max} = \sqrt{\frac{2qN_D(V_D - V)}{\varepsilon}}$$

$$V(x) = -(V_D - V)\left(\frac{x^2}{x_d^2} - \frac{2xx_d}{x_d^2} + 1\right)$$

耗尽区边界  $V(x_d) = 0$

界面  $V(0) = -(V_D - V)$

# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.2金半接触整流理论

### 5.2.1 定性分析

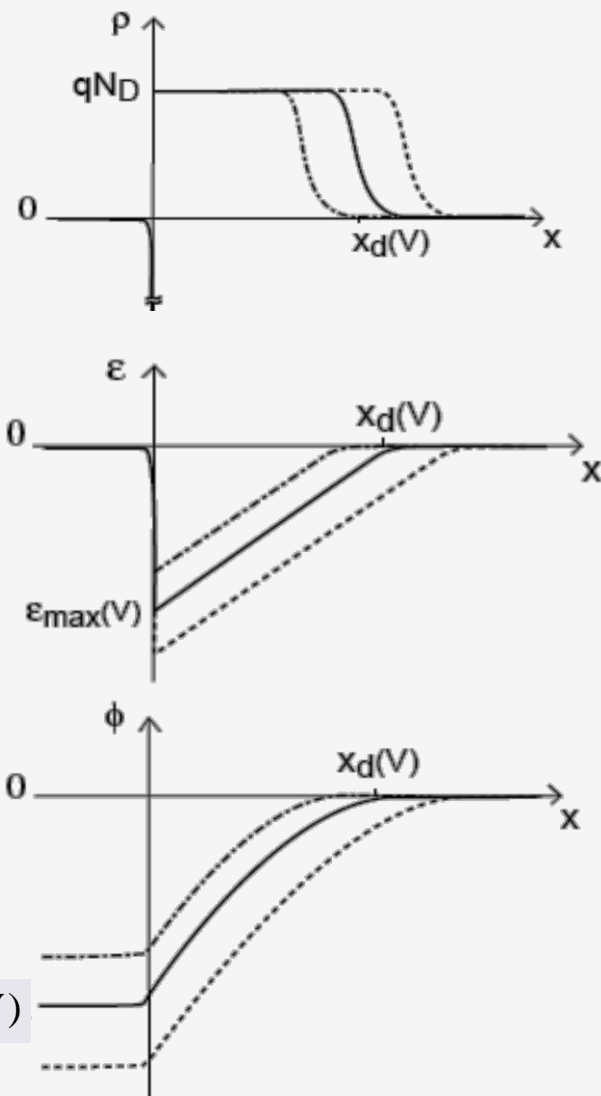
讨论：

$$x_d = \sqrt{\frac{2\varepsilon(V_D - V)}{qN_D}}$$

$$|\vec{E}(x)|_{\max} = \sqrt{\frac{2qN_D(V_D - V)}{\varepsilon}}$$

$$V(x) = -(V_D - V)\left(\frac{x^2}{x_d^2} - \frac{2xx_d}{x_d^2} + 1\right)$$

-----  $V > 0$   
—————  $V = 0$   
-----  $V < 0$



# 第五章 金属和半导体的接触

- 5.2金半接触整流理论

- 5.2.2 金半整流结构的伏安特性

- 1.模型:

- A.扩散理论模型（厚阻挡层，势垒区厚度 $\gg$ 电子平均自由程）

- 氧化铜，平均自由程小，扩散理论适用

- B. 热电子发射理论模型

- 当平均自由程 $\gg$ 势垒区厚度时，电子在势垒区碰撞可以忽略，势垒形状不重要，关键是势垒的高度，半导体内部电子只要有足够的能量就可以跃过势垒顶点，自由通过阻挡层进入金属。

