

# 第六章 金属/半导体 (M/S) 接触 (Contact)

本章我们将介绍金属与半导体接触的能带特征以及载流子在M/S结构中的输运规律。

§ 6.1 金属/半导体接触和肖特基势垒

§ 6.2 实际肖特基势垒高度的调制

§ 6.3 肖特基二极管及其IV特性

§ 6.4 M/S的欧姆接触

§ 6.5 异质结

## § 6.1 金属/半导体接触和肖特基势垒

**M/S接触 (Contact)** 为金属 (M) 与半导体 (S) 接触形成的基本结构，通常形成肖特基势垒 (**Shottky Barrier**)，其中肖特基势垒是M/S肖特基接触的主要特征。在特定的条件下M/S接触可形成欧姆 (**Ohmic**) 型接触。

影响肖特基势垒的因素有：金属和半导体的功函数、金属感应的镜像电荷产生的镜像势、界面的陷阱态能级及其密度等

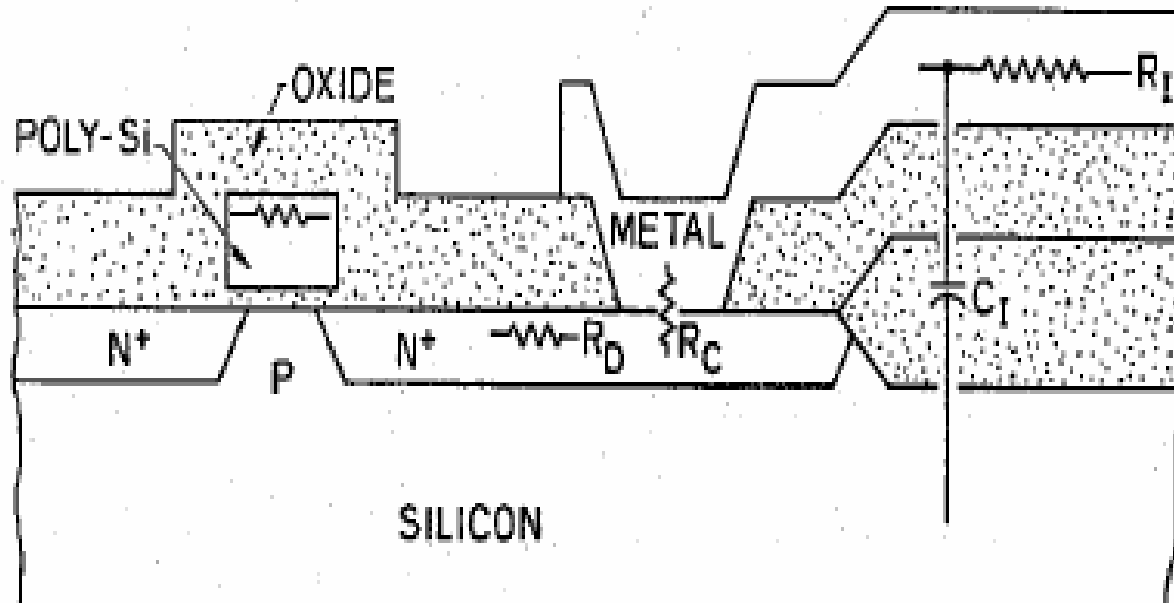
### 6.1.1 M/S接触的应用领域

- 在金属与半导体之间实现低电阻的欧姆接触，可为半导体器件之间的连接提供的低阻互连
- 作为整流结（肖特基势垒）器件（肖特基二极管）使用

## § 6.1 金属/半导体接触

### 6.1.2 M/S接触的形成

M/S结构通常是通过在干净的半导体表面淀积金属而形成。利用金属硅化物（**Silicide**）技术可以优化和减小接触电阻，有助于形成低电阻欧姆接触。



## § 6.1 金属/半导体接触

### 6.1.3 理想M/S接触的平衡能带图

1. 热平衡条件：形成统一的费米能级，即 $E_f = \text{Const}$

●在前面的讨论中，我们已经说明，任意半导体系统在达到热平衡时，费米能级在空间范围内保持平直，即 $E_f = \text{常数}$ 。相关的能带图特征，在非均匀掺杂的半导体系统（PN结）中已有演示。这一法则在两种不同类型的材料接触形成的系统中仍然适用。

●考虑两种材料：金属（M）与半导体（S）形成接触，设其各自费米能级分别为 $E_{f1}$ 和 $E_{f2}$ 。金属的功函数为 $\phi_M$ ，半导体的功函数为 $\phi_S$ ，亲和势为 $\chi$

