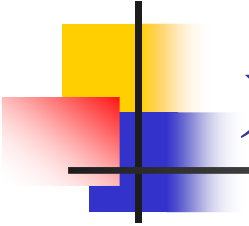


金属半导体和半导体异质结

西安电子科技大学 XIDIDIAN UNIVERSITY

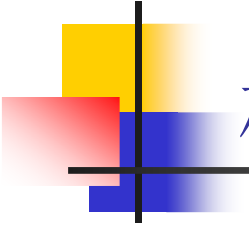
V1.0 © 2007 韩孝勇 Han XiaoYong

xyhan5151@yahoo.com.cn www.dianzichan.com



本次课内容

- 9. 1肖特基势垒二极管
- 9. 2金属. 半导体的欧姆接触
- 9. 3异质结
- 9. 4小结



概念：同质结、异质结、金半结、欧姆接触

- 同质结：同材料**PN**结
- 异质结：不同材料**PN**结
- 金半结：金属与半导体接触（肖特基势垒二极管）
- 欧姆接触：没有整流效应的接触

9.1 肖特基势垒二极管

- 点接触二极管:金属与半导体点接触（可靠性差）

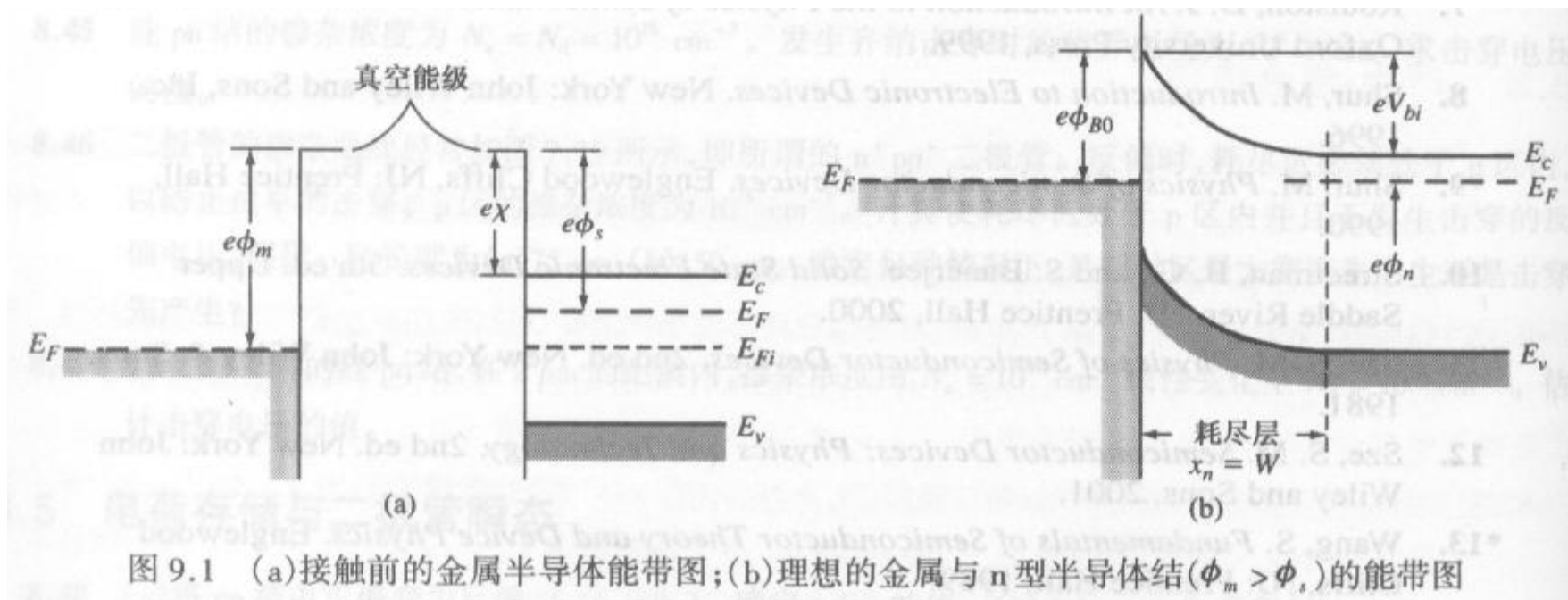


图 9.1 (a)接触前的金属半导体能带图;(b)理想的金属与 n 型半导体结($\phi_m > \phi_s$)的能带图

该势垒就是肖特基势垒,由下式给出:

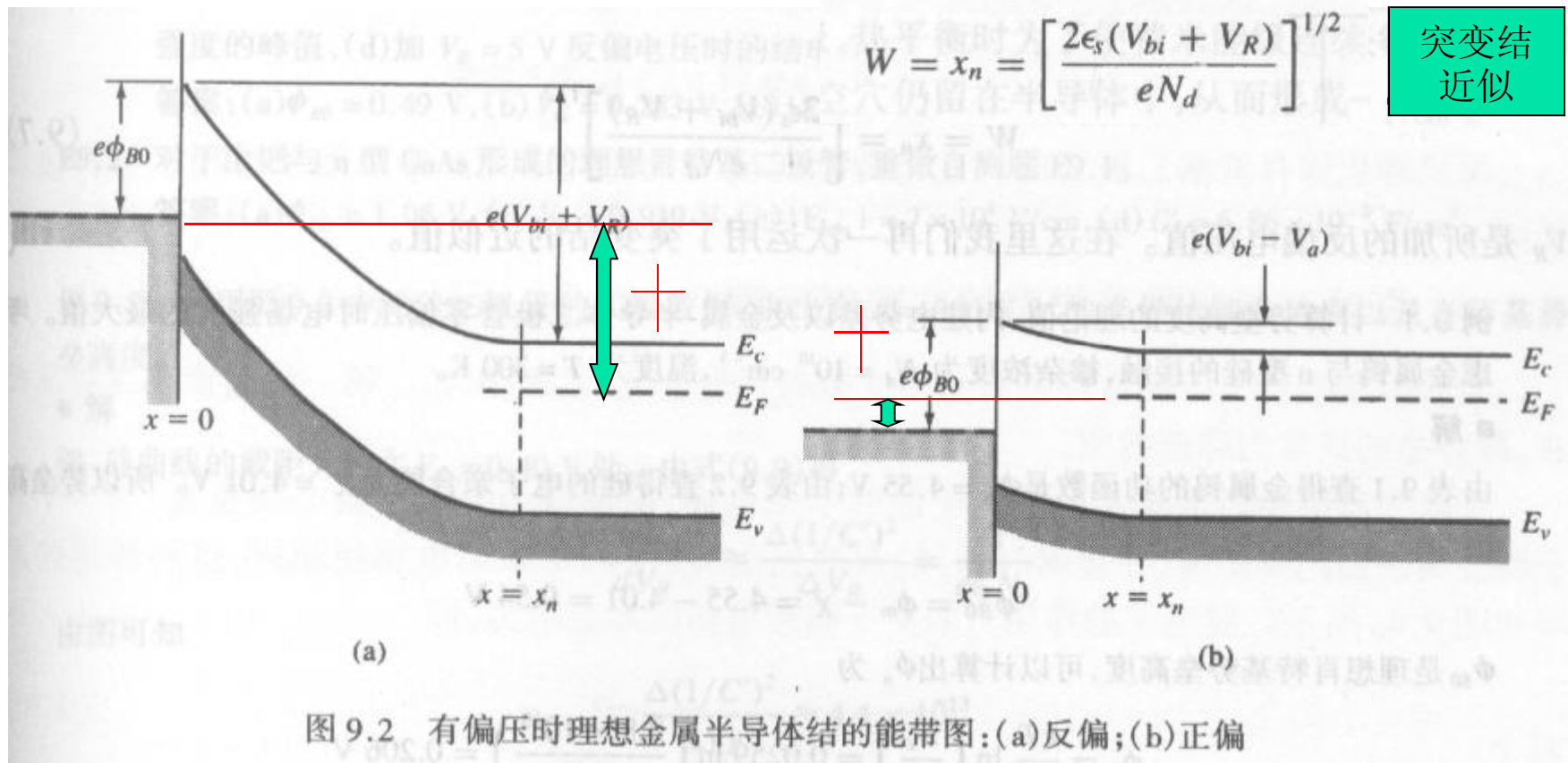
$$\phi_{B0} = (\phi_m - \chi)$$

内建电势差表示为

$$V_{bi} = \phi_{B0} - \phi_n$$

9.1 肖特基势垒二极管

正反偏



$$C' = eN_d \frac{dx_n}{dV_R} = \left[\frac{e\epsilon_s N_d}{2(V_{bi} + V_R)} \right]^{1/2}$$