- 问题的关键在于计算超越势垒的载流子数目

- Ge, Si, GaAs的迁移率大，平均自由程大，用热电子发射理论



# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.2金半接触整流理论

### 5.2.2 金半整流结构的伏安特性

A.扩散理论

$$J = q \left[ n(x) \mu_n |E(x)| + D_n \frac{dn(x)}{dx} \right]$$
$$= q D_n \left[ -\frac{qn(x)}{k_0 T} \frac{dV(x)}{dx} + \frac{dn(x)}{dx} \right]$$

得到:

$$J = J_{sD} \left[ \exp\left(\frac{qV}{k_0 T}\right) - 1 \right]$$

其中:

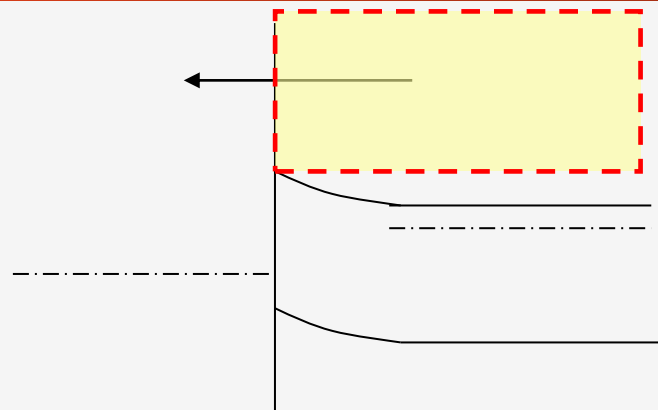
$$J_{sD} = \sigma \sqrt{\frac{2qN_D(V_D - V)}{\varepsilon}} \exp\left(-\frac{qV_D}{k_0 T}\right); \text{其中 } \sigma = qn_0\mu_n;$$

# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.2金半接触整流理论

### 5.2.2 金半整流结构的伏安特性

#### B.热电子发射理论



1.忽略势垒区电子碰撞,  
薄阻挡层, 电子平均自由程远大于势垒宽度;

2.取垂直于界面半导体指向金属方向为x方向, 热电子发射决定的半导体到金属的电子电流密度:  $J_{s \rightarrow m} = qn' \overline{v_x}$

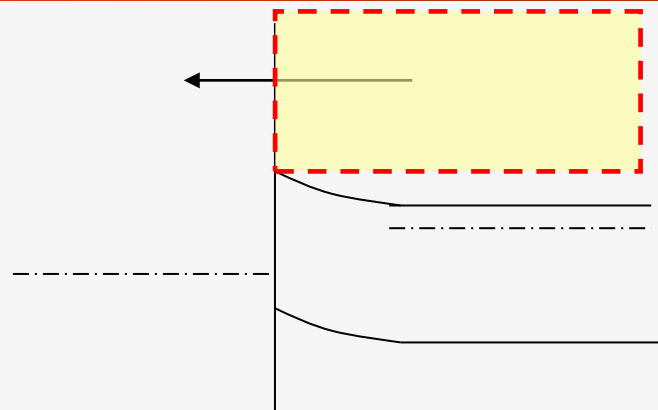
3. 电流的计算归结为超越势垒的载流子数量计算;

# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.2金半接触整流理论

### 5.2.2 金半整流结构的伏安特性

#### B.热电子发射理论



外加电压 $V$ 下, n型半导体的势垒顶点 $E_{CS}$ (界面处的导带底)比体内导带底高出 $q(V_D - V)$ , **占据势垒顶点以上的各能级的电子浓度为:**

$$\begin{aligned} n' &= N_c \exp\left(-\frac{E_{cs} - E_F}{k_0 T}\right) = N_c \exp\left(-\frac{E_c + q(V_D - V) - E_F}{k_0 T}\right) \\ &= N_c \exp\left(-\frac{E_n + qV_D}{k_0 T}\right) \exp\left(\frac{qV}{k_0 T}\right) = N_c \exp\left(-\frac{q\phi_{ns}}{k_0 T}\right) \exp\left(\frac{qV}{k_0 T}\right) \end{aligned}$$

