



半导体物理

张光祖 博士，副教授，博士生导师

光学与电子信息学院

zhanggz@hust.edu.cn



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
电子科学与技术类专业精品教材

半导体物理学

(第7版)

The Physics of Semiconductors

7th Edition

©刘恩科 朱秉升 罗晋生 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>

1

半导体中的电子状态

2

半导体中载流子的统计分布

3

载流子输运与导电

4

非平衡载流子

5

p-n结

6

金属和半导体的接触

7

半导体表面与MIS结构

8

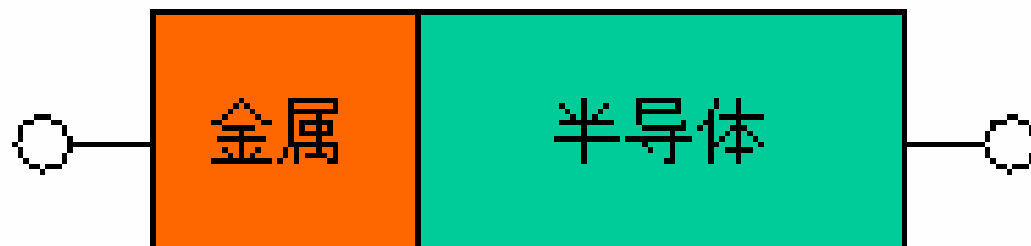
半导体异质结

9

半导体的光、热、磁效应

本章内容提要

- 金半接触及其能带图
- 肖特基模型和巴丁模型
- 整流特性
- 少子注入和欧姆接触（自学）



➤ 1874年：F. Braun发现金属和硫化物半导体接触时具有**整流作用**
(CuFeS_2 、 PbS 等)

➤ 上世纪初期 Cu_2O 、 Se 整流器

➤ 上世纪30年代末：点接触硅整流器

➤ 1938年：W. Schottky在能带论的基础上提出金-半接触界面

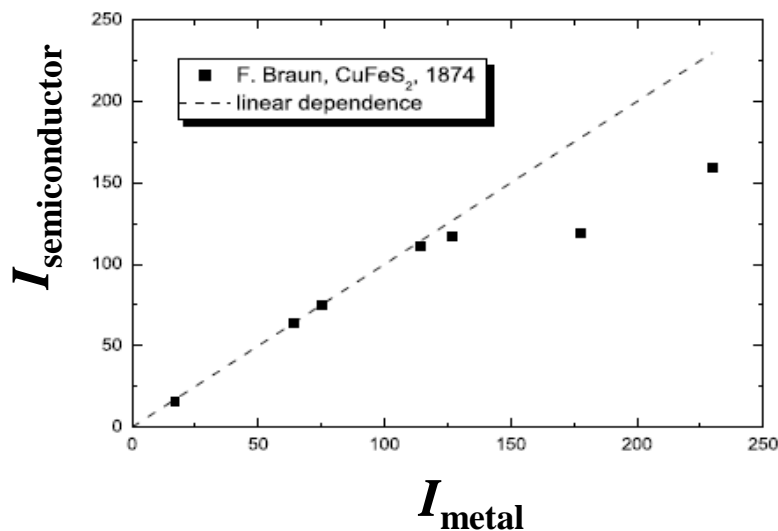
势垒模型(**肖特基势垒**)，奠定了金-半接触的理论基础！

1940s~：随着p-n结二极管的出现，金-半接触在器件方面的应用地位降低

➤ 1960s：平面工艺制作出**金-半二极管(肖特基二极管)**

<近乎理想的伏安特性，噪声低，频率特性好>

随后，应用领域的快速发展推动了金-半接触理论的进一步发展

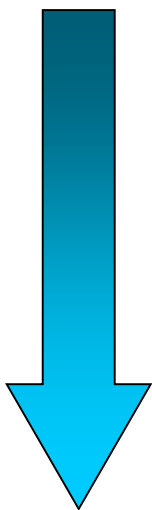


金属—半导体接触

整流接触：微波技术和高速集成电路

欧姆接触：电极制作

半导体器件和电路的重要组成部分



半导体物理的重要内容

能带图

整流特征

欧姆接触

6.1 金属半导体接触及其能带图

1. 金属与半导体的功函数

功函数：费米能级与真空能级的差值

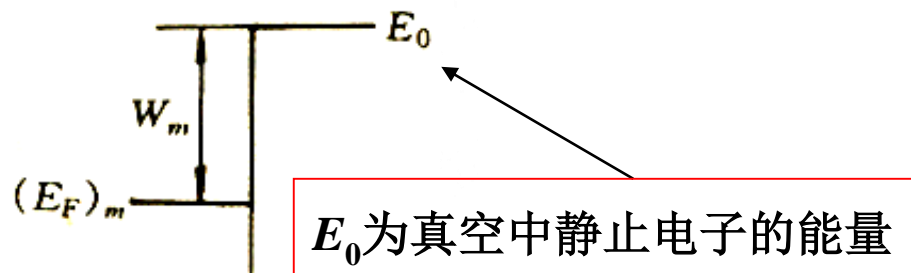
- 使电子从其逸出到真空中所需要的能量的最小值
- 标志着束缚电子能力的强弱！！
- 功函数越大，电子越不容易离开

