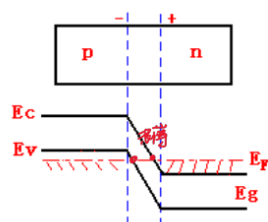


### 第五章 3 (隧道效应和金半接触)

隧道效应出现在简并半导体中；区分于齐纳击穿（齐纳击穿出现在反向电压下，非简并半导体）

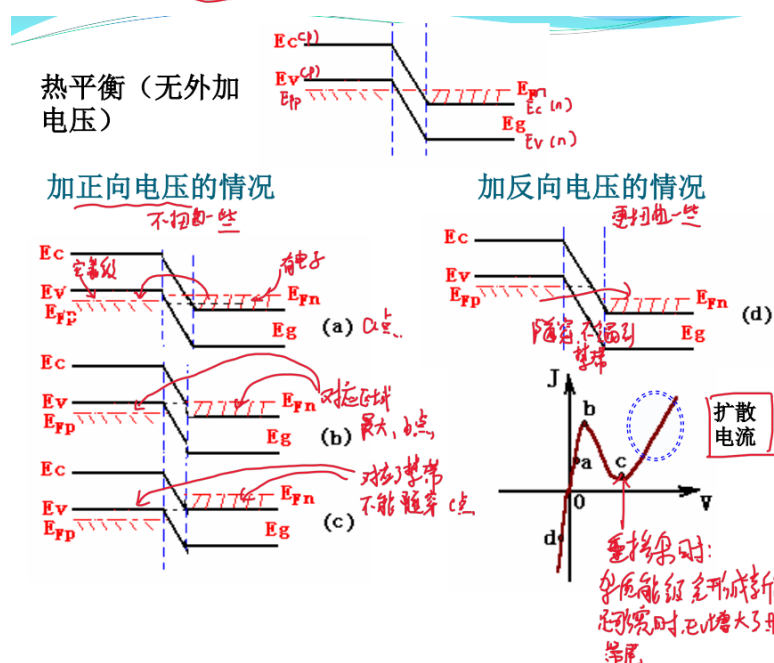
当p-n结的两边都是重掺杂时：(1) 费米能级分别进入导带和价带。(2) 势垒十分薄。

平衡时



简并  
不同齐纳击穿

在外加正向或反向电压下,有些载流子将可能穿透势垒产生额外的电流。—隧道电流



对重掺杂而言，加正向电压时，势垒区不扭曲一些：

- a 点处，n 型半导体的电子有多余，对应着 p 型半导体价带中的空能级，所以会形成电流
- b 点处，比 a 处电压高，有更多的 n 型半导体有更多的电子对应着 p 型半导体的空能级，所以形成的电流比 a 处的大
- c 点处，比 b 点处电压高，虽然有更多的电子有余，但是都对应了 p 型半导体的禁带，所以电流最小，但由于重掺杂时，多个杂质能级会形成新能带，形成了带尾（ $E_V$  上升一些）。

隧道二极管优点：

## 隧道二极管的优点：

温度影响小、高频特性良好

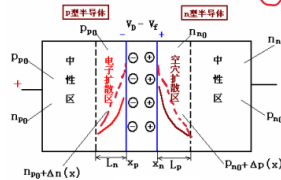
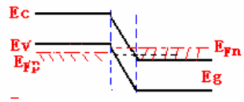
单位时间通过p-n隧道结的多子数目起伏小。

电子穿过势垒极其迅速



江崎二极管

应用于低噪声高频放大器及高频振荡器中（其工作频率可达毫米波段），也可以被应用于高速开关电路中。

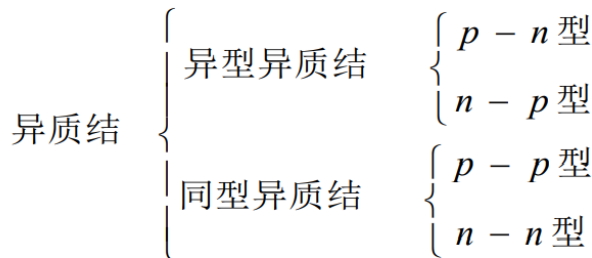


↑ 载流子分布梯度↑

由于隧穿的是电子（以上述为例），是多子，所以温度影响很小。

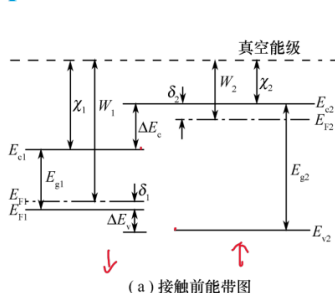
由于电子穿过势垒很快；对于正常的PN结而言，增大正向电压，扩散区会形成增大载流子分布梯度，才增大了电流，相较于这一过程，电子隧穿就快很多，适合高频。

