

第四章 金-半接触与单极型器件

§4.1 金属-半导体接触

§4.2 肖特基势垒二极管SBD

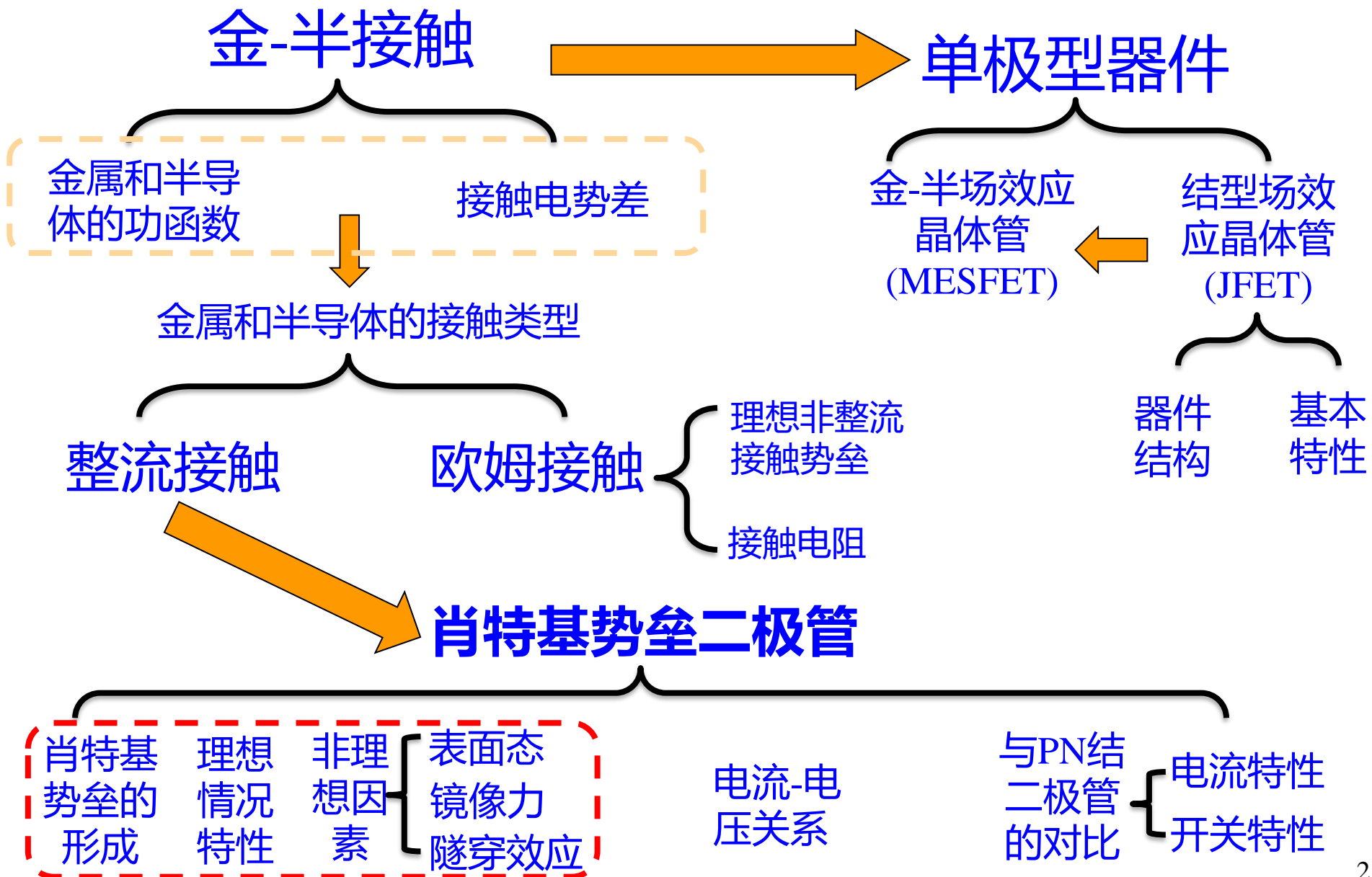
§4.3 欧姆接触

§4.4 结型场效应晶体管JFET

§4.5 金属-半导体场效应晶体管MESFET

§4.6 最近研究进展

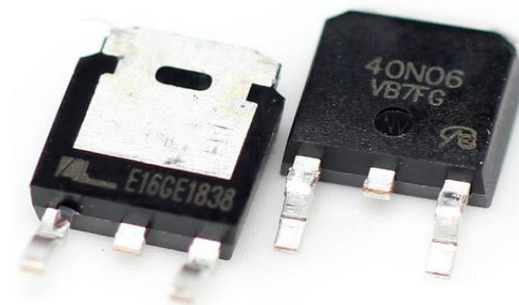
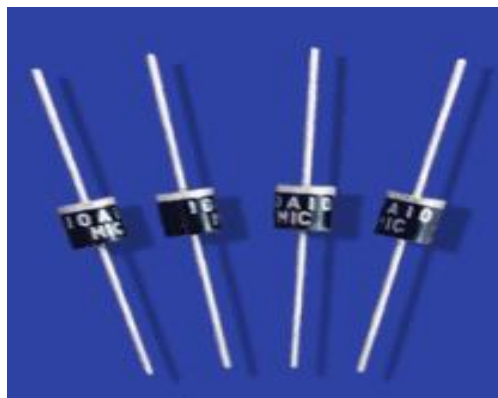
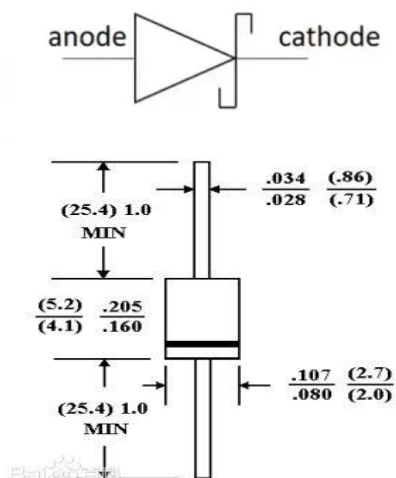
金-半接触与单极型器件基本知识体系框架



§4.1 金属半导体接触基本介绍

金属-半导体(M-S)结构:

- 把须状的金属触针压在半导体晶体上(点接触)或者在高真空下向半导体表面蒸镀大面积的金属薄膜(面接触)都可以获得金属-半导体结。
- 金属-半导体器件是应用于电子学的最古老的固态器件。早在1874年, 布劳恩(Braun)就提出了金属与硫化铝晶体点接触的不对称电导特性。



商用金属-半导体二极管 (肖特基二极管)

金属-半导体结构应用

最早于20世纪初期使用的一种半导体器件是金属-半导体二极管，这种点接触二极管是将金属须与裸露的半导体表面轻触而形成的，不容易形成，可靠性也不好。

被pn结取代

半导体技术和真空技术的发展。

金属半导体器件获得迅速的发展和应用。

整流特性：核粒子探测器、压力传感器、声波换能器等。

肖特基势垒场效应晶体管已在低噪声、大功率微波领域获得了重要的应用。

非整流特性：不论外加电压的极性如何，接触都具有低的欧姆压降而且不呈现整流效应。这种接触十分重要，几乎对所有半导体器件都是不可缺少的部分。

金半接触整流作用机理探究历程

肖特基(Schottky)、斯托梅尔(Stormer)和韦伯(Waibel)提出在金属和半导体接触处可能存在**某种势垒**

1931

1932

肖特基和莫特(Mott)各自独立地提出了电子以**漂移和扩散**过程越过势垒的看法

1938

1942

巴丁(Bardeen)提出了金属和半导体表面存在一个表面层因而存在受**表面态**控制的巴丁势垒

1947

威尔逊(Wilson)等用量子力学的隧穿效应通过势垒概念解释了金属半导体的整流性质

贝特(Bethe)提出了**热电子发射**理论

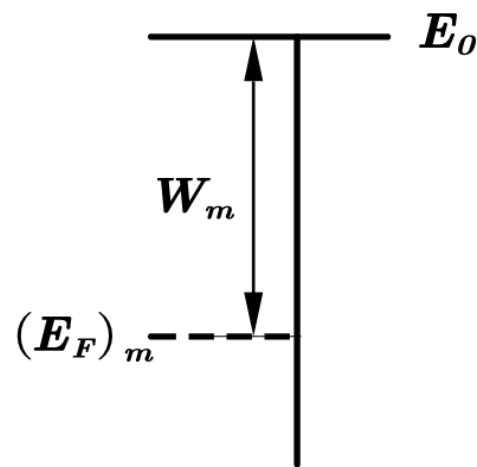
金属和半导体的功函数

金属中的电子势阱：

$T=0\text{K}$ 时，金属中的电子填满了**费米能级** E_F 以下的
的所有能级，而高于 E_F 的能级则全部是空的。

E_F 附近的少数电子受到热激发，由低于 E_F 的能级
跃迁到高于 E_F 的能级上去，但绝大多数所处的能
级都低于体外能级，因此绝大部分电子仍不能脱
离金属而逸出体外。金属中大量的导电电子能在
金属中自由运动，但不容易脱离金属的束缚。

金属内部的电子是在一个势阱中运动。要使电子
从金属中逸出，必须由外界给它以足够的能量。

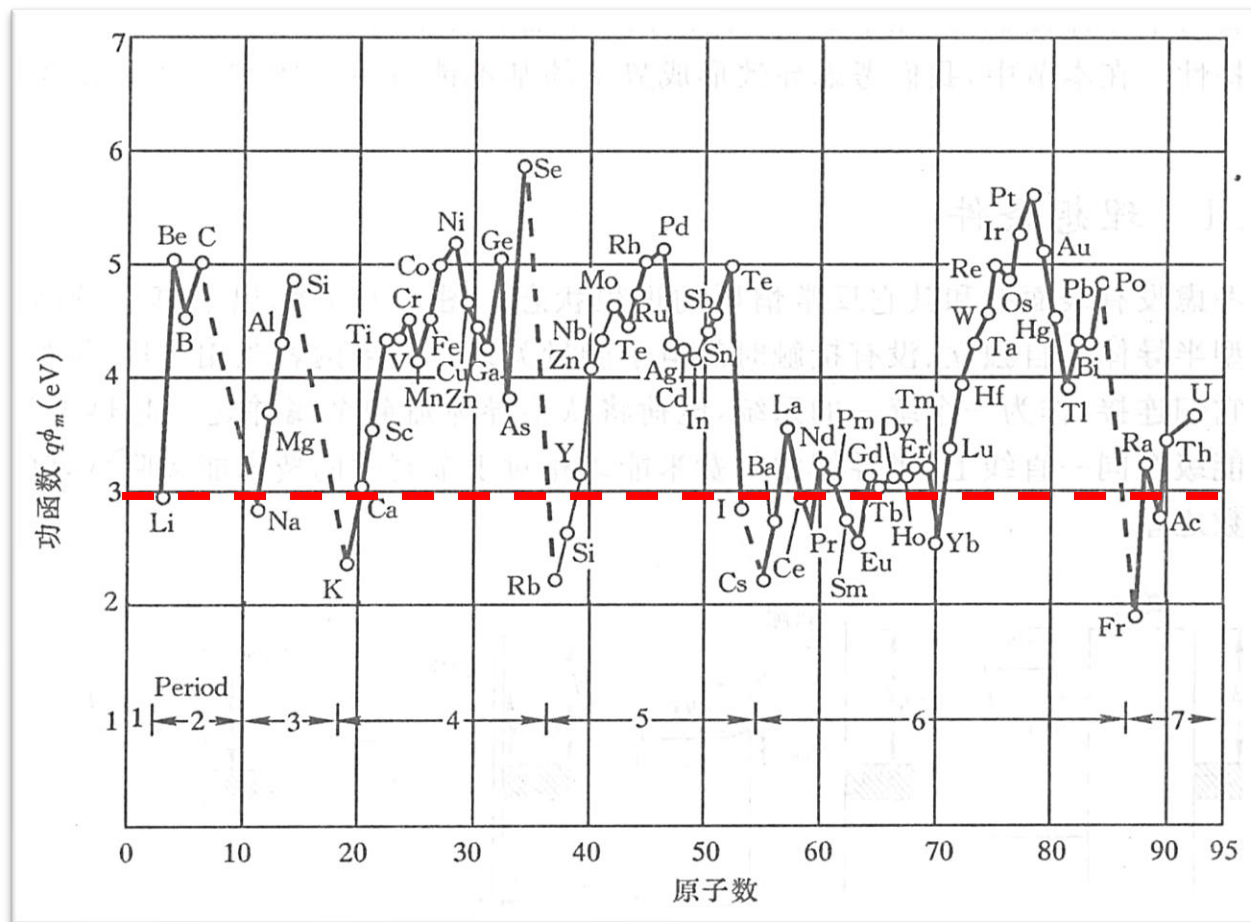


金属功函数： $W_m = E_0 - (E_F)_m$

**电子能量达到多
高才能逸出呢？**

真空能级 E_0 ：电子达到该能级时完全自由而不受原子的作用。
对于每一种**金属**，功函数 W_m 可看作是**固定**的。

金属和半导体的功函数

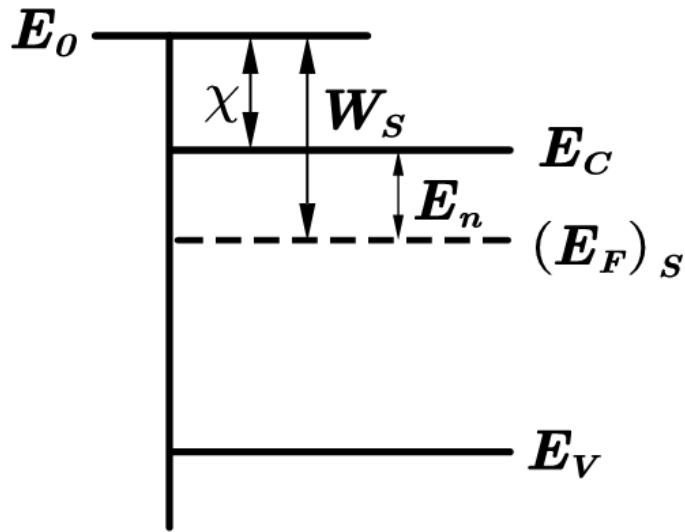


功函数与表面状况有关，清洁金属表面的功函数：

- 功函数约为几个电子伏特；
- 随着原子序数递增，功函数周期性变化。

金属和半导体的功函数

半导体功函数和电子亲和能



半导体功函数：

$$W_s = E_0 - (E_F)_s$$

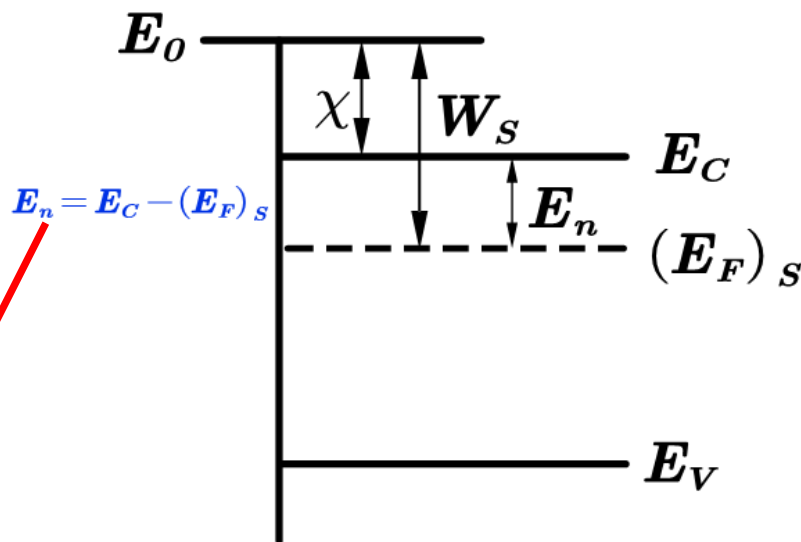
与金属类似，真空能级与费米能级 E_F 之差称为半导体的功函数，用 W_s 表示。

半导体电子亲和能： $\chi = E_0 - E_c$

χ 称为电子亲和能（亲和力），表示要使半导体导带底的电子逸出体外所需要的最小能量。

金属和半导体的功函数

为什么半导体的功函数是不确定的？



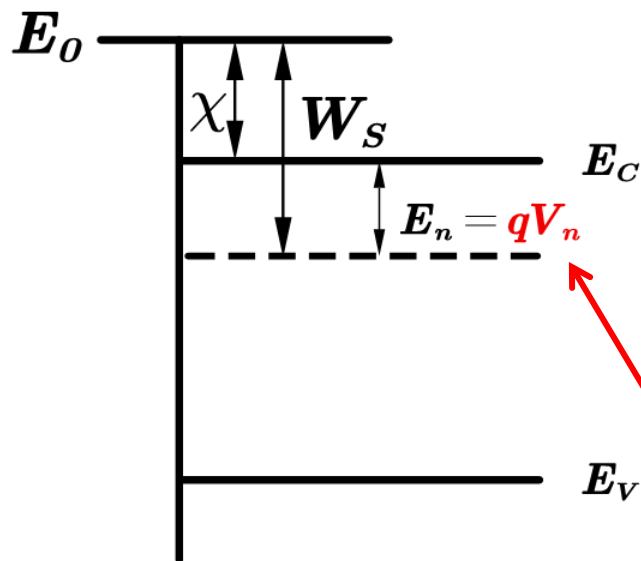
结合亲和能表达式，功函数也可表示为 $W_s = \chi + [E_C - (E_F)_s]$

$$E_n = E_C - (E_F)_s$$

$$W_s = \chi + E_n$$

当能带不弯曲的时候，即半导体内没有电场的时候，半导体功函数等于电子亲和能加上费米能级到导带底的能量差。

金属和半导体的功函数



对于 $(E - E_F) \gg kT$ 的情况，导带电子浓度为：

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right)$$

$$N_c = \frac{2(2\pi m_{dn} kT)^{3/2}}{h^3}$$

导带有效
状态密度

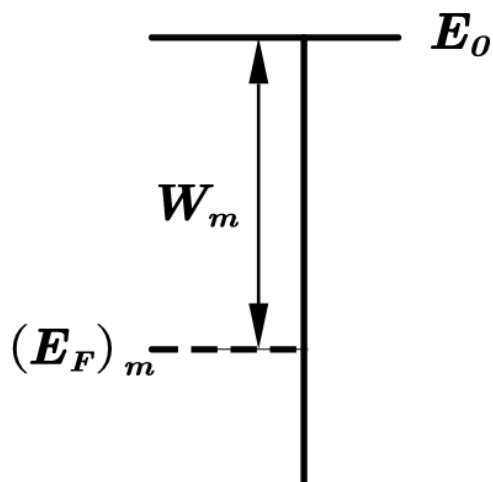
$$\star V_n = \frac{E_c - E_F}{q} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_c}{n} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_c}{N_d}$$

$$E_n = qV_n \longrightarrow W_s = \chi + E_n$$

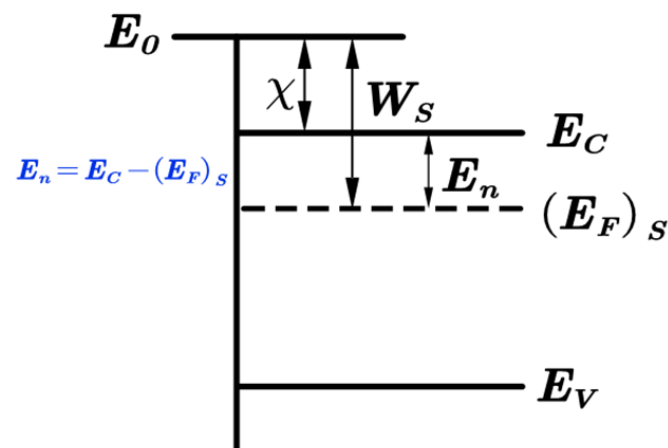
$$E_n = E_c - (E_F)_s$$

E_n 数值与掺杂浓度相关，显然半导体的功函数与掺杂浓度相关。

金属和半导体的功函数小结



金属的功函数



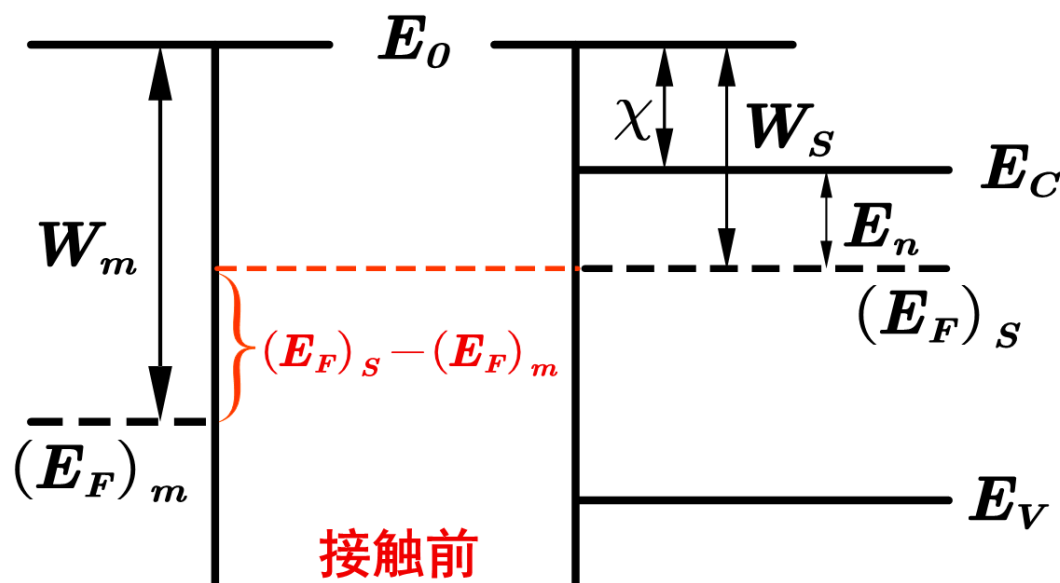
半导体功函数和电子亲和能

- ◆ 功函数给出了固体中 E_F 处的电子逃逸到真空所需的最小能量。
- ◆ 也标志了电子在金属中被束缚的程度， W_m 越大，电子越不易离开金属。
- ◆ 对半导体而言，其费米能级上电子填充概率很小，但是其功函数依旧定义为电子从费米能级到真空能级的能量差。实际上，功函数是个统计的概念，它代表从导带逸出电子所需能量的一个权重。