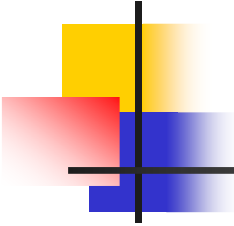
9.1 肖特基势垒二极管

表 9.1 几种金属元素的功函数

元素	功函数, ϕ_m
Ag, 银	4.26
Al, 铝	4.28
Au, 金	5.1
Cr, 铬	4.5
Mo, 钼	4.6
Ni, 镍	5.15
Pd, 钯	5.12
Pt, 铂	5.65
Ti, 钛	4.33
W, 钨	4.55

表 9.2 一些半导体的电子亲和能

元素	电子亲和能, χ
Ge, 锗	4.13
Si, 硅	4.01
GaAs, 砷化镓	4.07
AlAs, 砷化铝	3.5



9.1 肖特基势垒二极管

非理想因素

1. 肖特基效应：势垒的镜像力降低
2. 界面态的影响

9.1 肖特基势垒二极管

非理想因素

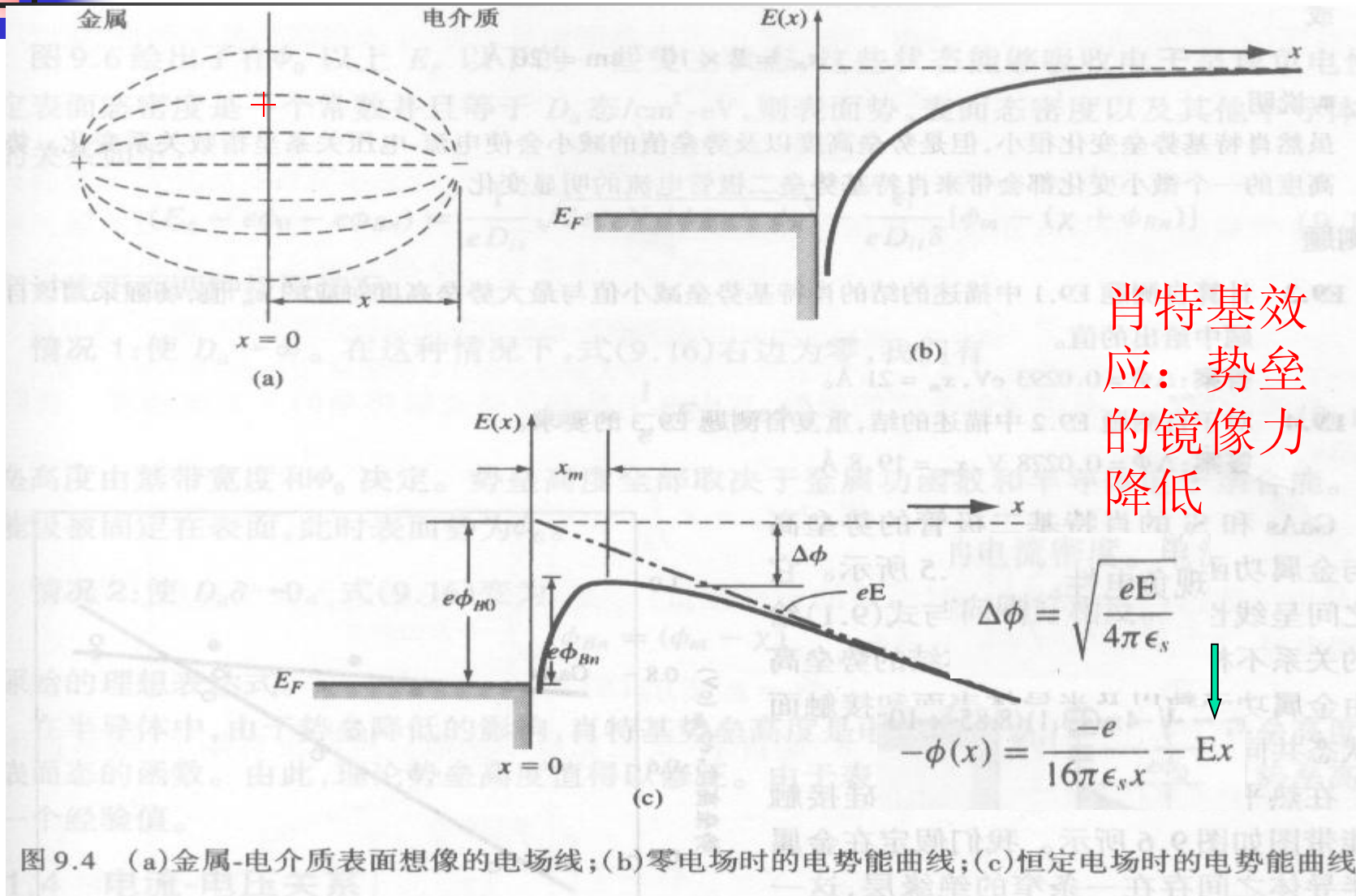


图 9.4 (a)金属-电介质表面想像的电场线;(b)零电场时的电势能曲线;(c)恒定电场时的电势能曲线

9.1 肖特基势垒二极管

非理想因素

■ 与理想不符

出：的方法求得
$$\phi_{B0} = (\phi_m - \chi)$$

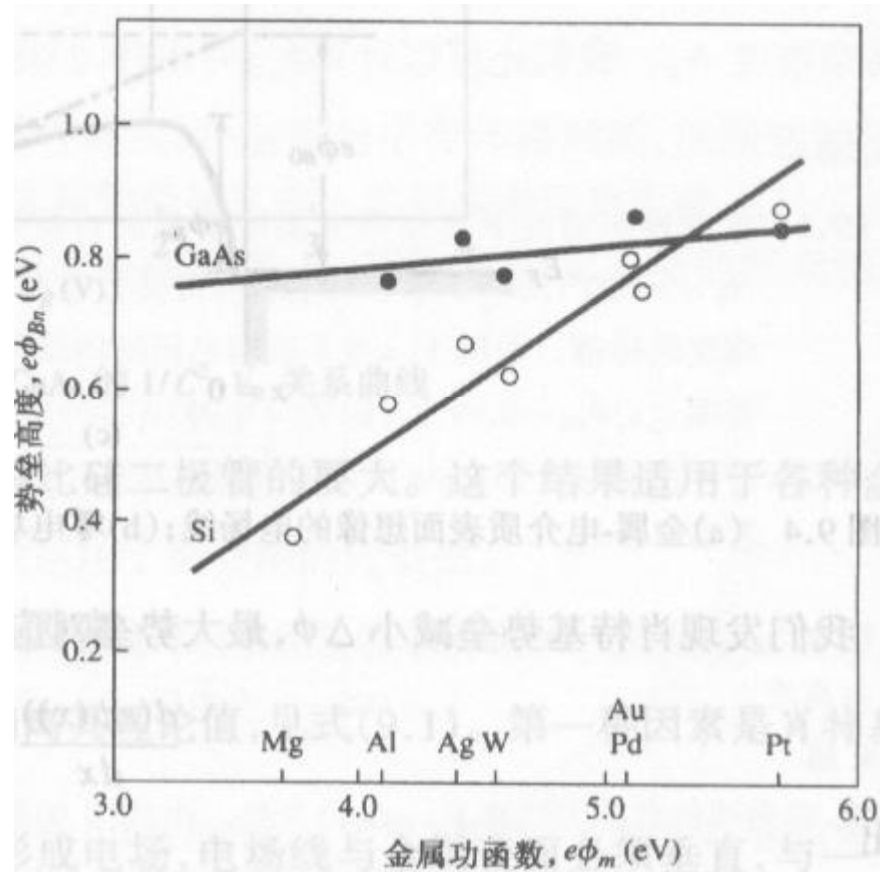
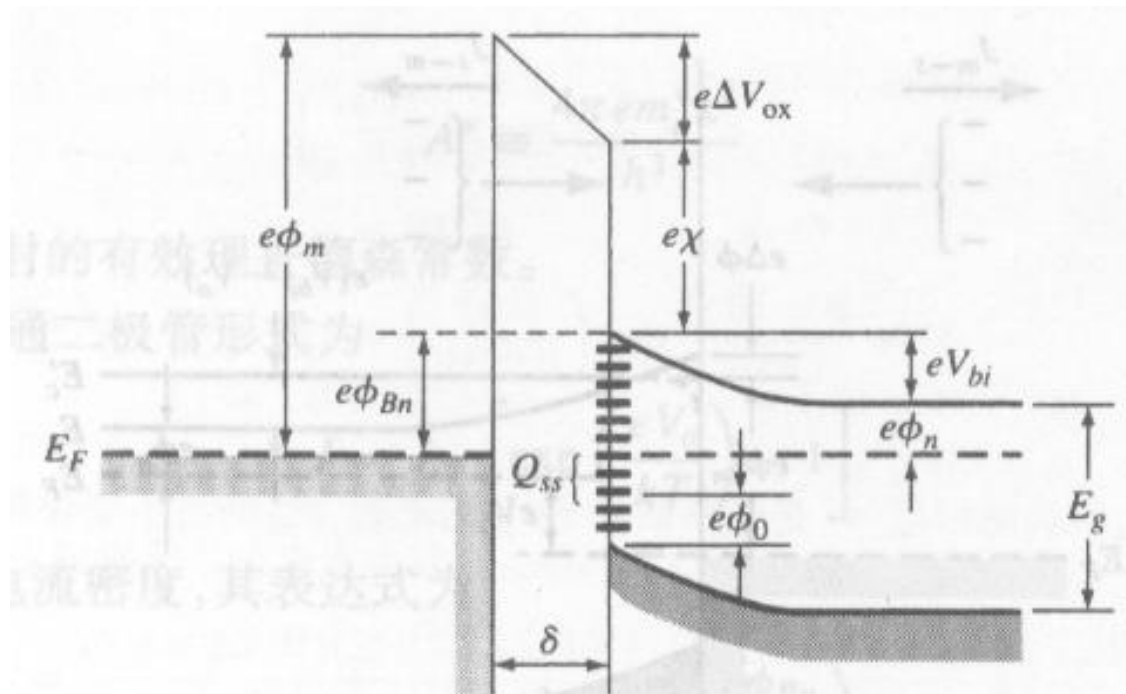


图 9.5 GaAs 和 Si 的肖特基二极管的势垒高度与金属功函数之间的关系(实验值)

9.1 肖特基势垒二极管

非理想因素



界面态的
影响

图 9.6 金属-半导体结的能带图及表面态

9.1 肖特基势垒二极管

非理想因素

假定表面态密度是一个常数并且等于 D_{it} 态/cm²-eV, 则表面势、表面态密度以及其他半导体参数的关系如下:

$$(E_g - e\phi_0 - e\phi_{Bn}) = \frac{1}{eD_{it}} \sqrt{2e\epsilon_s N_d (\phi_{Bn} - \phi_n)} - \frac{\epsilon_i}{eD_{it}\delta} [\phi_m - (\chi + \phi_{Bn})] \quad (9.16)$$

我们讨论下面两种极限情况。

情况 1: 使 $D_{it} \rightarrow \infty$ 。在这种情况下, 式(9.16)右边为零, 我们有

$$\phi_{Bn} = \frac{1}{e} (E_g - e\phi_0) \quad (9.17)$$

势垒高度由禁带宽度和 ϕ_0 决定。势垒高度全部取决于金属功函数和半导体电子亲和能。费米能级被固定在表面, 此时表面势为 ϕ_0 。

情况 2: 使 $D_{it}\delta \rightarrow 0$ 。式(9.16)变为

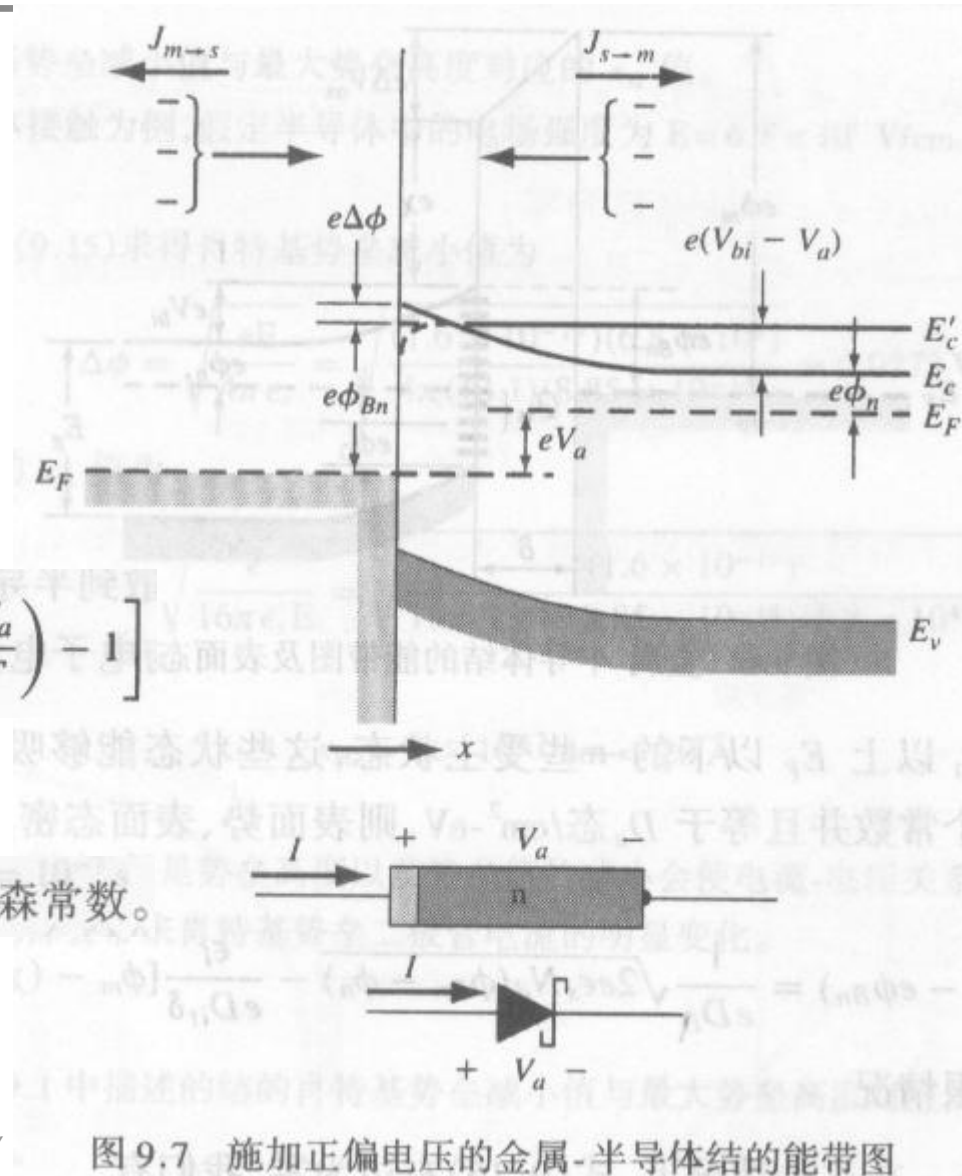
$$\phi_{Bn} = (\phi_m - \chi)$$

即原始的理想表达式。

在半导体中, 由于势垒降低的影响, 肖特基势垒高度是电场强度的函数。同时势垒高度也是表面态的函数。由此, 理论势垒高度值得以修正。由于表面态密度无法预知, 所以势垒高度是一个经验值。

9.1 肖特基势垒二极管

电流电压关系



$$J = J_{s \rightarrow m} - J_{m \rightarrow s}$$

$$J = \left[A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_{Bn}}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$A^* \equiv \frac{4\pi em_n^* k^2}{h^3}$$