金属功函数

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

半导体功函数

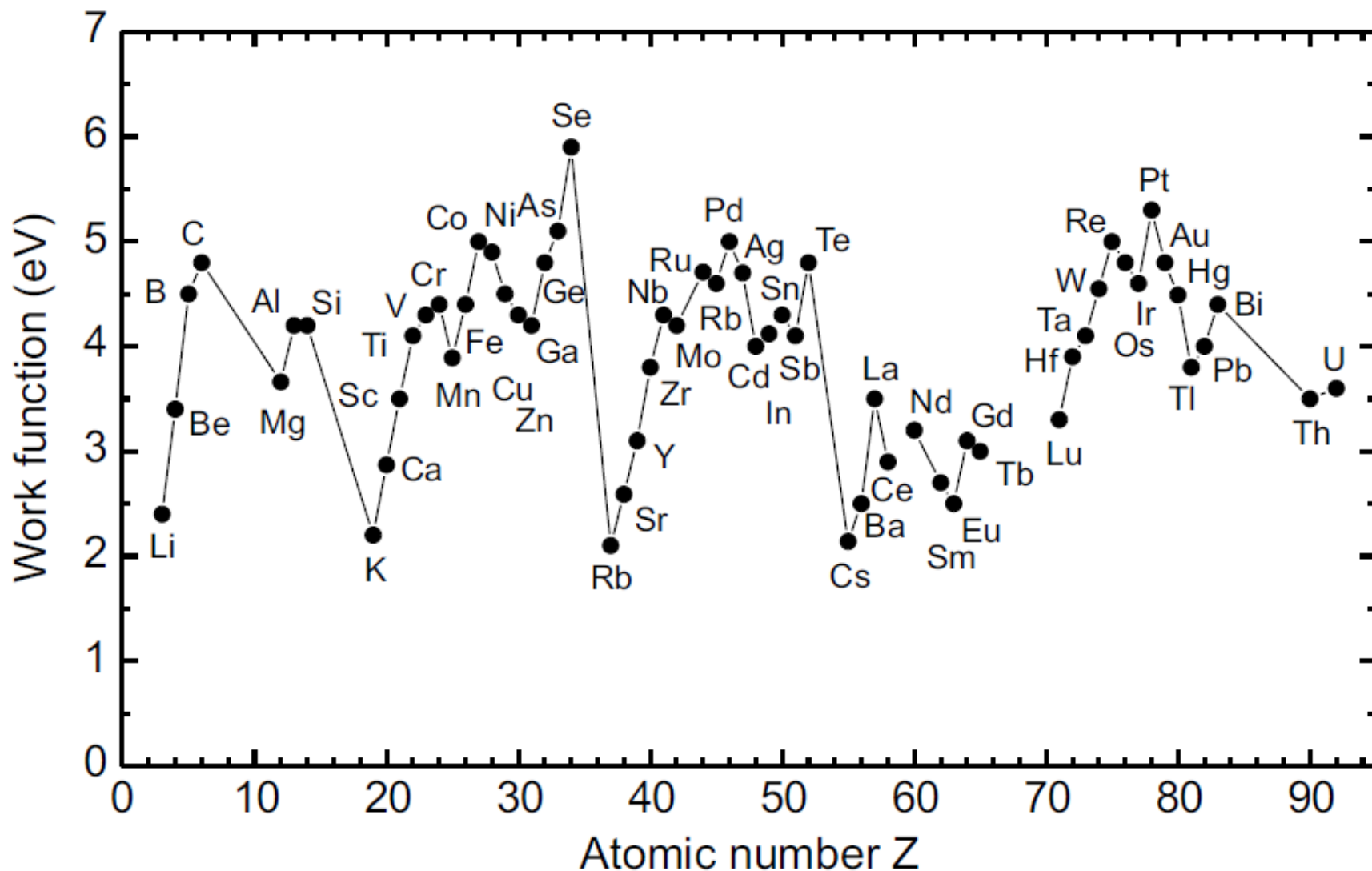
$$W_s = E_0 - (E_F)_s$$



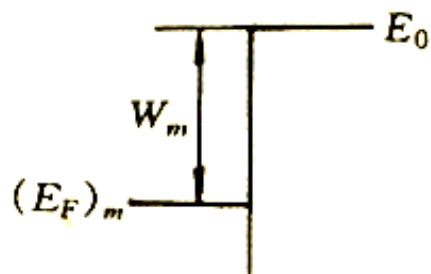
金属的功函数

金属的功函数

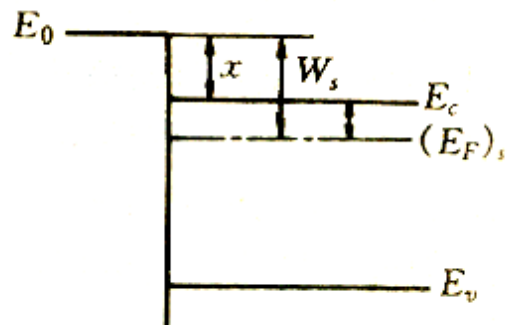
(约几个电子伏特，且随原子序数成周期性变化)



Z	element	W_m (eV)	Z	element	W_m (eV)	Z	element	W_m (eV)
3	Li	2.4	37	Rb	2.1	64	Gd	3.1
4	Be	3.4	38	Sr	2.59	65	Tb	3.0
5	B	4.5	39	Y	3.1	66	Dy	-
6	C	4.8	40	Zr	3.8	67	Ho	-
12	Mg	3.66	41	Nb	4.3	68	Er	-
13	Al	4.2	42	Mo	4.2	69	Tm	-
14	Si	4.2	44	Ru	4.71	70	Yb	-
19	K	2.2	45	Rh	4.6	71	Lu	3.3
20	Ca	2.87	46	Pd	5.0	72	Hf	3.9
21	Sc	3.5	47	Ag	4.7	73	Ta	4.1
22	Ti	4.1	48	Cd	4.0	74	W	4.55
23	V	4.3	49	In	4.12	75	Re	5.0
24	Cr	4.4	50	Sn	4.3	76	Os	4.8
25	Mn	3.89	51	Sb	4.1	77	Ir	4.6
26	Fe	4.4	52	Te	4.8	78	Pt	5.3
27	Co	5.0	55	Cs	2.14	79	Au	4.8
28	Ni	4.9	56	Ba	2.5	80	Hg	4.49
29	Cu	4.5	57	La	3.5	81	Tl	3.8
30	Zn	4.3	58	Ce	2.9	82	Pb	4.0
31	Ga	4.2	59	Pr	-	83	Bi	4.4
32	Ge	4.8	60	Nd	3.2	90	Th	3.5
33	As	5.1	62	Sm	2.7	92	U	3.6
34	Se	5.9	63	Eu	2.5			



E_0 为真空电子能级



金属功函数

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

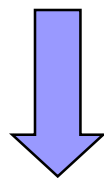
半导体功函数

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

二者的区别?

金属和半导体的功函数不同

半导体的费米能级随掺杂和温度而改变
所以半导体的功函数不是常数

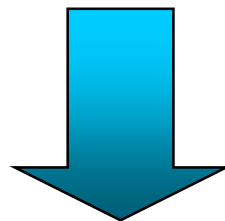


接触后，电子由功函数小的地方
往功函数大的地方流！

平衡态时具有统一的费米能级

接触电势差 φ_{ms}

肖特基模型



电子亲和能

$$\chi = E_0 - E_c$$

$$W_s = \chi + [E_c - (E_F)_s]$$

$$= \chi + E_n$$

$$\text{其中 } E_n = E_c - (E_F)_s$$

2. 接触电势差（肖特基模型）

$$\begin{cases} \text{金属与n型半导体} \\ W_m > W_s \end{cases}$$

电子由半导体流向金属

金属的表面带负电

半导体表面带正电（留下正的空间电荷）

半导体内建电场（体内指向表面，表面势 $V_s < 0$ ）

交界面的能带发生弯曲

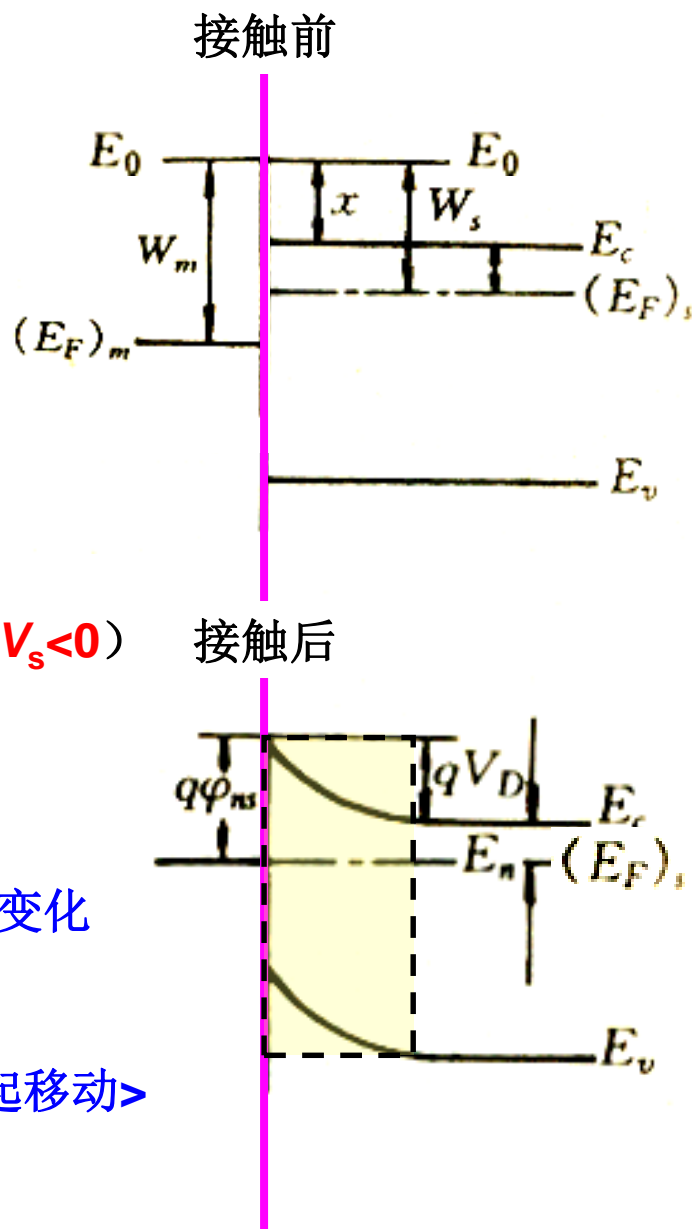
直至费米能级统一

金属导带的电子浓度很大，其费米能级无显著变化

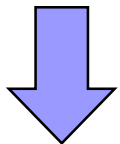
金属表面处能带无明显变化

主要是半导体的费米能级在降低<整个能带一起移动>

半导体表面处能带上弯，电子的表面势垒！



空间电荷区存在内建电场

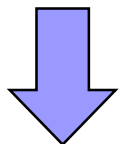


沿电场方向，电势降低

p-n结的接触电势差

$$V_D = \frac{k_0 T}{q} \left[\ln \left(\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) \right]$$