异质结：

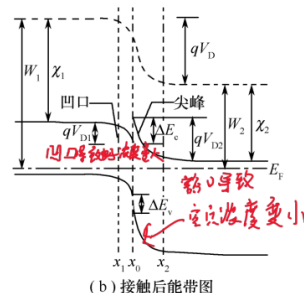


PN型

## 1. p-n型



(a) 接触前能带图



(b) 接触后能带图

1. 凹口具有聚集电子的作用，电子浓度增高

2. 导带底高度差小，价带顶高度差大，意味着电子电流在总电流中比重增大

这里是把  $E_{c1}, E_{v1}, E_{c2}, E_{v2}$  的端点固定，然后把费米能级这些能级靠拢。

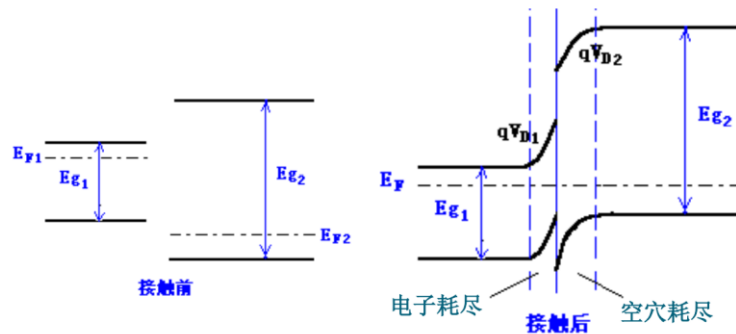
上部分出现了凹口，凹口的左边积累了大量电子，电子浓度增大；下部分出现了豁口，豁口

的右边空穴浓度减小了

其中导带底高度差较小（出现了凹口），价带顶高度差大（出现了豁口），意味着电子电流在总电流的比重增大

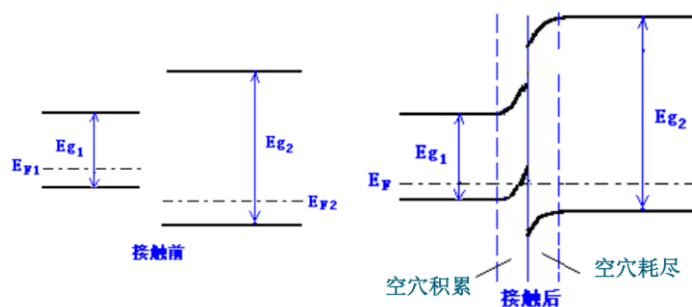
NP 结：

## 2. n-p型



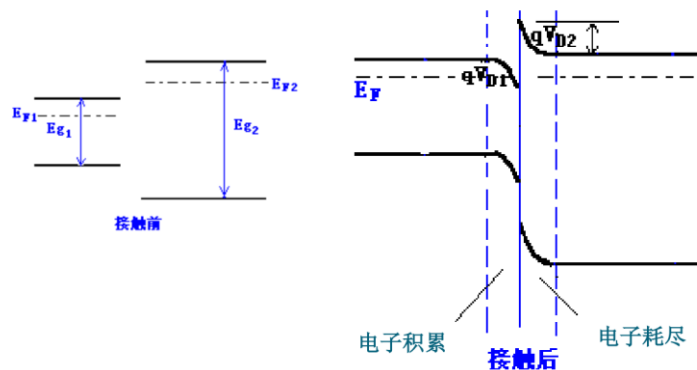
同上，固定端点靠拢能级，上面出现豁口，下面出现了凹口；

## 3. p-p型



固定端点靠拢能级，上面出现豁口，下面出现了凹口；

## 4. n-n型



固定端点靠拢能级，上面出现凹口，下面出现豁口

异质结的主要性质

1. 可提高注入比
2. 窗口效应
3. 限制光子的光波导壁界

#### 4. 限制载流子的势垒

##### 1. 可提高注入比

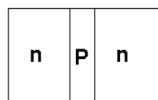
##### 1. 可提高注入比

$J_n/J_p$  的注入比

在总电流中电子电流与空穴电流之比，称为电子的注入比。

下面以p-n型为例，并借用同质p-n结的电流表达式，做些定性的讨论。

外加正偏：

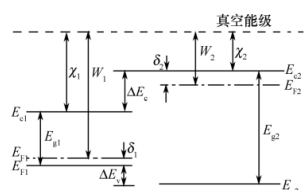


$$J_n = q \frac{D_n}{L_n} n_{p0} \left( e^{\frac{qV}{k_0 T}} - 1 \right)$$

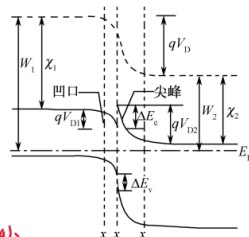
$$\Rightarrow \frac{J_n}{J_p} = \frac{D_n L_p}{D_p L_n} \cdot \frac{n_{p0}}{p_{n0}}$$