接触电势差的形成

设想有一块金属和一块n型半导体，它们具有共同的真空能级 E_0 ，并假定金属功函数大于半导体的功函数，即 $W_m > W_s$ 。

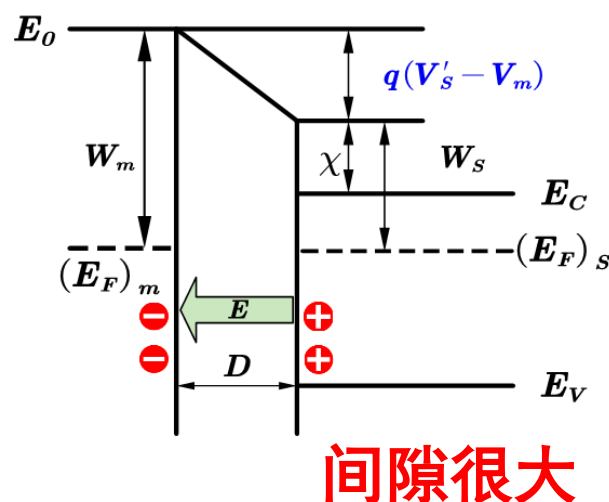
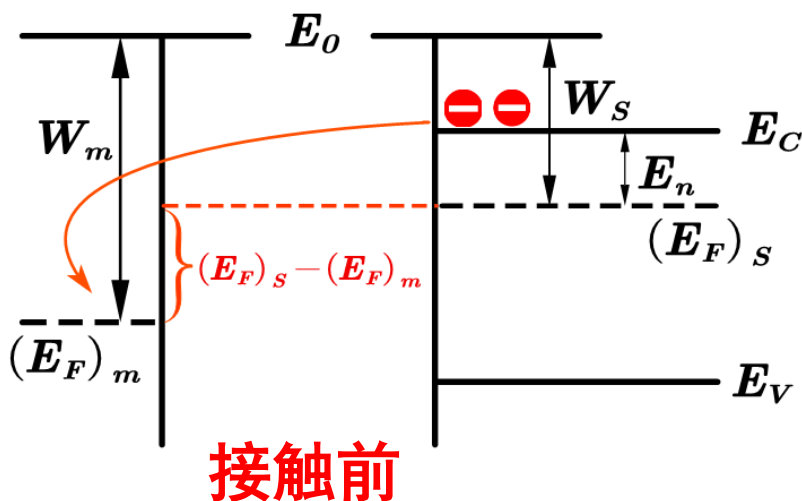
(理想状态：不考虑表面态和其他反常情形)



接触前，两块材料是分立的，能带处于平衡状态。显然半导体的费米能级 $(E_F)_s$ 高于金属的费米能级 $(E_F)_m$ ，且此时：

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

接触电势差的形成



金属半导体接触后但间隙 D 很大的情况：此时它们要成为一个统一的电子系统，由于原本半导体的 $(E_F)_s$ 高于金属的 $(E_F)_m$ ，半导体中的电子向金属流动，使金属表面带负电，半导体表面带等量正电，保持电中性。结果金属电势降低，半导体电势增加。最后达到平衡，两者费米能级处于同一水平。此电势差补偿了原费米能级的不同。由图：

$$q(V'_s - V_m) = W_m - W_s$$

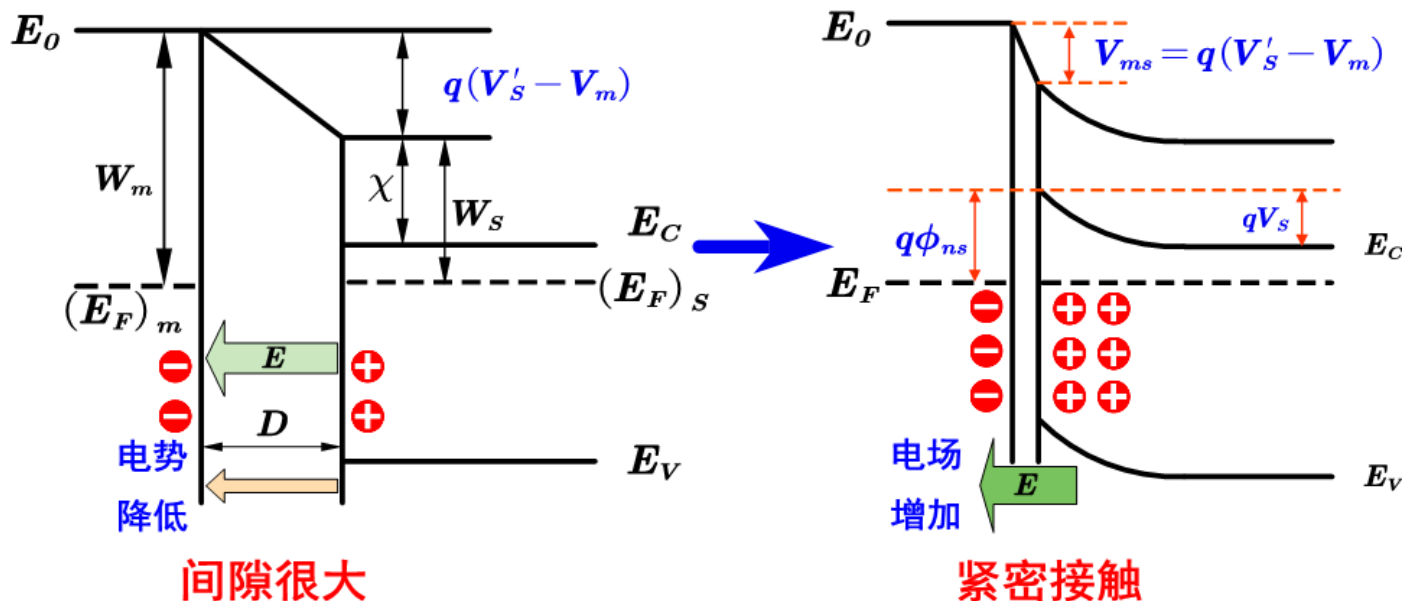
V_m 为金属电势
 V'_s 为半导体电势

由于接触而产生的电势差称为接触电势差

$$\frac{W_s - W_m}{q} = V_m - V'_s = V_{ms} < 0$$

V_{ms} 表示金属-半导体间隙的电势差。 $V_{ms} < 0$ 表示金属电势低，半导体电势高。

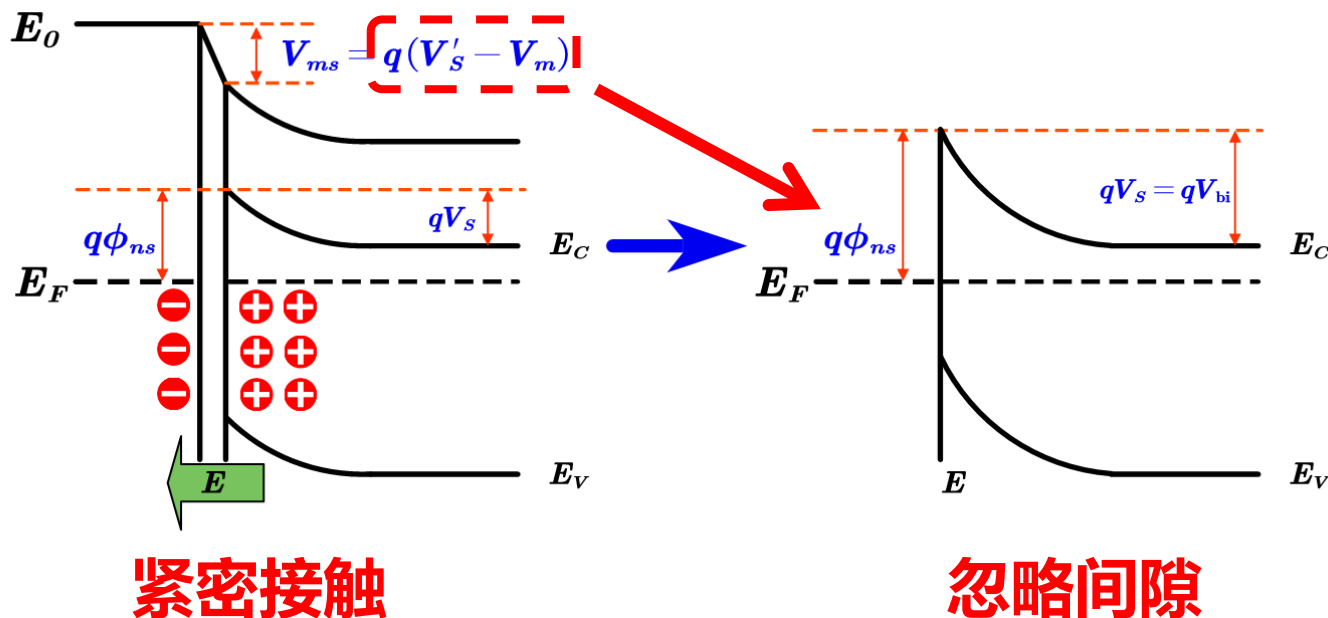
接触电势差的形成



随着 D 的减小，由高斯定理 $E = \frac{|V_{ms}|}{D} = \frac{\sigma}{\varepsilon}$ ，表面电荷密度增加。由于半导体自由电荷密度的限制，其正电荷分布在半导体表面相当厚的一层表面层，即空间电荷区。空间电荷区存在一定电场，造成能带弯曲，使半导体表面与内部存在电势差 V_s ，即表面势。此时接触电势差降落在金属-半导体间隙和半导体空间电荷区，即：

$$\frac{W_s - W_m}{q} = V_{ms} + V_s \quad V_{ms} < 0, \quad V_s < 0$$

接触电势差的形成



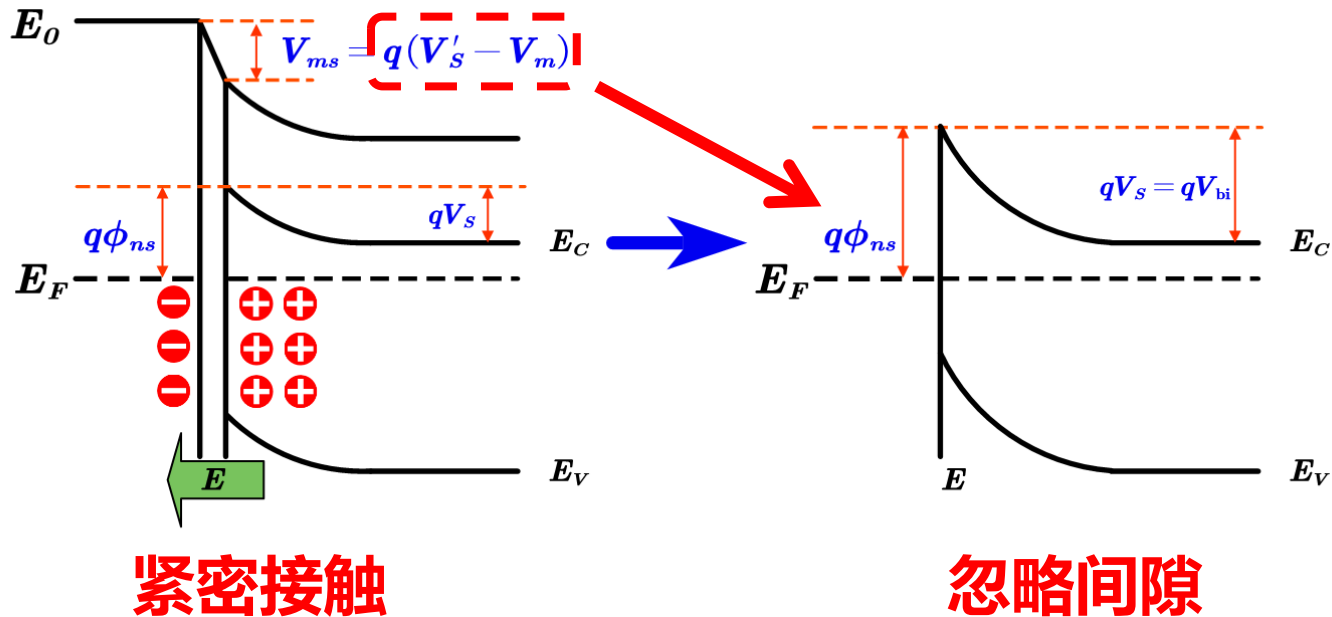
当我们忽略间隙中的电势差，此时接触电势差完全降落在半导体的空间电荷区 (V_s)。

这时：

接触电势差 = 半导体表面与内部电势差

$$(W_s - W_m)/q = V_s \quad (V_s = -V_{bi})$$

接触电势差的形成



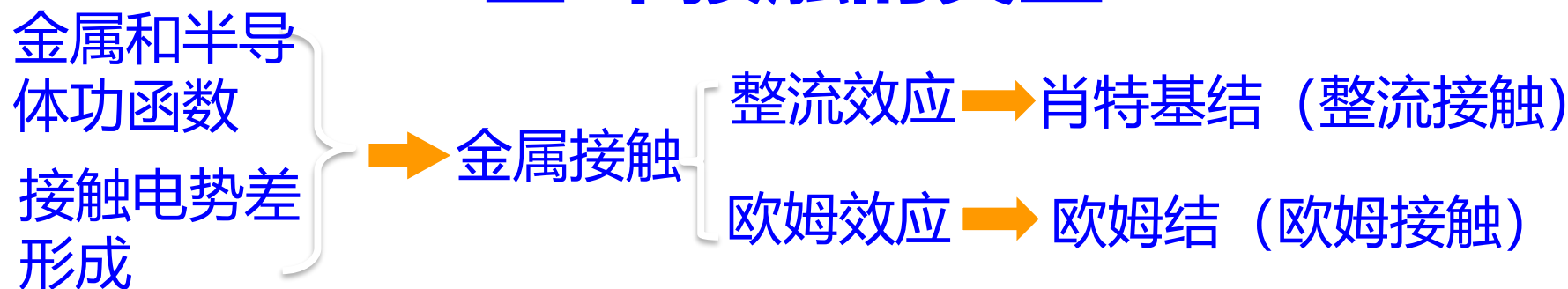
$$V_s = (W_s - W_m) / q$$

半导体势垒高度为: $qV_{bi} = -qV_s = W_m - W_s$

金属一边势垒高度: $q\phi_{ns} = qV_{bi} + E_n = W_m - W_s + E_n$
 $= W_m - (W_s - E_n) = W_m - \chi$

为了使问题简化, 接下来**只讨论这种忽略间隙的极限情况。**

金-半接触的类型



◆肖特基结：

1938年，由肖特基提出，半导体内稳定的空间电荷形成的势垒可能有整流作用。由此产生的势垒模型就是所谓肖特基势垒。金属-半导体形成的具有整流效应的结称为肖特基结。

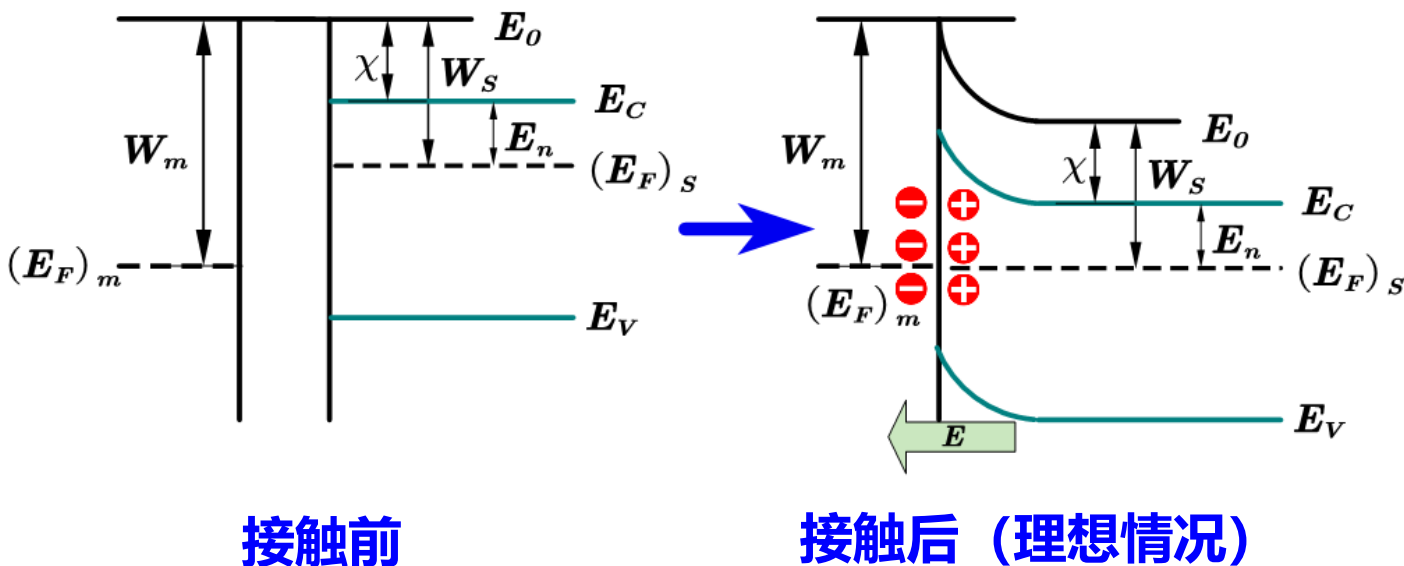
◆欧姆结：

金属-半导体接触也可能是非整流性的，即不管所加电压极性如何，接触电阻均可忽略，这种金属-半导体接触称为欧姆接触。为实现电子系统中的相互连接，所有半导体器件和集成电路都必须有欧姆接触。

金-半接触的类型

对金属-n型半导体肖特基接触：

① 金属功函数 $q\phi_M$ 大于n型半导体功函数 $q\phi_S$ ，即 $\phi_M > \phi_S$

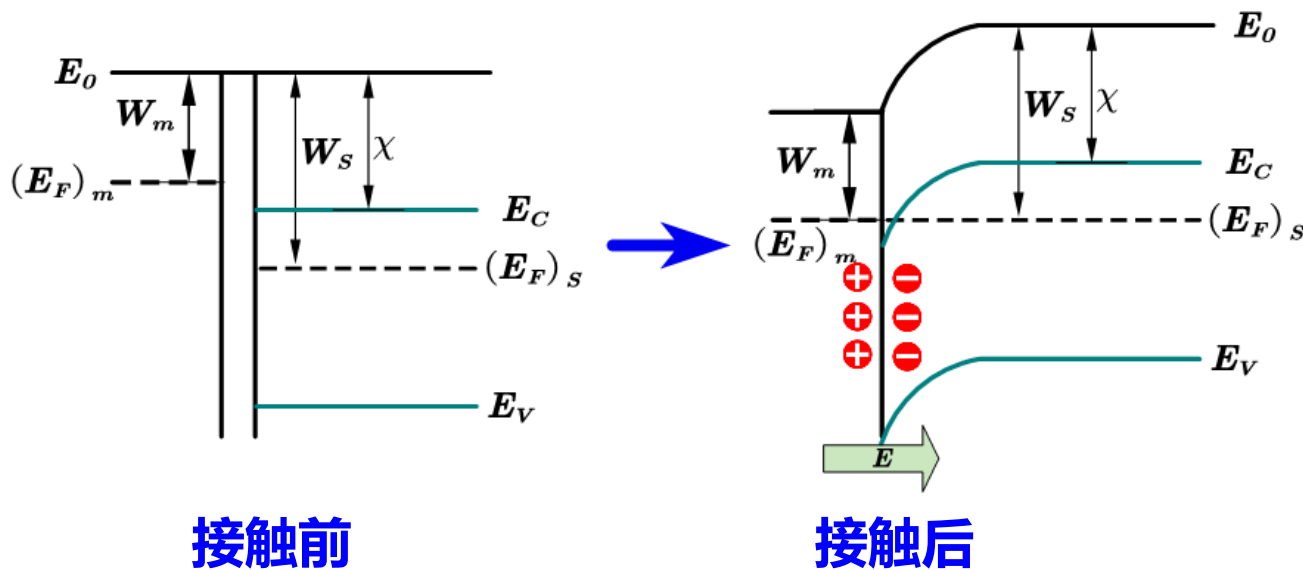


- 若 $W_M > W_S$ ，即 $q\phi_M > q\phi_S$ ，则在半导体表面形成一个**正的空间电荷区**，其中电场方向由体内指向表面，它使半导体表面电子的能量高于体内，**能带向上弯曲**，即形成表面势垒。
- 在势垒区中，空间电荷主要由电离施主形成，电子浓度要比体内小得多，因此它是一个**高阻**的区域，常称为**阻挡层**。

金-半接触的类型

对金属-n型半导体欧姆接触：

② 金属功函数 $q\phi_M$ 小于n型半导体功函数 $q\phi_S$ ，即 $\phi_M < \phi_S$

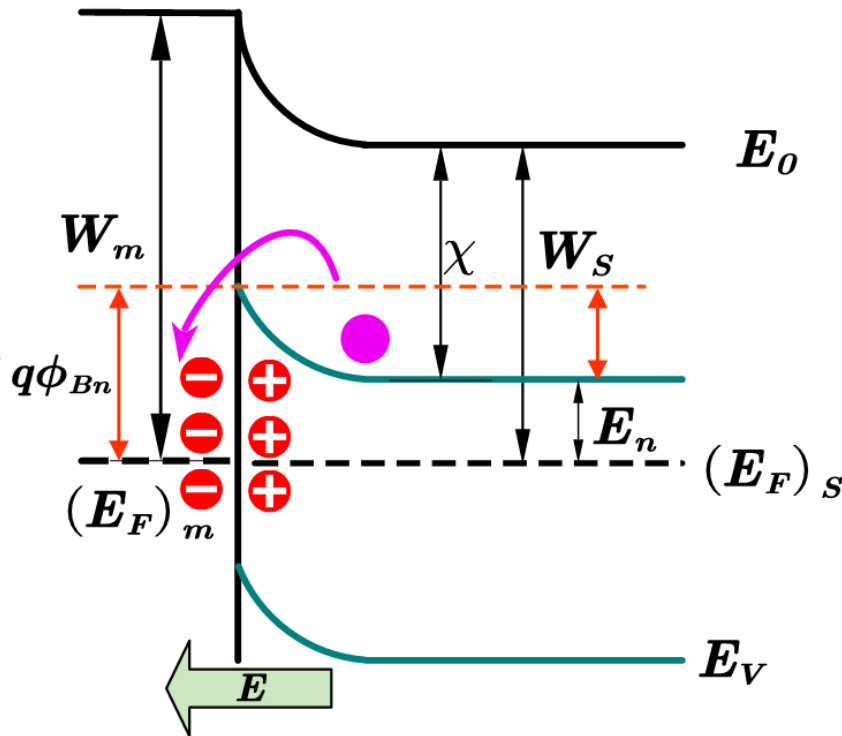


◆ 若 $W_M < W_S$ ，即 $q\phi_M < q\phi_S$ ，则金属与n型半导体接触时，电子将从金属流向半导体，在半导体表面形成负的空间电荷区。其中电场方向由表面指向体内，能带向下弯曲。这里电子浓度比体内大得多，因而是一个高电导的区域，称为反阻挡层。