热平衡情形下，M和S之间电子的运动达到动态平衡。

热平衡时，电子从1到2 ( $F_{1 \rightarrow 2}$ ) 和从2到1 ( $F_{2 \rightarrow 1}$ ) 的流量应该相等,即

$$F_{1 \rightarrow 2} = F_{2 \rightarrow 1}$$

$$f_{D1}g_1(1 - f_{D2})g_2 = f_{D2}g_2(1 - f_{D1})g_1$$

$$f_{D1} = f_{D2}$$

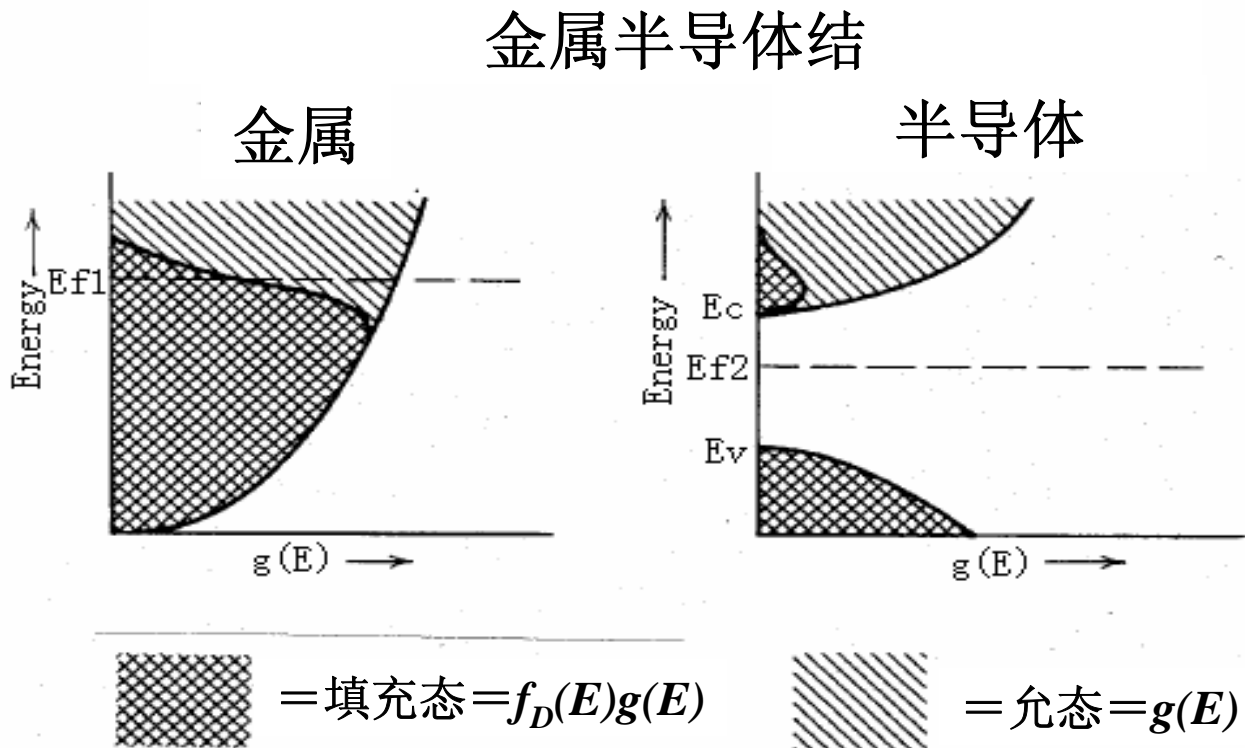
则

$$E_{f1} = E_{f2}$$

其中 $f_{D1}$ 和 $f_{D2}$ 为电子的费米分布函数， $g_1$ 和 $g_2$ 为电子的态密度

## § 6.1 金属/半导体接触

### 2. 金属和半导体中允态和填充态与能级位置的关系



金属的  $E_f$  在导带中，有很多自由电子；半导体的  $E_f$  在禁带中，价带近满、导带近空。

## § 6.1 金属/半导体接触

### 3. 热平衡情形下M/S接触的能带图

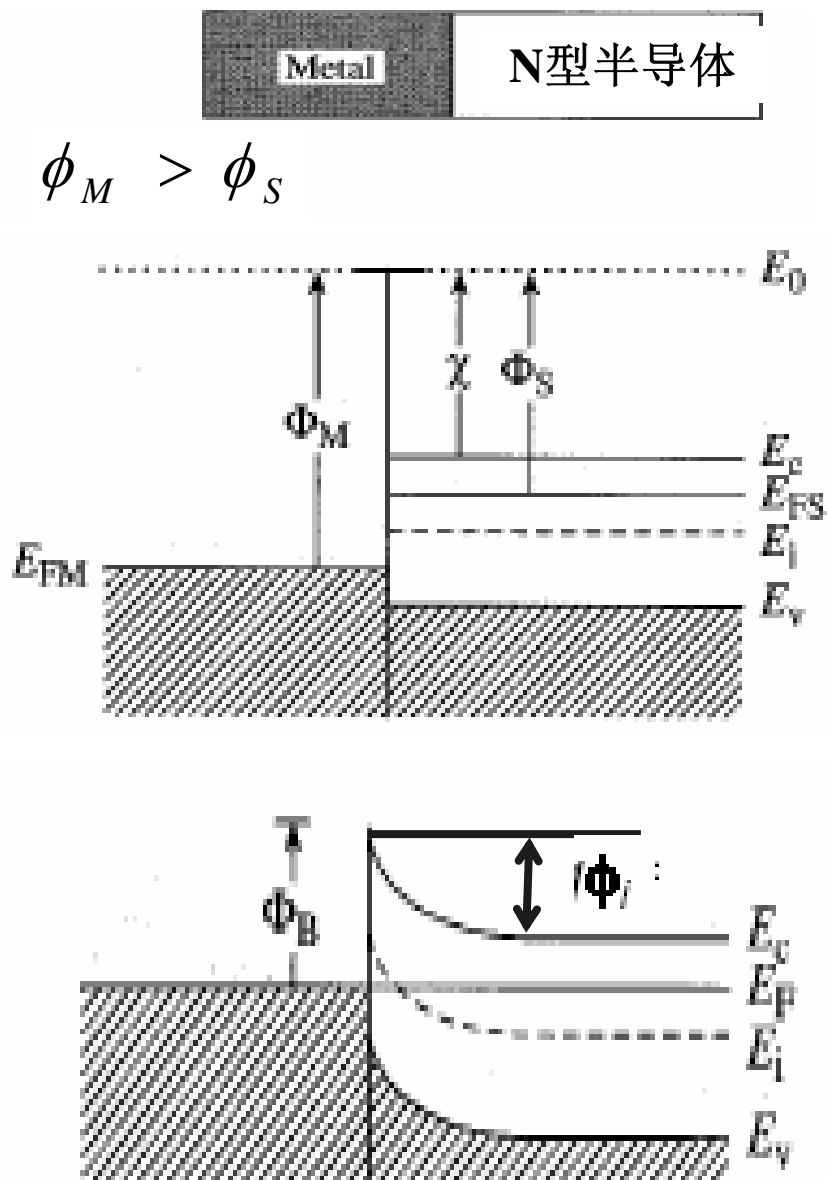
假设金属与半导体功函数差为： $\phi_{MS} = \phi_M - \phi_S$

且一般情况下： $\phi_{MS} \neq 0$

当金属和半导体形成接触时，如果二者的功函数不同（费米能级不等），则会发生载流子浓度和电势的再分布，形成肖特基势垒。通常会出现电子从功函数小（费米能级高）的材料流向功函数大的材料，直到两材料体内各点的费米能级相同（即 $E_f = \text{常数}$ ）为止。半导体体内载流子的再分布会形成载流子耗尽或积累，并在耗尽区或积累区发生能带弯曲，而在金属体内的载流子浓度和能带基本没有变化。

## § 6.1 金属/半导体接触

### 4. 理想M/S接触的平衡能带图和肖特基势垒 $\phi_M > \phi_S$



肖特基势垒由金属端的高度  $\phi_B$  和半导体的表面势（自建势）  $\phi_i$  表征。假设金属和半导体形成理想的肖特基接触，即接触界面没有陷阱态，则其势垒结构由金属功函数和半导体的功函数及亲和势决定。理想肖特基势垒的结构参数为：

$$q\phi_B = q(\phi_M - \chi)$$

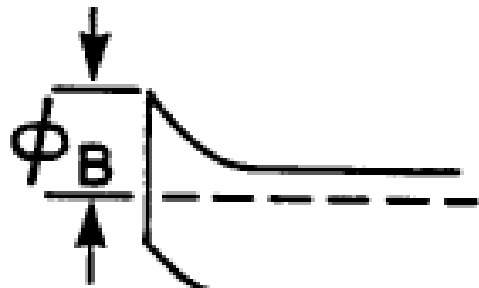
$$q\phi_i = q\phi_B - (E_C - E_f) = q(\phi_M - \phi_S)$$



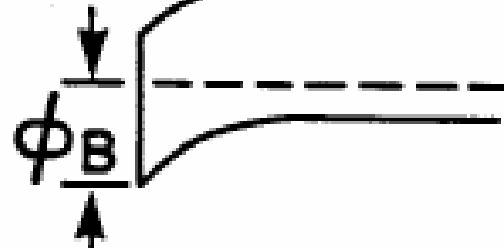
## § 6.1 金属/半导体接触

### 6.1.4 理想肖特基 (Schottky) 势垒

半导体表面电子的再分布和半导体表面势的形成，与金属的功函数相关。M/S之间形成的肖特基势垒通常会形成如下图所示的特征。



$$\phi_{BN} = \phi_M - \chi$$



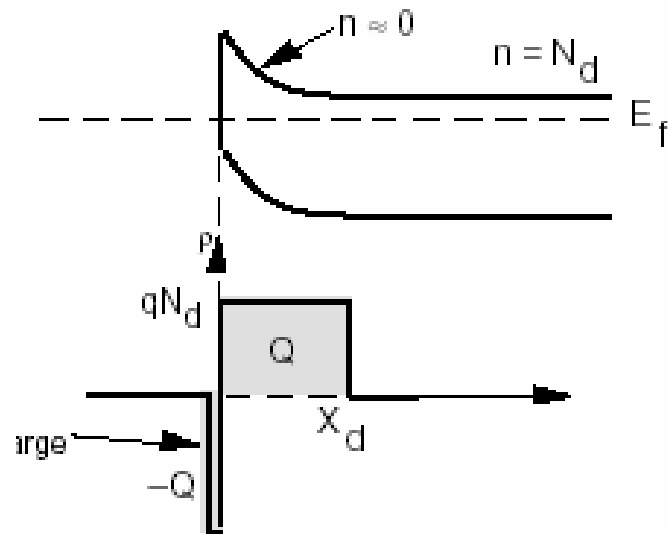
$$\phi_{BP} = E_g - \phi_M + \chi$$

## § 6.1 金属/半导体接触

### 6.1.5 M/S接触的电势分布和Poisson方程求解

为简单起见，做以下假设（耗尽近似）：

- 1) 忽略空穴浓度， $p=0$
- 2) 在  $x=0$  到  $x=x_d$  的半导体表面势的范围内， $n=0$ （耗尽近似）
- 3) 当  $x>x_d$  时， $n=N_d$ （完全电离）
- 4) 在空间电荷区总电荷为  $Q=qN_d x_d A$



$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{d\xi}{dx} = \frac{q}{\epsilon_{Si}} [(n-p) - (N_d - N_a)] \approx -\frac{q}{\epsilon_{Si}} N_d$$

从任意点  $x$  到  $x=x_d$  积分得：

在  $x=0$  处，电场  $\xi$  取最大值，为：

$$\xi(x) = -\frac{qN_d}{\epsilon_{Si}} (x_d - x)$$

$$\xi_{\max} = -\frac{qN_d}{\epsilon_{Si}} x_d$$

从  $x$  到  $x_d$  再次积分得：
$$\psi(x) = -\frac{qN_d}{2\epsilon_{Si}} (x_d - x)^2$$

## § 6.1 金属/半导体接触

### 6.1.5 M/S接触的电势分布和Poisson方程求解

金属和半导体接触在半导体表面形成的表面势为：

$$\phi_i = \phi_M - \phi_S = \psi(0) = \frac{1}{2} \frac{qN_d}{\epsilon_{Si}} x_d^2$$