参数 A^* 是热电子发射的有效理查德森常数。

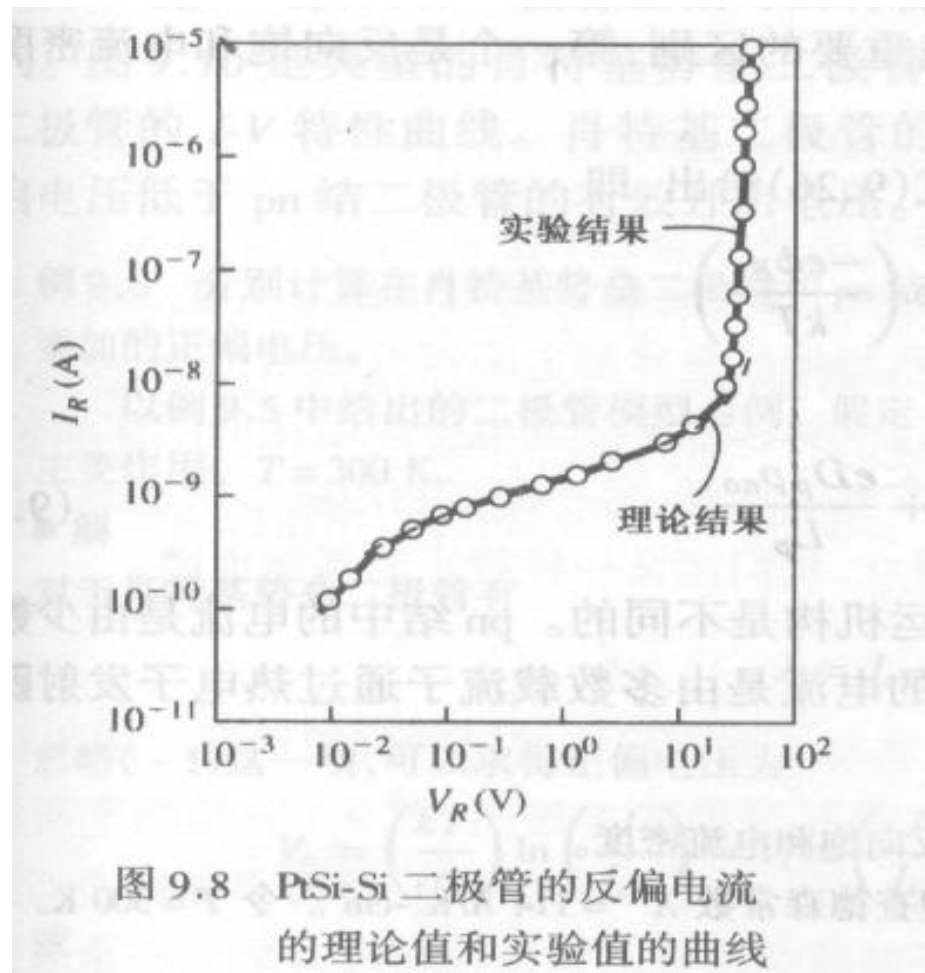
$$J = J_{sT} \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right]$$

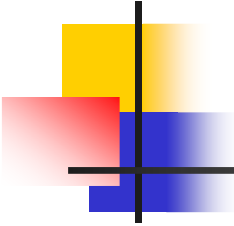
图 9.7 施加正偏电压的金属-半导体结的能带图

9.1 肖特基势垒二极管

电流电压关系

反向电流随反偏电压的增加而增加





9.1 肖特基势垒二极管 与PN结比较

- 区别 1：反向饱和电流的数量级
- 区别 2：开关特性（多子器件，频率高）

9.1 肖特基势垒二极管 与PN结比较

■ 区别 1 . 反向饱和电流的数量级

肖特基势垒二极管的反向饱和电流密度由式(9.26)给出,即

$$J_{sT} = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_{Bn}}{kT}\right)$$

而理想 pn 结的反向饱和电流密度表示如下:

$$J_s = \frac{eD_n n_{po}}{L_n} + \frac{eD_p p_{no}}{L_p} \quad (9.28)$$

两个公式的形式有很大区别,两种器件的电流输运机构是不同的。pn 结中的电流是由少数载流子的扩散运动决定的,而肖特基势垒二极管中的电流是由多数载流子通过热电子发射跃过内建电势差而形成的。

9.1 肖特基势垒二极管

与PN结比较

- 0.3V
- 0.7V

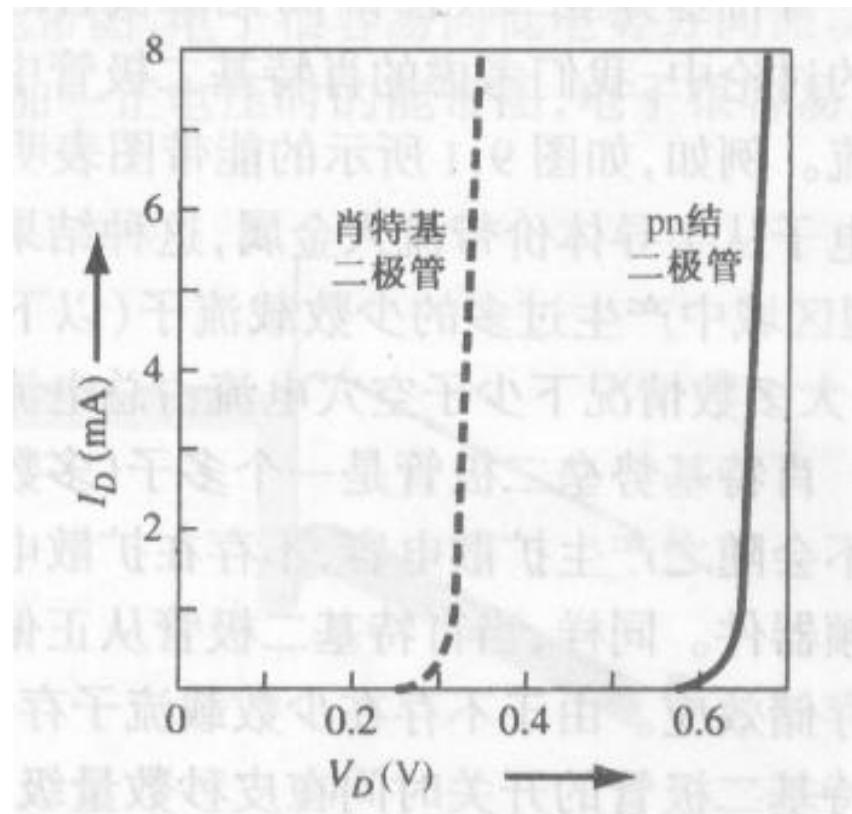
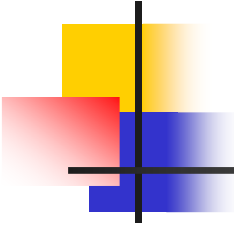


图 9.10 肖特基二极管和 pn 结二极管的正偏 I - V 特性曲线比较



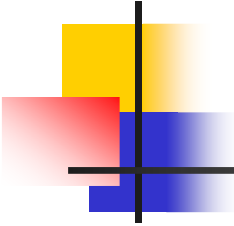
9.1 肖特基势垒二极管

与PN结比较

■ 区别 2 开关特性

肖特基势垒二极管和 pn 结二极管的第二个主要不同点在于频率响应,即开关特性。在我们的讨论中,我们考虑的肖特基二极管中的电流主要取决于多数载流子通过内建电势的发射电流。例如,如图 9.1 所示的能带图表明金属中的电子能够直接进入邻近半导体中的空位,如果电子从半导体价带流入金属,这种结果相当于空穴被注入到半导体中,这种空穴的注入会在 n 型区域中产生过多的少数载流子(以下有时简称为少子)空穴。然而,计算和测量的结果表明,大多数情况下少子空穴电流占总电流的比率相当小。