$$J_p = q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} \left( e^{\frac{qV}{k_0 T}} - 1 \right)$$

$$E_{g2} - E_{g1} = \Delta E_c + \Delta E_v$$



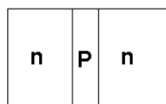
(a) 接触前能带图



(b) 接触后能带图

中性强电荷  $n_{ns} = N_b$

$$\frac{J_n}{J_p} = \frac{D_n L_p}{D_p L_n} \cdot \frac{n_{p0}}{p_{n0}} = \frac{D_n L_p}{D_p L_n} \cdot \frac{(n_i^2)_p}{(n_i^2)_n} \cdot \frac{n_{n0}}{p_{p0}} = \frac{D_n L_p (N_p)}{D_p L_n (N_n)} e^{\frac{\Delta E}{k_0 T}}$$



同质pn结

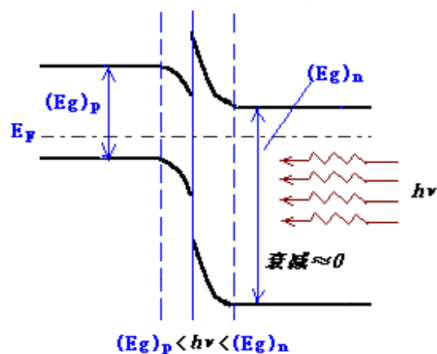
$$\Delta E = \Delta E_c + \Delta E_v = (E_g)_n - (E_g)_p$$

$\Delta E \uparrow$   
电子流比  $J_n/J_p \uparrow$   
电流显著

##### 2. 窗口效应

##### 2. 窗口效应

n型区的  $(E_g)_n$  让  $h\nu$  进来



$(E_g)_p < h\nu < (E_g)_n$

异质结的窗口效应

应用：

1. 太阳能电池

2. 发光二极管

逆向考虑

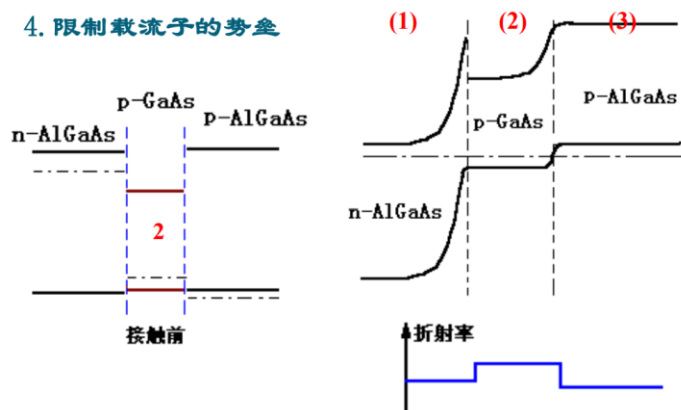
让  $h\nu$  从 n 的  $E_g$  出来

对于太阳能电池而言：是让合适的  $h\nu$  能通过 n 型半导体的禁带，然后打到 p 型半导体的价带电子上，从而激发出电子空穴对；

对于发光二极管而言，是 p 型半导体跃迁激发的  $h\nu$  能量光子，n 型半导体适合筛选出合适的  $h\nu$ ，让其从 n 型半导体的  $E_g$  打出；

### 3. 限制光子的光波导壁界

### 4. 限制载流子的势垒



在 2 处形成了凹口，这时在 2 处的电子被限制住了。  
异质结不同的折射率，可以作为光波导。

金属半导体接触 (metal-semiconductor contact)

### 一、金属和半导体的功函数

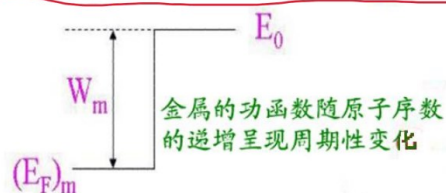
金属的功函数  $W_m$

表示一个起始能量等于费米能级的电子，由金属内部逸出到表面外的真空中所需要的最小能量。

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

功函数又叫逸出功

$E_0$  为真空中静止电子的能量，又称为真空静止电子能级。



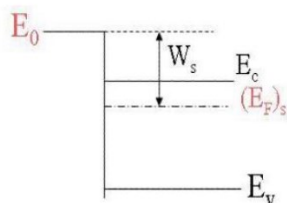
金属逸出功（功函数），就是在金属费米能级上的电子，跃迁成自由电子时，所需要的能量