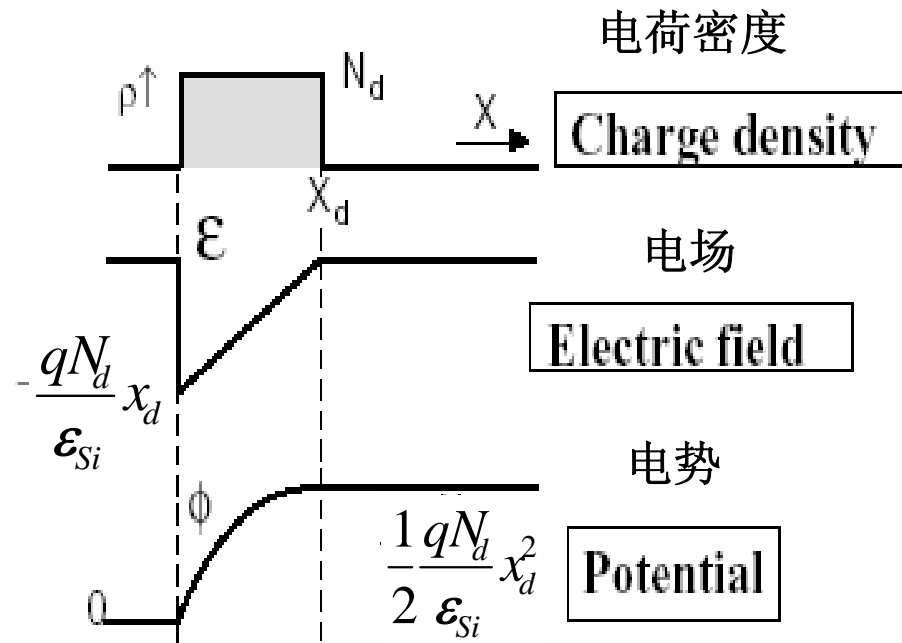
耗尽层厚度与表面势的关系满足：

$$x_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_{Si}\phi_i}{qN_d}}$$

耗尽层电荷量为：

$$Q = qAx_dN_d = A\sqrt{2q\epsilon_{Si}N_d\phi_i}$$

其中A为半导体耗尽区横截面积



等同于PN结的单边突变结的结果

## § 6.2 实际肖特基势垒高度的调制

实际测量的M/S肖特基势垒参数与理论结果不一致，为了解释实验结果，人们探讨了各种可能影响和调整肖特基势垒的因素，建立相应的理论。这些因素包括：

- 镜像力
- 界面态

### 6.2.1 M/S中的镜像力和镜像力引起的势垒降低

如果金属和半导体功函数不同，则在形成M/S接触达到热平衡时，会发生载流子的再分布，并在半导体表面区域产生净电荷。这种净电荷会在金属中感应形成镜像电荷，二者形成镜像力，这种镜像力的作用势会引起肖特基势垒高度的降低。这种由镜像力引起的肖特基势垒降低的值约在10~20 mV范围。

## § 6.2 实际肖特基势垒高度的调制

### 6.2.1 M/S中的镜像力和镜像力引起的势垒降低

镜像电荷和镜像力的概念

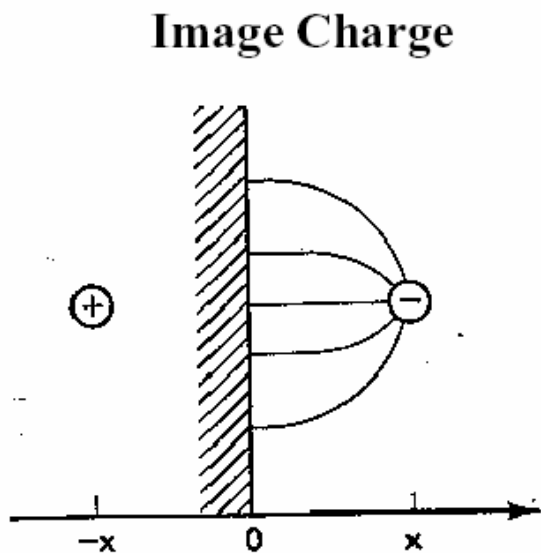
镜像力和镜像势的表达式

镜像力是库仑引力的一种，表达式如下：

$$F_{im} = -q\xi = \frac{-q^2}{4\pi\epsilon_{Si}(2x)^2} = -\frac{q^2}{16\pi\epsilon_{Si}x^2}$$

由镜像力引起得静电能是指将电荷从  $x$  处移动到  $\infty$  处所需要得能量，计算表达式如下：

$$E_{im} = \int_x^{\infty} F_{im} dx = \frac{-q^2}{16\pi\epsilon_{Si}x}$$



## § 6.2 实际肖特基势垒高度的调制

### 6.2.1 M/S中的镜像力和镜像力引起的势垒降低

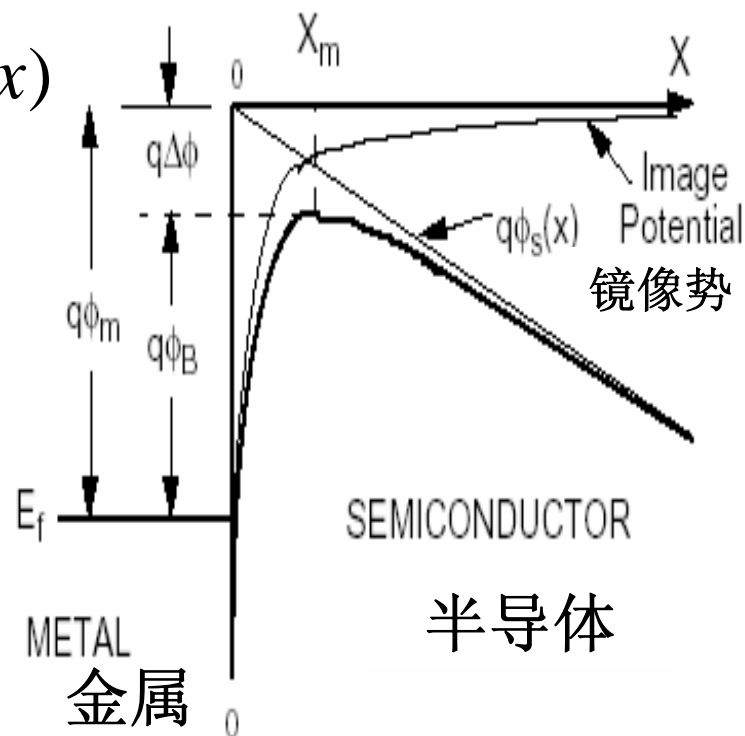
假设在不考虑镜像力时，电子的能量为：

$$E_s = -q\Phi_s(x) = E_C(x) = E_i(x)$$

其中 $E_C(x)$ 是导带在 $x$ 的能量（势能）。根据电势叠加原理，考虑镜像力引起的能量因素后，总能量为：

$$E = E_{im} + E_s$$

$$E(x) = -q\Phi_s(x) - \frac{q^2}{16\pi\epsilon_{Si}x}$$



## § 6.2 实际肖特基势垒高度的调制

### 6.2.1 M/S中的镜像力和镜像力引起的势垒降低

镜像势极大点 $x_m$  镜像势极值点处在半导体内部，其位置和大小由下式决定：

$$dE(x)/dx \Big|_{x=x_m} = 0 \quad x_m = \sqrt{\frac{q}{16\pi\epsilon_{Si}\xi_m}}$$

其中  $\xi$  表示电场  $\xi_m = \frac{dE_C(x)}{dx} \Big|_{x=x_m}$

势垒降低量 镜像势引起的势垒降低量下式决定：

$$\Delta\phi = \sqrt{\frac{q\xi_m}{4\pi\epsilon_{Si}}} = 2x_m$$

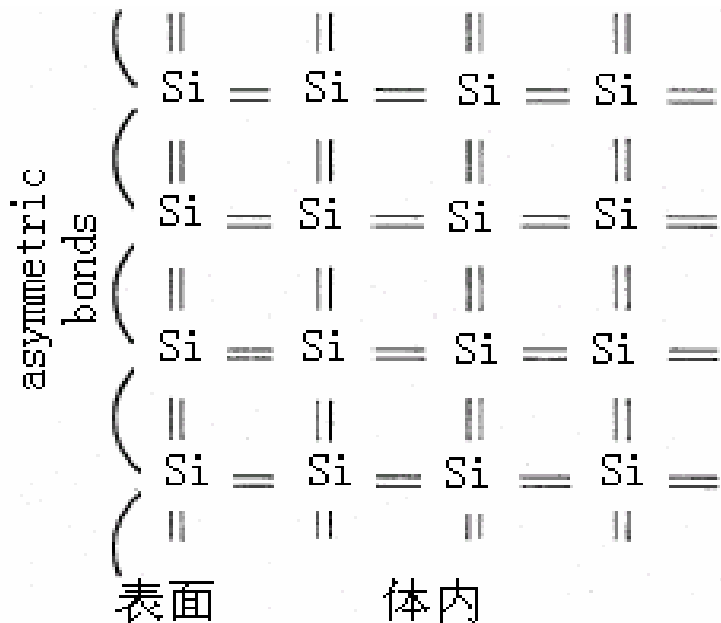
上面的结果导致在反向偏置下势垒有所降低而在正向偏置下略有增大，通常 $\Delta\phi$ 很小， $\Delta\phi \approx 25 - 50mV$

但它和 $\phi_B$ 成指数关系，因而不可忽略。

## § 6.2 实际肖特基势垒高度的调制

### 6.2.2 M/S接触中的界面（表面）态及其对势垒高度的调制

前面所说的功函数差指的是理想的金属半导体二极管情形。实际上，M/S界面态（Si表面态）往往也会影响肖特基特性。



表面态的存在使得接触界面处产生界面电荷陷阱作用（和前面考虑的产生一复合中心相似），影响表面势和势垒高度，费米能级  $E_f$  可能会偏移理想情况。界面陷阱态可分为施主和受主型两类：

施主型：有电子填充时为电中性，无电子填充时带正电；

受主型：无电子填充时为电中性，有电子填充时带负电；

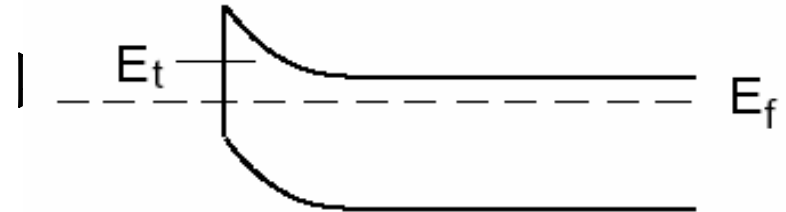
**练习题：**在Si表面存在表面态，其能级位于禁带中距导带  $1/3E_g$  处，画出其平衡能带图。