V_D 与 N_D 、 N_A 、 T 、材料禁带宽度有关

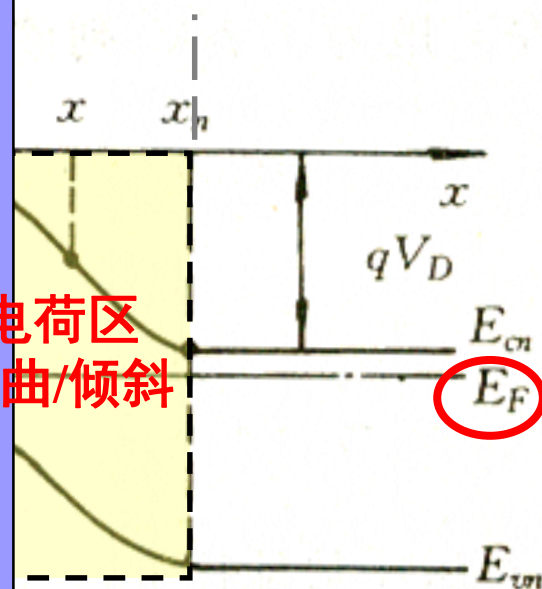
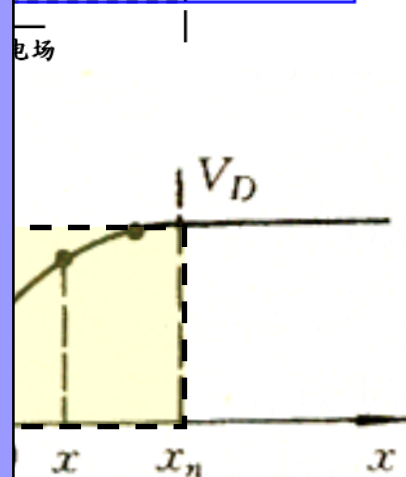
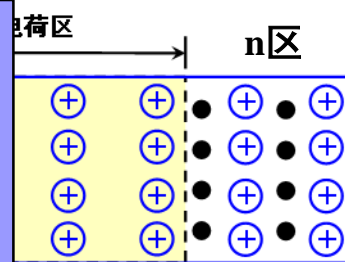


电子电势能则逐渐升高

空间电荷区能带弯曲/倾斜

p-n结势垒高度

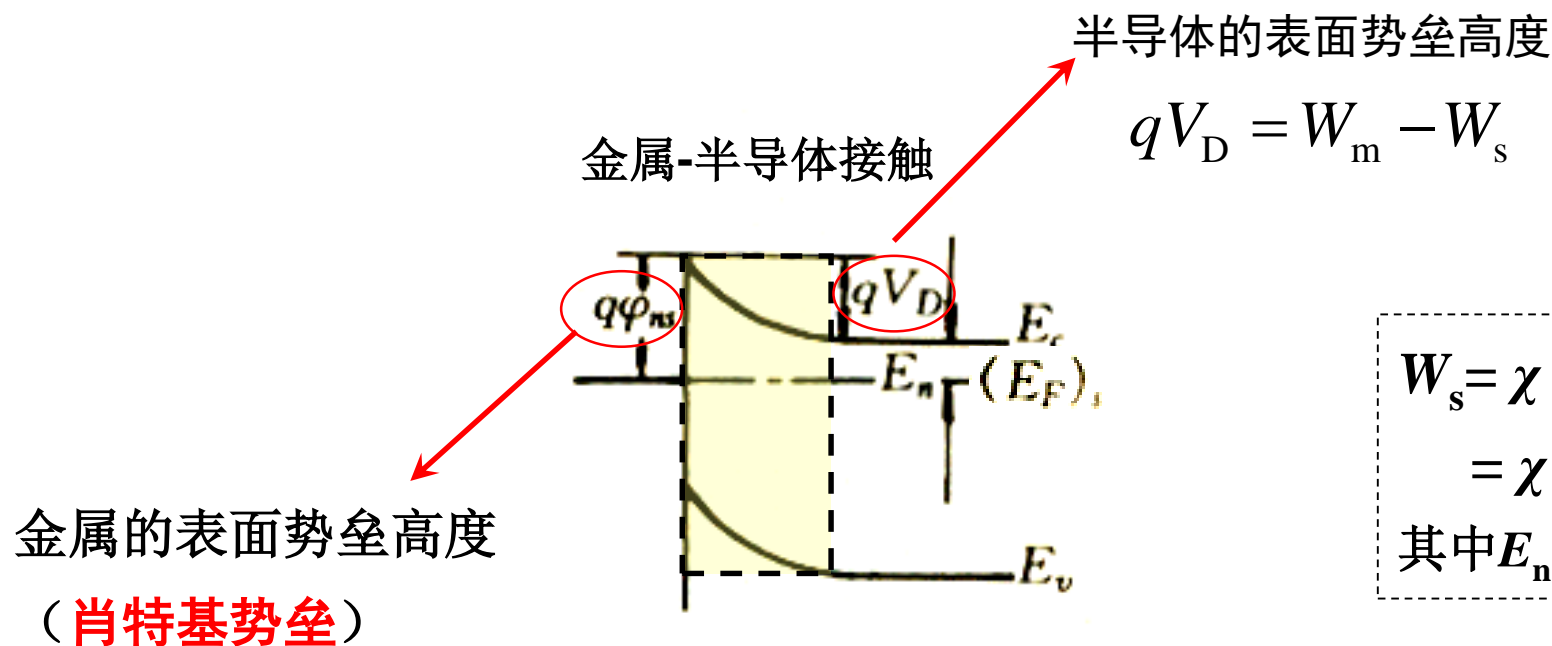
$$qV_D = (E_F)_n - (E_F)_p$$



空间电荷区
能带弯曲/倾斜

{ 金属与n型半导体
 $W_m > W_s$

表面势垒区阻值很高，n型“阻挡层”



$$\begin{aligned}
 W_s &= \chi + [E_c - (E_F)_s] \\
 &= \chi + E_n \\
 \text{其中 } E_n &= E_c - (E_F)_s
 \end{aligned}$$