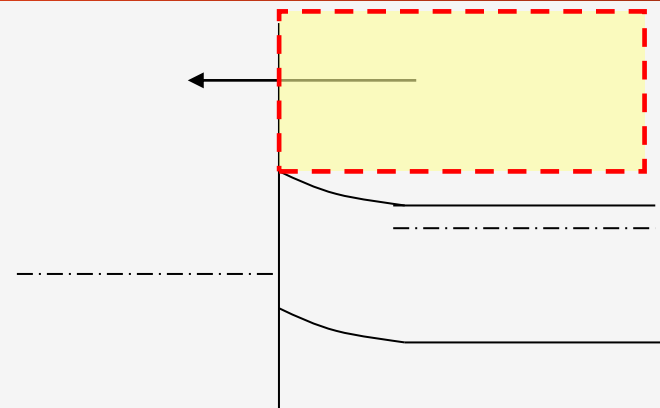
# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.2金半接触整流理论

### 5.2.2 金半整流结构的伏安特性

#### B.热电子发射理论

$$J_{s \rightarrow m} = qn' \overline{v_x} \quad \overline{v_x} = \frac{\int v_x dn}{n'}$$



$$\text{总电流密度: } J = J_{m \rightarrow s} + J_{s \rightarrow m} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{ns}}{k_0 T}\right) \left[ \exp\left(\frac{qV}{k_0 T}\right) - 1 \right]$$

$$= J_{sT} \left[ \exp\left(\frac{qV}{k_0 T}\right) - 1 \right]$$

其中:  $A^* = \frac{4\pi q m_n^* k_0^2}{h^3}$  称为有效理查逊常数

$$J_{sT} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{ns}}{k_0 T}\right) \quad J_{sT} \text{ 与外加电压无关, 却强烈依赖于温度}$$