◆ 反阻挡层是很薄的高电导层，半导体和金属接触电阻很小。所以，反阻挡层与阻挡层不同，在平常的实验中觉察不到它的存在。

金-半接触的类型

对金属-n型半导体，接触后的势垒高度：



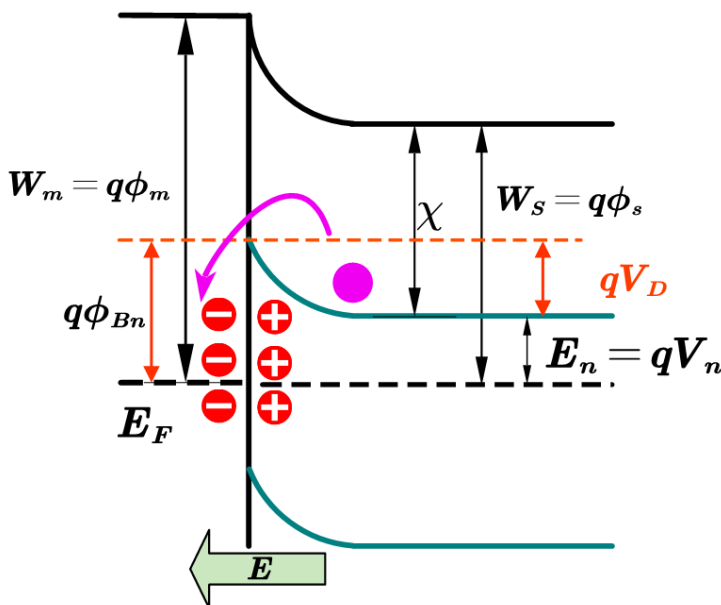
金属一边的势垒高度（肖特基势垒SB）： $q\phi_{SB} = q\phi_{Bn}$

$q\phi_{SB}$ 表示金属端电子跃迁到半导体导带，需要经历的势垒。

$q\phi_{SB}$ 几乎与外加电压无关。

金-半接触的类型

对金属-n型半导体，接触后的势垒高度：



- 图中 qV_n 为半导体的导带底和费米能级之差；
- qV_D 表示半导体端导带电子跃迁到金属过程中，需要经历的一个势垒。

对于这种理想的情况，势垒高度 $q\phi_{Bn}$ 就是金属功函数和半导体电子亲和能之差。对于理想的金属与n型半导体接触：

势垒高度为： $q\phi_{Bn} = q\phi_M - \chi$

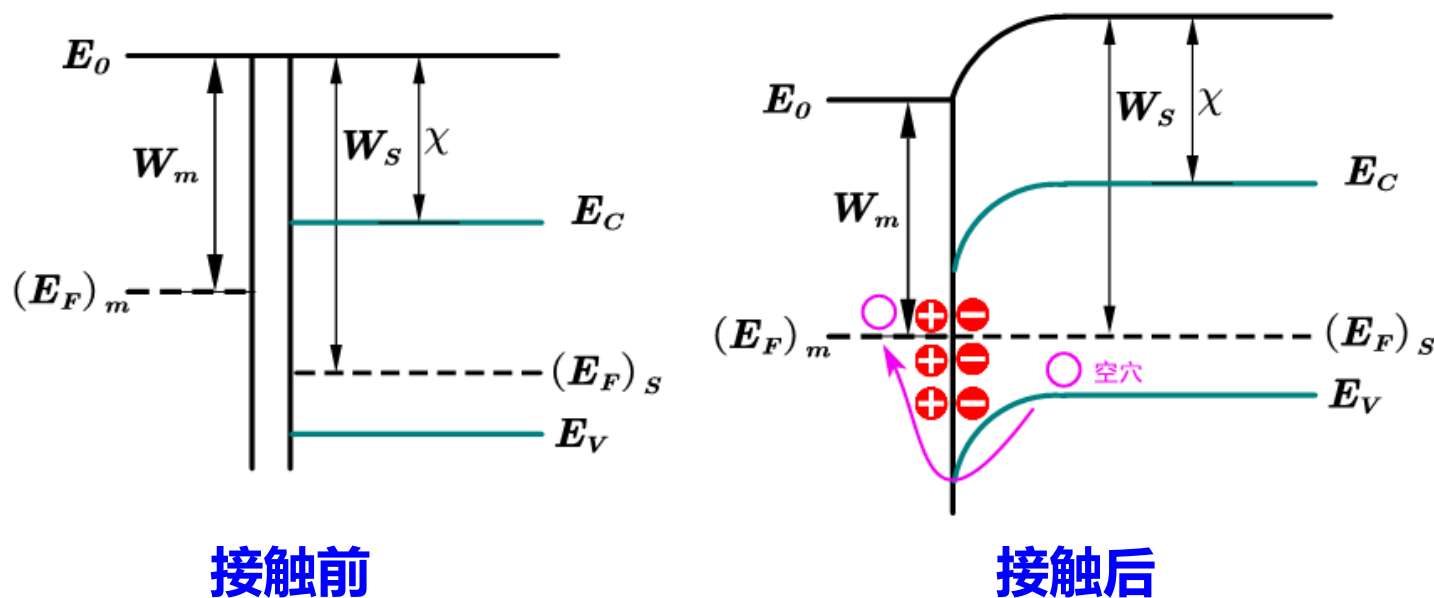
还可以写成： $q\phi_{Bn} = q(V_D + V_n)$

n型半导体内建电势： $V_D = -V_S = (W_M - W_S)/q \rightarrow V_D = \phi_M - \phi_S$

金-半接触的类型

对金属-p型半导体肖特基接触：

① 金属功函数 $q\phi_M$ 小于p型半导体功函数 $q\phi_S$ ，即 $\phi_M < \phi_S$

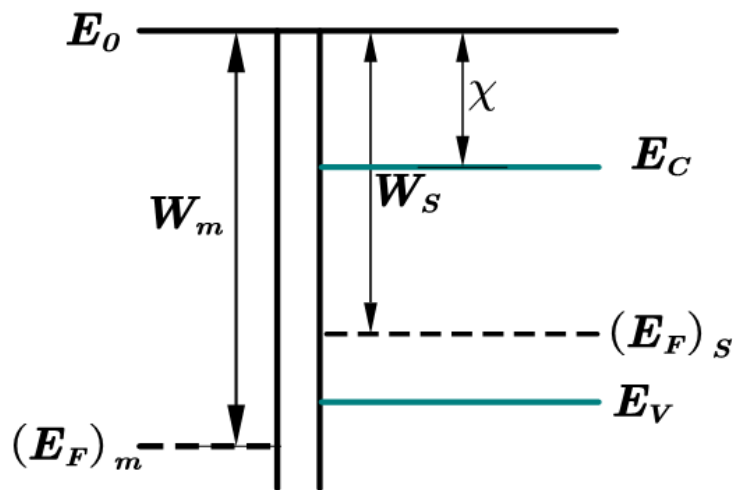


金属和p型半导体接触时，形成阻挡层的条件正好与n型的相反。当 $W_M < W_S$ ，即 $q\phi_M < q\phi_S$ ，则金属与p型半导体接触时，空穴将从半导体流向金属，在半导体表面形成负的空间电荷区。其中电场方向由表面指向体内，能带向下弯曲，造成空穴的势垒，形成p型阻挡层。

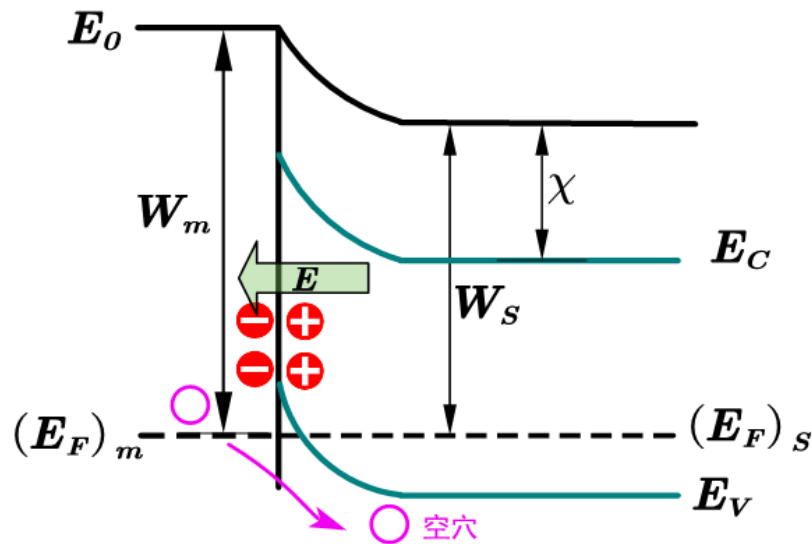
金-半接触的类型

对金属-p型半导体欧姆接触：

② 金属功函数 $q\phi_M$ 大于p型半导体功函数 $q\phi_S$ ，即 $\phi_M > \phi_S$



接触前

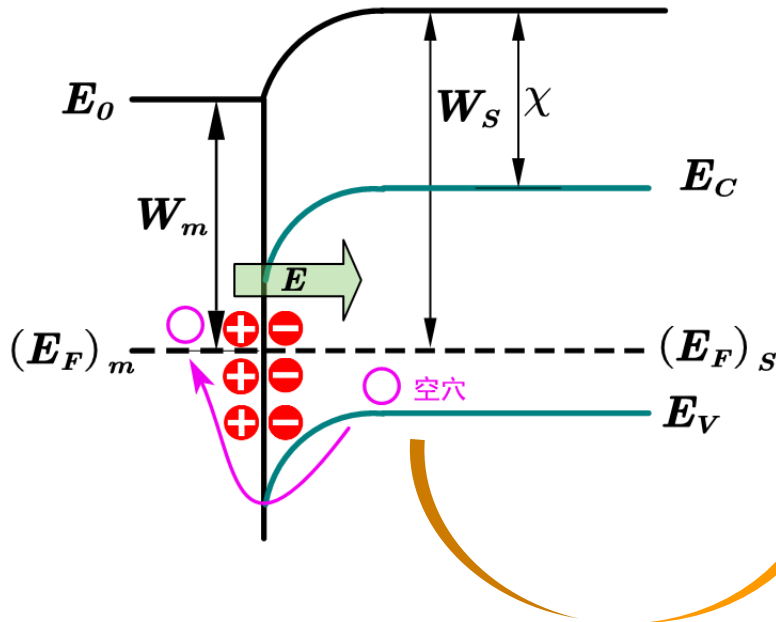


接触后

若 $W_M > W_S$ ，即 $q\phi_M > q\phi_S$ ，则金属与p型半导体接触时，空穴将从金属流向半导体，在半导体表面形成正的空间电荷区。其中电场方向由体内指向表面，能带向上弯曲，形成p型反阻挡层。

金-半接触的类型

对金属-p型半导体，接触后的势垒高度：



D

对于理想的金属分别与p型半导体接触，其势垒高度为：

$$q\phi_{Bp} = E_g + \chi - W_m = E_g - q\phi_m + \chi$$

与n型半导体接触，其势垒高度： $q\phi_{Bn} = q\phi_M - \chi$

★ $q\phi_{Bn} + q\phi_{Bp} = E_g$

对于任意给定的半导体和金属的组合，n型和p型衬底的肖特基势垒高度之和等于带隙

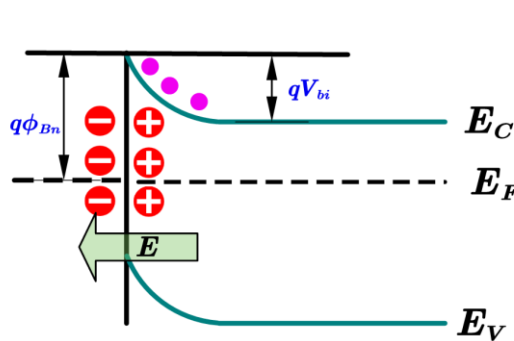
金-半接触的类型

对金属-n型半导体:

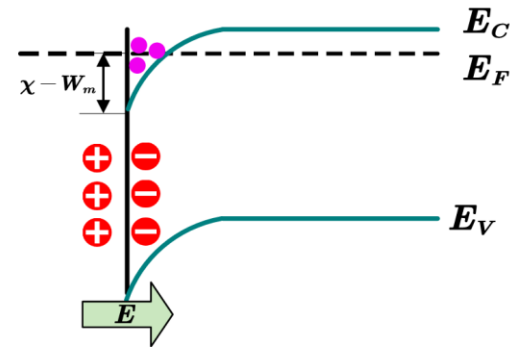
$W_m > W_s$, 能带上弯--电子势垒
空间电荷—电离施主 (带正电)

$W_m < W_s$, 能带下弯--电子势阱
空间电荷—电子积累 (带负电)

◆ 势垒—阻挡层, 势阱—反阻挡层



$W_m > W_s$ 电子势垒



$W_m < W_s$ 电子势阱

金-半接触的类型

对金属-p型半导体:

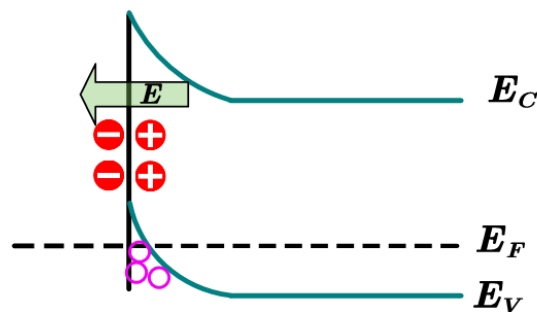
$W_m > W_s$, 能带上弯--空穴势阱

空间电荷—空穴积累 (带正电)

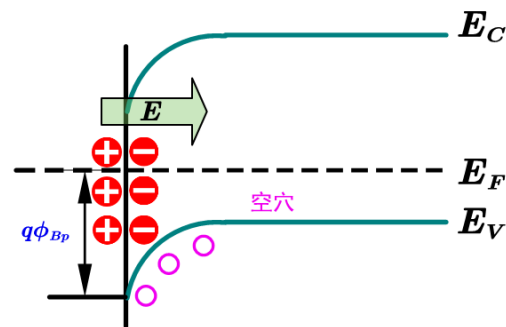
$W_m < W_s$, 能带下弯--空穴势垒

空间电荷—电离受主 (带负电)

势垒—阻挡层, 势阱—反阻挡层



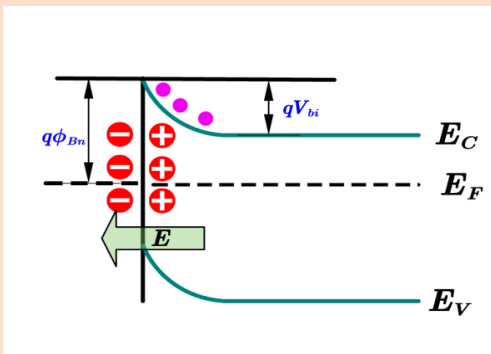
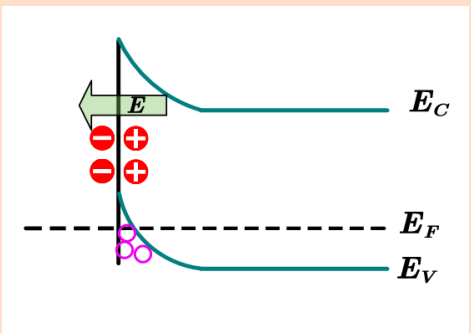
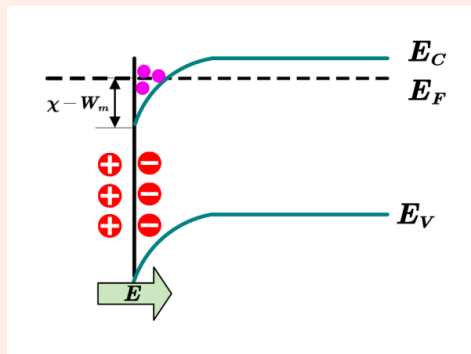
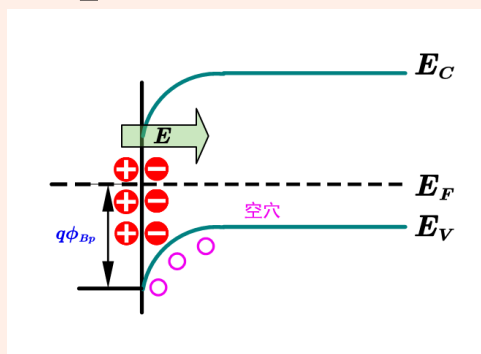
$W_m > W_s$ 空穴势阱



$W_m < W_s$ 空穴势垒

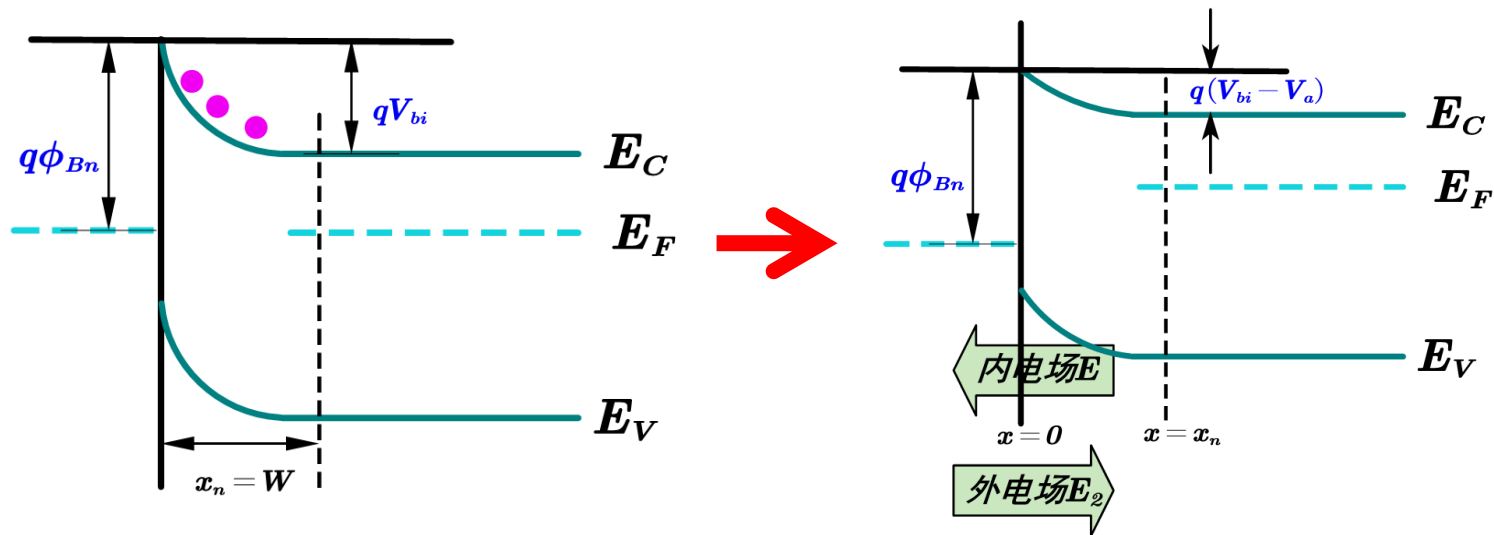
金-半接触的类型小结

形成n型和p型阻挡层、反阻挡层的条件：

	n型半导体	p型半导体
$W_m > W_s$	<p>n型阻挡层</p> 	<p>p型反阻挡层</p> 
$W_m < W_s$	<p>n型反阻挡层</p> 	<p>p型阻挡层</p> 

§4.2 肖特基势垒二极管SBD

理想情况下，正偏肖特基结的能带图



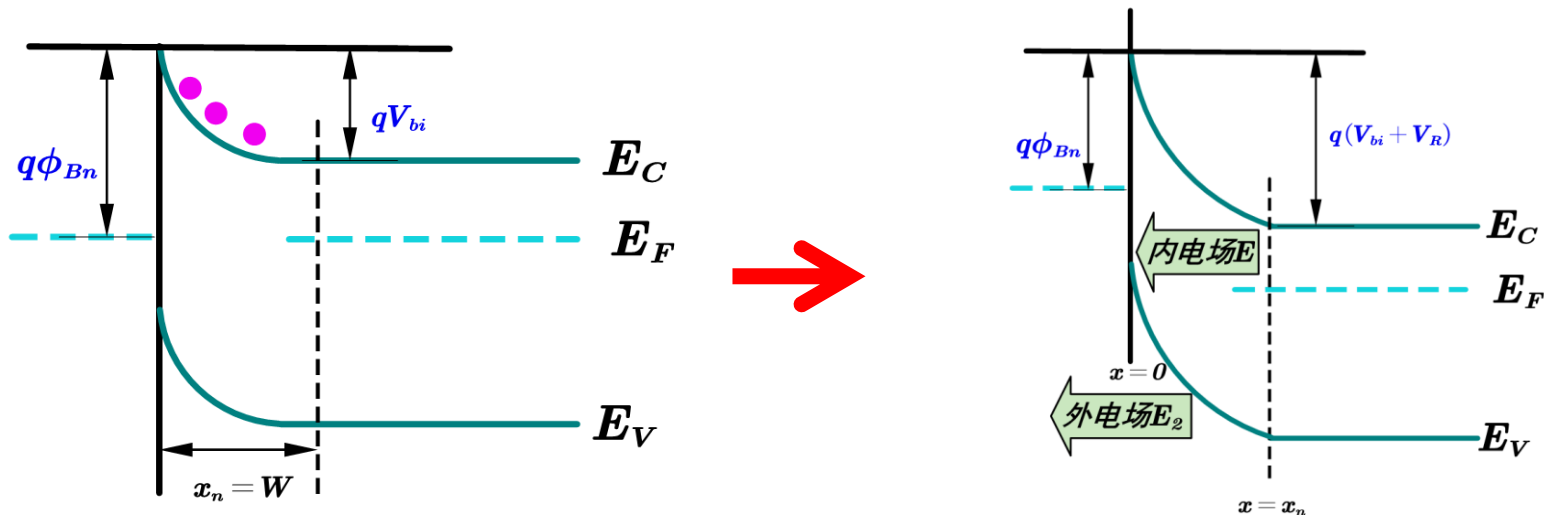
零偏

半导体处施加负电压，金属端施加正电压

- ◆ **正向偏压**：在金属上加**正电压** V_a ，正偏下半导体中的电子能级相对金属的向上移动 qV_a ，势垒高度则由 qV_{bi} 变成 $q(V_{bi} - V_a)$ 。
- ◆ 由于金属一侧的空间电荷层相对很薄基本保持不变。**半导体一侧势垒的降低**使得半导体中的电子**更易于移向金属**，能够流过大的正向电流。