$$q\phi_{ns} = qV_D + E_n = W_m - W_s + E_n = W_m - \chi$$

{ 金属与n型半导体
 $W_m < W_s$

电子由金属流向半导体

金属的表面带正电

半导体表面带负电

半导体内建电场（表面指向体内，表面势 $V_s > 0$ ）

交界面的能带发生弯曲

直至费米能级统一

金属导带的电子浓度很大，其费米能级无显著变化

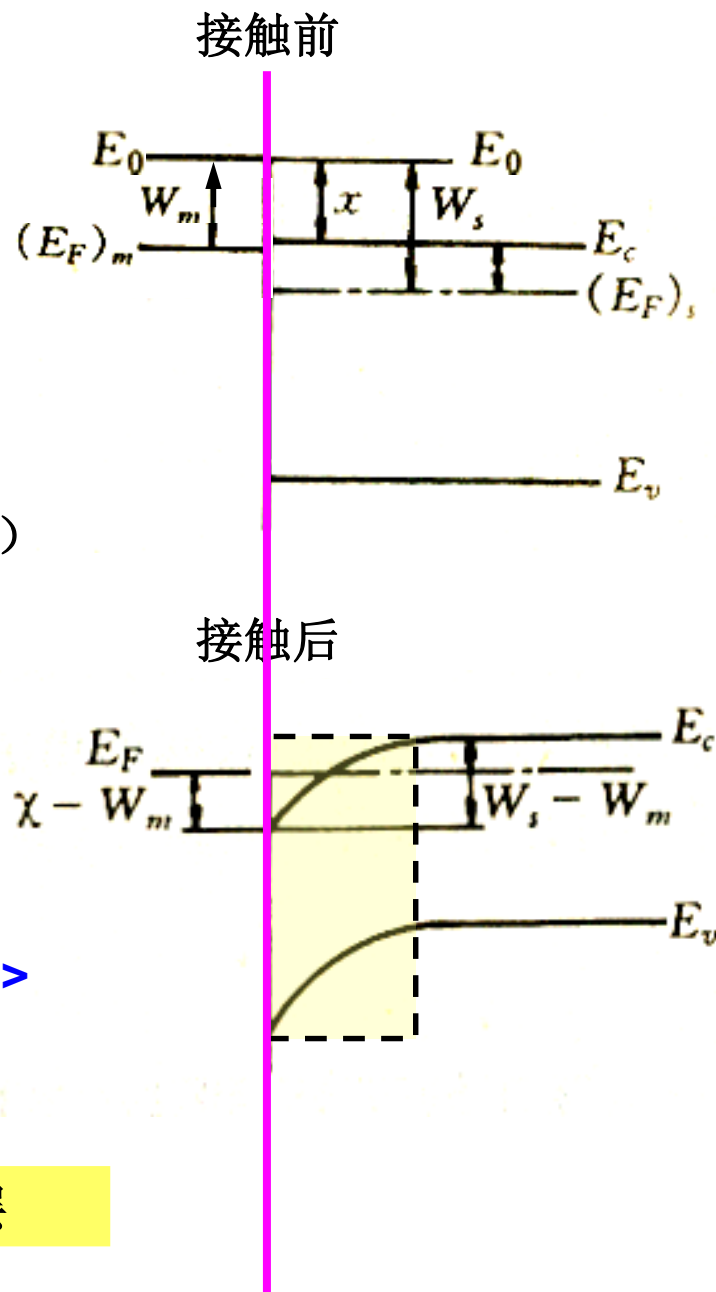
金属表面处能带无明显弯曲

主要是半导体的费米能级在上升<整个能带一起移动>

半导体表面处能带下弯，电子的表面势阱！



表面电子浓度较高，积累层/高电导层，n型反阻挡层



归纳与小结:

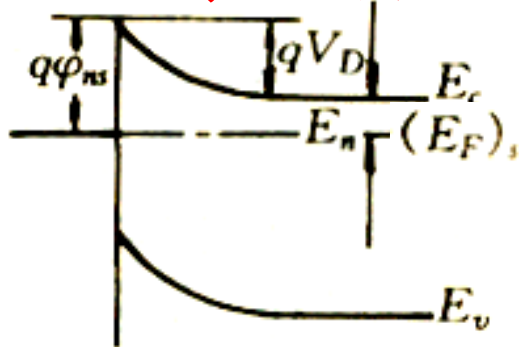
(1) 金属与n型半导体接触

- ◆ $W_m > W_s$ 电子由半导体进入金属，半导体表面处能带上弯， $V_s < 0$ ，表面是电子势垒，电子耗尽，**n型阻挡层**
- ◆ $W_m < W_s$ 电子由金属进入半导体，半导体表面处能带下弯， $V_s > 0$ ，表面是电子势阱，电子积累，**n型反阻挡层**

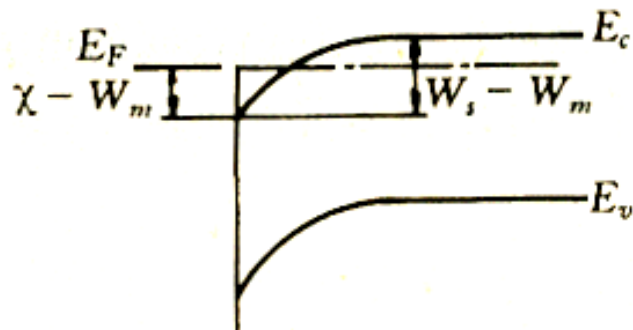
(2) 金属与p型半导体接触

- ◆ $W_m > W_s$ 电子由半导体进入金属，半导体表面处能带上弯， $V_s < 0$ ，
表面是空穴势阱，空穴积累，**p型反阻挡层**
- ◆ $W_m < W_s$ 电子由金属进入半导体，半导体表面处能带下弯， $V_s > 0$ ，
表面是空穴势垒，空穴耗尽，**p型阻挡层**