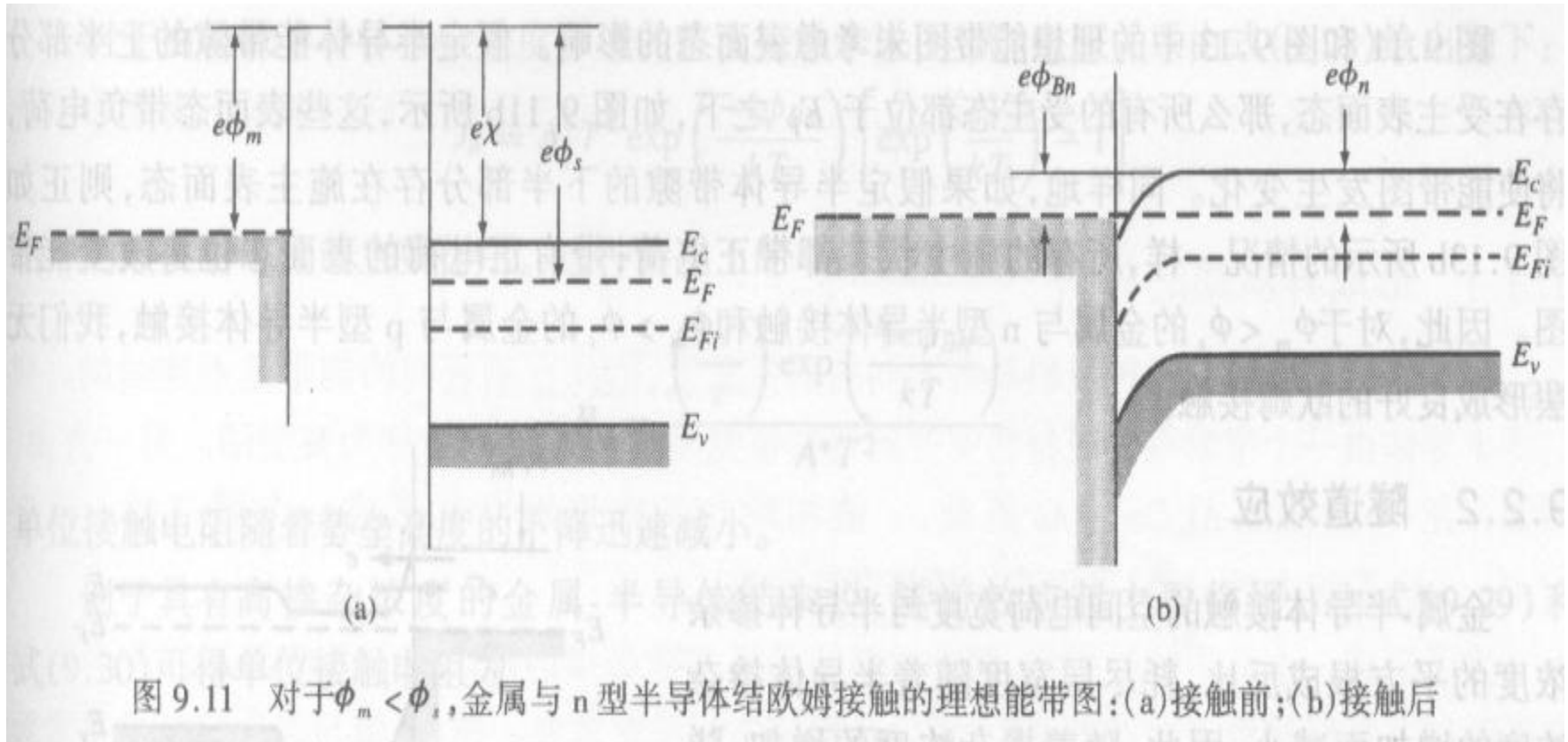
肖特基势垒二极管是一个多子(多数载流子)导电器件,这表明肖特基二极管加正偏电压时不会随之产生扩散电容,不存在扩散电容的肖特基二极管相对于 pn 结二极管来说,是一个高频器件。同样,当肖特基二极管从正偏转向反偏时,也不存在像 pn 结中发生的少数载流子的存储效应。由于不存在少数载流子存储时间,肖特基二极管可以用于快速开关器件。通常肖特基二极管的开关时间在皮秒数量级,而 pn 结的开关时间通常在纳秒数量级。