§4.2 肖特基势垒二极管SBD

理想情况下，反偏肖特基结的能带图

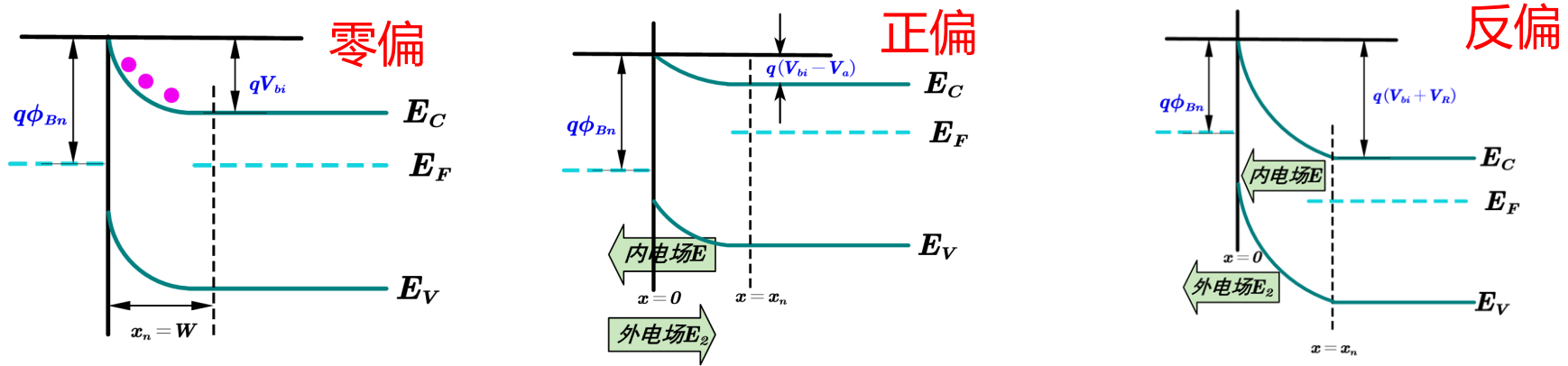


零偏

半导体处施加正电压，金属端施加负电压

- ◆ 反向偏压：半导体加正电压 V_R 。反偏下，半导体中的电子能级相对金属向下移动 qV_R ， $e\phi_{Bn}$ 基本保持不变。半导体与金属之间的电势差增加为 $(V_{bi} + V_R)$ 。
- ◆ 如图所示，被提高的势垒 $q(V_{bi} + V_R)$ 阻挡电子由半导体向金属运动，因此金属到半导体的电子流占优势，形成反向电流。而金属中的电子要越过相当高的势垒 $e\phi_{Bn}$ 才能到达半导体中，因此反向电流很小。

理想情况下，肖特基结有偏压下的能带图与 p^+n 结非常类似

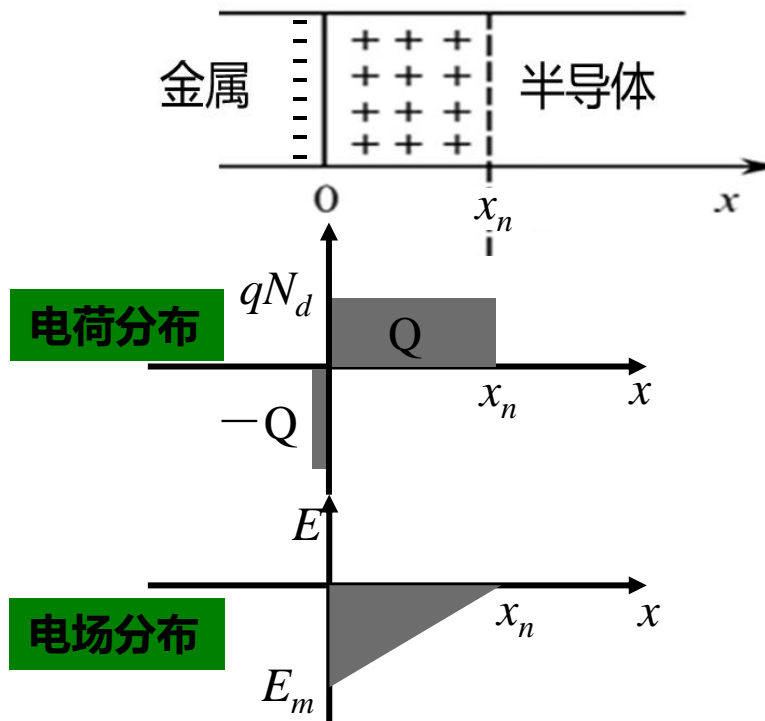


- ◆ 当施加偏压的时候，由于耗尽区阻抗比金属和半导体体内阻抗大很多，所加电压几乎全加在耗尽区上。
- ◆ 正偏时，由于金属一侧的空间电荷层相对很薄，基本上保持不变。半导体一侧势垒的降低使得半导体中的电子更易于移向金属，能够流过大的电流。
- ◆ 反偏时，半导体侧提高的势垒阻挡电子由半导体向金属移动，金属向半导体的电流占主导但很小，总的反偏电流很小。
- ◆ 肖特基势垒具有单向导电性，即整流特性。

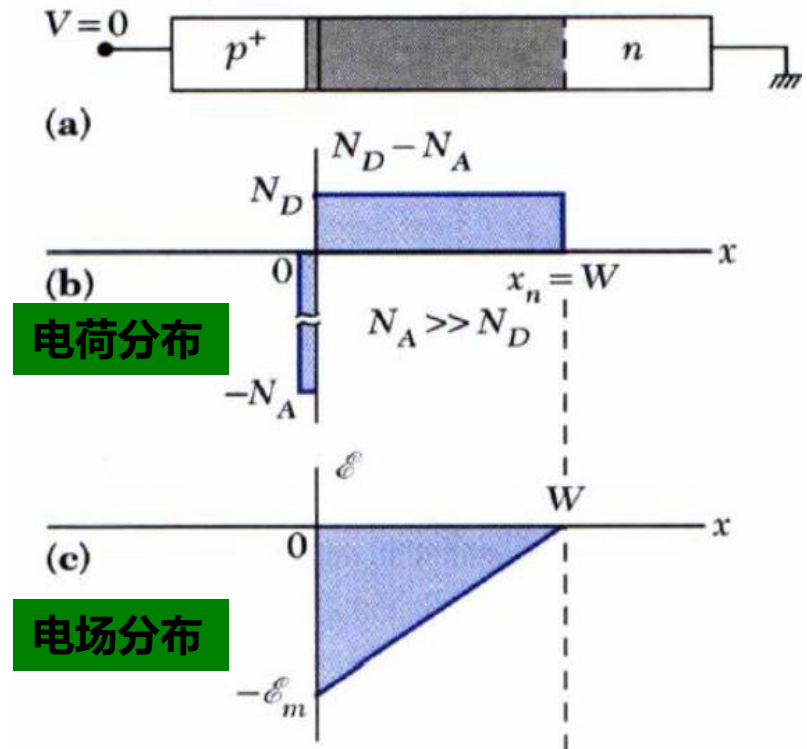
势垒区的电荷分布

金属与n型半导体接触 ($W_M > W_S$)，金属一侧有负表面电荷，半导体一侧存在等量的但极性相反的正空间电荷。这种电荷分布和具有同样电场分布的P⁺N结完全相同。

SBD:



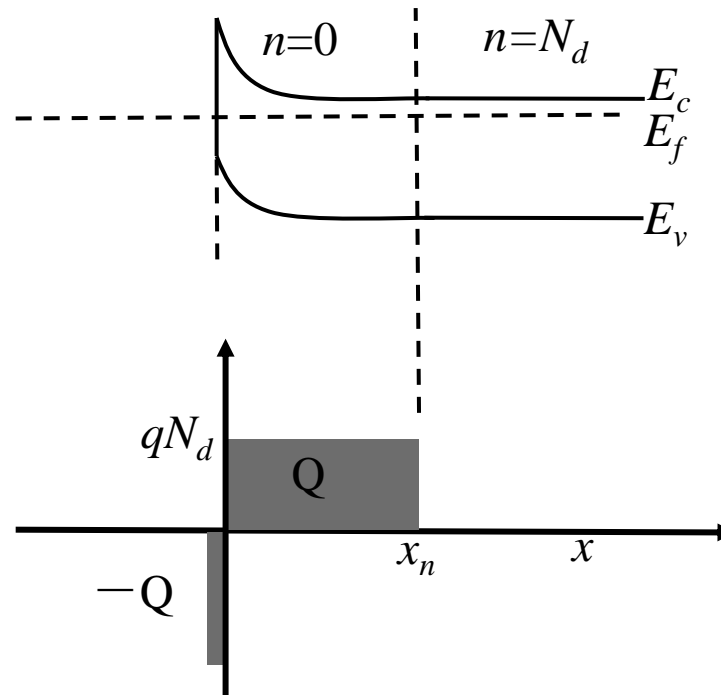
P⁺N结:



金-半接触的电场分布

为了简单起见，假设（耗尽近似）：

- ◆ 忽略半导体的空穴浓度，即 $p=0$
- ◆ 在 $x=0$ 到 $x=x_n$ 的半导体表面势的范围内， $n=0$ （耗尽近似）
- ◆ 当 $x > x_n$ 时， $n=N_d$ （完全电离）
- ◆ 在空间电荷区总电荷为 $Q=qN_d x_n A$



金-半接触的电场分布

泊松方程:

(电势与电荷密度的关系)

$$\frac{dE(x)}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_s} \quad \leftarrow \rho(x) = qN_d$$

$\rho(x)$ 是空间电荷区的体密度, ϵ_s 是半导体的介电常数

将上式积分后, 可得:

$$E(x) = \int \frac{qN_d}{\epsilon_s} dx = \frac{qN_dx}{\epsilon_s} + C_1 \quad C_1 \text{是积分常数}$$

由于半导体**空间电荷区边界** (即 $x=x_n$ 处) **的电场强度 E 为零**。
即 $E(x_n)=0$, 可求积分常数为:

$$C_1 = -\frac{qN_dx_n}{\epsilon_s}$$

将其带入上式, **场强**为:

$$E(x) = \frac{qN_dx}{\epsilon_s} - \frac{qN_dx_n}{\epsilon_s} = -\frac{qN_d}{\epsilon_s} (x_n - x)$$

金-半接触的电势分布

电场分布:

$$E(x) = -\frac{qN_d}{\epsilon_s}(x_n - x)$$

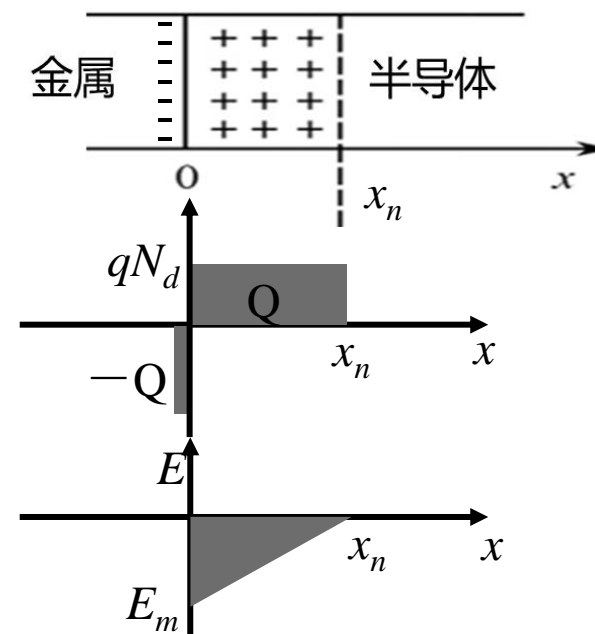
在 $x=0$ 处, 电场 E 最大:

$$E_{max} = E(0) = -\frac{qN_d x_n}{\epsilon_s}$$

电势分布: $V(x) = -\int E(x) dx$

假设 x_n 处为电势零点, 由边界条件 $V(x_n)=0$, 得:

$$V(x) = -\frac{qN_d}{2\epsilon_s}(x_n - x)^2$$



金-半接触的半导体耗尽区宽度 $W (=x_n)$

金-半接触的接触电势差:

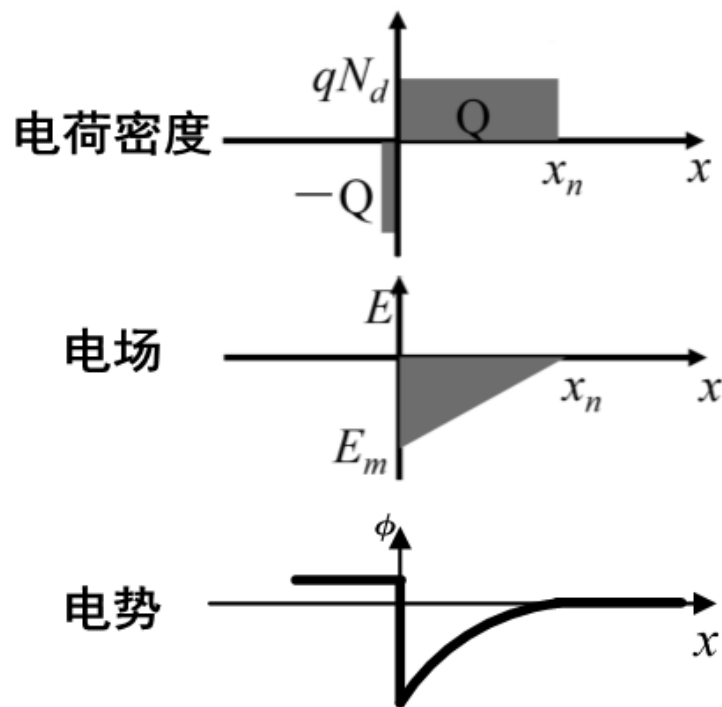
$$V(x) = -\frac{qN_d}{2\varepsilon_s}(x-x_n)^2 \quad \text{电势分布}$$



$$\phi_i = \phi_M - \phi_S = V(x_n) - V(0) = \frac{qN_d}{2\varepsilon_s}x_n^2$$

空间电荷区宽度 x_n 与表面势 ϕ_i 关系:

$$x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s\phi_i}{qN_d}}$$



接触电势差 $|\phi_i| = \text{表面势 } |V_s|$

金-半接触的半导体耗尽区宽度 $W (=x_n)$

耗尽区宽度 W 与接触电势差 ϕ_i 的关系:

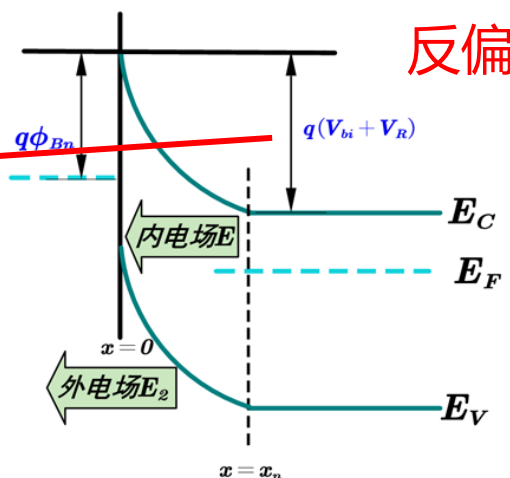
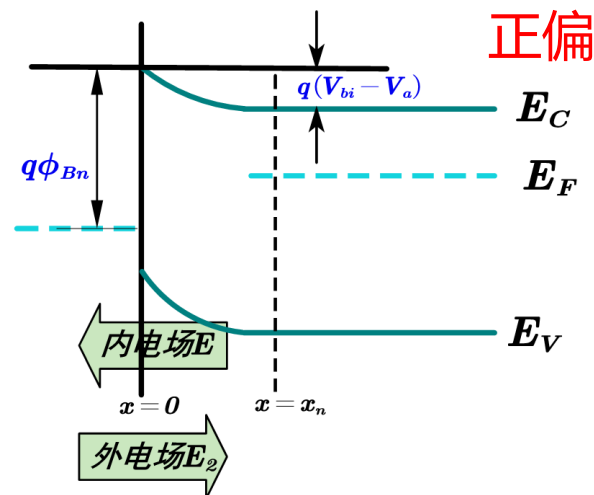
$$W=x_n=\sqrt{\frac{2\varepsilon_s\phi_i}{qN_d}}$$

- ◆ 零偏下, 半导体金属间电势差 $\phi_i=V_{bi}$;
- ◆ 正偏下, 半导体金属间电势差 ϕ_i 减少为 $(V_{bi}-V_a)$;
- ◆ 反偏下, 半导体金属间电势差 ϕ_i 增加为 $(V_{bi}+V_R)$ 。

半导体表面耗尽区宽度为:

$$W=\sqrt{\frac{2\varepsilon_s(V_{bi}+V)}{qN_d}}$$

正向偏置时, 上式中外加电压 V 取负值;
反向偏置时, 外加电压 V 取正值。



金-半接触的耗尽区电容

耗尽区宽度 $W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi}+V)}{qN_d}}$

耗尽区单位面积的空间电荷量 Q_{sc} (C/cm²):

$$Q_{sc} = qN_d W = \sqrt{2qN_d\epsilon_s(V_{bi}+V)}$$

单位面积耗尽区电容 C (F/cm²):

$$C = \left| \frac{\partial Q_{sc}}{\partial V} \right| = \sqrt{\frac{qN_d\epsilon_s}{2(V_{bi}+V)}}$$

$$C = \frac{\epsilon_s}{W}$$

类似于平板电容器

例题：考虑金属钨与n型硅的接触，掺杂浓度为 $N_d=10^{16}\text{cm}^{-3}$ ，温度为 $T=300\text{K}$ 。计算势垒高度的理论值、内建电势差以及金属半导体二极管零偏压时电场强度的最大值。（金属钨的功函数为 $q\phi_i=4.55\text{eV}$ ，硅的电子亲和能为 $\chi=4.01\text{eV}$ ）

解：势垒高度理想值为：

$$q\phi_{Bn} = q\phi_m - \chi = 4.55 - 4.01 = 0.54\text{eV}$$

E_c 与 E_F 之间的电势差：

$$\phi_n = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_c}{N_d}\right) = 0.0259 \ln\left(\frac{2.8 \times 10^{19}}{10^{16}}\right) = 0.206\text{V}$$

内建电势差为：

$$V_{bi} = \phi_{Bn} - \phi_n = 0.54 - 0.206 = 0.334\text{V}$$

耗尽层宽度及最大电场强度见下一页

例题：考虑金属钨与n型硅的接触，掺杂浓度为 $N_d=10^{16}\text{cm}^{-3}$ ，温度为 $T=300\text{K}$ 。计算势垒高度的理论值、内建电势差以及金属半导体二极管零偏压时电场强度的最大值。（金属钨的功函数为 $\phi_i=4.55\text{V}$ ，硅的电子亲和势为 $\chi=4.01\text{V}$ ）

解：耗尽层宽度为：

$$x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s V_{bi}}{qN_d}} = \sqrt{\frac{2(11.7)(8.85 \times 10^{-14})(0.33)}{(1.6 \times 10^{-19})(10^{16})}} = 2.07 \times 10^{-5} \text{cm}$$

最大电场强度为：

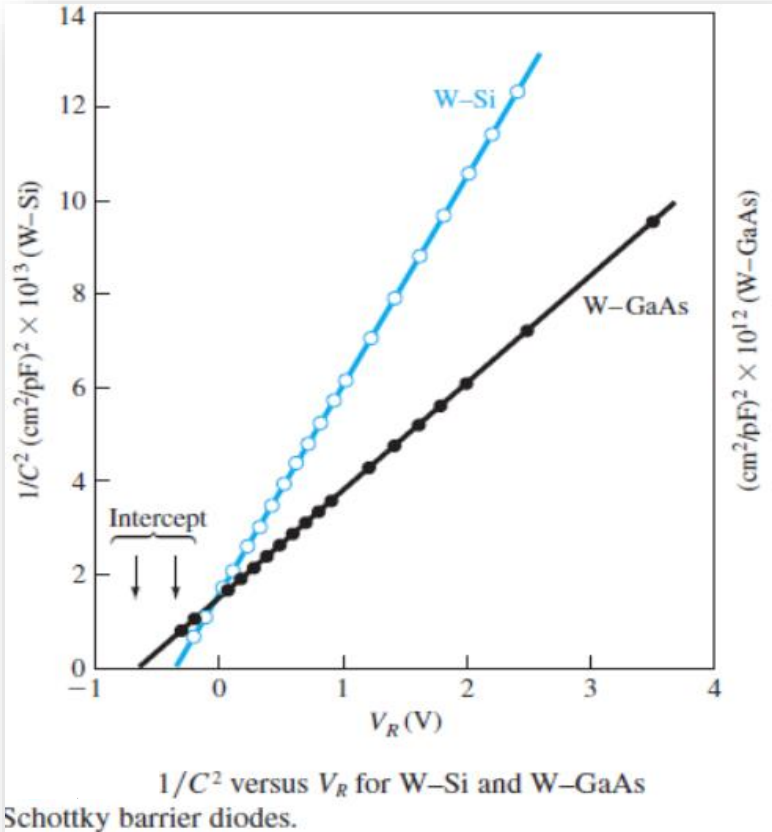
$$E_{max} = \frac{qN_d x_n}{\varepsilon_s} = \frac{(1.6 \times 10^{-19})(10^{16})(0.207 \times 10^{-4})}{(11.7)(8.85 \times 10^{-14})}$$

$$E_{max} = 3.2 \times 10^4 \text{V/cm}$$

金-半接触的耗尽区电容 (C-V曲线)