电子势垒，耗尽层
高电阻，阻挡层



电子势阱，积累层
高电导，反阻挡层



金属和n型半导体接触能带图

$$W_m > W_s$$

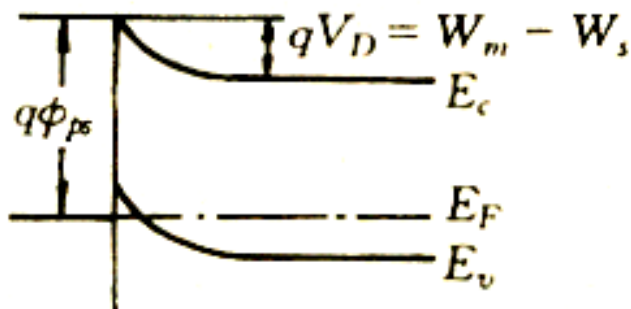
电子由半导体流向金属
半导体表面能带上弯

思考：能定性
分析阻挡层的
整流作用吗？

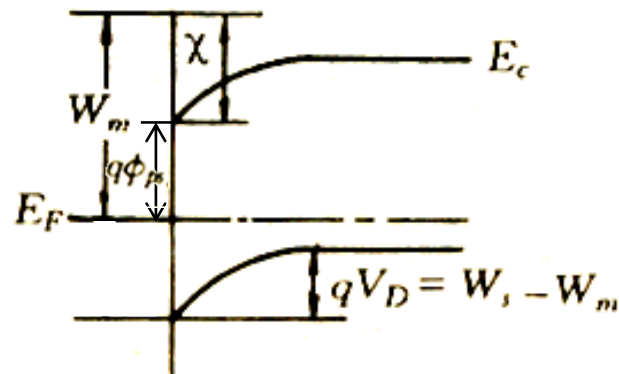
$$W_m < W_s$$

电子由金属流向半导体
半导体表面能带下弯

金属和p型半导体接触能带图



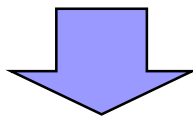
空穴势阱，积累层
高电导，反阻挡层



空穴势垒，耗尽层
高电阻，阻挡层

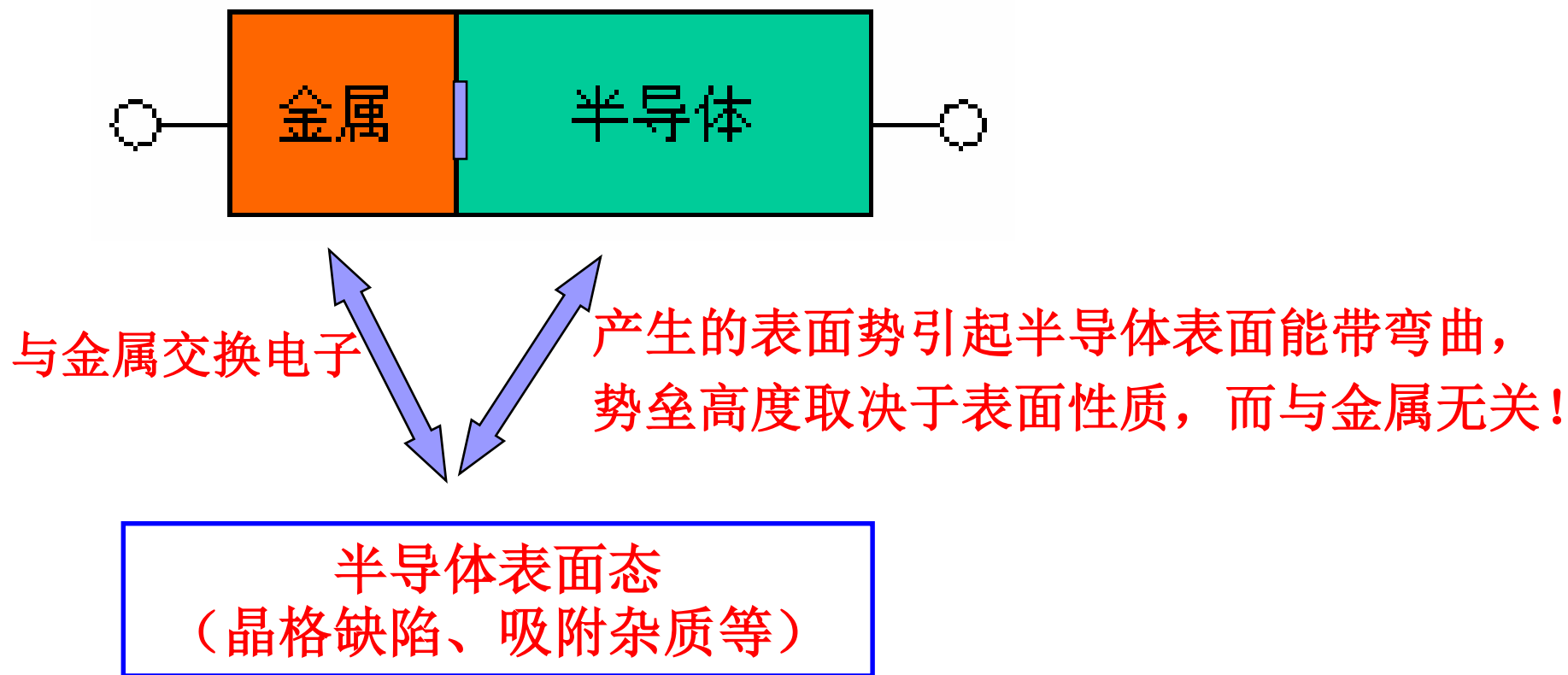
肖特基模型很好地揭示了半导体与金属接触时所形成的势垒的物理本质：

- 二者功函数的大小决定了**电子**的流动方向，从而决定了内建电场的方向，即决定了内建电场引起界面能带弯曲（主要是半导体表面）的方向！
- 半导体表面的能带弯曲对其**载流子**分布产生影响，起**阻挡**（势垒，载流子耗尽，高电阻层）或**反阻挡**（势阱，载流子积累，高电导层）作用，**取决于半导体多数载流子的类型！**
- 根据肖特基模型，不同金属与同一种半导体相接触时，是否形成势垒以及势垒高度应与金属功函数的大小有关（如n型阻挡层 $q\phi_{ns} = W_m - \chi$ ），然而，**大量测量结果证实，几乎90%的金属同半导体接触时，都形成势垒，而且其高度几乎与其金属功函数的大小无关！**



肖特基模型不是金半接触势垒的唯一机理！！！（想一想）

3. 表面态对接触势垒的影响（Bardeen巴丁模型）



半导体表面处的禁带中

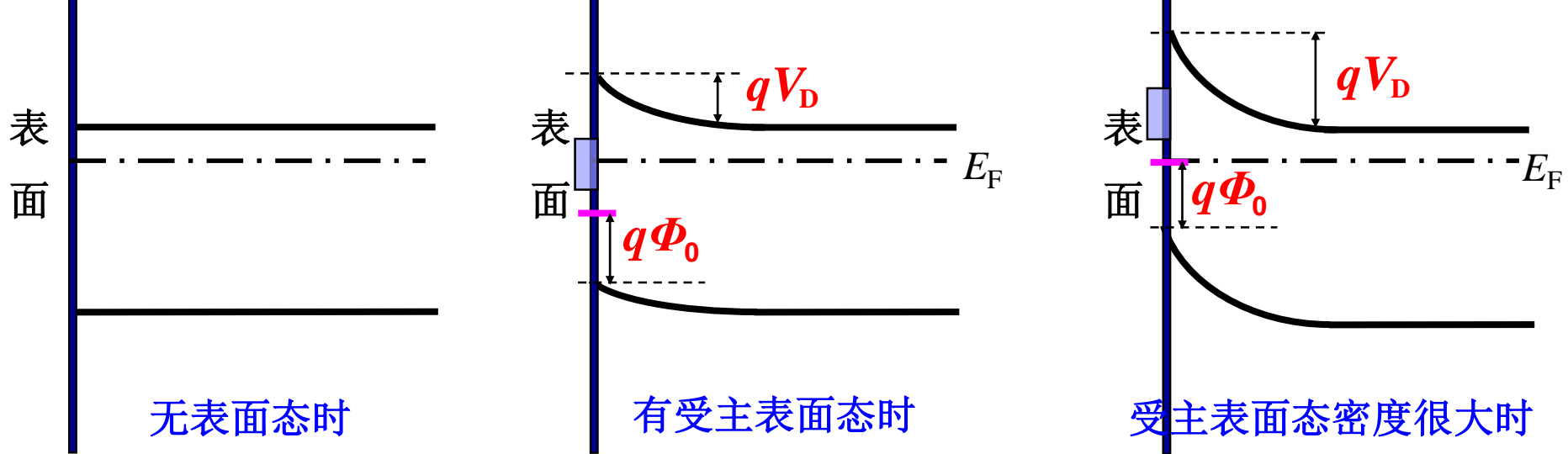
表面态 ↓ 表面能级

电子可以填充表面能级

若电子正好填满某一能级以下的所有表面态时，表面呈电中性，
该能级称为**表面中性(费米)能级**， $q\Phi_0$ （距离价带顶），
一般而言， $q\Phi_0$ 约为禁带宽度的1/3

中性能级以下：电子填充水平不到 $q\Phi_0$ ，表面带正电，类**施主表面态**

中性能级以上：电子填充水平超过了 $q\Phi_0$ ，表面带负电，类**受主表面态**



电子从半导体体内流向表面
表面带负电，体内带正电
内建电场从体内指向表面
表面能带上弯
电子势垒，阻挡层

半导体表面能级数目很多，只要 E_F 比 $q\Phi_0$ 高一点，表面态会积累很多负电荷，
能带上弯到 $q\Phi$ 与 E_F 重合时：

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

未接触金属时，由于表面态的作用，
半导体表面势垒已经形成了！！！！

金半接触时，

当电子由半导体流向金属时($W_s < W_m$)，受主表面态能够**提供**足够多的电子给金属，半导体内电子填充水平变化不大；当电子由金属流向半导体时($W_m < W_s$)，电子进入到半导体表面态中被其**容纳**，半导体内电子填充水平的变化不大；即金半接触时，当表面态密度很大时，半导体的费米能级几乎不随金属改变而发生改变（费米能级**钉扎效应**）

NOTE:

1. 巴丁模型表明：半导体表面态的存在，使得不与金属接触时都能形成势垒，而且表面态密度很高时，其提供/容纳载流子的能力可以完全屏蔽金半接触对半导体的影响，使得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（表面中性费米能级的位置）决定，此时接触电势差全部降落在两个表面之间。
2. 由于表面态密度的不同，接触电势差还是会有一部分降落在半导体表面以内时，金属功函数将对表面势垒将产生一定程度的影响，只是影响不大而已。实际情况是肖特基模型和巴丁模型的结合！