半导体功函数  $W_s$ ：

半导体的功函数  $W_s$  semiconductor

$E_0$  与费米能级之差称为半导体的功函数。

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



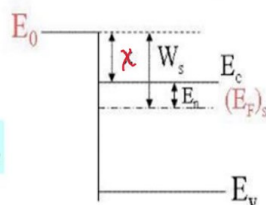
N 型半导体的功函数与亲和能：

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

**N型半导体：**

$$W_s = \chi + E_n$$

式中：  $\chi = E_0 - E_c$      $E_n = E_c - (E_F)_s$



$\chi$  表示从  $E_c$  到  $E_0$  的能量间隔：

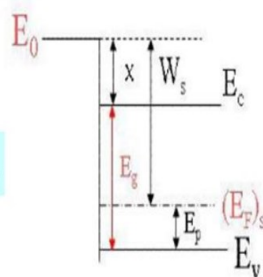
称  $\chi$  为 **电子的亲和能**，它表示要使半导体导带底的电子逸出体外所需要的最小能量。

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

**P型半导体：**

$$W_s = \chi + (E_g - E_p)$$

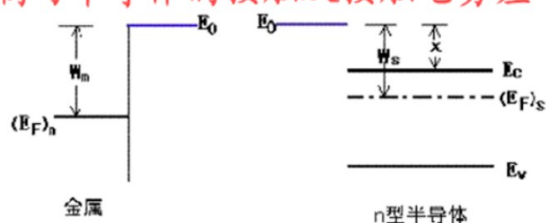
式中：  $\chi = E_0 - E_c$      $E_p = (E_F)_s - E_v$



金属与半导体的接触与接触电势差

根据 N、P 型半导体的类型与功函数大小，可以分成四类：

## 二、金属与半导体的接触及接触电势差



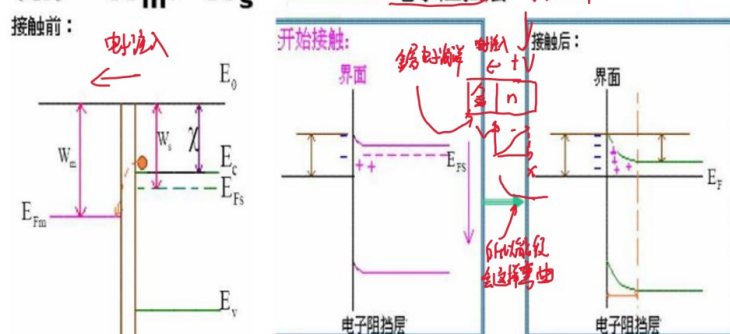
四种接触类型

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{金属} - n\text{型半导体} \left\{ \begin{array}{l} W_m > W_s \\ W_m < W_s \end{array} \right. \\ \text{金属} - p\text{型半导体} \left\{ \begin{array}{l} W_m > W_s \\ W_m < W_s \end{array} \right. \end{array} \right.$$

金属与 N 型半导体接触，且  $W_m > W_s$  时：

### (1) 金属-n型半导体接触

#### (a) $W_m > W_s$



来看两者的能级比较，N 型半导体的导带顶处的电子能级较高，比较容易掉到金属费米能级上；

即此时，电子容易从半导体到金属内；

由于此时的电子主要是杂质电离的电子，所以此时半体会留下不能动的正电中心。电势升高；也就是说，会形成往上翘的能级（其实从我的小技巧也能分析）；此时翘的地方远离费米能级电子浓度小。电子比较大。所以是电子阻挡层