耗尽区单位面积耗尽区电容 (F/cm^2) :

$$C = \left| \frac{\partial Q_{sc}}{\partial V} \right| = \sqrt{\frac{qN_d\epsilon_s}{2(V_{bi} + V)}} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{C^2} = \frac{2(V_{bi} + V)}{qN_d\epsilon_s}$$



以 V 和 $1/C^2$ 分别为横、纵坐标作图，通过直线的斜率可求得半导体掺杂浓度 N_d 的大小，即，通过测量 C-V 曲线可得到杂质分布，与单边突变结情况类似

$$N_d = \frac{2}{q\epsilon_s} \left[\frac{1}{d(1/C^2)/dV} \right]$$

金-半接触的耗尽区电容 (C-V曲线)

通过测量C-V曲线得到杂质分布，从而得到肖特基势垒高度：

$$\text{已知 } N_d: \quad C^{-2}-V \text{ 曲线斜率} = \frac{2}{qN_d\epsilon_s}$$

可求肖特基势垒 ϕ_{Bn} ，具体过程：

在热平衡态下，n型半导体中， $n_0 = N_c \exp[\frac{-(E_c - E_F)}{kT}]$ ，经过数学变换有：

$$E_c - E_F = kT \ln\left(\frac{N_c}{n_0}\right)$$

导带有效态密度： $N_c = 2\left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2}\right)^{3/2}$

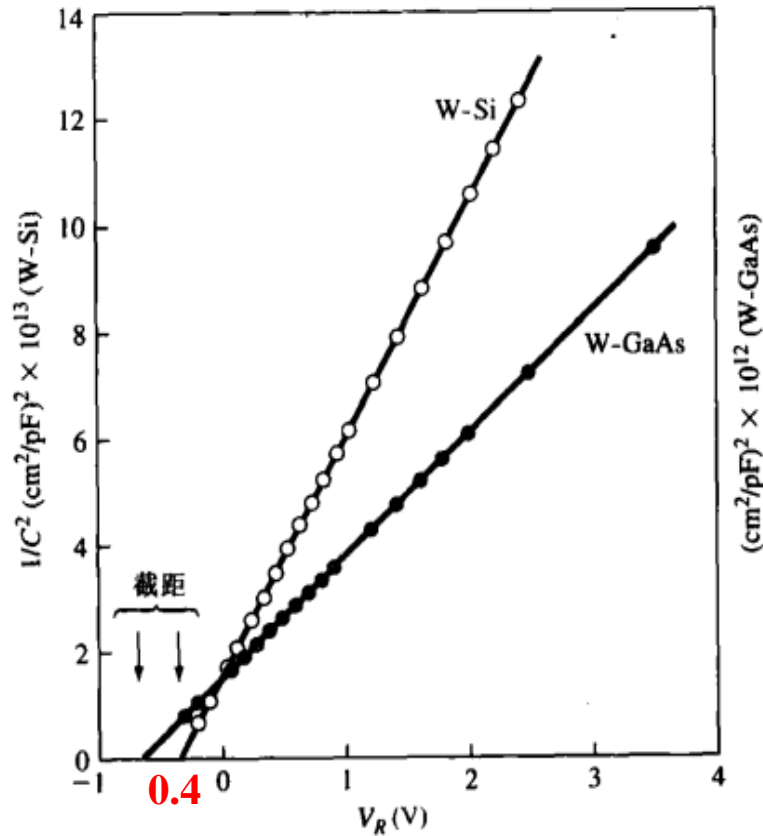
如果是杂质完全离化，则 $n_0 \approx N_d$ ，从而有

$$V_{bi} \text{ 为截距} \quad E_c - E_F = kT \ln\left(\frac{N_c}{N_d}\right) = q\phi_n$$

最后由公式 $V_{bi} = (\phi_{Bn} - \phi_n)$ ，求得 ϕ_{Bn} 大小。

详细计算过程由下页例题可知

例题：利用下图中硅二极管的实验数据，求出 $T=300\text{K}$ 时的半导体掺杂浓度以及肖特基势垒高度。



W-Si 与 W-GaAs 的 $1/C^2 - V_R$ 关系曲线

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_{bi} + V)}{qN_d\epsilon_s}$$

解： V_{bi} 为截距，约为 0.4V 。

斜率： $\frac{d(1/C')^2}{dV_R} \approx \frac{\Delta(1/C')^2}{\Delta V_R} = \frac{2}{e\epsilon_s N_d}$

$$\frac{\Delta(1/C')^2}{\Delta V_R} \approx 4.4 \times 10^{13}$$

掺杂浓度 N_d

$$N_d = \frac{2}{(1.6 \times 10^{-19})(11.7)(8.85 \times 10^{-14})(4.4 \times 10^{13})} = 2.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

$$\phi_n = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{N_c}{N_d}\right) = (0.0259) \ln\left(\frac{2.8 \times 10^{19}}{2.7 \times 10^{17}}\right) = 0.12 \text{ V}$$

肖特基势垒高度

$$\phi_{Bn} = V_{bi} + \phi_n = 0.40 + 0.12 = 0.52 \text{ V}$$

肖特基势垒特性小结

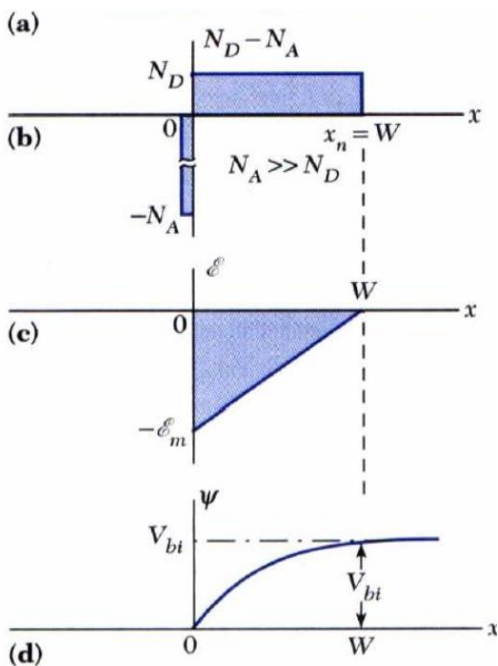
半导体表面空间电荷区内建电势差： $\phi_i = \phi_M - \phi_S$

肖特基势垒高度： $q\phi_{Bn} = q(\phi_M - \chi)$

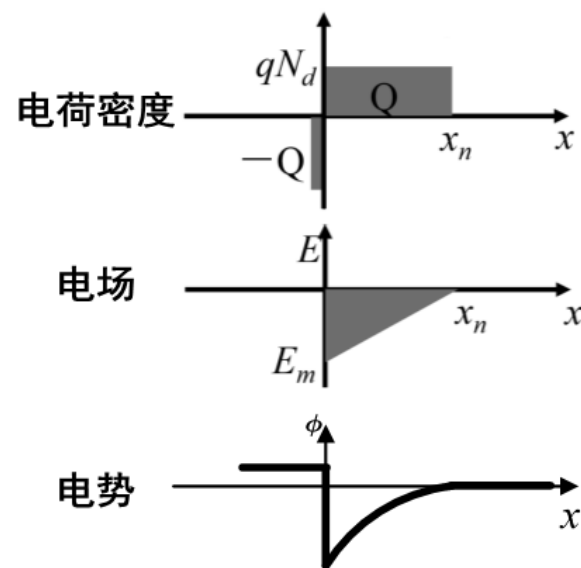
空间电荷区宽度： $W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} + V)}{qN_d}}$

肖特基势垒结电容： $C = \left| \frac{\partial Q_{sc}}{\partial V} \right| = \sqrt{\frac{qN_d\epsilon_s}{2(V_{bi} + V)}}$

**P+N结
的基本
特性**

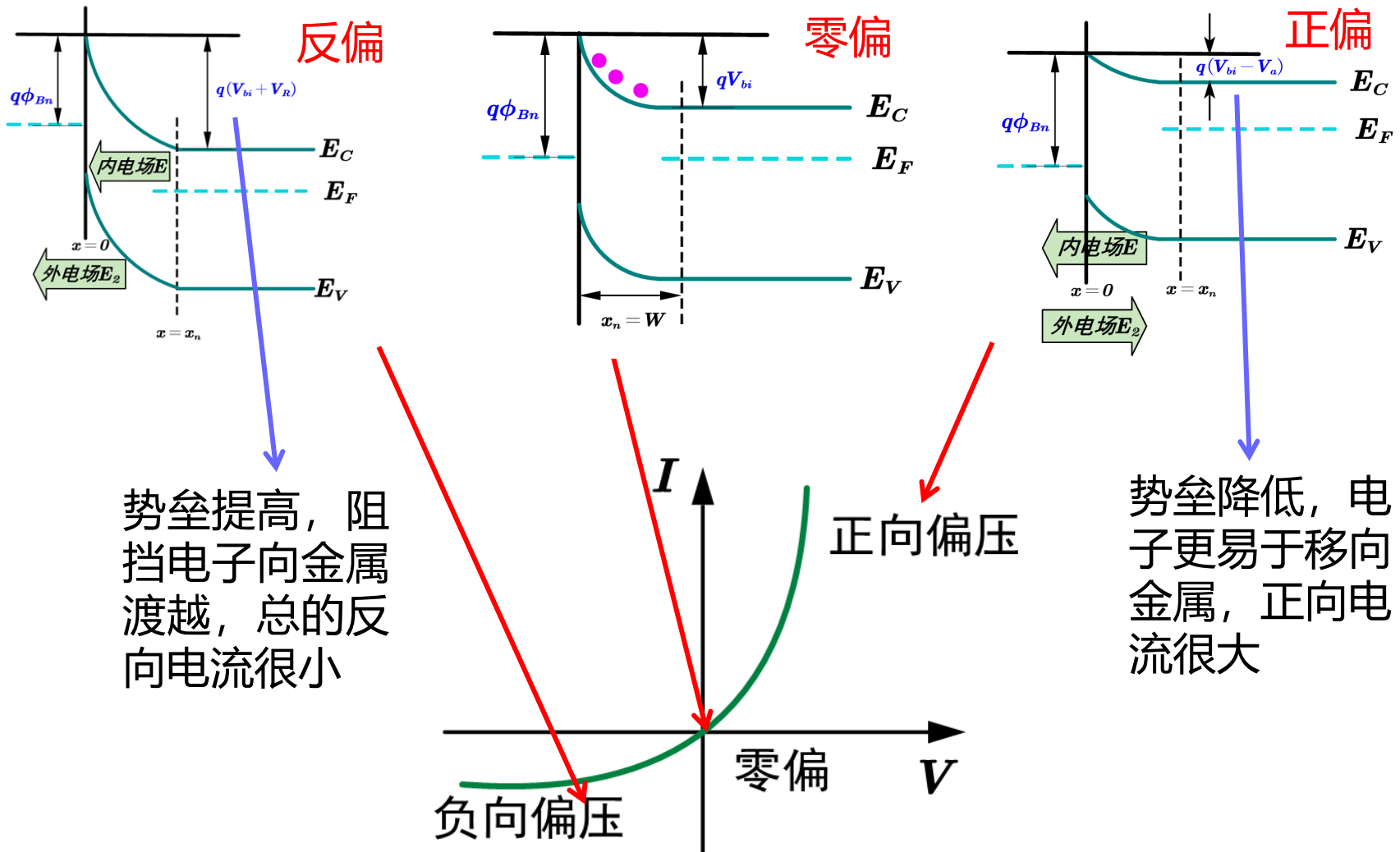


**肖特基
结的基本
特性**



肖特基势垒特性小结

单向导电性（整流特性）



非理想因素①—界面态

理论上 $q\phi_{Bn} = q\phi_m - \chi$ ，但实际上如下图所示，虽然总体上 ϕ_{Bn} 随 W_m 的增大而增大，但不完全是直线。

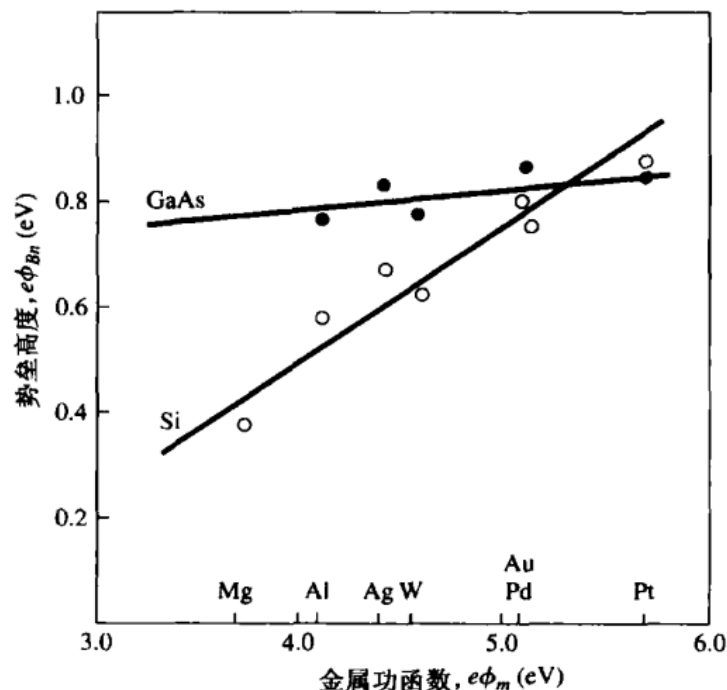
这是因为在实际金-半接触中，由于晶格不连续，在接触界面处产生晶体缺陷，其对应的大量的能量状态叫做**界面态（或表面态）**，它们几乎连续分布在禁带内，起到**施主或受主作用**，从而影响势垒高度的实际值。

理论：

$$q\phi_{Bn} = q\phi_m - \chi$$

实际：

不完全吻合



GaAs和Si的肖特基二极管的势垒高度与金属功函数的关系（实验值）

非理想因素①—界面态

前提：单独考虑表面态

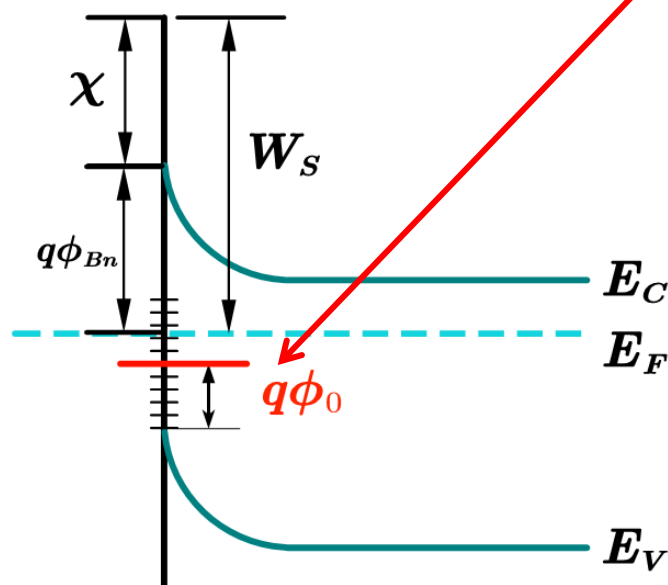
半导体表面处禁带中存在表面态，它所对应的能级为表面能级。

表面态一般分**施主型**和**受主型**两种

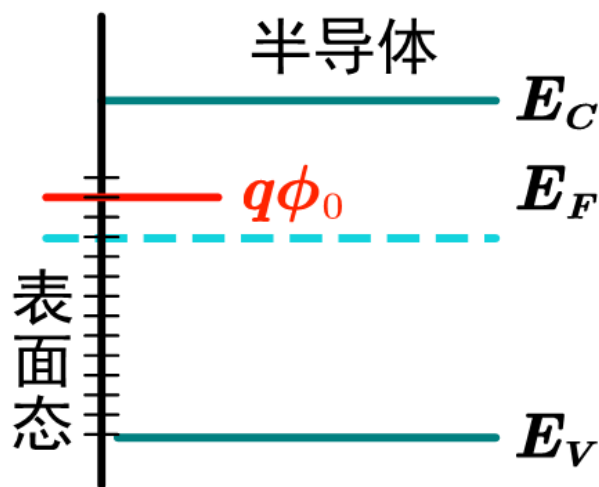
为了描述半导体表面态，引入**中性能级**（距离价带顶 $q\phi_0$ ）

当刚好 $q\phi_0$ 以下的表面态全部被电子占据，而以上的表面态全部空出时，**净表面电荷为零**，整个表面态**呈电中性**。

对大多数半导体， $q\phi_0$ 约为禁带宽度的1/3。

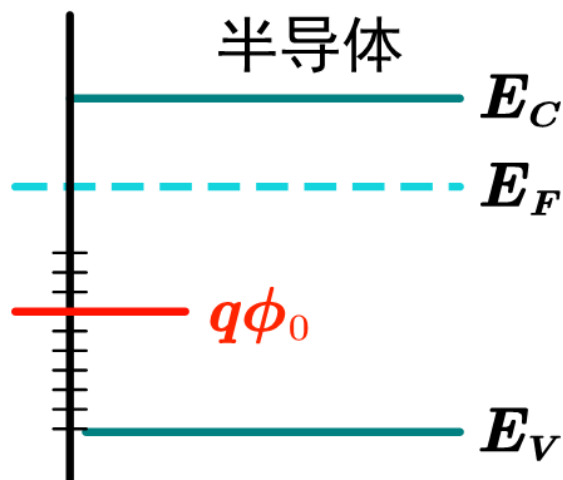


非理想因素①—界面态



表面态类型：

◆ **施主型**：若 $q\phi_0 > E_F$ ，表示 $q\phi_0$ 到 E_F 间的表面态被电子填充而半导体内为空态，电子会从能级高处向能级低处移动，因此**电子从表面向体内移动**，表面净电荷为正，这种表面态为施主型表面态。



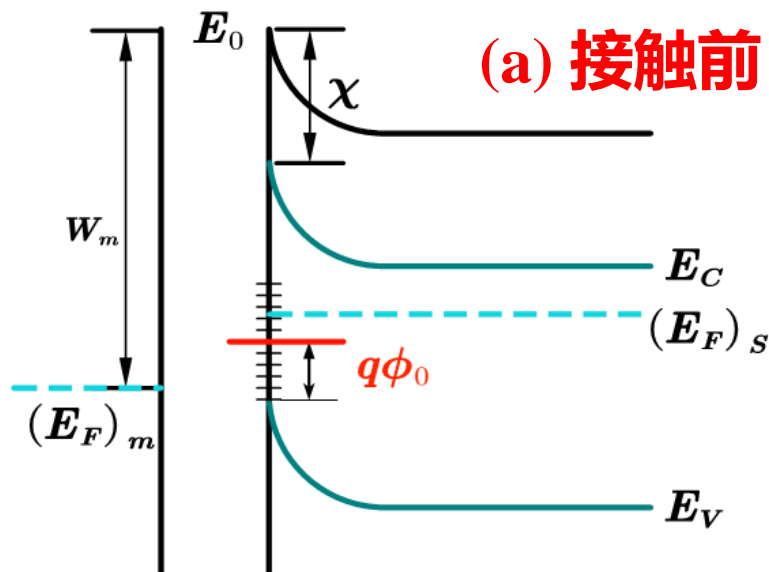
◆ **受主型**：如果 $q\phi_0 < E_F$ ，表示 $q\phi_0$ 到 E_F 间半导体基本被电子填满而表面态为空态，此时**电子从体内向表面移动**，表面净电荷为负，这种表面态为受主型表面态。

非理想因素①—界面态

表面态分析1—以金属-n型半导体为例，且 $W_m > W_s$

接触前：

假定n型半导体表面存在表面态。半导体费米能级 E_F 高于 $q\phi_0$ 。 $q\phi_0$ 以上存在受主表面态。 $q\phi_0$ 到 E_F 之间的表面态能级将被电子填充，**表面带负电**。



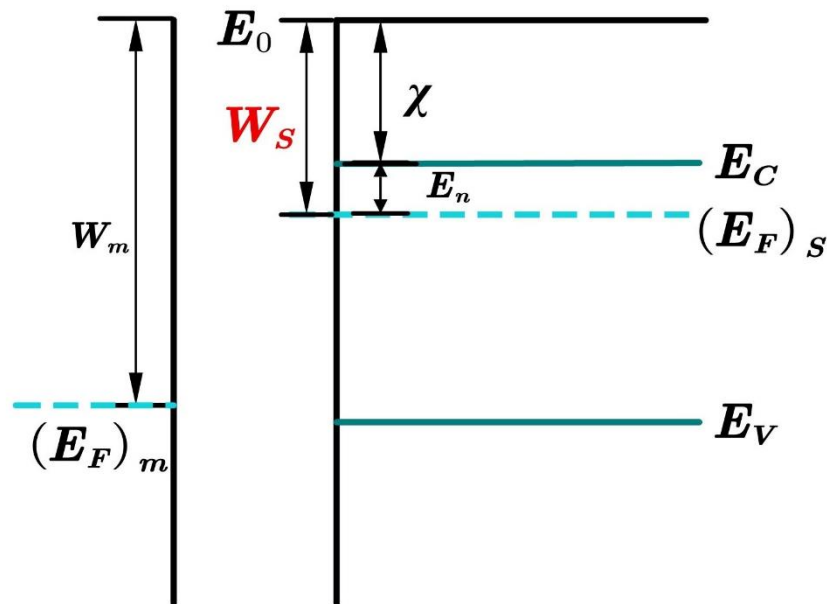
表面带负电，相应地，在半导体表面附近必定出现等量的正电荷，成为正的空间电荷区。

未接触时能带已弯曲，半导体 E_F 下移更接近于 $q\phi_0$ 。

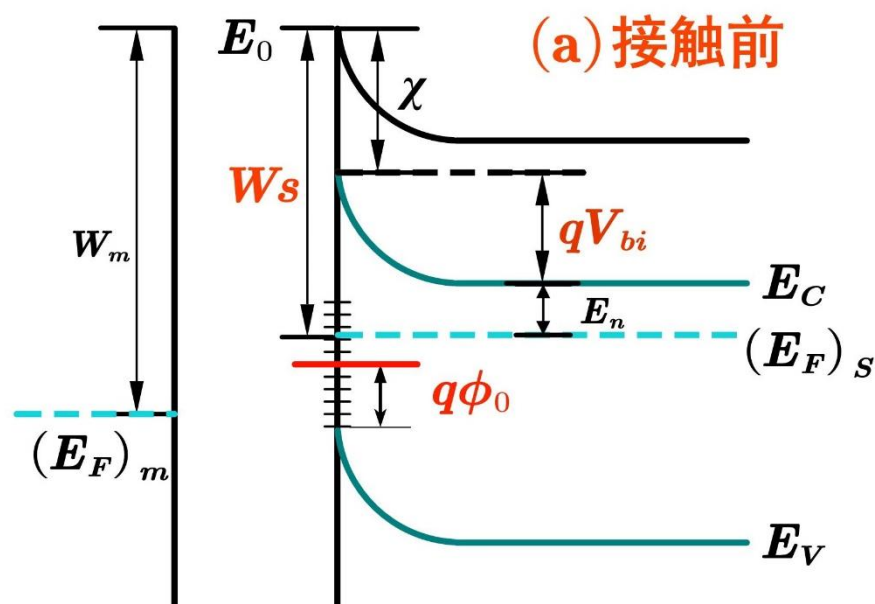
具有受主型表面态的n型半导体与金属
接触前的能带图 ($W_m > W_s$)