## § 6.2 实际肖特基势垒高度的调制

### 6.2.2 M/S接触中的界面态及其对势垒高度的调制

◆假设类施主型界面态的存在，阱能级为  $E_t$  如下图所示：

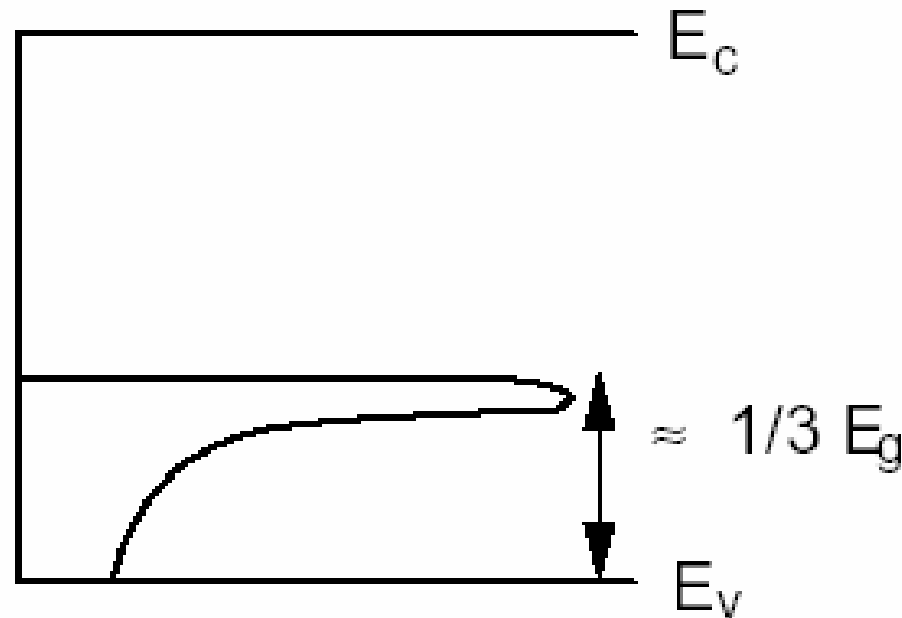


- ◆如果费米能级  $E_f$  比界面陷阱能级  $E_t$  低，界面陷阱将像施主杂质一样，可以提供电子而带正电荷。因此在趋于平衡过程中，界面态可以贡献电子和固定正电荷，使系统达到平衡。 $\phi_i$  和  $x_d$  都会相应减小。
- ◆如果界面态足够大，则系统要达到平衡所需的电荷再分布要考虑界面态的影响（表面电子和固定正电荷都由界面陷阱来提供，在表面费米能级  $E_f$  将被钉扎在  $E_t$  附近。（因为费米能级  $E_f$  在界面陷阱能级  $E_t$  附近很小的变化将使得电子和正电荷浓度有很大变化）

## § 6.2 实际肖特基势垒高度的调制

### 6.2.2 M/S接触中的界面态及其对势垒高度的调制

$\phi_i \neq \phi_M - \phi_S$  和内置电势不仅由材料特性（功函数和亲和势）决定，而且和工艺技术问题有关。实验发现，表面态经常在  $E_t = E_V + 1/3 E_g$  处有一个显著的峰。



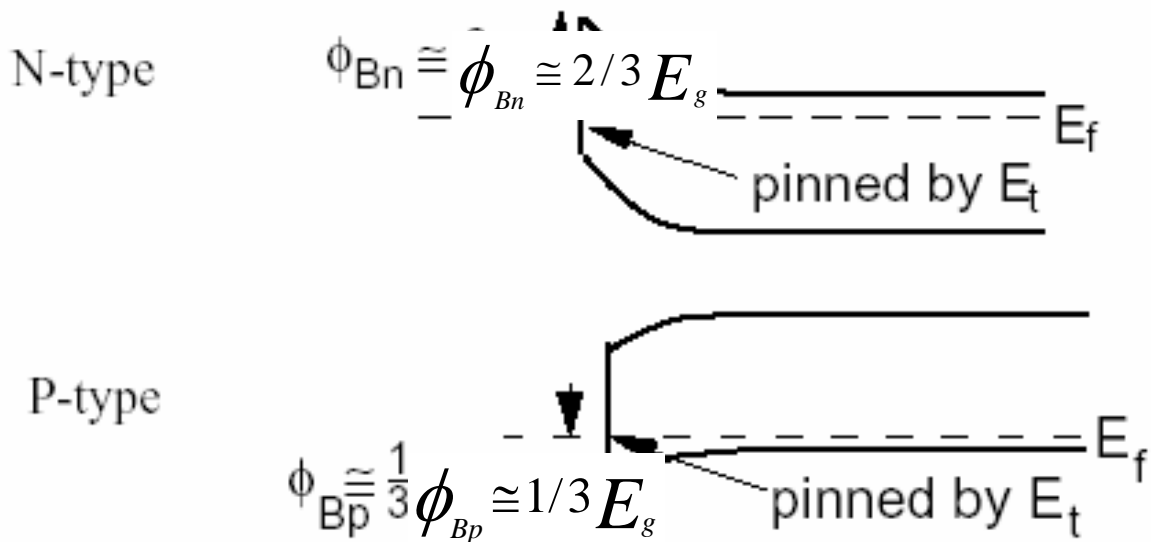
## § 6.2 实际肖特基势垒高度的调制

### 6.2.2 M/S接触中的界面态及其对势垒高度的调制

如果界面态密度很高，费米能级被完全钉扎，则N型和P型材料所对应的势垒高度分别为：

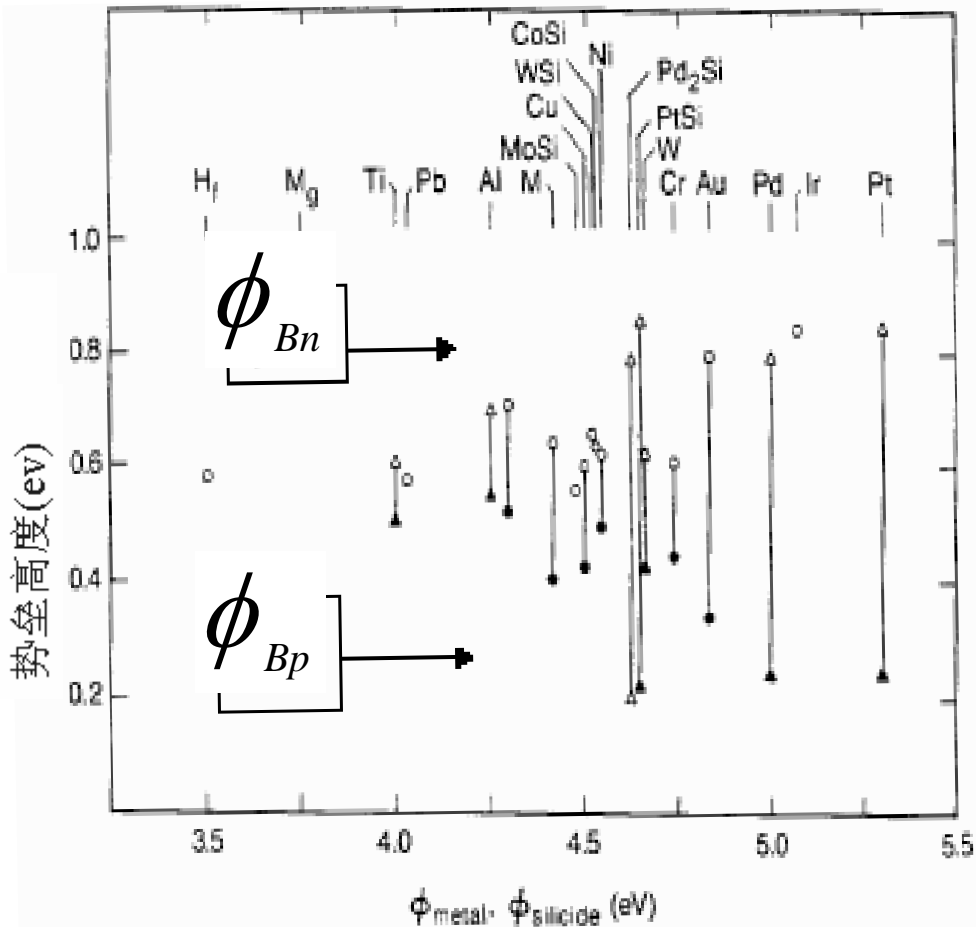
$$\phi_{Bn} \approx 2/3 E_g \quad \phi_{Bp} \approx 1/3 E_g \quad \phi_i \approx 2/3 E_g - (E_C - E_f)$$

实际上，由于很难对  $E_t$  进行理论预测 (依赖于工艺)， $\phi_B$  和  $\phi_i$  通常需要通过实验进行测量 (将在下两节中进行分析)。