接触电势差：

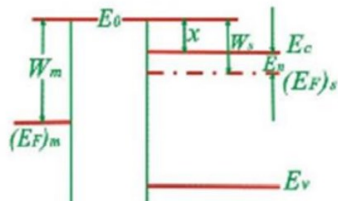
# 接触电势差

## 1. 金属和n型半导体的接触

### 1) 若 $W_m > W_s$ ，金属与n型半导体接触能带图

a 接触前

假定 $W_m > W_s$



a 接触前

### b 间隙很大(D远大于原子间距)

达到平衡状态后，它们之间的电势差完全补偿了原来费米能级的不同。于是有

$$q(V_s' - V_m) = W_m - W_s$$

上式可写成

$$V_{ms} = V_m - V_s' = (W_s - W_m)/q$$

的  $V_m - V_s'$

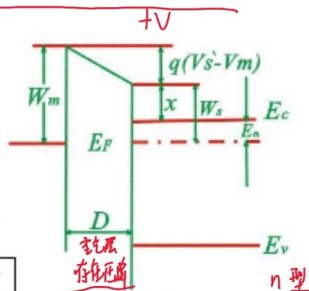
$V_m - V_s'$

$V_m - V_s'$

$V_m - V_s'$

这个由于接触而产生的电势差称为

接触电势差。



b 间隙很大

电子过不去，  
形成不了能带的压降

### c 紧密接触(D小到可以与原子间距相比较)

D减小→空间电荷区→电场→能带弯曲→表面势 $V_s$ 。

这时接触电势差一部分

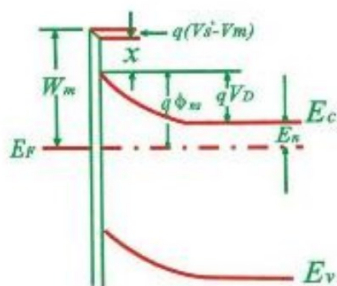
降落在空间电荷区，另

一部分降落在金属和半

导体表面之间。于是

$$(W_s - W_m)/q = V_{ms} + V_s$$

半导体内的电势差



c 紧密接触



d 忽略间隙

$V$  全落在半导体的势垒区内

接触间隙而  $E_F$  不同的差距

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

半导体一边的势垒高度为

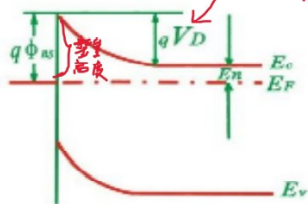
$$qV_D = -qV_s = W_m - W_s$$

金属一边的势垒高度是

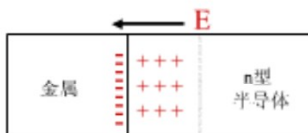
$$q\phi_{ns} = qV_D + E_n = -qV_s + E_n$$

$$= W_m - W_s + E_n = W_m - \chi$$

亲和能  
 $W_s - E_n$



d 忽略间隙



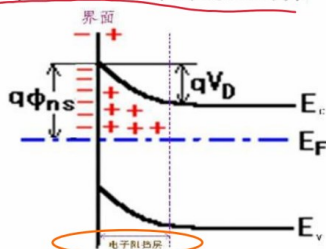
即:

✓ 半导体中导带底电子向金属运动时必须越过势垒的

高度:  $qV_D = W_m - W_s$

✓ 金属一边的电子运动到半导体一边也需要越过的势

垒高度:  $q\phi_{ns} = W_m - \chi$



金属-N 型半导体接触

$W_m < W_s$

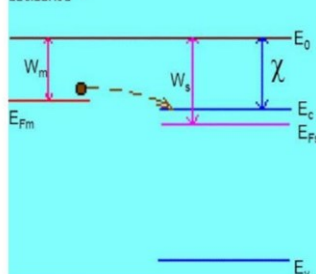
## (1) 金属-n型半导体接触

$W_m < W_s$

势垒区, 形成负的空间电荷区, 半导体表面电子浓度远大于体内, 因此是高电导区 (欧姆接触特性)

电子反阻挡层

接触前:



接触后: 界面

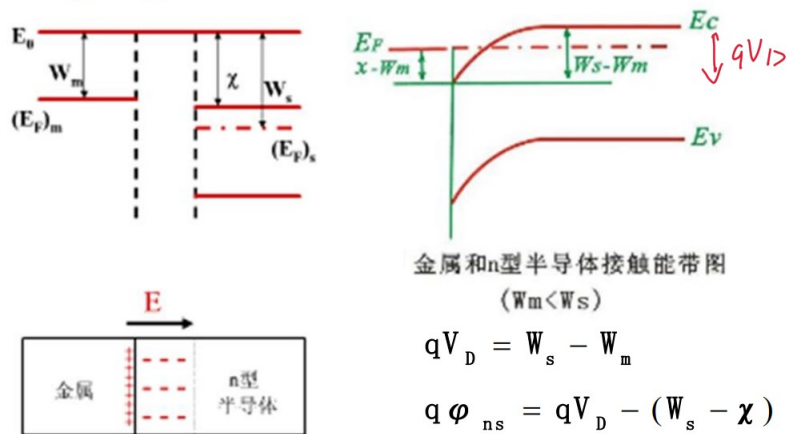


此时, 电子的费米能级高, 所以电子下楼梯到导带底能级上, 也就是金属的电子流到半导体内部  
由于是金属电子流向半导体, 也就是说金属一侧用 +V 表示, 那么半导体一侧就是 -V 表示即