非理想因素①—界面态

接触前，半导体表面功函数变化：



理想情况时 n 型半导体的能带图



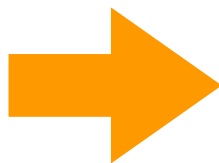
存在受主表面态时 n 型半导体的能带图

存在表面态，即使不与金属接触，表面已经形成**势垒**。

在能带图上体现为能带**向上的弯曲**。

不考虑表面态时
半导体表面处功函数

$$W_s = \chi + E_n$$



考虑表面态时
半导体表面处功函数

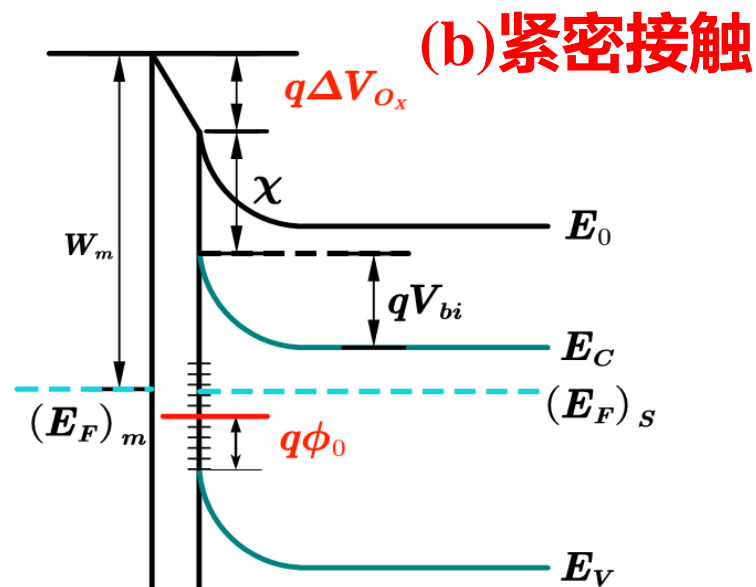
$$W_s = \chi + qV_{bi} + E_n$$

非理想因素①—界面态

表面态分析2—以金属-n型半导体为例，且 $W_m > W_s$

紧密接触（考虑间隙）：

半导体比金属的 E_F 高，电子由半导体流向金属，半导体表面带正电荷，金属表面带负电，因而在绝缘间隙上形成电势差 $q\Delta V_{ox}$ 。并且由于表面态带负电，空间电荷区带正电，因此半导体内也存在电势差。



(b) 存在受主表面态时n型半导体的金-半接触能带图

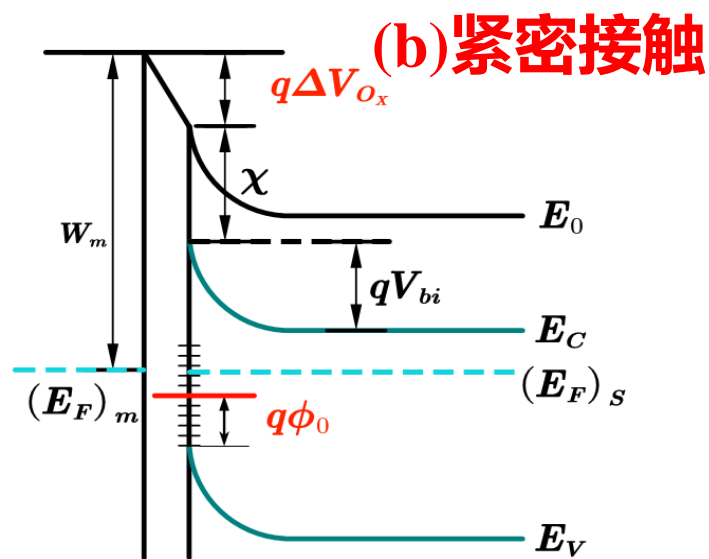
非理想因素①—界面态

表面态分析3—以金属-n型半导体为例，且 $W_m > W_s$

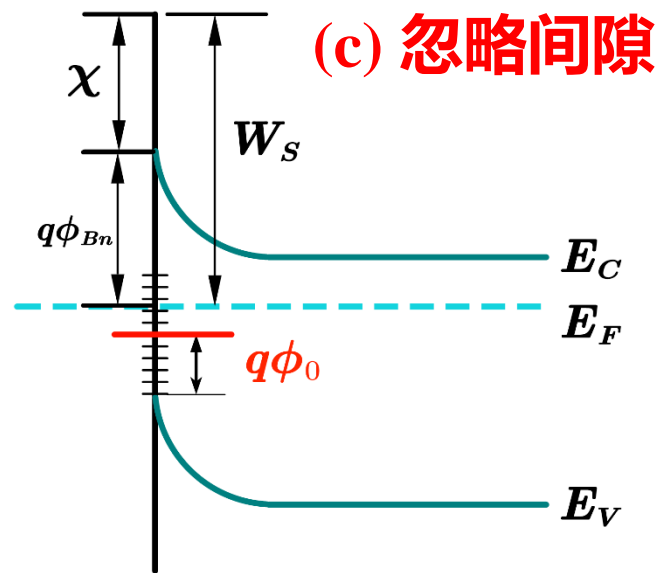
极限情形（不考虑间隙，只考虑表面态）：

（之后的讨论在此情况下考虑）

不考虑间隙，忽略间隙上的电势差 $q\Delta V_{ox}$ ，此时接触电势差完全降落在半导体的空间电荷区。



(b) 存在受主表面态时n型半导体的金-半接触能带图



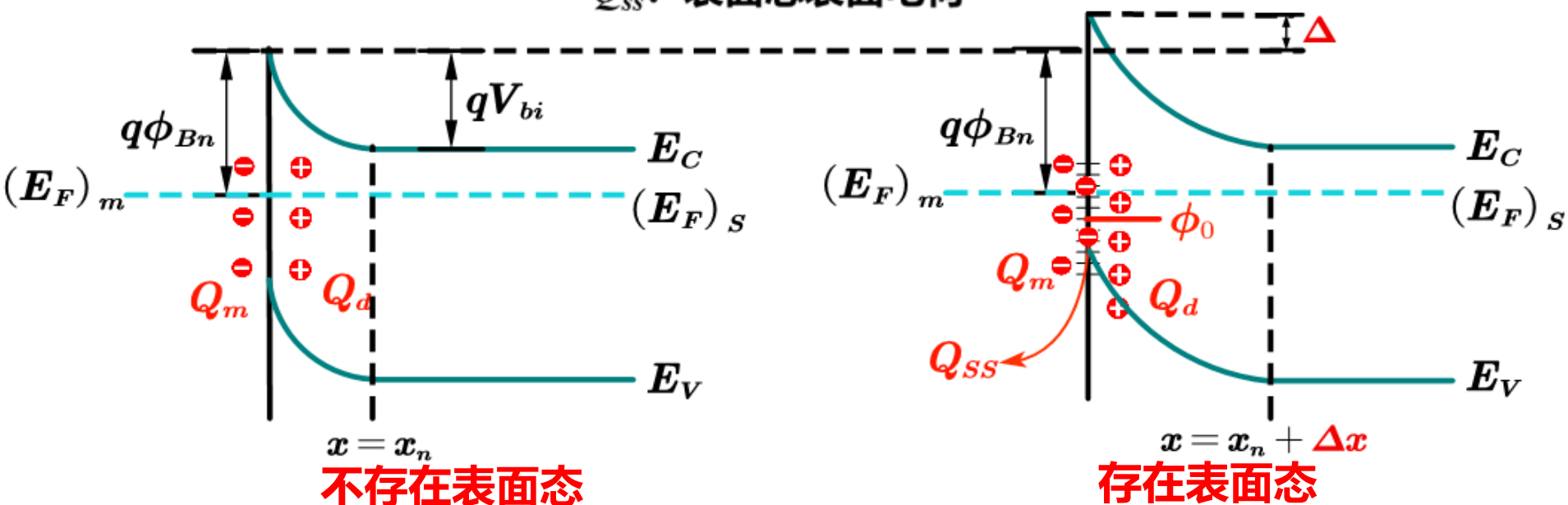
(c) 极限情况（忽略间隙，只考虑表面态）的金-半接触能带图

非理想因素①—界面态

如果不考虑表面态, 则 $Q_d = -Q_m$

考虑表面态, 存在表面态表面电荷 Q_{ss} , $Q_d = -Q_m - Q_{ss}$ ($Q_{ss} < 0$)

Q_m : 金属表面负电荷
 Q_d : 半导体正电荷
 Q_{ss} : 表面态表面电荷

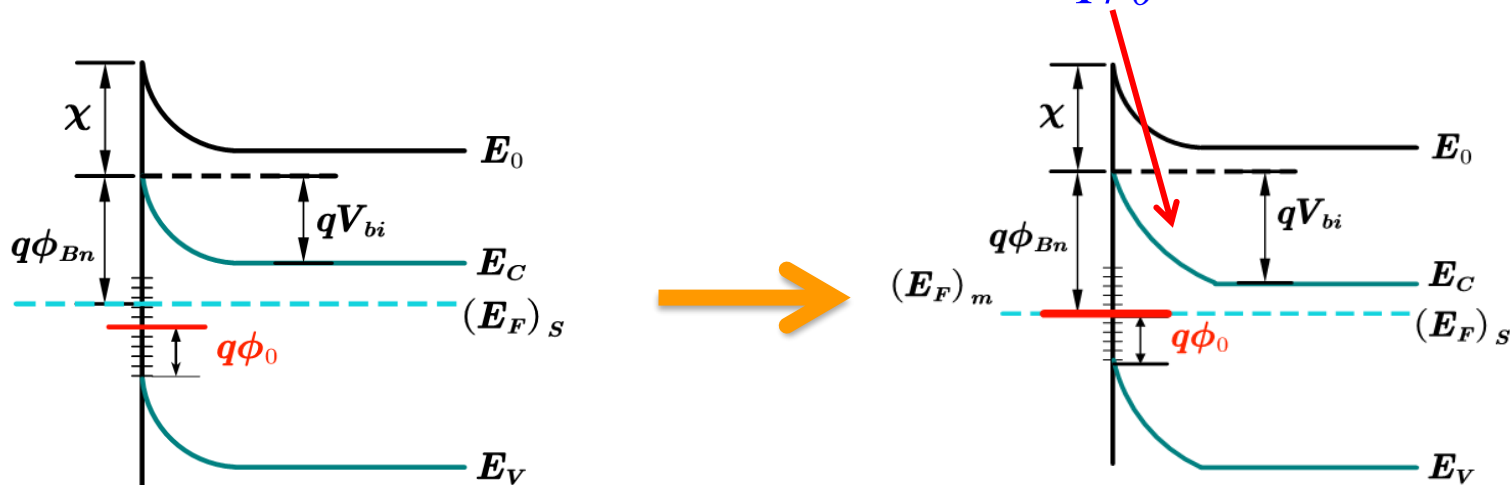


考虑表面态后, 半导体的正电荷 Q_d 要增加, 这时空间电荷宽度 W 变宽, 能带弯曲也会增加, 内建电势差增加, $q\phi_{Bn}$ 增加, 相当于费米能级下降, 此时费米能级更接近中性能级。

非理想因素①—界面态

钉扎效应—从能带结构考虑（接触前）

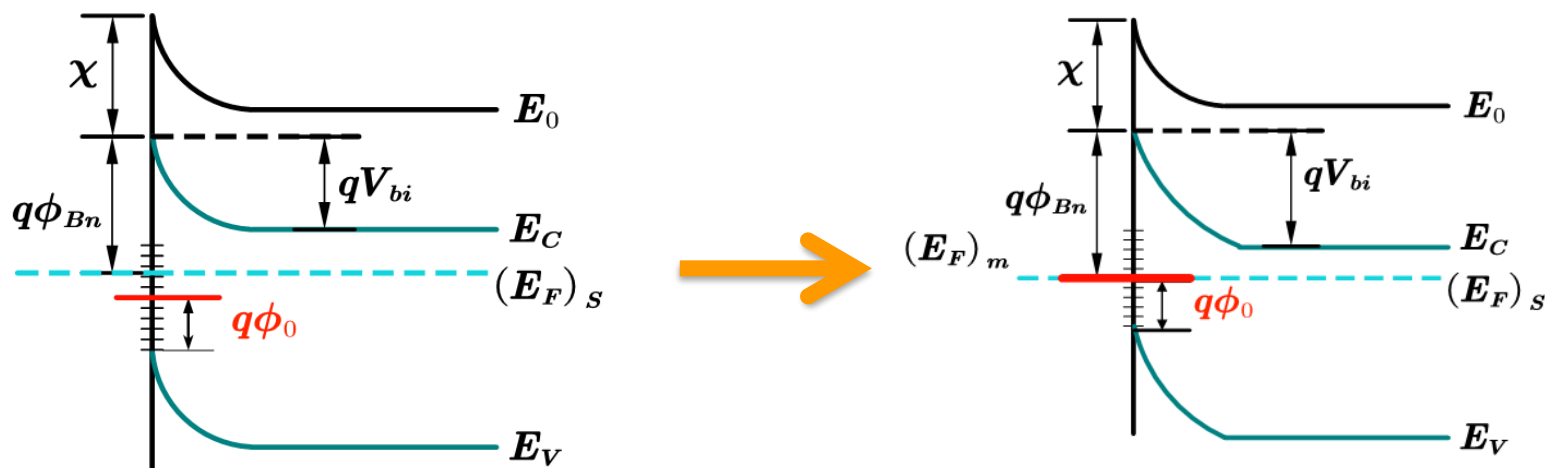
- ◆ 表面态电荷有**负反馈效应**，它**趋于使 E_F 与 $q\phi_0$ 接近**。例如，表面态负电荷越多，导致半导体内的正电荷也增多，能带弯曲更剧烈， $q\phi_{Bn}$ 增加，相当于 E_F 下降，此时 E_F 与 $q\phi_0$ 距离更加接近。
- ◆ 若**表面态密度很大**，表面会积累很多负电荷，能带**弯曲更剧烈**，费米能级与 $q\phi_0$ 更加接近，由于有足够多的表面态负电荷，弯曲程度足够大，大到 E_F 与 $q\phi_0$ 重合，此时表面不再继续产生负电荷，费米能级位置不再改变，费米能级被**箝位在 $q\phi_0$** 。



非理想因素①—界面态

钉扎效应—从扩散和漂移考虑（接触前）

- ◆ 受主表面态密度足够高，也就是有足够多的受主表面态接受电子。
- ◆ 当受主表面态没有接受电子时，体内的电子浓度大于表面，这时电子会从体内扩散到表面，与此同时会形成一个由体内指向表面的电场，随着扩散到表面的电子越来越多，指向表面的电场也越来越强，直到该电场使**电子受到的电场力和扩散力相等**时，到达平衡，电子的漂移和扩散平衡的临界点就是 E_F 与 $q\phi_0$ 重合。此时表面处的电子浓度不再变化， E_F 和 $q\phi_0$ 的相对位置不再变化，也就是费米能级被钉扎。



存在受主表面态时n型半导体的金-半接触能带图

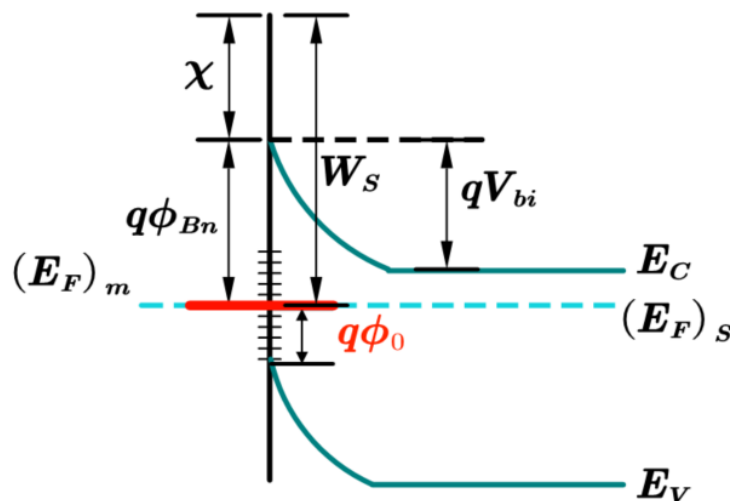
受主表面态密度很高时n型半导体的金-半接触能带图 54

非理想因素①—界面态

钉扎效应（金-半接触后）

表面态密度很高，当电子由半导体流向金属时，受主表面态能够提供足够多的电子给金属，而且其本身电子填充水平变化不大，即 $q\phi_0$ 的位置基本不变。

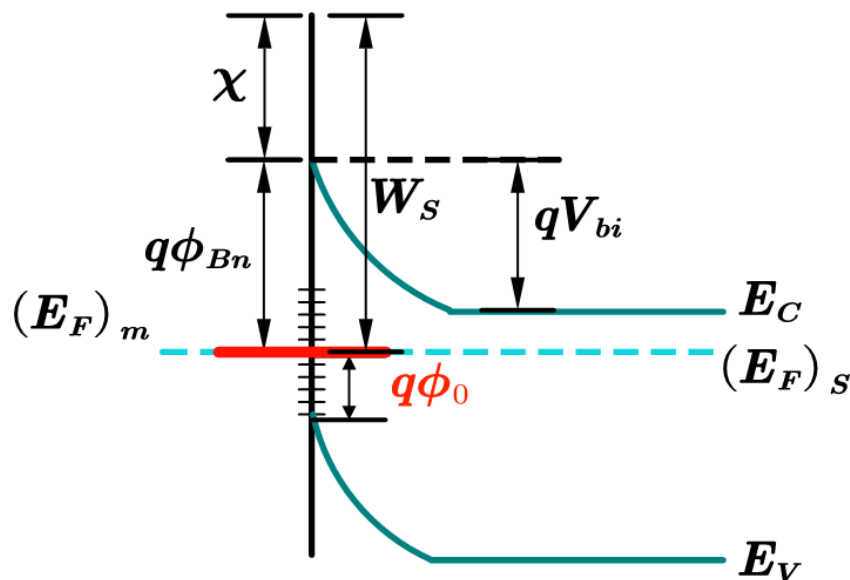
由于此时电子不再由半导体体内提供，相当于表面态屏蔽了金属接触的影响，使半导体的势垒高度和金属的功函数无关，而基本上由表面性质所决定，所以半导体势垒 qV_{bi} 在接触前后都只与表面态相关。



受主表面态密度很高时n型半导体的金-半接触能带图

非理想因素①—界面态

钉扎效应—半导体侧势垒高度（定量分析）



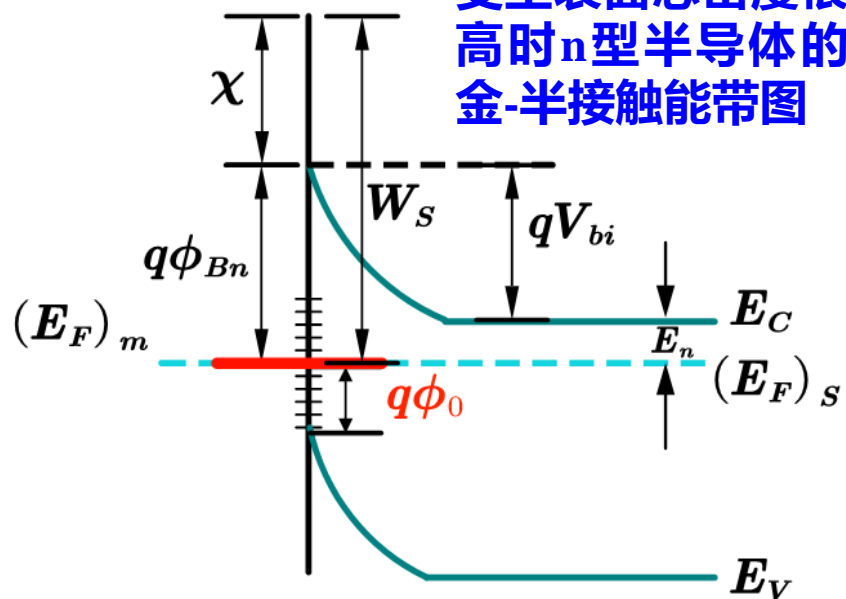
受主表面态密度很高时n型半导体的金-半接触能带图

高态密度时，半导体侧势垒高度： $qV_{bi} = E_g - E_n - q\phi_0 = (E_F)_s - E_v - q\phi_0$
表面态密度很高时，表面态是一个能态海洋，因此表面态中跑掉部分电子后，表面中性能级 $q\phi_0$ 的位置基本不变，所以半导体内表面势垒 qV_{bi} 在接触前后不变。

非理想因素①—界面态

钉扎效应—半导体功函数 (定量分析)