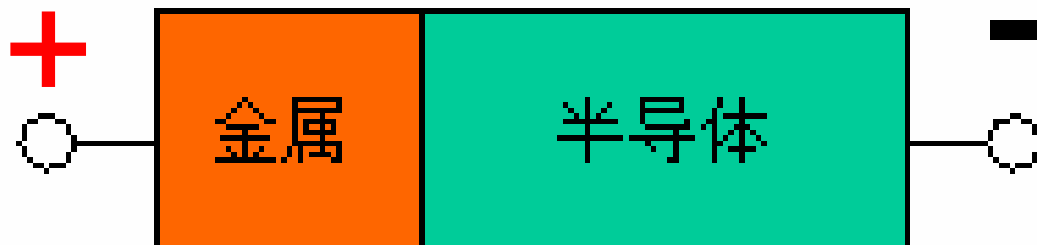
6.2 金属半导体接触整流特性

与p-n结的接触势垒类似，

金半接触的界面势垒（肖特基势垒）具有整流作用

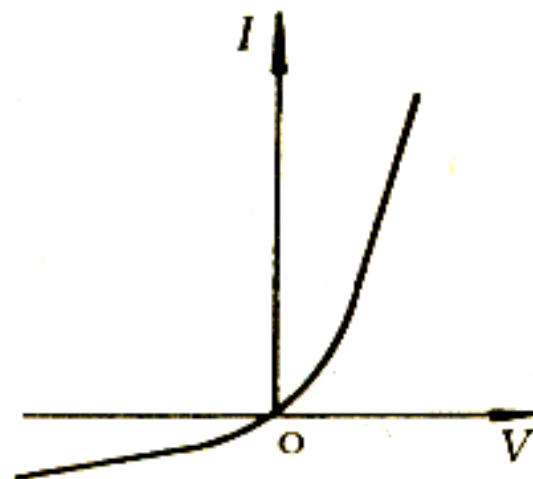
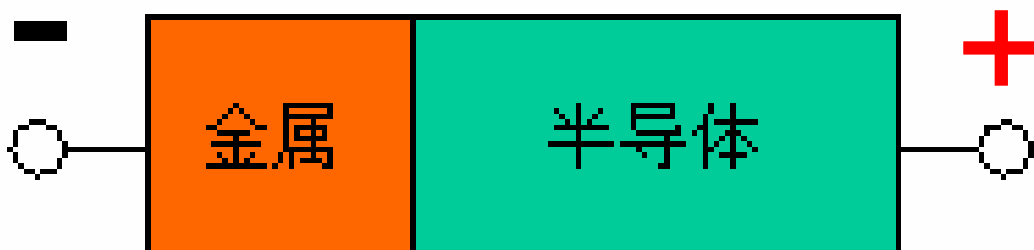
联系与区别？

正向偏压



n型半导体

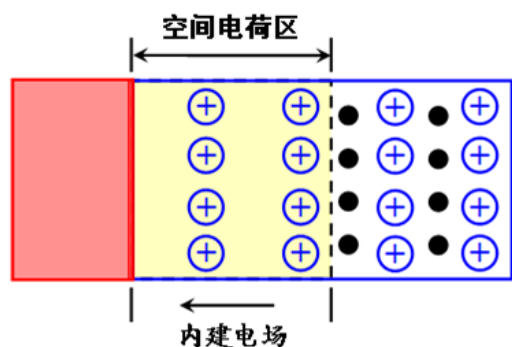
反向偏压



金属半导体接触伏安特性

n型阻挡层 ($W_m > W_s$, $V_s < 0$)

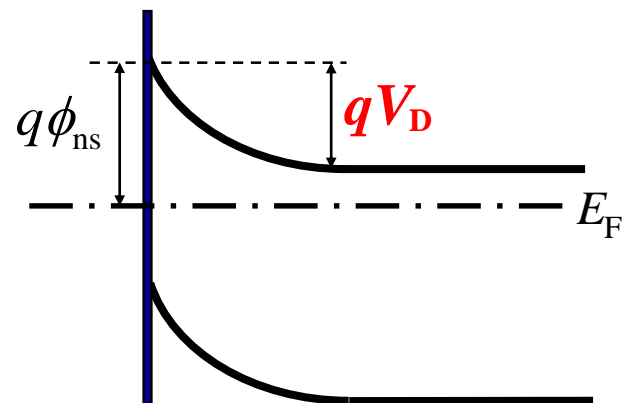
零偏 $V = 0$



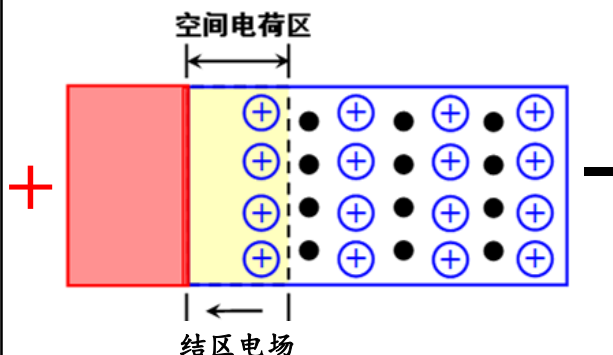
电子由半导体流向金属
产生内建电场阻碍扩散
直至二者平衡，无电流
表面能带上弯，**势垒区**

金属 \longleftrightarrow 半导体

无净电流



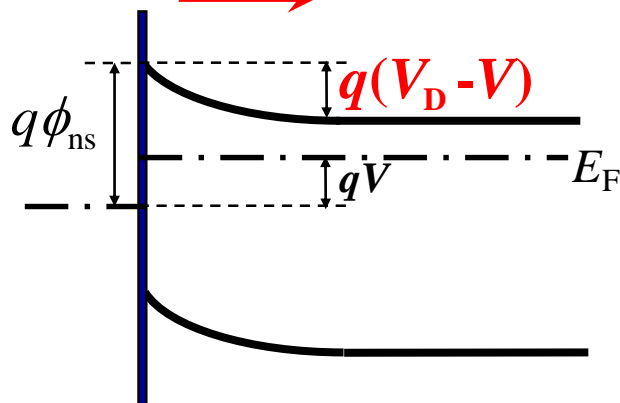
正偏 $V > 0$



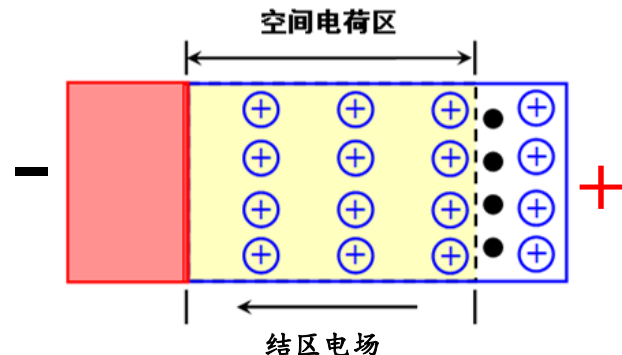
外加电场与内建电场方向相反
空间电荷减少，**势垒高度下降**
(金属表面势垒高度基本不变)