## § 6.2 实际肖特基势垒高度的调制

### 6.2.2 M/S接触中的界面态及其对势垒高度的调制



可以看出，由于表面态的钉扎效应， $\phi_B$  和  $\phi_M$  经常没有依赖关系。

金属和N型与P型半导体分别组成的金属半导体接触的势垒高度与金属功函数的关系如左图，每根线段上面点表示N型势垒高度，下面点表示P型势垒高度

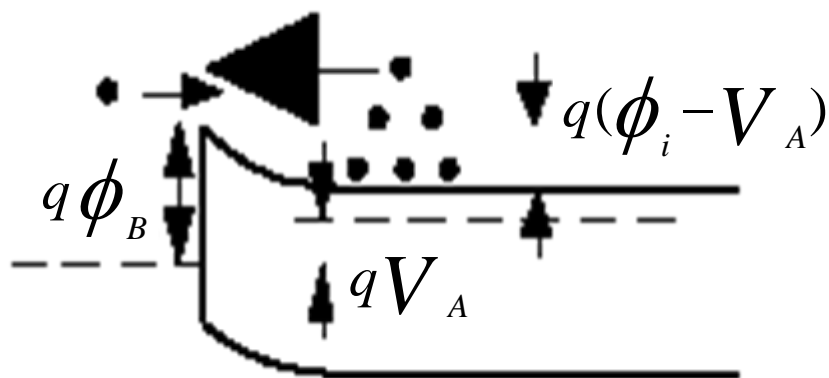
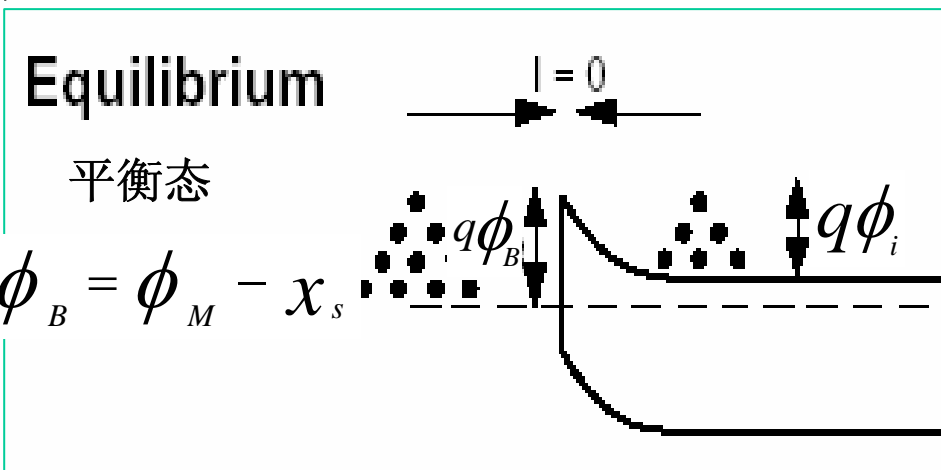
(Ref: S.Swirhun.PhD.Stanford Univ.1987)

## § 6.3 肖特基二极管的偏置及其IV特性

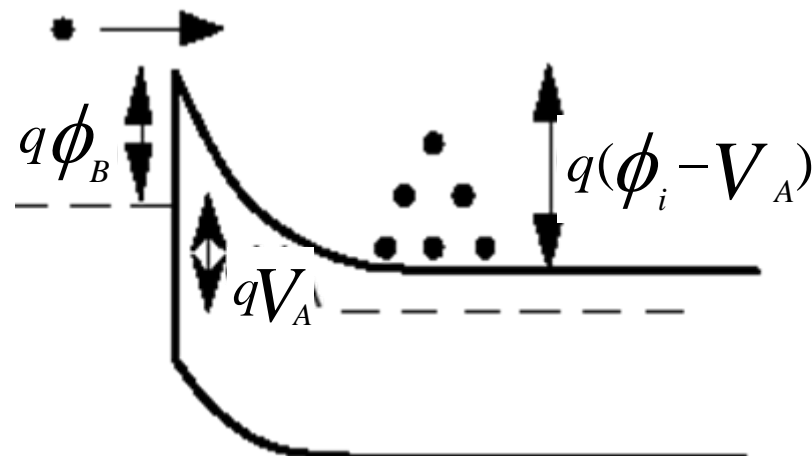
讨论：空间电荷区中准费米能级的变化

### 6.3.1 肖特基二极管的偏置

在半导体上施加外压，由于耗尽区阻抗比金属和半导体体内的阻抗都要大得多，所加外压几乎全加在耗尽区上。



正偏



反偏

外加偏置影响半导体的表面势及空间电荷区厚度，但不影响势垒高度。

## § 6.3 肖特基二极管的偏置及其IV特性

### 6.3.1 肖特基二极管的偏置

1938年，W. Schottky提出了基于整流二极管的理论，称为肖特基二极管理论。这一理论以金属和半导体功函数差为基础，考虑表面态的影响因素，用  $\phi_B$  代替  $\phi_{MS}$  来表示势垒

### 6.3.2 偏置的肖特基二极管的电容特性

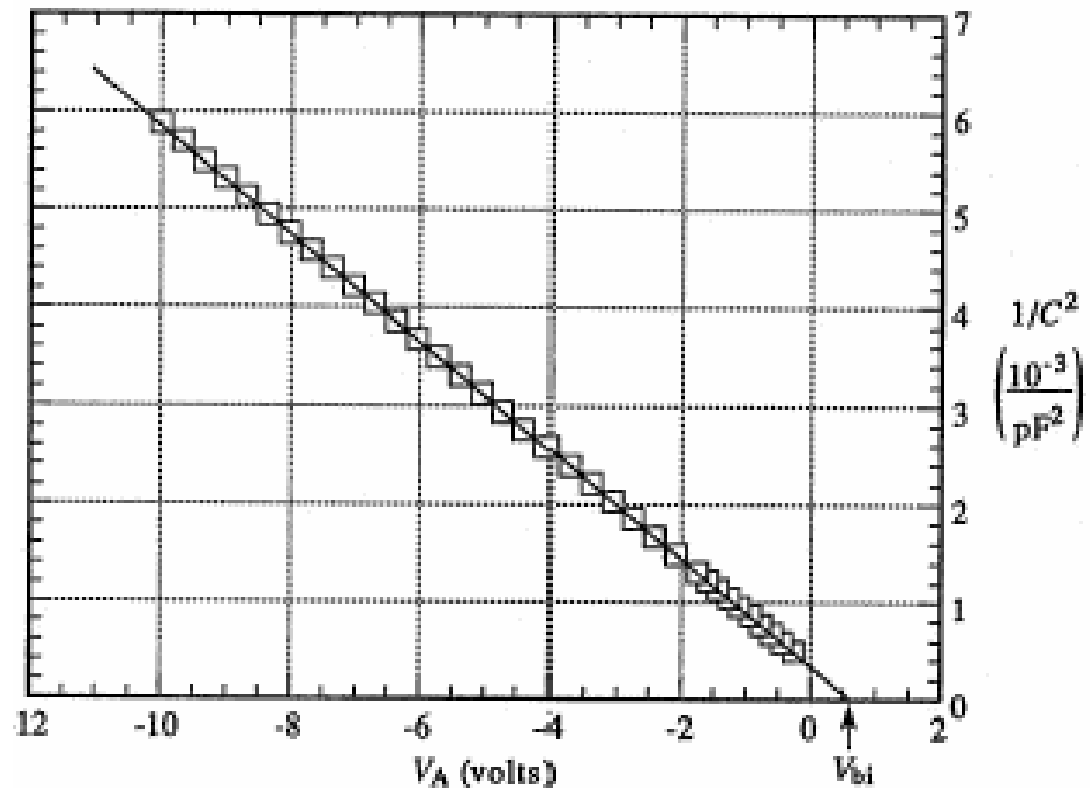
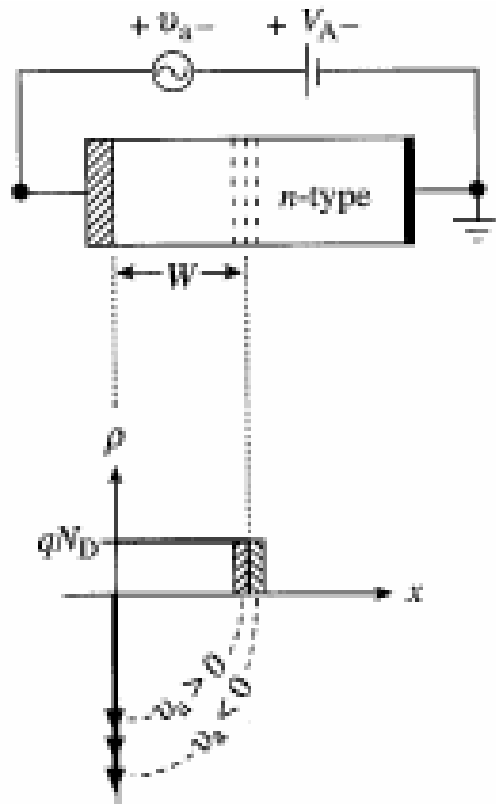
外加偏置为  $V_A$  时，耗尽区上有：

$$Q = A \sqrt{2q\epsilon_{Si} N_d (\phi_i - V_A)}$$

$$C = \frac{dQ}{dV} = A \sqrt{\frac{q\epsilon_{Si} N_d}{2(\phi_i - V_A)}} \quad \frac{1}{C^2} = \frac{2(\phi_i - V_A)}{q\epsilon_{Si} A^2 N_d}$$