受主表面态密度很高时n型半导体的金-半接触能带图



表面态密度很高时，半导体内表面势垒高度：

$$qV_{bi} = E_g - E_n - q\phi_0 = (E_F)_s - E_v - q\phi_0$$

半导体功函数：

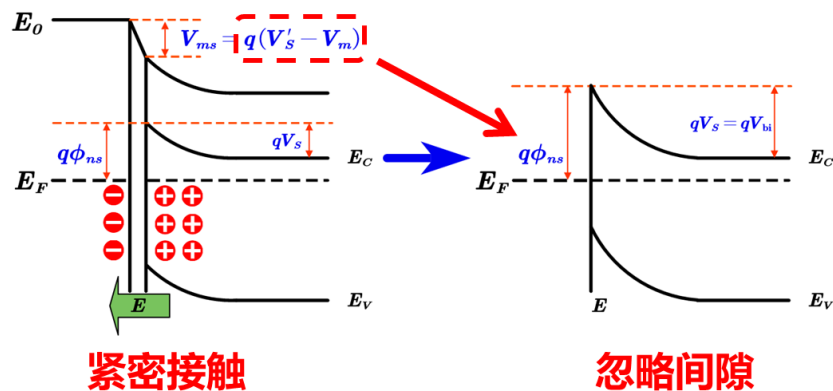
$$W_s = \chi + qV_{bi} + E_n$$

$$W_s = \chi + (E_F)_s - E_v + E_n - q\phi_0$$

$$W_s = \chi + E_g - q\phi_0$$

无表面态时半导体功函数：

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



非理想因素①—界面态

钉扎效应—半导体功函数（定量分析结果）

◆对应无表面态时，半导体功函数：

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



半导体功函数与
费米能级相关

◆表面态密度很高时，半导体功函数：

$$W_s = \chi + E_g - q\phi_0$$



半导体功函数与
费米能级无关

费米能级钉扎效应：当表面态的密度很大时， E_F 被表面态钉扎（钉扎于表面态中性能级）。

在半导体表面，费米能级的位置由表面态决定，而与半导体掺杂浓度无关。

非理想因素①—界面态

钉扎效应—势垒高度（实际结果）

存在高密度表面态

	$W_m = q\phi_m$ (eV)	Si ($\chi=4.05$) ($E_g=1.12\text{eV}$)	Ge ($\chi=4.13$) ($E_g=0.66\text{eV}$)	GaAs ($\chi=4.07$) ($E_g=1.42\text{eV}$)	GaP ($\chi=4.0$) ($E_g=2.26\text{eV}$)	$W_m - \chi$	$\frac{2}{3}E_g$
Al	4.2	0.5-0.77	0.48	0.8	1.05	0.2	1.51
Au	4.7	0.81	0.45	0.9	1.28	0.7	1.51
Cu	4.4	0.69-0.79	0.48	0.82	1.20	0.4	1.51
Pt	5.4	0.9	-	0.86	1.45	1.4	1.51

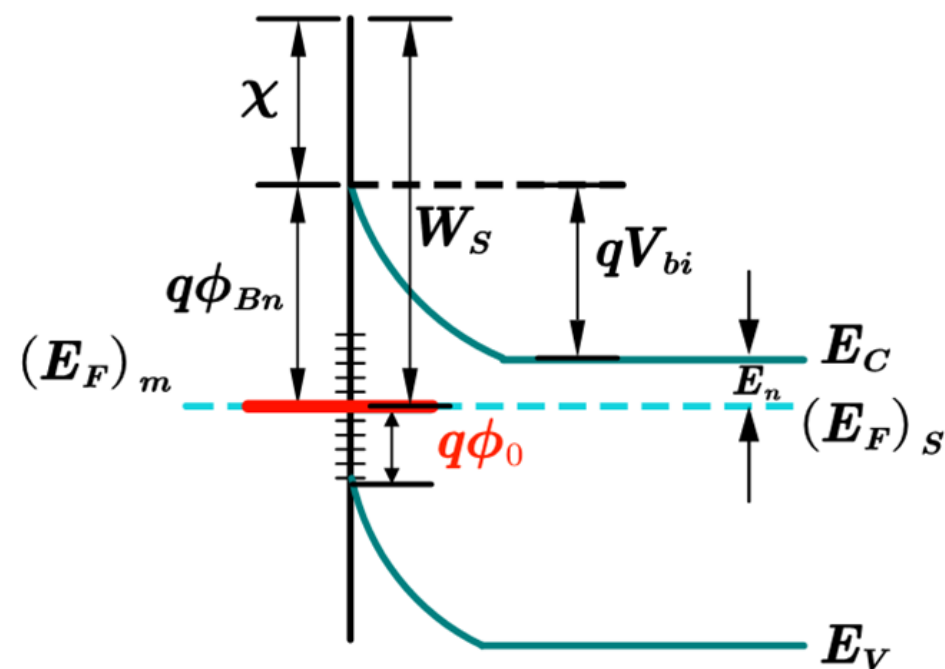
实际结果不满足不考虑表面态时的结果： $q\phi_{SB} = q\phi_{Bn} = W_m - \chi$

但也不完全满足当考虑表面态密度很高的结果： $q\phi_{SB} \approx \frac{2}{3}E_g$

非理想因素①—界面态

钉扎效应—势垒高度（定量分析结果）

金属-n型半导体接触, $W_m > W_s$, 存在高密度表面态



受主表面态密度很高时n型半导体的金-半接触能带图

当不考虑表面态:

$$q\phi_{SB} = q\phi_{Bn} = W_m - \chi$$

当表面态密度很高:

$$W_s = \chi + E_g - q\phi_0 \quad \text{前面已推导}$$

$$q\phi_{SB} = q\phi_{Bn} = W_s - \chi = E_g - q\phi_0$$

$$q\phi_0 \approx \frac{1}{3}E_g \quad \Rightarrow \quad q\phi_{SB} = \frac{2}{3}E_g$$

肖特基势垒高度与金属的 W_m 无关

非理想因素①—界面态

钉扎效应—势垒高度（实际结果）

- ◆ 理论上，当表面态密度很高时： $q\phi_{SB} = E_g - q\phi_0$
- ◆ 实际上，当表面态密度很高时， $q\phi_{SB}$ 并不完全约等于 $\frac{2}{3}E_g$ 。



原因分析

- ◆ 之前的分析说明，当半导体的表面态密度很高时，由于它可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所决定。
- ◆ 但是实际上，由于表面态密度的不同，紧密接触时，接触电势差有一部分要降落在半导体表面以内，金属功函数对半导体侧和金属侧的势垒将产生一定的影响，但总体影响不大，这种解释符合实际测量的结果。

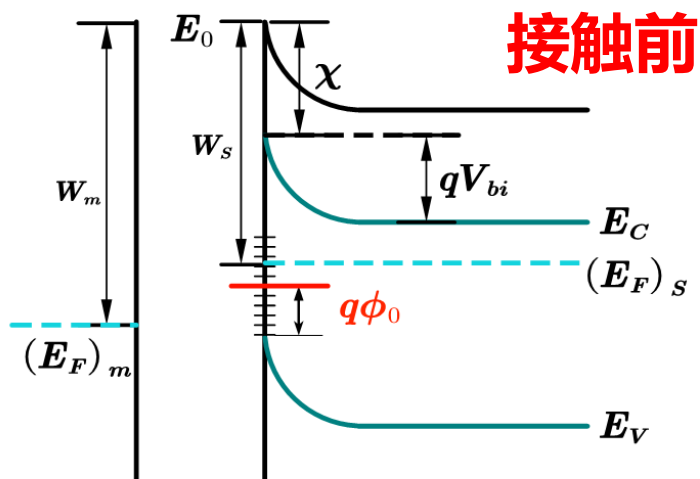
非理想因素①—界面态

表面态小结：以金属-n型半导体接触为例，且 $W_m > W_s$

钉扎效应：当表面态密度很大， E_F 被表面态钉扎（钉扎于表面态中性能级）。

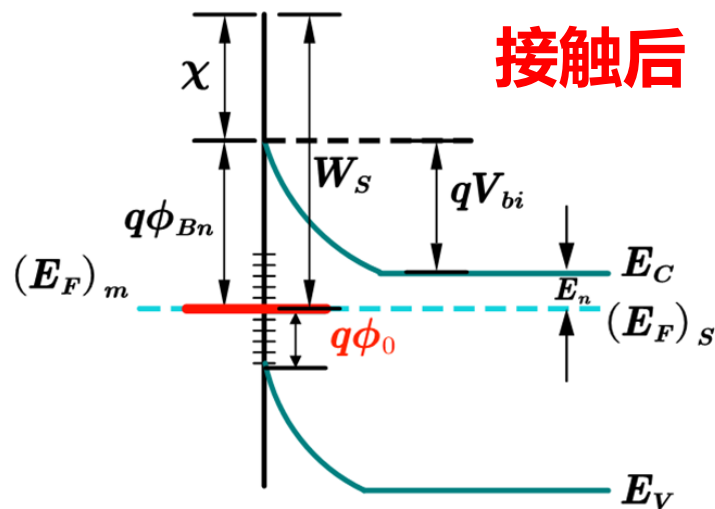
仅考虑表面态而不考虑接触

半导体与其表面态通过交换电子，达到相互平衡，此时出现表面态电荷，使导带弯曲，形成势垒。



考虑金-半接触(高表面态密度)

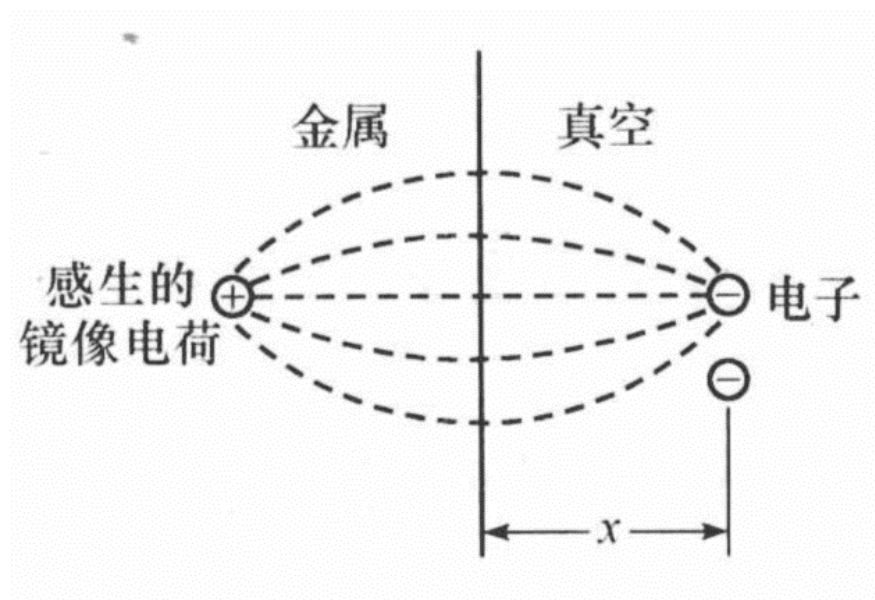
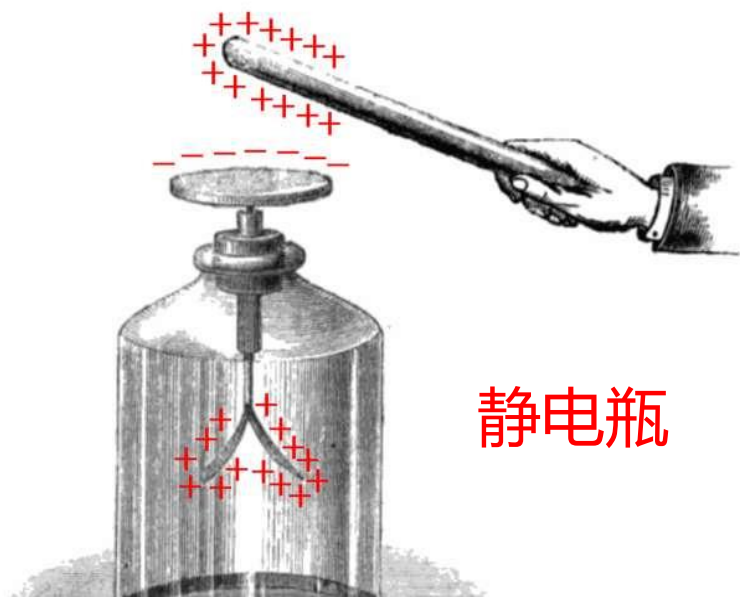
当带有表面态的半导体与金属接触，要考虑这三者之间的电子交换。平衡时，金属、表面态和半导体具有统一的 E_F 。



非理想因素②—肖特基效应

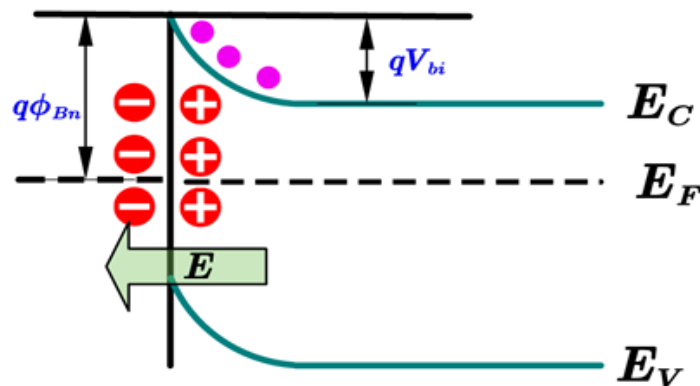
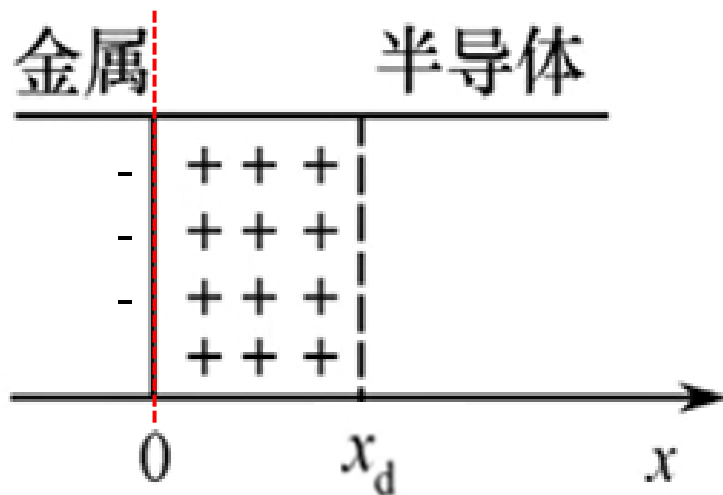
镜像力：

在金属-真空系统中，金属外面的电荷会在金属表面感应出相反极性的电荷，同时它们之间会产生库仑吸引力。感应出的电荷称为镜像电荷，库仑引力称为镜像力。



非理想因素②—肖特基效应

金-半接触中的镜像力效应：外加偏压时，半导体中会有载流子（电子、空穴）的运动，这些载流子就会在金属中形成等量的相反极性的感应电荷，从而形成镜像电场力、电势、电势能。



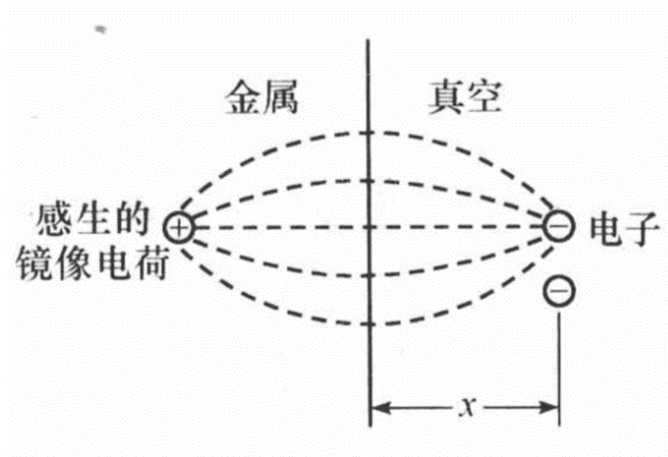
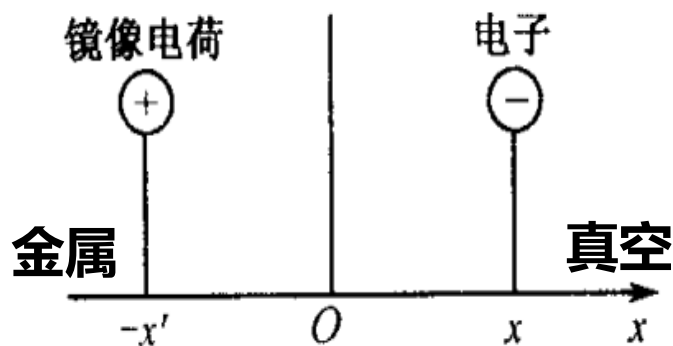
肖特基效应：

镜像力效应使得实际测量的肖特基势垒高度偏离其理论值，这就是镜像力势垒降低效应，也称之为肖特基效应。

非理想因素②—肖特基效应

- ◆ 距金属表面距离为 x 的电子能够形成电场，电场线与金属表面必须垂直，与距金属表面相同距离的感应正电荷形成的电场线相同，如下右图所示。
- ◆ 该电子与位于 $(-x)$ 处的等量正电荷之间的吸引力，根据电荷间库仑引力的公式，应为：

$$F = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_s(2x)^2} = -e\xi \rightarrow \text{镜像力电场}$$



非理想因素②—肖特基效应

此时电子势能的变化等于把电子从 x 位置移到无穷远处的过程中电场力所做的功，即：

$$e\phi(\infty) - e\phi(x) = e \int_x^{\infty} \xi dx$$

$$F = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_s(2x)^2} = -e\xi \longrightarrow \xi = \frac{e}{4\pi\epsilon_s(2x)^2}$$

假定在 $x=\infty$ 处电势为零，即 $\phi(\infty)=0$

$$e\phi(\infty) - e\phi(x) = 0 - e\phi(x) = e \int_x^{\infty} \frac{e}{4\pi\epsilon_s(2x)^2} dx = -\frac{e^2}{16\pi\epsilon_s x}$$

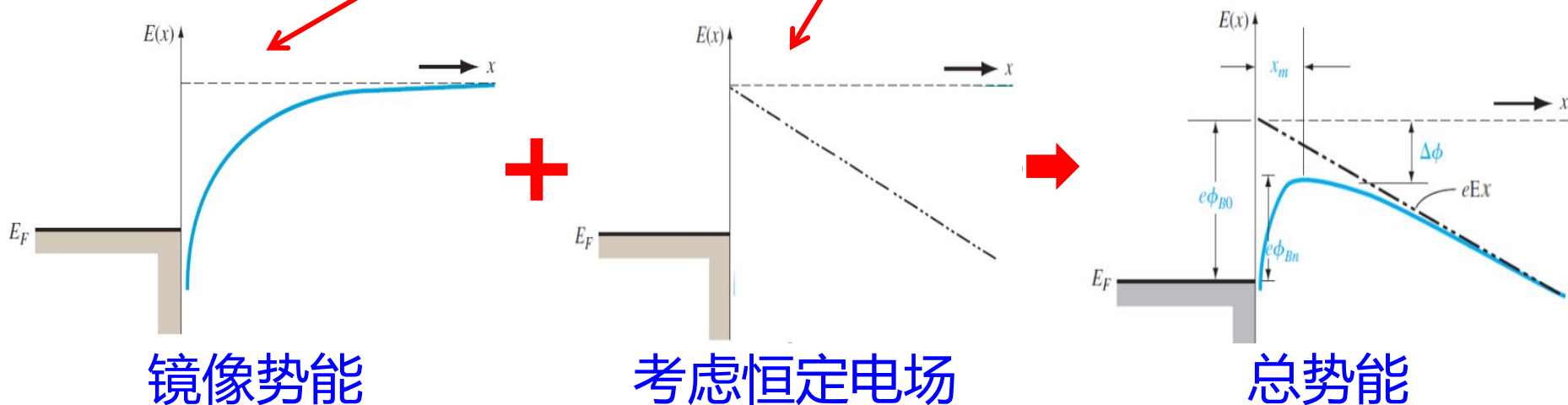
$$\text{即 } -e\phi(x) = -\frac{e^2}{16\pi\epsilon_s x}$$

非理想因素②—肖特基效应

- ◆ 又由于半导体和金属接触时，在耗尽层中还有电场，即内建电场和外加电场之和，假设其恒定，则势能表示为：

$$-e\phi(x) = -\frac{e^2}{16\pi\epsilon_s x} - eEx$$

- ◆ 镜像力的存在造成电子势能的降低，这说明，镜像力使势垒顶向半导体内移动，并且使势垒降低 $q\Delta\phi$ 。

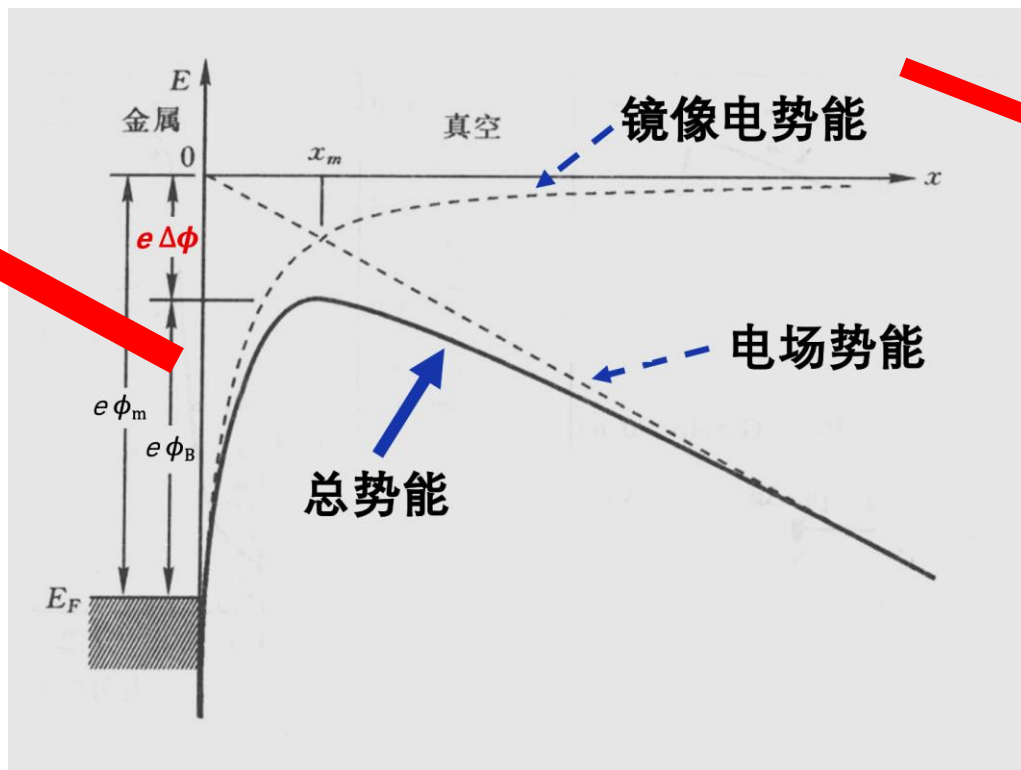


非理想因素②—肖特基效应

平衡时镜像力对势垒的影响分析

镜像力的存在减小了电子跨越势垒所需要能量

金属中的电子更容易发射至半导体



镜像势能随距离增大而减小

◆ 这种由于镜像力而使得势垒高度降低的现象，称为**镜像力效应（肖特基效应）**。

非理想因素②—肖特基效应

电势能在 x_m 处出现极大值，这个极大值发生在作用于电子上的镜像力和电场力相平衡的地方，可以在对势能公式求一阶导等于零时得到：

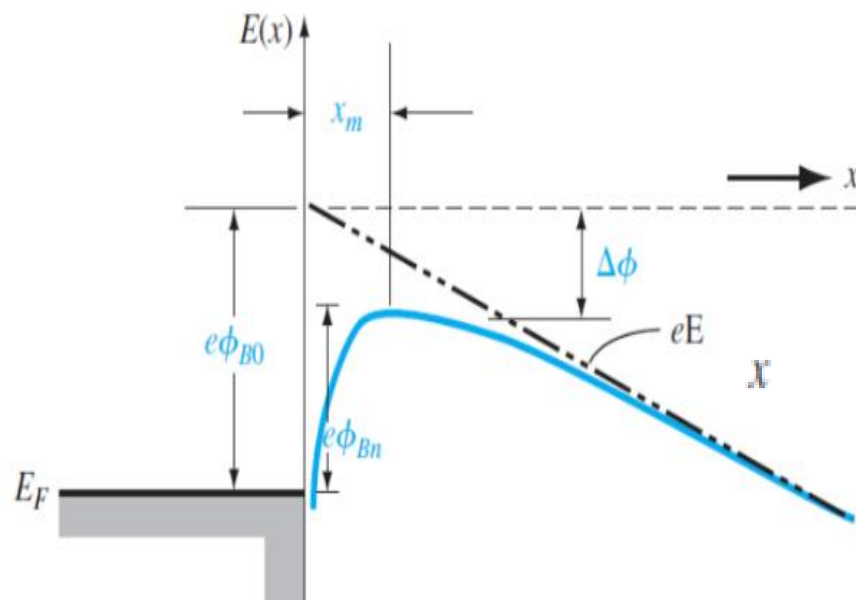
$$-e\phi(x) = -\frac{e^2}{16\pi\epsilon_s x} - eEx$$