9.2 欧姆接触

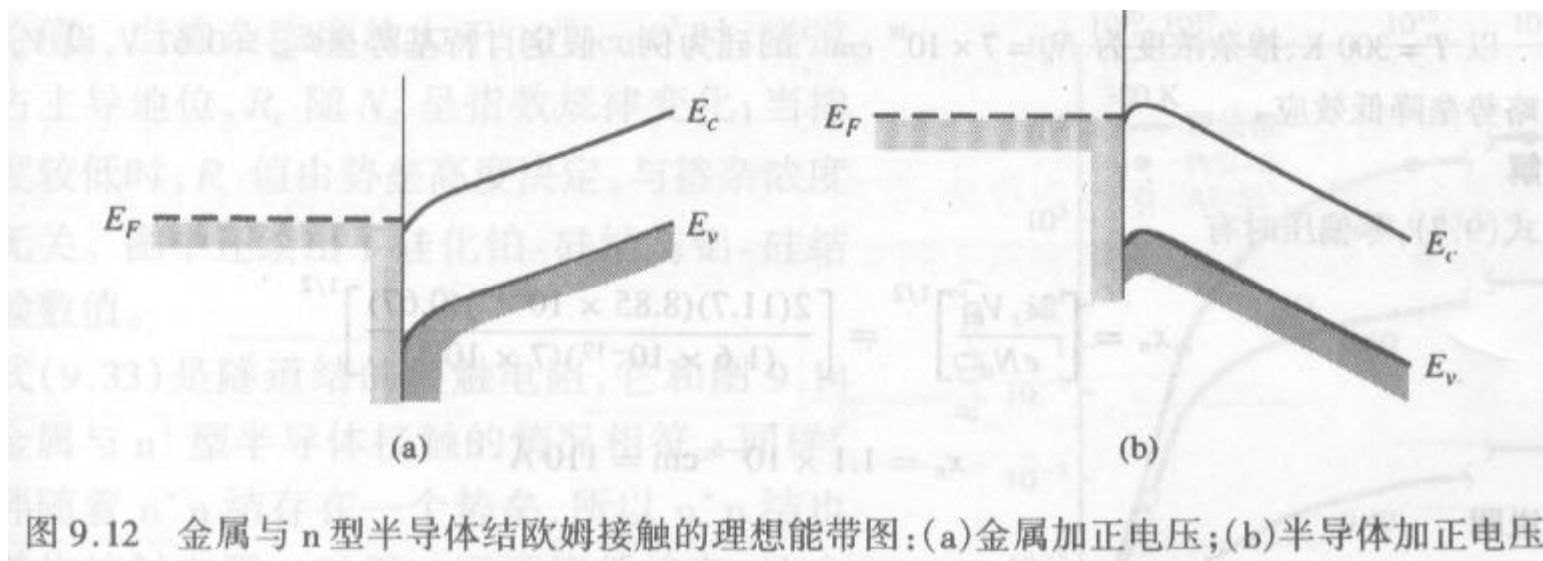
1. 使表面不产生势垒的接触
2. 隧道效应

9.2 欧姆接触

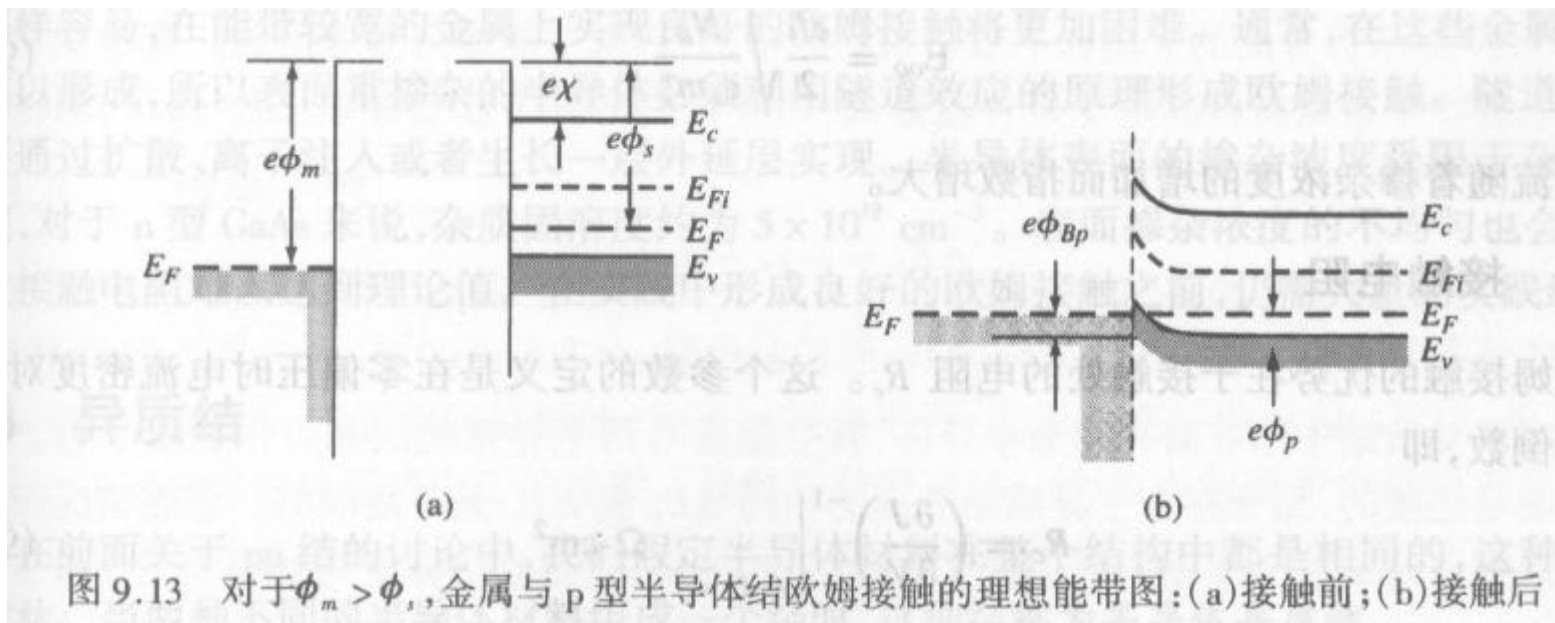


使N型半导体表面更N，不上坡，下坡

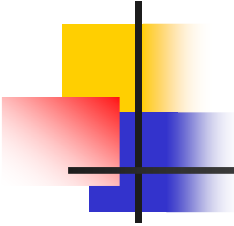
9.2 欧姆接触



9.2 欧姆接触



使p型半导体表面更p



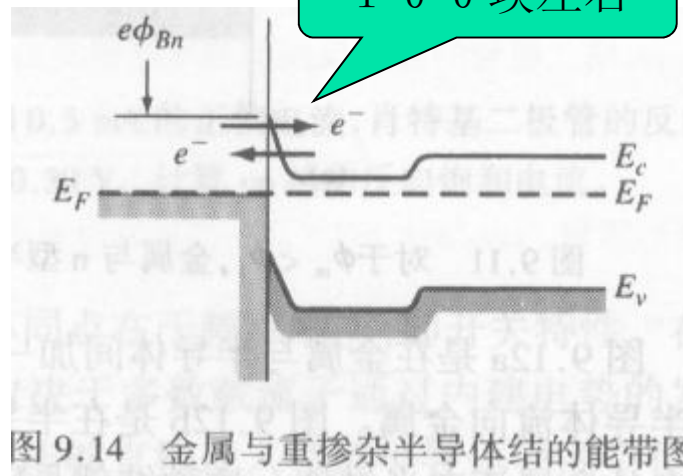
9.2 欧姆接触

- 前述没有考虑界面态的影响. 实际由于界面态的影响, 很难很好的形成欧姆接触.
- 上半部为受主态, 位于 E_F 下时带负电 (图 9.1 1 b)
- 下半部为施主态, 位于 E_F 上时带正电 (图 9.1 3b)

因此, 实际的欧姆接触采用隧道效应

9.2 欧姆接触

■ 隧道效应



隧道电流有如下形式：

$$J_t \propto \exp\left(\frac{-e\phi_{Bn}}{E_{oo}}\right)$$

其中，

$$E_{oo} = \frac{e\hbar}{2} \sqrt{\frac{N_d}{\epsilon_s m_n^*}}$$

隧道电流随着掺杂浓度的增加而指数增大。

9.2 欧姆接触

- 接触电阻值
- 掺杂越高电阻越低

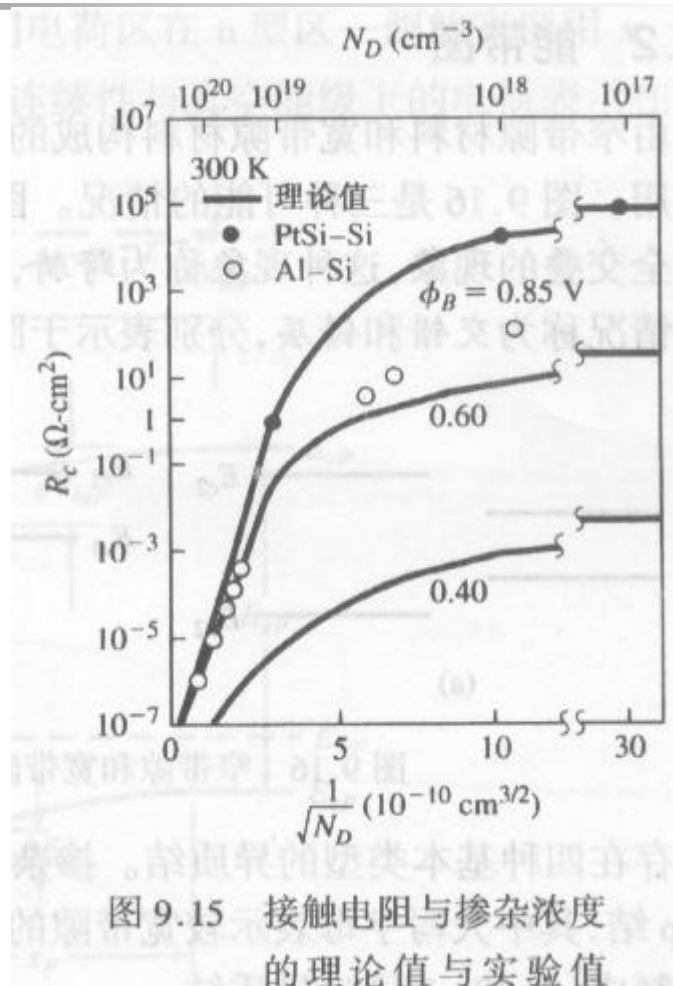
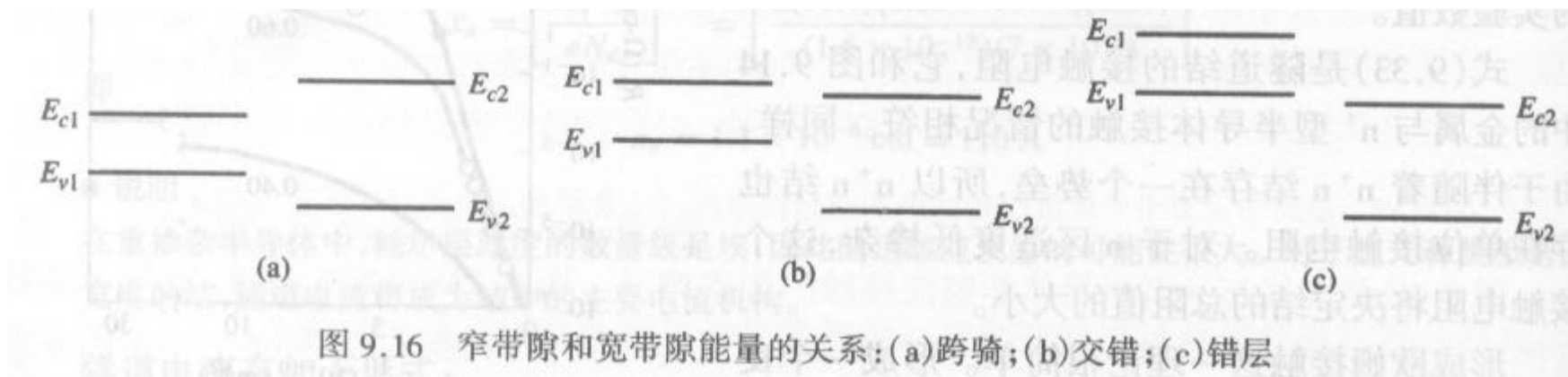