## § 6.3 肖特基二极管的偏置及其IV特性

### 6.3.2 偏置的肖特基二极管的电容特性

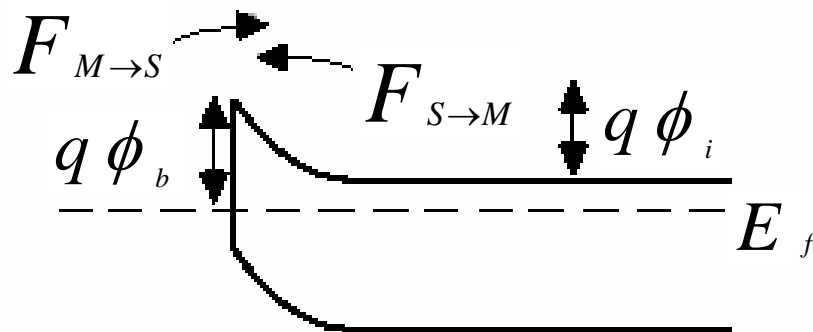


截距为  $\phi_i$ ，斜率与  $N_d$  相关，如果  $N_d$  是位置的函数，可以通过测量电容算出  $N_d(x)$ 。

## § 6.3 肖特基二极管的偏置及其IV特性

### 6.3.3 肖特基二极管的IV特性

◆肖特基电流可能既包括热电子（**Thermionic**）电流又包括扩散电流。基于两种观点可以建立各自的肖特基二极管输运理论讨论其IV特性。其一是，假设热电子电流占主要成分，忽略扩散电流。



◆在平衡态时，两个方向的电流相等。当有外加偏置  $F_{S \rightarrow M}$  势垒高度改变为  $\phi_i - V_A$  而  $F_{M \rightarrow S}$  保持  $\phi_b$  不变（假设在理想导体上没有压降）。

◆电流受越过势垒(热电子发射)或从势垒区扩散的载流子的限制，和PN结比较相似。热电子发射通常占主导低位。



## § 6.3 肖特基二极管的偏置及其IV特性

### 6.3.3 肖特基二极管的IV特性

热电子发射电流的电流密度  $J_{S \rightarrow M}$  与沿  $\mathbf{x}$  方向运动的动能大于内置电势的电子数目有如下关系:

$$J_{S \rightarrow M} = q \int_{q\phi_i}^{\infty} v_x dn \quad \text{其中} \quad dn = N_C(E) f_e(E)$$

如果电子能量大于导带能量部分全是动能:

$$\frac{1}{2} m^* v^2 = E - E_C$$

利用  $J = J_{S \rightarrow M} - J_{M \rightarrow S}$  和在平衡态  $J_{S \rightarrow M} = J_{M \rightarrow S}$  可得:

$$J = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right] = J_0 \left[ \exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right]$$

其中  $J_0 = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right)$   $A^* \equiv \frac{4\pi q m_n^* k^2}{h^3}$  (里查孙常数)

## § 6.3 肖特基二极管的偏置及其IV特性

### 6.3.3 肖特基二极管的IV特性

其二是，假设扩散电流为主要电流因素，则：

$$F_{S \rightarrow M} = D_n \frac{dn}{dx} + n\mu E$$

通过施加场，电场强度会发生变化。正向偏置时，电场强度减小，漂移项减小，扩散项起主导作用，产生净电流。

能够越过势垒的电子数目由势垒高度  $\phi_i$  和  $\phi_B$  代入费米狄拉克统计分布(或麦克斯韦波尔兹曼分布)得到：

$$n_{S \rightarrow M} = n \exp\left(-\frac{q\phi_i}{kT}\right)$$

由于金属中电子数目远大于半导体掺杂浓度  $N_d$ ， $\phi_B$  须大于  $\phi_i$  使两个方向电流相等（无外加偏置时）。

## § 6.3 肖特基二极管的偏置及其IV特性

### 6.3.3 肖特基二极管的IV特性

$$I_{S \rightarrow M} = I_{M \rightarrow S} = -Kne^{-\frac{q\phi_i}{kT}}$$

在有外加偏置 $V_A$ 时,  $\phi_i \rightarrow (\phi_i - V_A)$   $n_{S \rightarrow M} = ne^{-q(\phi_i - V_A)/kT}$

从金属到半导体的电子流大小不受 $V_A$ 影响, 有:

$$\begin{aligned} I &= I_{S \rightarrow M} - I_{M \rightarrow S} \\ &= KN_d e^{-(\phi_i - V_A)/kT} - KN_d e^{-q\phi_i/kT} \\ &= I_0 \left[ e^{qV_A/kT} - 1 \right] \end{aligned}$$

其中  $I_0 = KN_d e^{-q\phi_i/kT}$  为反向饱和电流。

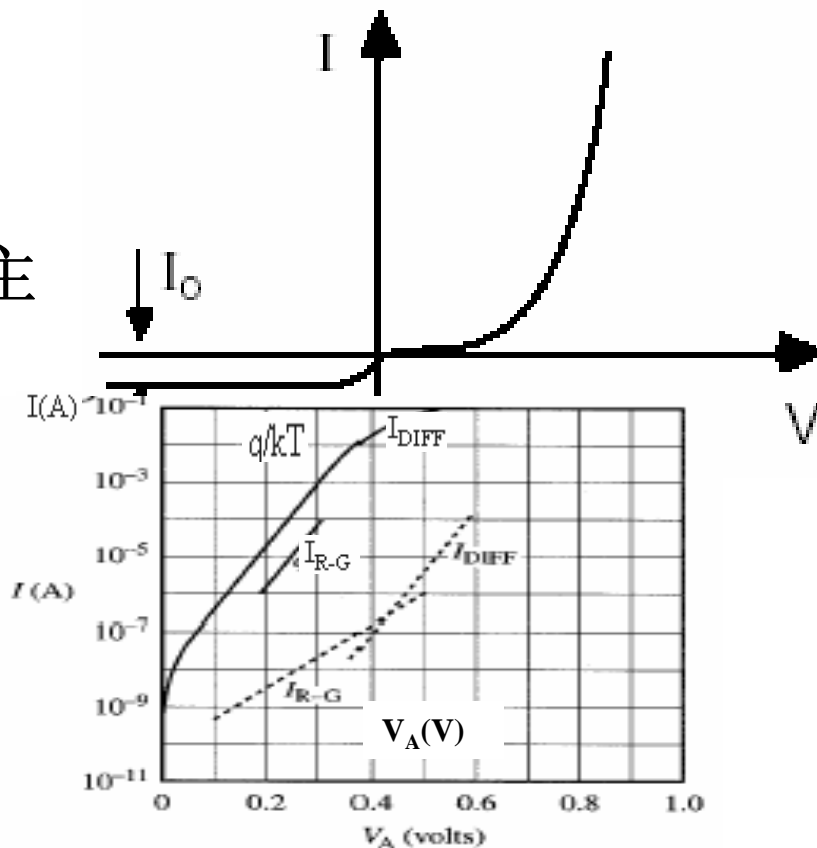
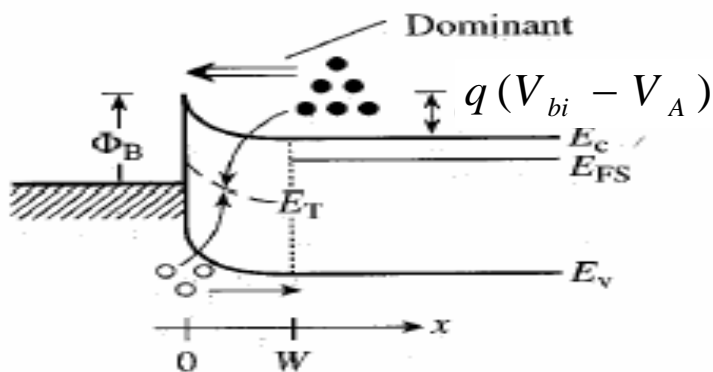
## § 6.3 肖特基二极管的偏置及其IV特性

### 6.3.3 肖特基二极管的IV特性

无论采用何种理论推导出的I-V特性曲线满足：

$$I = I_0 \left[ e^{qV_A/kT} - 1 \right]$$

不同理论推出的结果的差别主要在于  $I_0$  的表达式不同。



其中，基于热载流子发射的肖特基理论， $I_0$ 取决于肖特基势垒高度有关；基于多子扩散理论， $I_0$ 取决于半导体的自建势大小。

## § 6.3 肖特基二极管的偏置及其IV特性

### 6.3.3 肖特基二极管的IV特性

更精确的分析（Muller和Kamins）可得知， $I_0$ 实际是与电压相关的，具体表达式如下：

$$I_0 = \frac{Aq^2 D_n N_C}{kT} \left[ \frac{2qN_d (\phi_i - V_A)}{\epsilon_{Si}} \right]^{1/2} e^{-q\phi_B/kT}$$