# 第五章 金属和半导体的接触

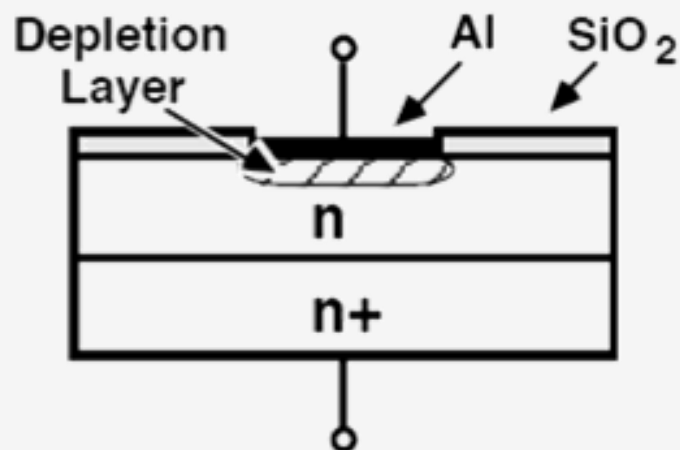
- 5.2金半接触整流理论

- 5.2.2 金半整流结构的伏安特性

## 肖特基势垒二极管 (SBD) :

利用金属-半导体整流特性制成

- ◆ 单向导电
- ◆ 多子器件, 具有更好的高频特性
- ◆ SBD有较低的正向导通电压



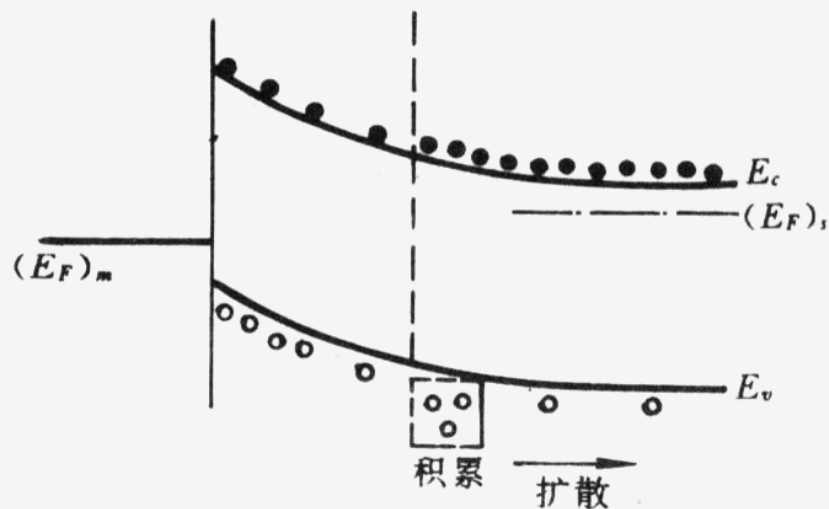
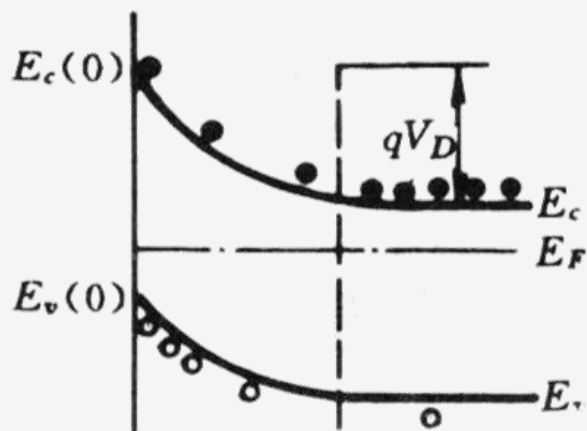
# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.3少数载流子的注入和欧姆接触

### 5.3.1 少子注入

接触界面处：

$$n(0) = n_0 \exp\left(-\frac{qV_D}{k_0T}\right) \quad p(0) = p_0 \exp\left(\frac{qV_D}{k_0T}\right)$$



# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.3少数载流子的注入和欧姆接触

### 5.3.1 少子注入

接触界面处：

$$n(0) = n_0 \exp\left(-\frac{qV_D}{k_0T}\right) \quad p(0) = p_0 \exp\left(\frac{qV_D}{k_0T}\right)$$

电子的势垒是空穴的积累区，表面空穴浓度最大，存在浓度梯度，空穴由表面向内部扩散，当 $p(0)$ 很大，**接近甚至超过 $n_0$ 时，空穴注入电流贡献不能再忽略**；正向电压下，空穴向体内扩散并在内界形成积累，少数载流子对电流的贡献将**决定于空穴在体内的扩散效率**。

# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.3少数载流子的注入和欧姆接触

### 5.3.1 少子注入

**注入比:**  $\gamma = J_p / J = J_p / (J_n + J_p)$

◆ 小注入，注入比很小

金-n型平面二极管一般情况下： $\gamma < 0.1\%$

◆ 大电流，注入比随电流密度增加而增加，可达5%

◆ 探针接触可以有效提高少数载流子扩散效率



# 第五章 金属和半导体的接触

- 5.3少数载流子的注入和欧姆接触

## 5.3.2 欧姆接触

### 1.要求

- 1) 不产生明显的附加阻抗，接触电阻小，当有电流流过时，欧姆接触上的电压降远小于样品和器件本身的压降；
- 2) 有线性对称的电流 - 电压关系，正反向电压对欧姆接触没有影响