金属 \longleftarrow 半导体

I_F 正向电流



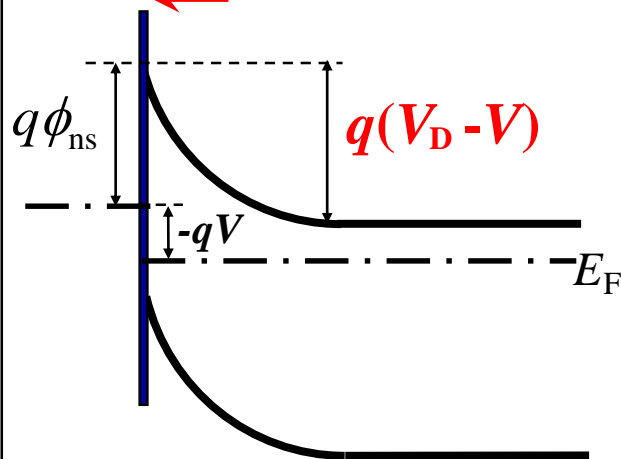
反偏 $V < 0$



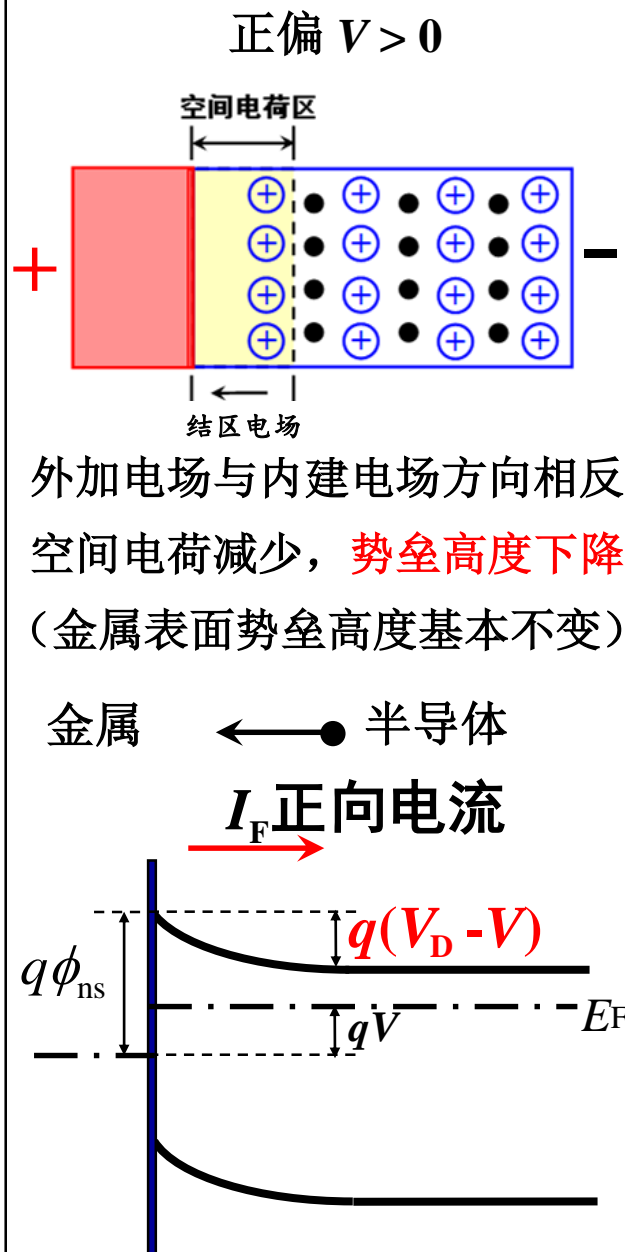
外加电场与内建电场方向相同
空间电荷增多，**势垒高度上升**
(金属表面势垒高度基本不变)

金属 \longrightarrow 半导体

I_R 反向电流

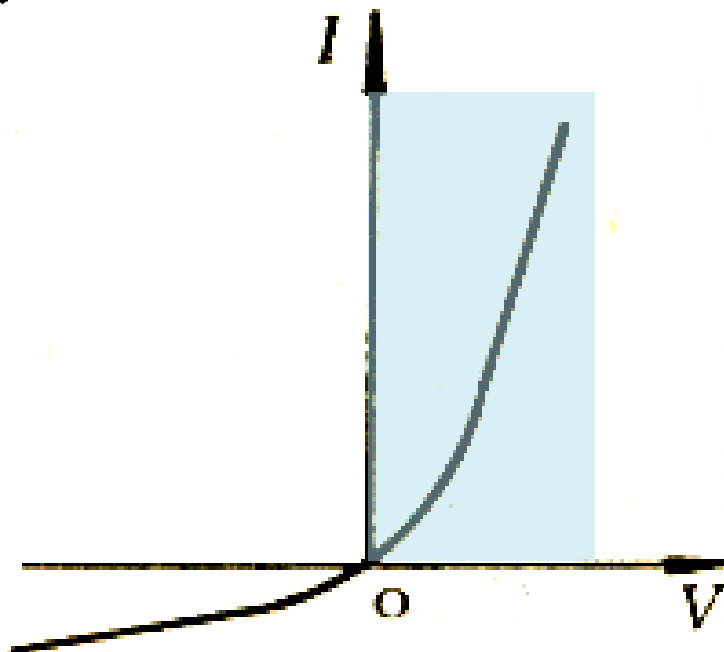


n型阻挡层 ($W_m > W_s$, $V_s < 0$)

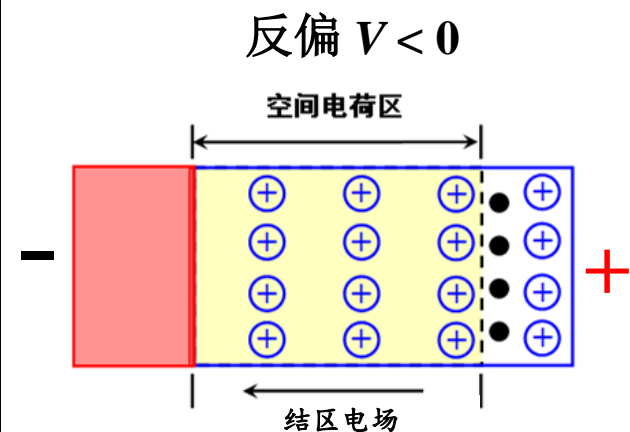


正偏时 (金属接正, 半导体接负)

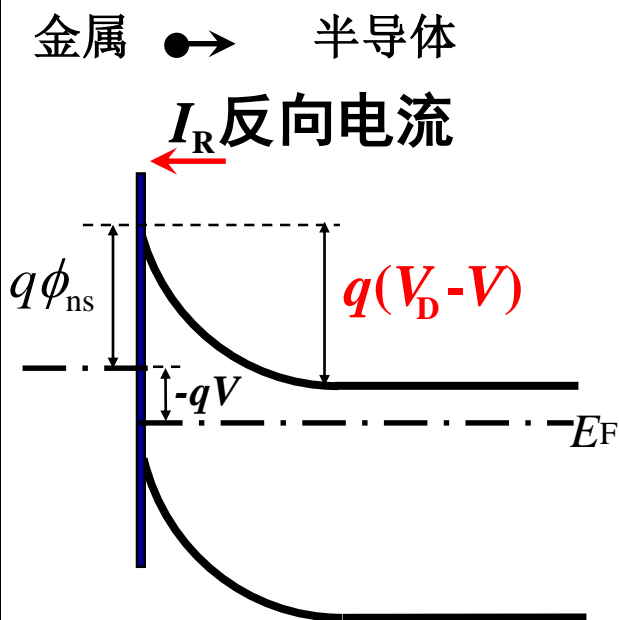
- 半导体势垒由 qV_D 降低为 $q[V_D - V]$, 破坏了原来的平衡, 半导体到金属的电子流占优势 (多子)
- 形成**从金属到半导体的正向电流 (多子电流)**
- 外加电压 V 越大, 势垒高度降低越多, 正向电流越大



n型阻挡层 ($W_m > W_s, V_s < 0$)