形成从左向右的内建电场。也就是能级会往下翘。

能级往下翘，靠近费米能级，就是说会有大量的电子（金属注入的）。电阻比较小。是电子反阻挡层，高电导区（欧姆接触特性，小电阻接触）。

### 若 $W_m < W_s$ ，金属与n型半导体接触能带图



对半导体而言，从  $E_c$  到固定的端点，有着  $qV_d$  之差；

对于金属而言，从  $E_f$  到端点，有着  $\chi - W_m$  之差

小结：

## 小结

当金属与n型半导体接触时：

若  $W_m > W_s$

- 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， $V_s < 0$ ，它使半导体表面的能量高于体内，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。

若  $W_m < W_s$ ,

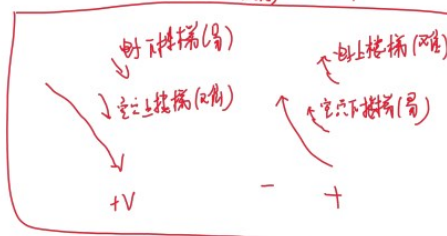
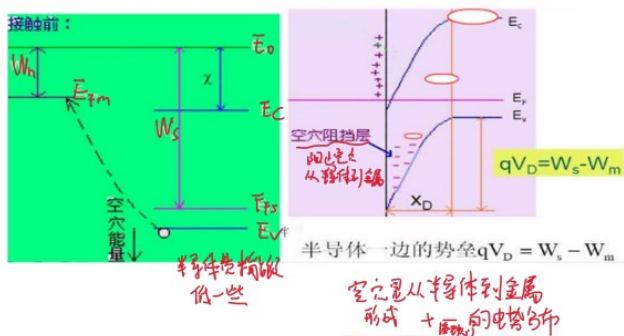
- 电子将从金属流向半导体，在半导体表面形成负的空间电荷区。其中电场方向由表面指向体内,  $V_s > 0$ , 能带向下弯曲。
- 这里电子浓度比体内大得多，因而是一个高电导的区域，称之为 反阻挡层。
- 反阻挡层是很薄的高电导层，它对半导体和金属接触电阻的影响是很小的。

金属-P型半导体接触，且  $W_s > W_m$  时：

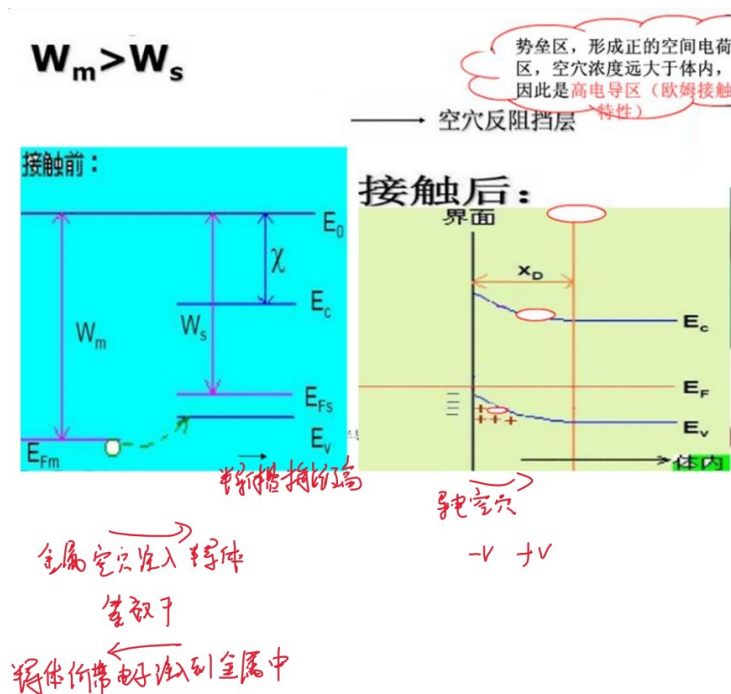
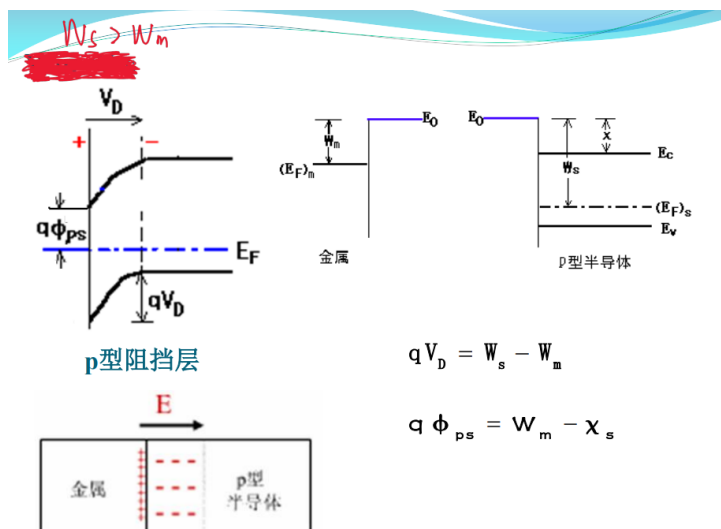
## (2) 金属-p型半导体接触