势能函数一阶导数为零：

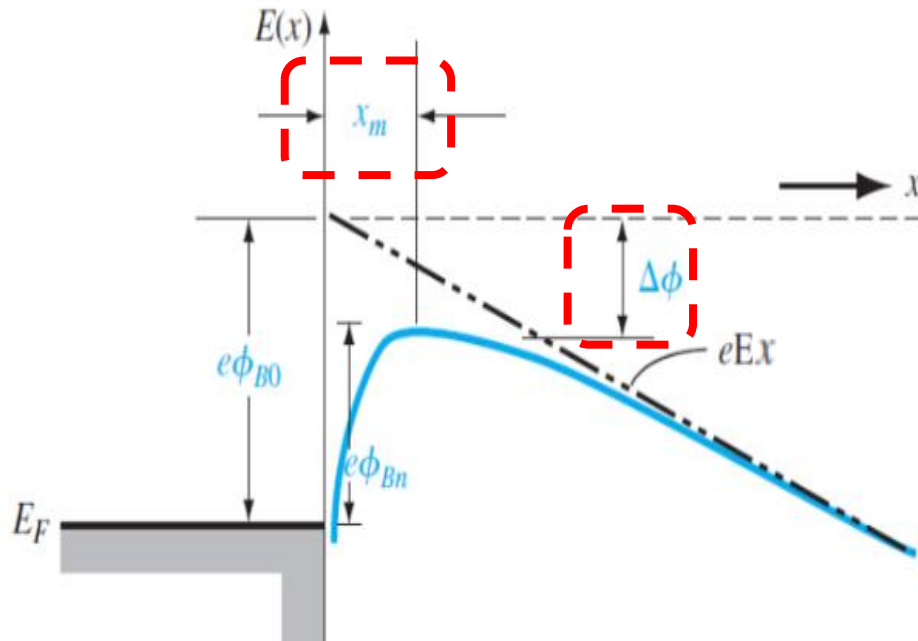
$$\frac{d[e\phi(x)]}{dx} = 0$$

求得最大势能所处的位置 x_m ：

$$x_m = \sqrt{\frac{e}{16\pi\epsilon_s E}}$$



非理想因素②—肖特基效应



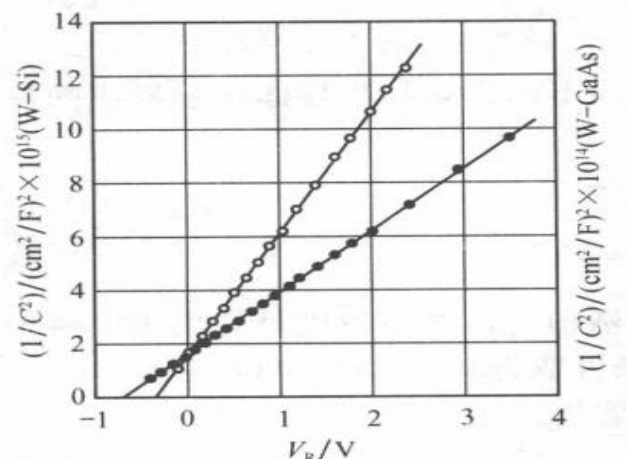
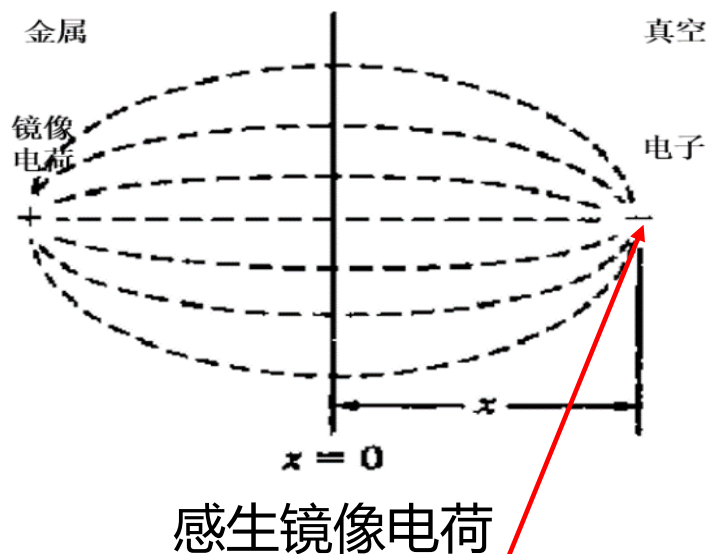
$$-e\phi(x) = -\frac{e^2}{16\pi\epsilon_s x} - eEx$$

将最大势能所处的位置 x_m : $x_m = \sqrt{\frac{e}{16\pi\epsilon_s E}}$

代入，求得由镜像力引起的势垒降低为： $e\Delta\phi = e\phi(x_m) = e\sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_s}}$

非理想因素②—肖特基效应

镜像力小结

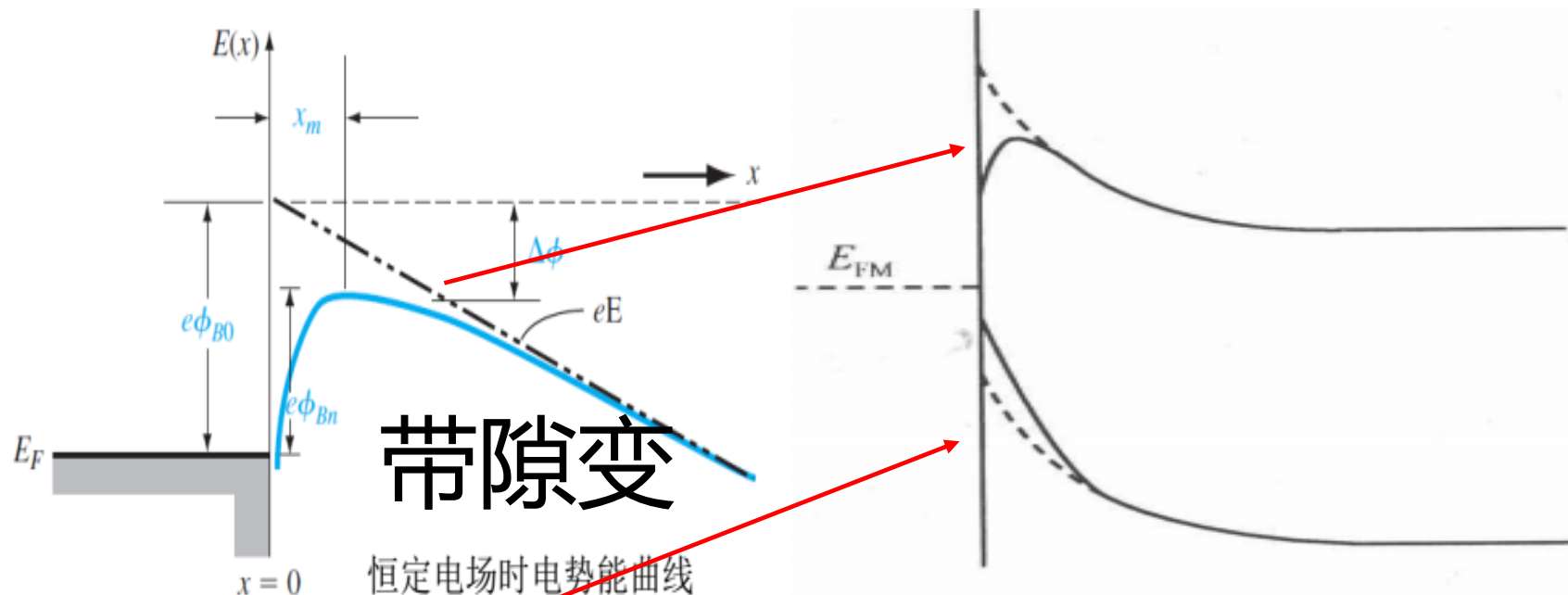


C-V法测势垒

- ◆ 镜像力使肖特基势垒高度降低的前提：金属表面附近的半导体导带要有电子存在（或价带有空穴存在）。
- ◆ 因此，在测量势垒高度时，如果所用方法与电子（或空穴）在金属和半导体间的输运有关，则所得结果是 $e\phi - e\Delta\phi$ ；
- ◆ 如果测量方法只与耗尽层的空间电荷有关而不涉及电子的输运（如电容方法），则测量结果不受镜像力的影响。

非理想因素②—肖特基效应

镜像力小结



镜像力对半导体能带的影响

空穴也产生镜像力，它的作用是使半导体能带的价带在结附近向上弯曲，如图所示，但价带顶不像导带底那样有极值，结果使接触处的带隙变窄。

作业：推算结区附近价带上移的原因

例题：计算肖特基效应使势垒减小的值与最大势垒高度对应的 x_m 值。以金属-GaAs半导体接触为例，假定半导体中电场强度为 $E=6.8\times 10^4\text{V/cm}$ 。

解：在给定电场下，肖特基势垒减小值为：

$$e\Delta\phi = e\sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_s}} = e\sqrt{\frac{(1.6\times 10^{-19})(6.8\times 10^4)}{4\pi(13.1)(8.85\times 10^{-14})}} = 0.0273\text{eV}$$

肖特基
势垒变
化很小

最大势垒高度对应 x_m 值为：

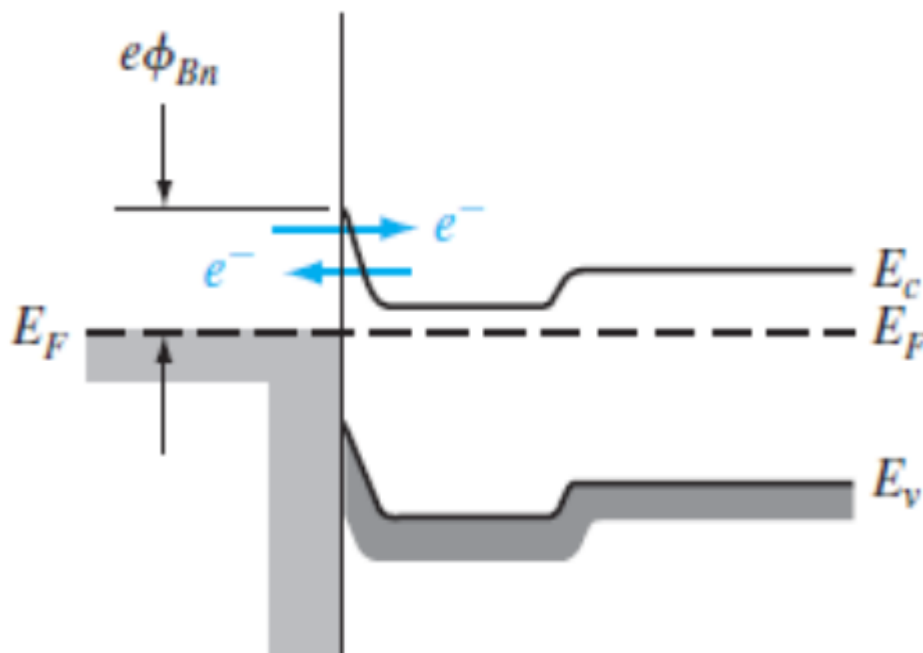
$$x_m = \sqrt{\frac{e}{16\pi\epsilon_s E}} = \sqrt{\frac{(1.6\times 10^{-19})}{16\pi(13.1)(8.85\times 10^{-14})(6.8\times 10^4)}}$$

$$x_m = 2\times 10^{-7}\text{cm} = 20\text{\AA}$$

非理想因素③—隧穿效应

在金-半接触中，肖特基效应可以使势垒减小，通常隧穿效应更为显著。

隧穿效应：能量低于势垒顶的电子有一定概率穿过势垒，称为隧穿效应。穿过的概率与电子能量和势垒厚度有关。



金属与重掺半导体外延层接触的能带图

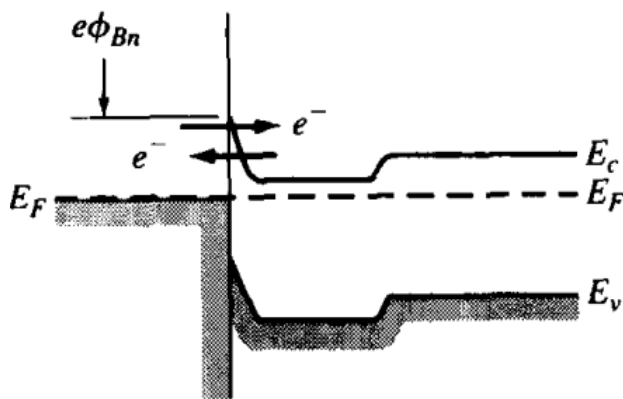
非理想因素③—隧穿效应

例：计算重掺杂半导体上的肖特基势垒的空间电荷宽度。
 $T=300\text{K}$ ，以掺杂浓度为 $N_d=7\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 的硅为例，假定肖特基势垒 $\phi_{Bn}=0.67\text{V}$ ，假设 $\phi_{Bn}\approx V_{bi}$ ，忽略势垒降低效应。

解：

$$x_n = \left[\frac{2\epsilon_s V_{bi}}{eN_d} \right]^{1/2} = \left[\frac{2(11.7)(8.85 \times 10^{-14})(0.67)}{(1.6 \times 10^{-19})(7 \times 10^{18})} \right]^{1/2}$$

$$x_n = 1.1 \times 10^{-6} \text{ cm} = 110 \text{ \AA}$$



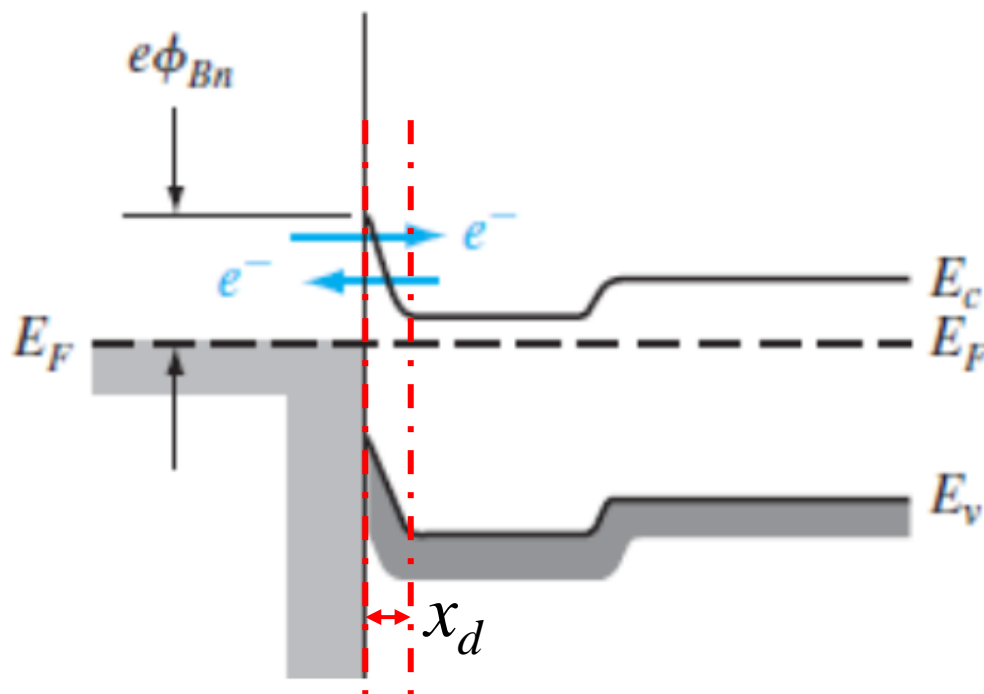
在重掺杂半导体中，**耗尽层厚度为10nm数量级**。因此隧穿效应发生的可能性很大。

金属与重掺半导体外延层接触的能带图

非理想因素③—隧穿效应

隧穿效应的简化模型

- ◆ 对于一定能量的电子，存在一个**临界势垒厚度** x_c
- ◆ 若 $x_d > x_c$ ，则电子完全不能穿过势垒；
- ◆ 若 $x_d < x_c$ ，则势垒对于电子透明，电子可直接穿过，**相当于势垒降低了**。（ x_d 为实际的耗尽层宽度）

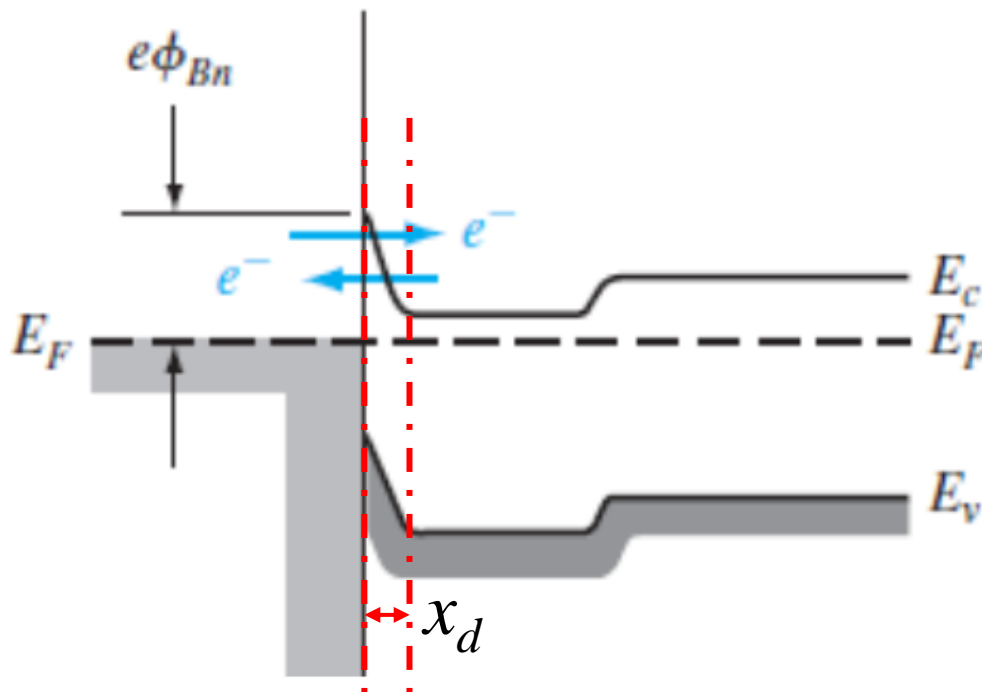


非理想因素③—隧穿效应

由于耗尽层宽度为：

$$x_d = W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0(V_D + V)}{qN_D}}$$

耗尽层宽度与掺杂浓度的平方根成反比，因此随着掺杂浓度的增加，耗尽层宽度减小，隧道效应会加强。



非理想因素③—隧穿效应

金属一边的有效势垒高度为 $qV(x)$, $x_d < x_c$

$$x_d = W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0(V_D + V)}{qN_D}}$$

此公式仅了解 $-qV(x_c) \approx q\phi_{Bn} - \frac{q^2 N_D}{\varepsilon_r \varepsilon_0} x_d x_c$

原金属边势垒 $= q\phi_{Bn} - \left[\frac{2q^3 N_D}{\varepsilon_r \varepsilon_0} (V_D + V) \right]^{1/2} x_c$

因此隧穿效应引起的势垒降低为

$$\left[\frac{2q^3 N_D}{\varepsilon_r \varepsilon_0} (V_D + V) \right]^{1/2} x_c$$

当反向电压较高时，势垒的降低才明显。

肖特基效应和隧穿效应小结

- ◆ 镜像力和隧穿效应对反向特性影响显著，势垒高度降低，反向电流增加。

$$\uparrow \Delta\phi = \sqrt{\frac{eE\uparrow}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0}} \quad \uparrow \left[\frac{2q^3 N_D}{\epsilon_r \epsilon_0} (V_D \mp \uparrow V) \right]^{1/2} x_c$$

镜像力引起的势垒降低 隧道效应引起的势垒降低

- ◆ 镜像力和隧穿效应引起势垒高度的降低，使反向电流增加。
- ◆ 反向电压越大，势垒降低越显著，反向电流越大。