为了方便，通常将上式改写为：

$$I \approx I_0 \left[ e^{qV_A/nkT} - 1 \right]$$

其中， $I_0$ 与外加偏压 $V_A$ 无关，具体值有实验结果提取

## § 6.3 肖特基二极管的偏置及其IV特性

### 6.3.3 肖特基二极管的IV特性

$n$ 为理想因子， $I_0$ 为与不依赖电压的部分，非理想效应用 $n$ 的取值来反映， $n$ 通常取1.0-1.2

1) 其中  $I_0$  通过外推得到。

2)  $\phi_B$  可以从以前的式子得到，在分析中势垒降低必须考虑。

3)  $n$  从曲线斜率得到。

## § 6.3 肖特基二极管的偏置及其IV特性

### 6.3.4 肖特基二极管与PN结二极管的IV特性比较

正向偏置时， $I$ 与 $V_A$ 呈指数关系，反向偏置时， $I=I_0$ 为常数，肖特基二极管 $I$ - $V$ 特性与PN结相似，但其电流机制则完全不同。

肖特基二极管的电流输运由热电子发射或多数载流子扩散支配，产生复合电流在其中只占很小比例。而在PN结二极管中的电流输运与少子扩散和复合电流相关。

正向偏置下 $V_A$ 被限制在 $V_A < \phi_i$ ，半导体的体串连电阻决定了 $V_A < \phi_i$ 的电流。

肖特基二极管的反向电流 $J_0$ 与肖特基势垒参数及温度相关；而PN结二极管的反向电流 $J_0$ 与少子浓度及其少子寿命相关。

肖特基二极管的反向电流比PN结二极管反向电流大。

# 第六章 金属/半导体 (M/S) 接触 (Contact)

## § 6.4 M/S的欧姆接触

如果多数载流子通过M/S接触时，能够不受肖特基势垒的阻挡，从一种材料输运到另一种材料，则该接触称为欧姆接触，也就是说，电流通过欧姆接触时其正反偏置的电流输运特征没有差别。

理论上，可通过两种途径得到欧姆接触：

**A.** 半导体掺杂浓度很高使得隧穿几率很大。

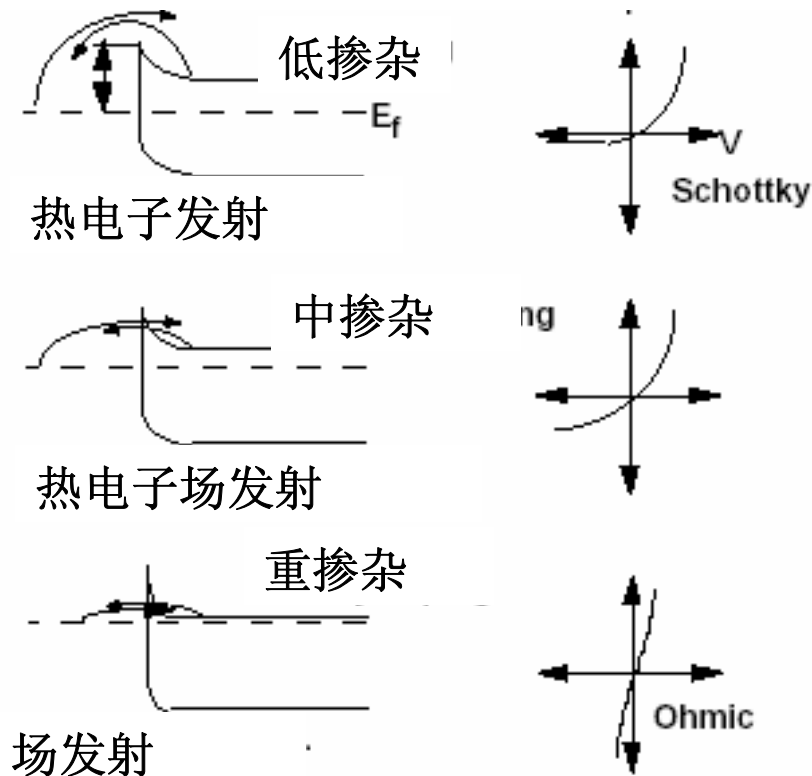
**B.** 选择合适功函数的半导体和金属，使得电流流经M/S接触时不存在势垒



# 第六章 金属/半导体 (M/S) 接触 (Contact)

## § 6.4 M/S的欧姆接触

通常采用重掺杂半导体确保M/S接触形成隧穿型欧姆接触(Tunneling Contact)



## § 6.4 M/S的欧姆接触

假设  $N_d$  和  $N_a$  很大, 则: 
$$X_d = \sqrt{\frac{2K\varepsilon_0\phi_i}{qN_d}}$$

变得很小, 当  $X_d \approx 25 - 50 \text{ \AA}$  时, 电子可以隧穿过势垒, 电子可以从半导体隧穿到金属, 也可以从金属隧穿到半导体, 使得M/S接触的电阻很小, 即为欧姆接触。

可以近似计算出要达到欧姆接触的半导体掺杂浓度。

在  $x_d = 25 \text{ \AA}$  条件下, 可得到:

$$N_{d_{\min}} \approx \frac{2\varepsilon_{Si}\phi_i}{qx_d^2} \approx 6.2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

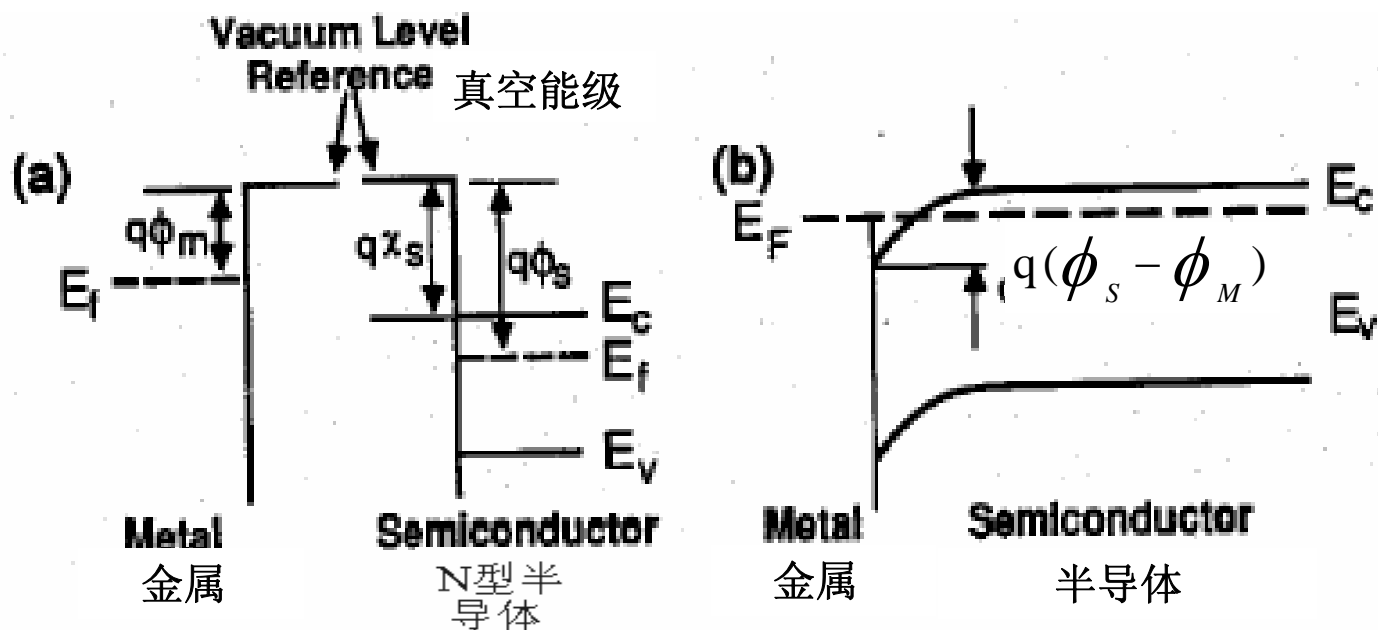
**A.** 这一掺杂浓度在实际工艺当中很容易实现, 集成电路中通常也采用此浓度。