图 9.15 接触电阻与掺杂浓度的理论值与实验值

9.3 异质结

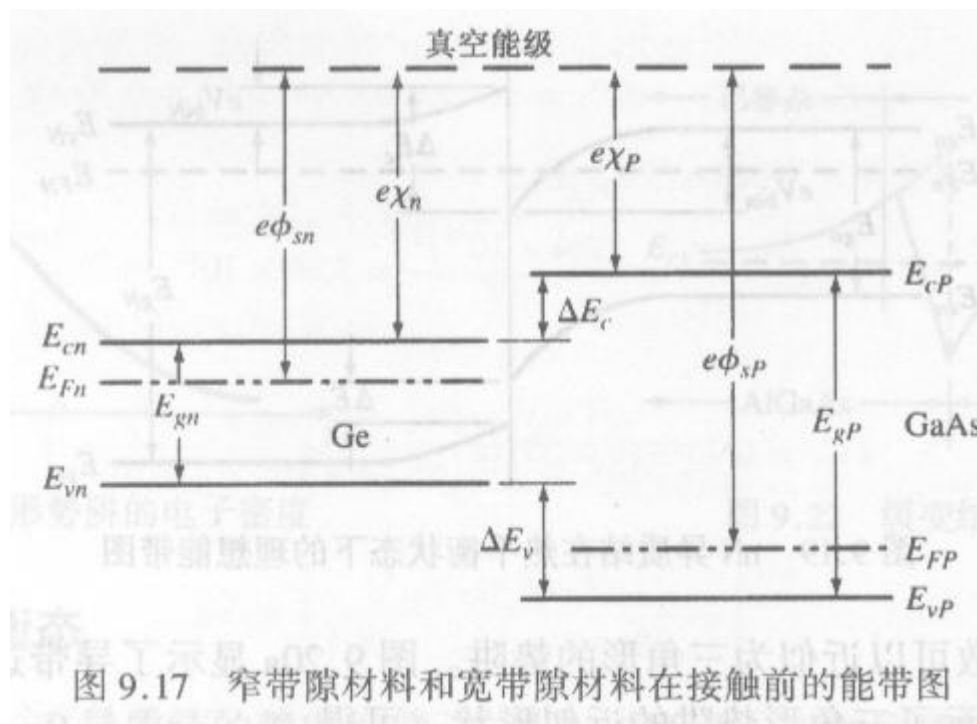
■ 能带图



存在四种基本类型的异质结。掺杂类型变化的结称为反型异质结。我们可以制成 nP 结或 Np 结,其中大写字母表示较宽带隙的材料。具有相同掺杂类型的异质结称为同型异质结,可以制成 nN 和 pP 同型异质结。