$W_s > W_m$

空穴阻挡层

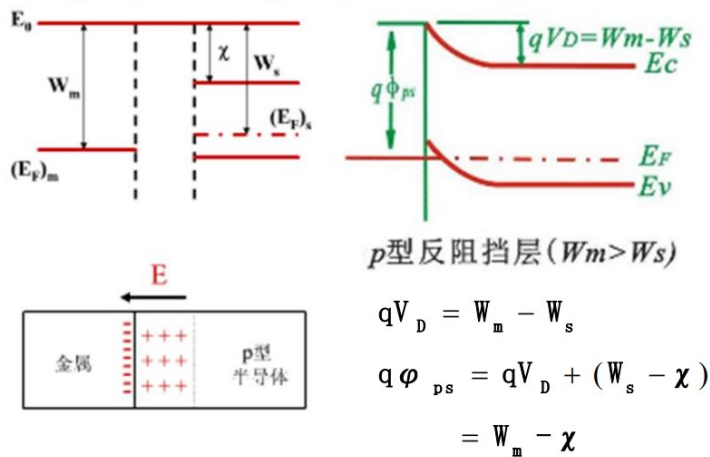


空穴上楼梯哦，所以是半导体中的空穴流到金属中。这个会形成负电中心。  
对于空穴来说，下楼梯难，所以金属和价带的空穴都比较难通过接触面，是空穴阻挡层。



空穴是上楼梯容易，但金属中没有空穴，所以是价带中的电子移动到金属中，这里的正电是由于半导体中的电子溜走了，在此处形成空位置即空穴，也可以看成是金属中的空穴流到半导体中。

若  $W_m > W_s$ ，金属与p型半导体接触能带图



求势垒高度，都是求正值！！！！

## □ 阻挡层与反阻挡层

### (1) 金属-n型半导体接触

- $W_m > W_s$  → 电子阻挡层 (高电阻层)
- $W_m < W_s$  → 电子反阻挡层 (高电导层)

### (2) 金属-p型半导体接触

- $W_m > W_s$  → 空穴反阻挡层 (高电导层)
- $W_m < W_s$  → 空穴阻挡层 (高电阻层)

求势垒高度，都是求正值！！！！

表面态对接触势垒的影响

### 三、表面态对接触势垒的影响

金 - 半 (n型) 接触: 金属一边形成的势垒高度:

$$q\phi_{ns} = W_m - \chi_s \begin{cases} \chi_s: \text{对同一种半导体, 保持定值} \\ W_m: \text{随不同金属而变化} \end{cases}$$

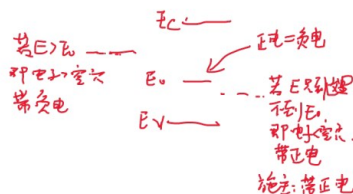
**实验表明:** 不同金属与同一种半导体接触, 各种金属的功函数虽然相差很大, 但与半导体接触时形成的势垒高度却相差很小。

原因: 半导体表面的禁带中存在表面态 (表面能级)

□表面态：局域在表面附近新电子态。

□表面能级：与表面态相应的能级称为表面能级

- 在界面处晶格的断裂产生大量能量状态，称为界面态或表面态，位于禁带内，表面态通常按能量连续分布。表面所有价带电子都断裂了，成为很大范围的连续能级
- 表面态分为施主型和受主型。
- 表面处存在一个距离价带顶为 $q\Phi_0$ 的能级（中性能级 $E_0$ ）。电子正好填满 $q\Phi_0$ 以下所有的表面态时，表面呈电中性。若 $q\Phi_0$ 以下表面态为空，表面带正电，类似施主作用； $q\Phi_0$ 以上表面态被电子填充，表面带负电，类似受主作用。
- 对于大多数半导体，中性能级 $E_0=q\Phi_0$ 约为禁带宽度的三分之二