# 第六章 金属/半导体 (M/S) 接触 (Contact)

## § 6.4 M/S的欧姆接触

**B.选择金属**, 对于n型半导体要求  $\phi_M < \phi_S$ , 对于p型半导体要求  $\phi_M > \phi_S$  (然而要找到没有表面态的半导体却很难!)

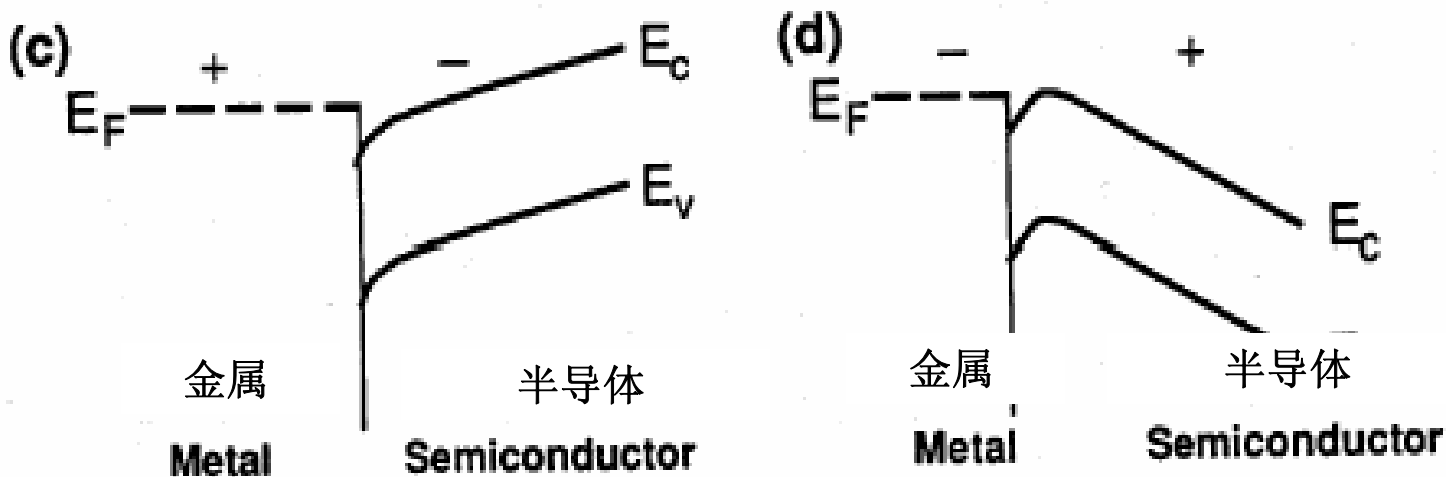
对于n型半导体:



# 第六章 金属/半导体 (M/S) 接触 (Contact)

## § 6.4 M/S的欧姆接触

当  $\phi_M < \phi_S$  时，电子从金属流向半导体以达到平衡。当金属和半导体接触时，半导体表面由于没有耗尽而有足够的电子。通常如果在表面出现多数载流子浓度积累时，则为欧姆接触。



# 第六章 金属/半导体 (M/S) 接触 (Contact)

## § 6.4 M/S的欧姆接触

实际上，不仅要考虑  $\phi_M$  和  $\phi_S$ ，还要考虑界面态的影响，大多数普通金属和n型半导体接触都不为欧姆接触。由于表面费米能级钉扎效应使  $\phi_M < \phi_S$  而不能得到欧姆接触。因此，尽管理论计算能够作出预测，但大多数金属和n型半导体并不能形成欧姆接触。

由于费米能级钉扎效应的影响，使得  $\phi_B$  的值对于不同的金属半导体接触差别不大，因而接触电阻率主要由半导体的掺杂浓度决定。

## 第六章 金属/半导体 (M/S) 接触 (Contact)

### 肖特基二极管的击穿:

当电场强度大到使肖特基二极管产生雪崩击穿后, 二极管将会有很大的反向电流, 雪崩击穿的过程和机制与第五章中PN结击穿相同。

肖特基二极管具有广泛的应用, 如利用其没有少子存储而制成快速开关, 在双极集成电路中用作钳制二极管阻止达到饱和, 并阻止NPN双极晶体管集电区存储少子。

## § 6.5 异质结

### 6.5.1 异质结的形成

由两种不同半导体材料组成的结，称为异质结。异质结的禁带宽度可能相同，也可能不同，本章我们主要讨论禁带宽度不同的情形。

异质结的形成通常是通过异质外延的方法制备的。经常形成超晶格结构，在半导体激光器和高迁移率晶体管（HEMT）领域有应用。

## § 6.5 异质结

### 6.5.2 异质结的能带结构

异质结的能带结构与构成异质结材料的禁带宽度、禁带失调有关。设构成异质结材料的禁带宽度分别为 $E_{g1} > E_{g2}$ 。

禁带的失调可能有三种情形：

1)  $E_{g2}$  包含在  $E_{g1}$  之间，如  $Ga_{1-x}Al_xAs$  与  $GaAs$  ；

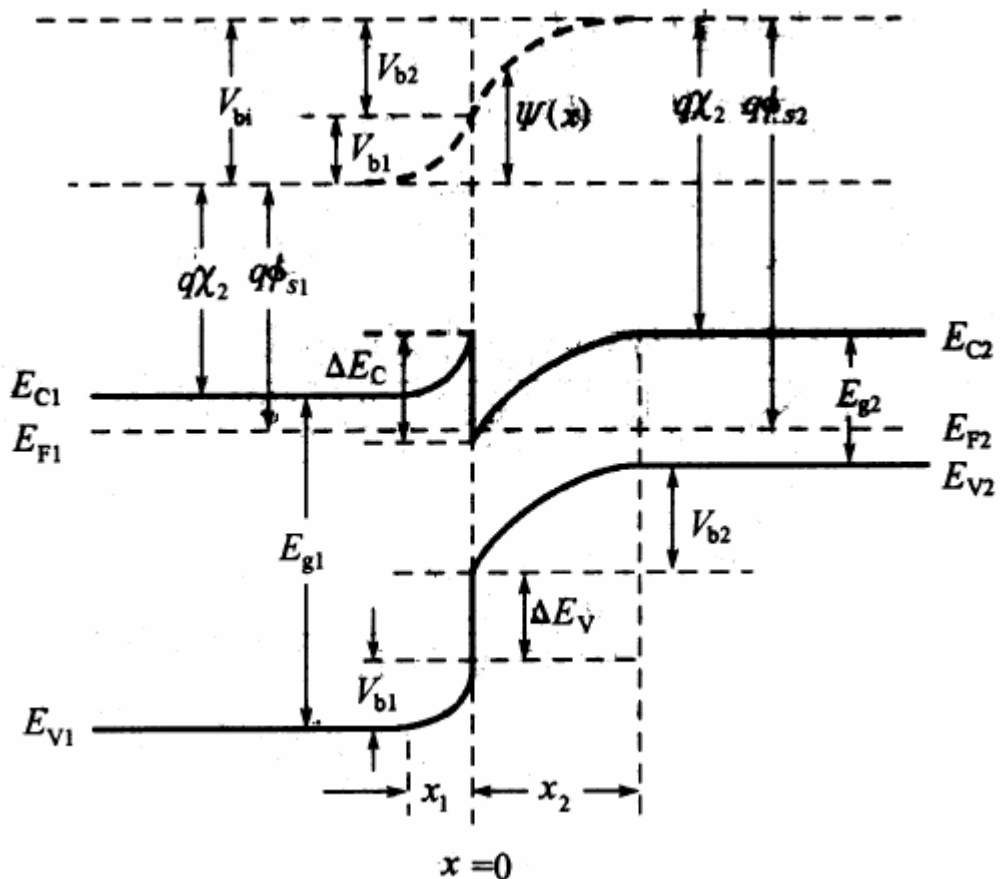
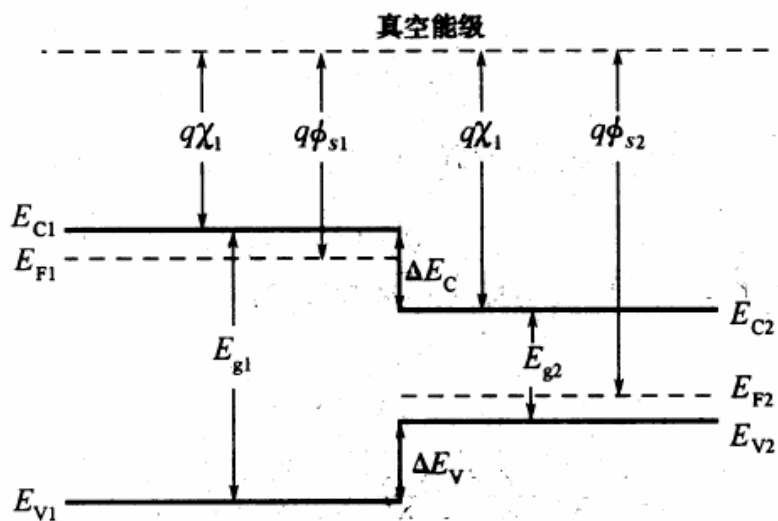
2)  $E_{g1}$  与  $E_{g2}$  禁带相互错开，如  $Ga_{1-x}In_xAs$ （下）和  $GaAs_{1-x}Sb_x$ （上）；

3) 二者没有共能量，如  $InAs$ （下）与  $GaSb$ （上）



正确画出异质结的能带结构，需要给出禁带宽度差、导带或价带差，才能获得。这些值的取得，需要利用能带计算和实验的对比，才能获得。

可以假定：导带的失调由材料的亲和势或功函数的差决定，由此，在获得禁带宽度差的条件下，即可获得正确的能带结构。



## § 6.5 异质结

### 6.5.3 异质结的应用

- 异质结的主要应用之一是形成量子阱。它由两个异质结背对背相接形成的。
- 异质结的主要应用之二是形成超晶格。它由异质结交替周期生长形成。超晶格是**Esaki**和**Tsu**在**1969**年提出的。
- **Esaki**等提出的超晶格有两类：1) 同质调制掺杂；2) 异质材料交替生长。
- 超晶格或多量子阱间的共振隧穿效应