# 第五章 金属和半导体的接触

- 5.3少数载流子的注入和欧姆接触

- 5.3.2 欧姆接触

## 2.欧姆接触的实现

1) 反阻挡层：金属 + n型半  $W_m > W_s$  金属 + p型半导体  $W_m < W_s$

但实际上由于表面态存在，金半接触几乎总是存在势垒，而与金属功函数关系不大

2) 隧穿效应：实际欧姆接触是通过半导体重掺杂，形成很薄的势垒区，载流子可以轻易隧穿势垒而构成的，产生相当大的隧道电流，接触电阻很小

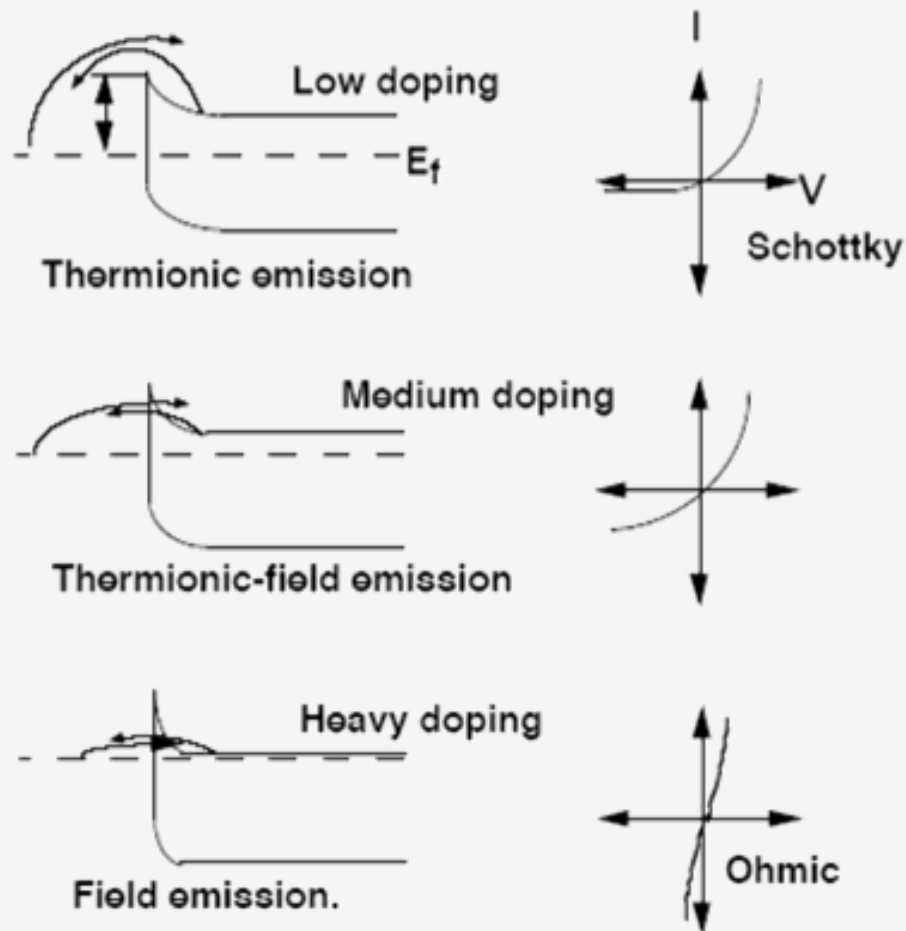
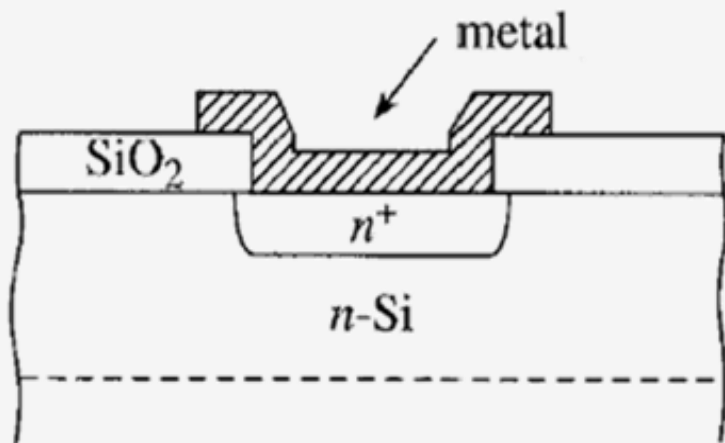
# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.3少数载流子的注入和欧姆接触