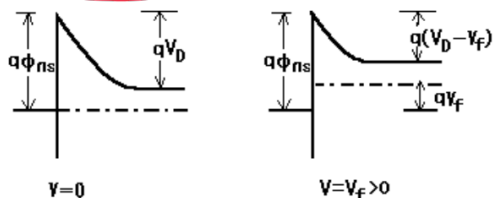
整流特性：

#### 四、整流特性（对阻挡层而言）

金属与半导体接触可以形成阻挡层（肖特基势垒 Schottky Barrier）与反阻挡层，前者具有与p-n结相似的整流特性，而后者具有欧姆特性

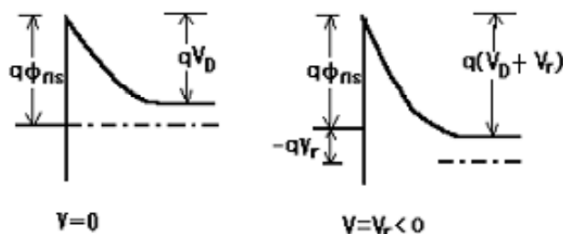
外加电压对n型半导体的影响：

(1) 加正电压（金属接“+”）



势垒高度随外加正电压的增加而降低，因此由半导体流向金属的净电子流增加

(2) 加反向电压（金属接“-”）



势垒高度随外加反电压的增加而升高，因而从半导体到金属的电子减少，反向电流主要由金属到半导体的电子流构成，金属净电子流增加

小电流



描述肖特基I

- V特性的理论有两种

{ 扩散理论  
热电子发射理论

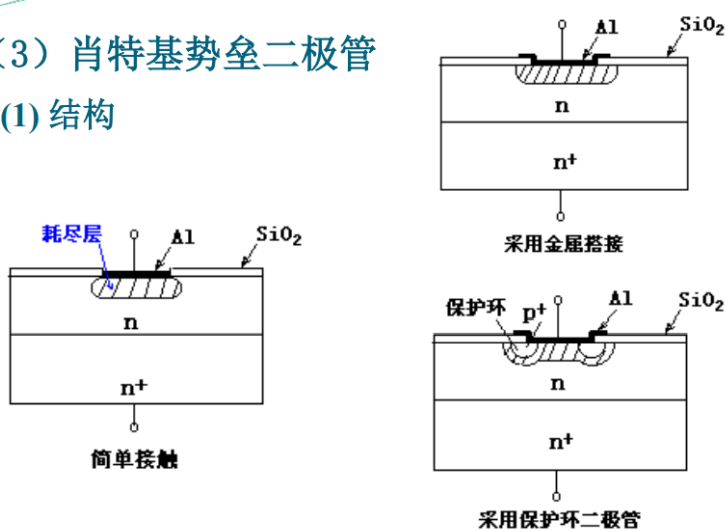
**扩散理论：**假设势垒区宽度较半导体内的电子的平均自由程长，必须同时考虑电子在势垒区的漂移和扩散运动。

**热电子发射：**假设势垒区宽度较电子的平均自由程短，故可略去电子在势垒区的碰撞，当电子的热运动有足够大的动能超越势垒的顶点时，就可以自由地通过势垒区进入金属。同样，金属中能超越势垒顶的电子也都能到达半导体内。

肖特基势垒二极管

### (3) 肖特基势垒二极管

#### (1) 结构



#### (2) 与p-n结二极管的比较

1、SDB是多数载流子器件，而p-n结二极管电流取决于非平衡少数载流子的扩散运动

2、p-n结二极管中，少数载流子注入造成非平衡载流子在势垒区两侧界面的积累，外加电压变化，电荷积累和消失需有一弛豫过程(电荷存储效应)，严重影响了p-n结二极管的高频性能。SDB器件不发生电荷存储现象，使得它在高频、高速器件中有重要作用

3、SDB的正向开启电压比p-n的低；而反向饱和电流比p-n的大。这是因为多数载流子电流远高于少数载流子电流。SDB中通常存在额外的漏电流和软击穿

欧姆接触：

## 五、欧姆接触 (Ohmic Contact)

$I \propto V$  电阻很小

从电学上讲，理想的欧姆接触的接触电阻应当很小，同时还应具有线性的和对称的电流—电压关系。

由于表面态的影响，不能通过选择金属的功函数来实现欧姆接触（理论上说， $W_m < W_{ns}$  或  $W_m > W_{ps}$  可形成反阻挡层）

在生产实际中，主要是利用隧道效应的原理在半导体上制造欧姆接触。采用重掺杂半导体与金属接触

### 欧姆接触的实现

用重掺杂的半导体与金属接触