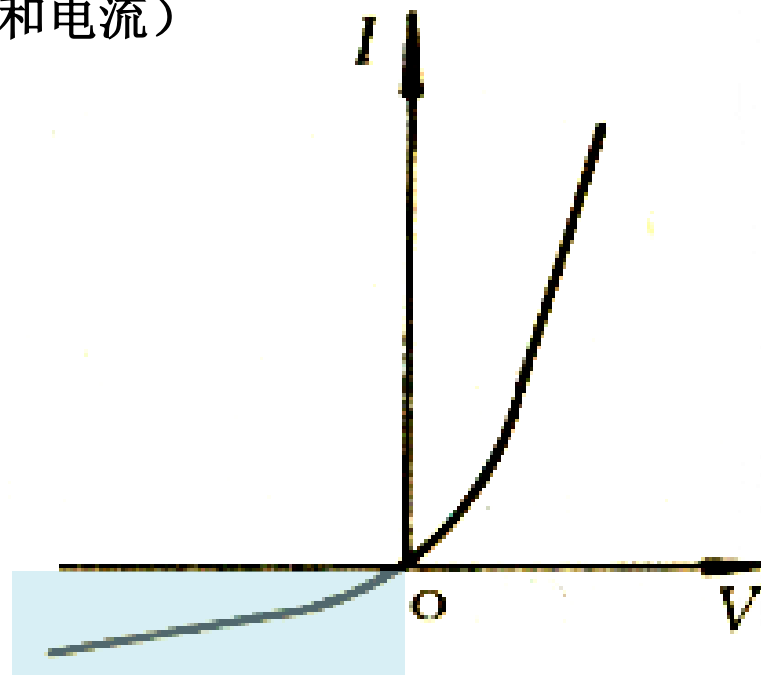


外加电场与内建电场方向相同
空间电荷增多, **势垒高度上升**
(金属表面势垒高度基本不变)



反偏时 (金属接负, 半导体接正)

- 半导体势垒由 qV_D 升高为 $q[V_D - V]$, 破坏了原来的平衡, 使得金属到半导体的电子流占优, 形成从半导体到金属的反向电流
- 金属中的电子要越过相当高的势垒 $q\phi_{ns}$ 才能到达半导体中, 因此反向饱和电流的数值很小
- 金属势垒高度基本不随外加电压改变 (反向饱和电流)



p型阻挡层 ($W_m < W_s$, $V_s > 0$)

可作类似讨论

NOTE:

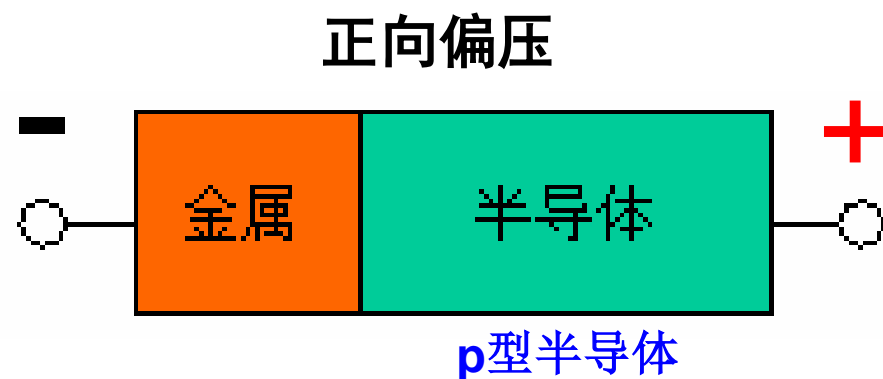
由于 $V_s > 0$ ，正向电压、反向电压极性与n型阻挡层时相反

即：p型阻挡层

金属接负，半导体接正

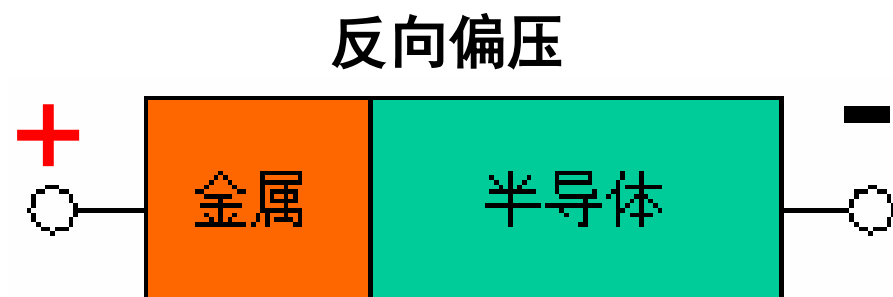
从半导体到金属的空穴流占优

形成从半导体到金属的正向电流



金属接正，半导体接负

金属到半导体的反向电流



◆ p-n结：正向永远是p正、n负，正向电流方向从p区流向n区

◆ 金半接触阻挡层：正向电流均是半导体的多子向金属流动所形成的电流

因此其正向电流的方向要看阻挡层的类型（即半导体的类型）

利用金属-半导体整流接触特性制成的二极管，称为肖特级势垒二极管
(Schottky Barrier Diode, SBD)

肖特级势垒二极管与p-n结二极管的比较

- ① SBD是多子器件，相对于少子器件而言，无论正偏或反偏时其载流子都不发生明显积累（扩散电容很小），因此具有良好的开关特性，更适于用于高频领域。
- ② 相同势垒高度下，SBD的反向饱和电流密度 $-J_{sD}$ （或 $-J_{sT}$ ）比p-n结的 $-J_s$ 大得多，那么正向电流的特性也有所不同，SBD具有较低的正向导通电压（0.3V左右）。

6.3 少数载流子的注入和欧姆接触（自学）

1. 少数载流子的注入（n型阻挡层）

少子对电流的贡献？？？

Schottky扩散理论中，
界面处的载流子浓度分别为：

$$n(0) = n_0 \exp\left(-\frac{qV_D}{k_0T}\right) \quad \text{该浓度差导致电子由体内向表面扩散}$$

平衡时，浓度差被势垒中的电场抵消，扩散=漂移

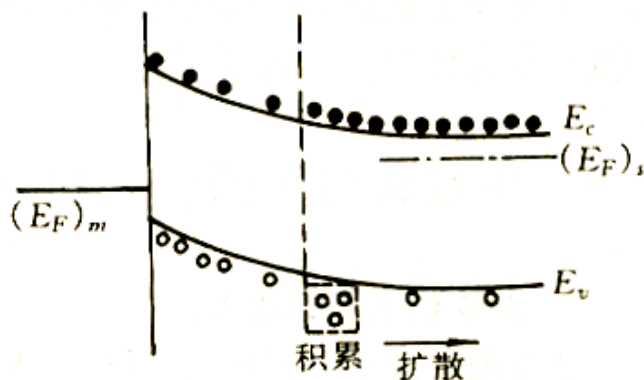
正偏时，势垒降低，电场作用减弱，扩散作用占优，形成正向电流

★ 电子的阻挡层是空穴的积累层！

$$p(0) = p_0 \exp\left(\frac{qV_D}{k_0T}\right) \quad \text{该浓度差导致空穴由表面向体内扩散}$$

部分正向电流是由少数载流子空穴提供的！

金属与n型半导体的整流接触在正向偏压下，有空穴从金属流向半导体——少子注入，产生一定积累，向内部扩散、复合而消失



这里所指的“空穴从金属流向半导体内”，实际上是半导体价带顶附近的电子流向金属！！

- ◆ 在少子的注入与测量试验中，希望得到高的注入效率，常采用探针接触。（点接触面积的半径小，少子注入和扩散效果强）
- ◆ 探针法测量半导体电阻率时，应避免金属探针注入少子的影响，故采用一些增加表面复合的措施。

2. 欧姆接触 (如何制作欧姆电极?)

欧姆接触: 接触电阻很小, 当有电流流过时, 其电压降远小于器件本身的压降, 因此不影响器件本身的电流-电压特性, 此时的金属接触具有**线性的**和**对称的**电流-电压关系。(欧姆电极)

$W_m < W_s$: 金属和n型半导体接触形成反阻挡层
 $W_m > W_s$: 金属和p型半导体接触形成反阻挡层 } 欧姆接触

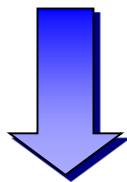
高表面态密度 无论n型p型都易形成势垒 与金属功函数关系不大 通常无法用选择金属的方法来获得欧姆接触



采用重掺杂

利用隧道效应

如何解决?



隧道电流占主导地位, 接触电阻总是很小 (阻挡层作用消失)

在半导体表面制作一层重掺杂区后再与金属接触, 可以获得理想的欧姆接触!