### 5.3.2 欧姆接触

## 2.欧姆接触的实现

隧穿型电极：



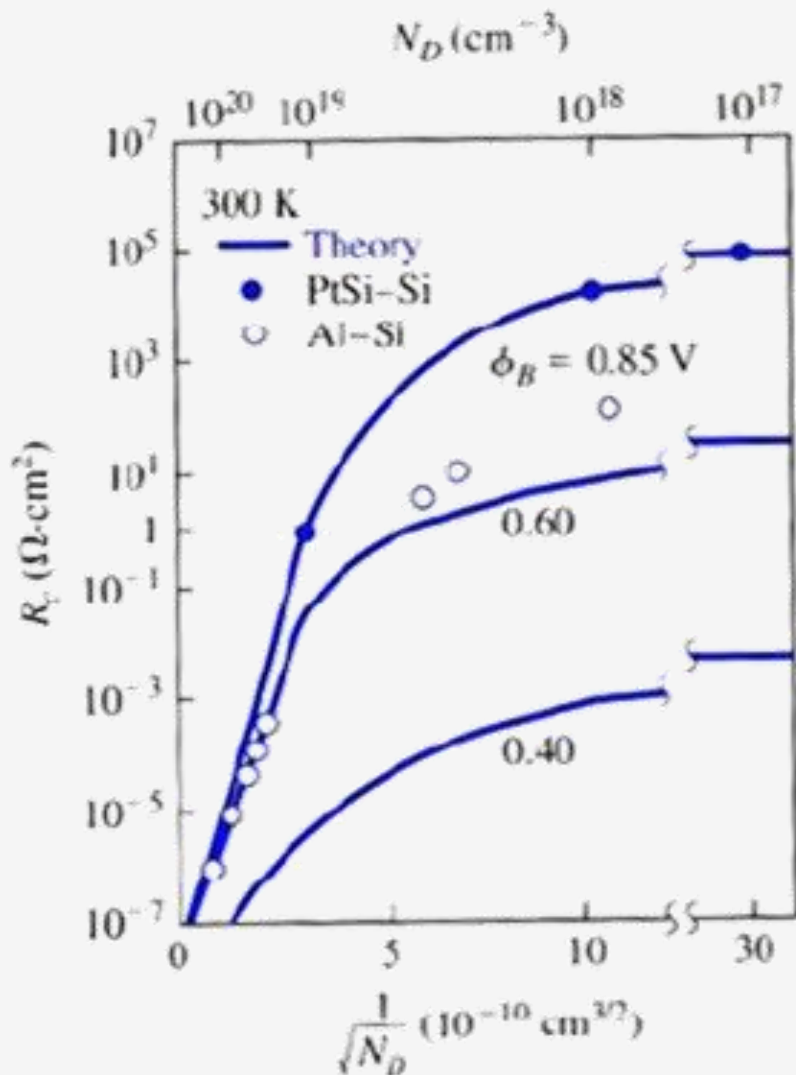
# 第五章 金属和半导体的接触

## • 5.3少数载流子的注入和欧姆接触

### 5.3.2 欧姆接触

## 2.欧姆接触的实现

比接触电阻与掺杂浓度之间的关系



## ◆ 金属和半导体的接触

- 金属半导体接触能带图  
会画图，4种理想情况  
定性说明表面态对金半接触的影响
- 金半接触整流理论  
说明整流原理（外加电压方向不同，电流大小不同）  
简要说明两种主要整流理论（热电子发射理论及扩散理论）  
肖特基二极管与pn结二极管的区别
- 少数载流子注入和欧姆接触  
理解少子注入概念  
如何制作欧姆接触