9.3 异质结

■ 接触前



9.3 异质结

■ 接触后

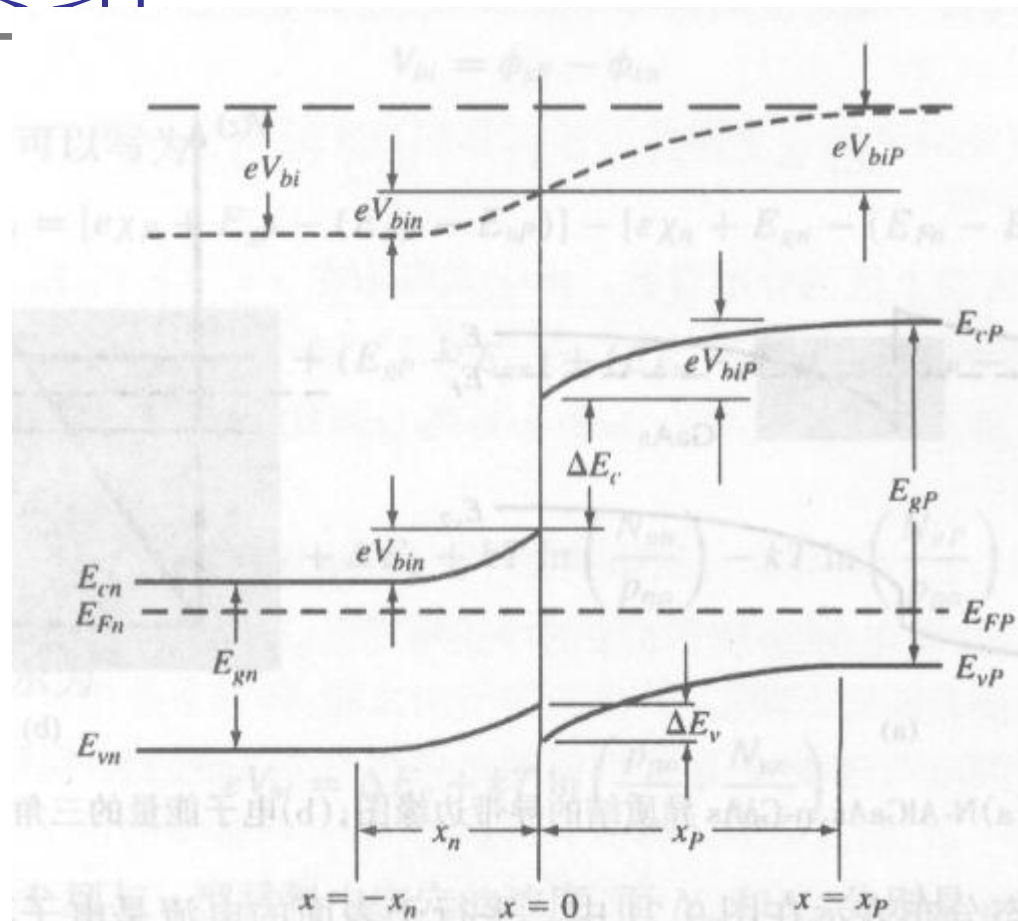


图 9.18 热平衡状态下的一个典型理想 nP 异质结

9.3 异质结

■ nN 结热平衡时理想能带图（三角势阱）

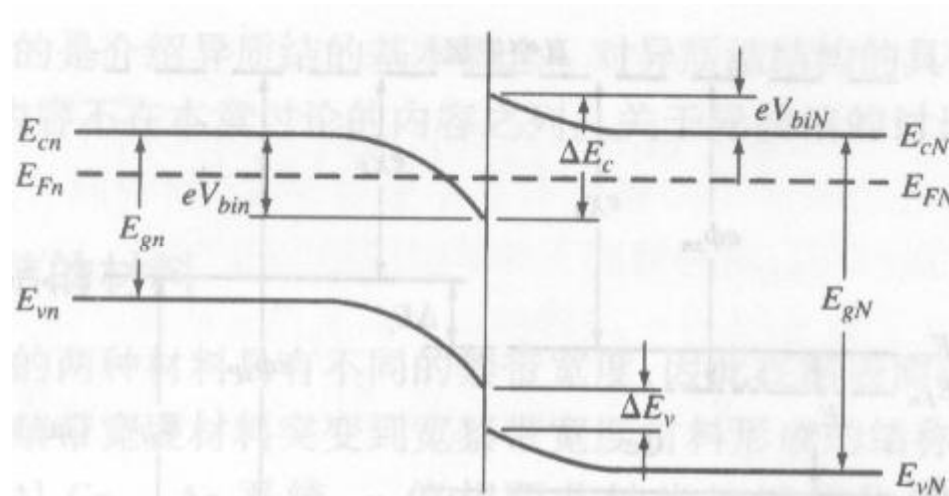


图 9.19 nN 异质结在热平衡状态下的理想能带图

二维电子气：电子堆积在异质结表面的势阱中，
但可以沿其他两个方向自由流动

9.3 异质结

■ 三角形势阱

低掺杂
散射小

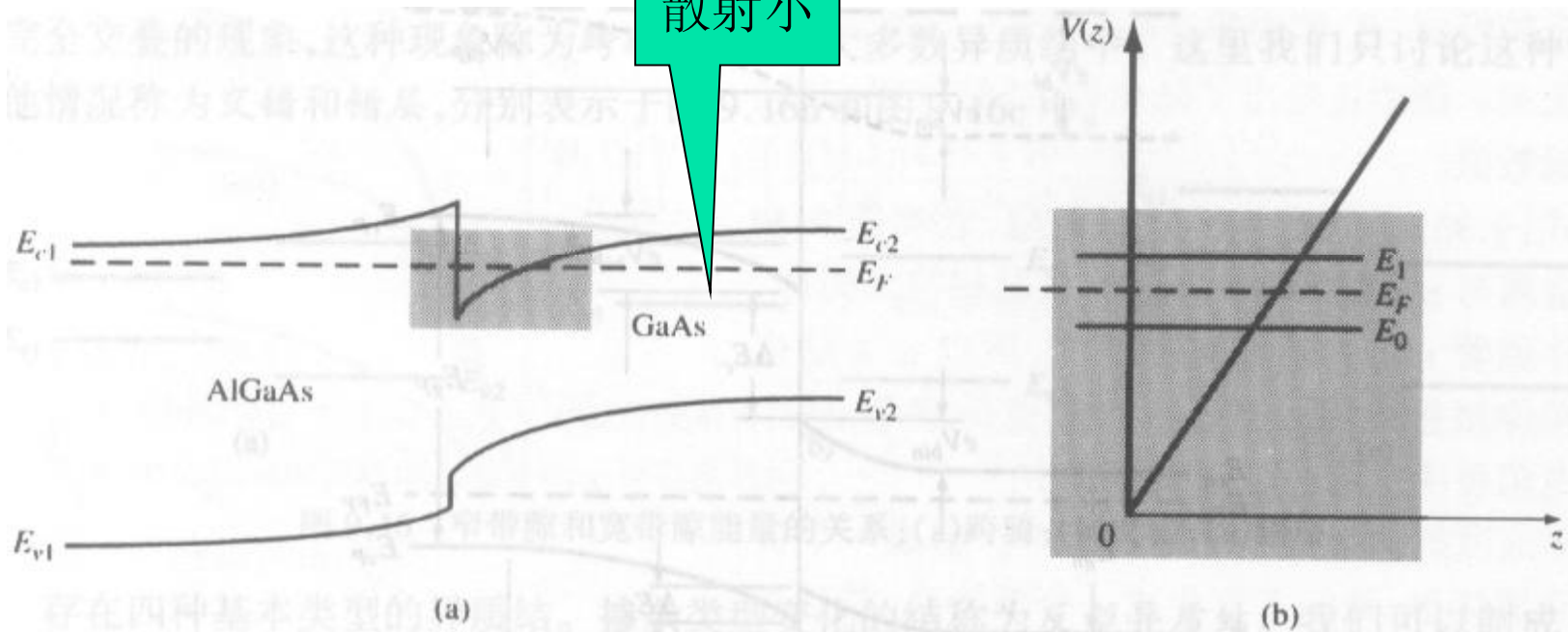


图 9.20 (a) N-AlGaAs, n-GaAs 异质结的导带边缘图; (b) 电子能量的三角形势阱

9.3 异质结

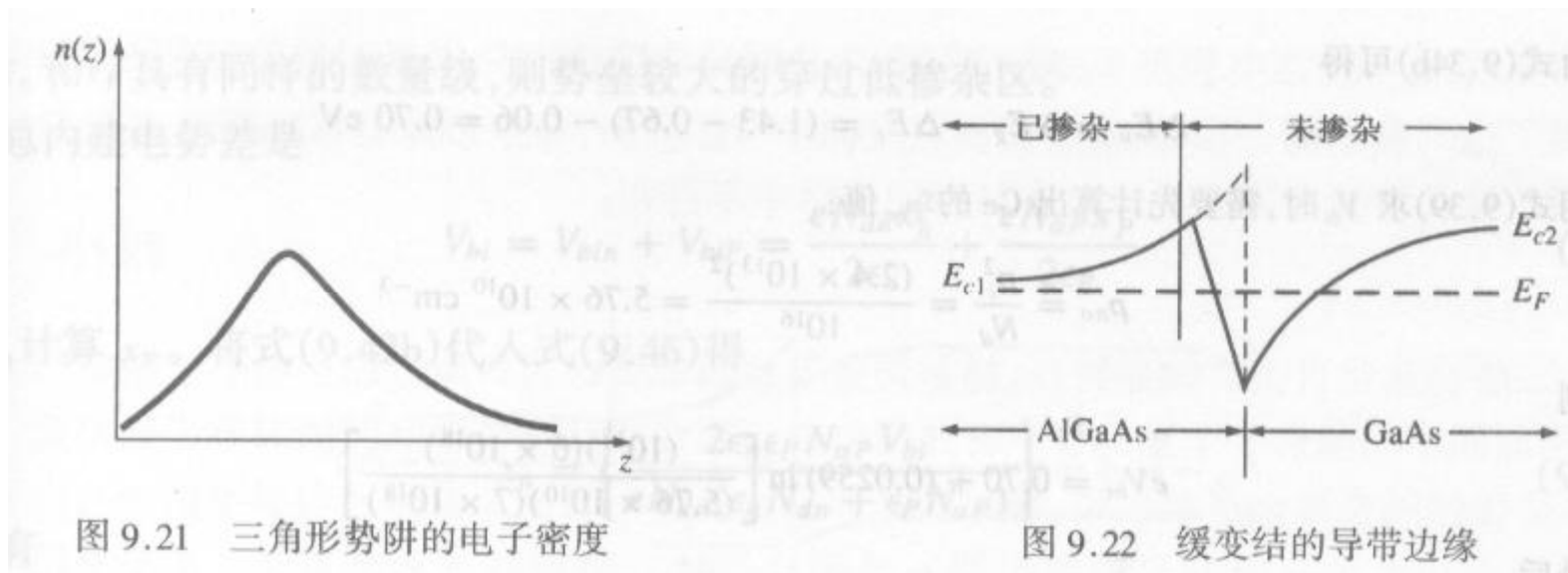


图 9.21 三角形势阱的电子密度

图 9.22 缓变结的导带边缘

9.3 异质结

■ IV特性 类似整流接触

$$J = A^* T^2 \exp\left(\frac{-E_w}{kT}\right)$$

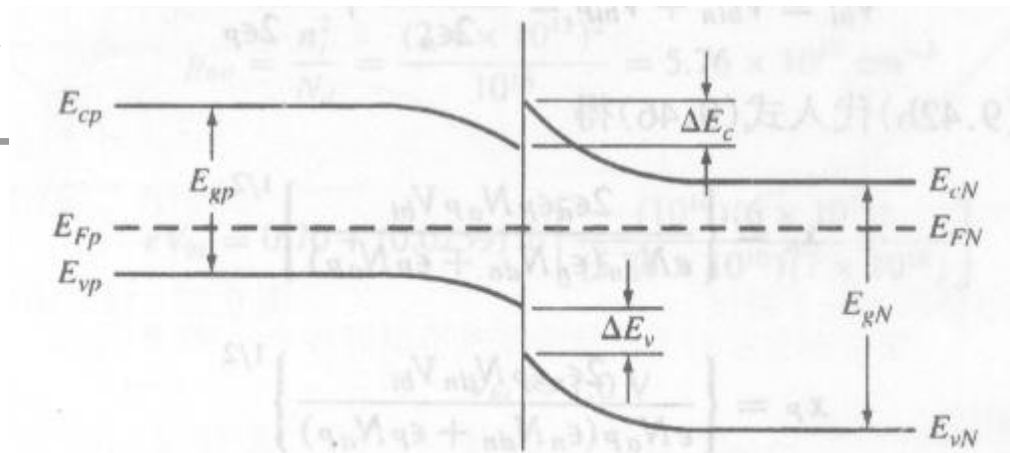


图 9.23 Np 异质结在热平衡时的能带图

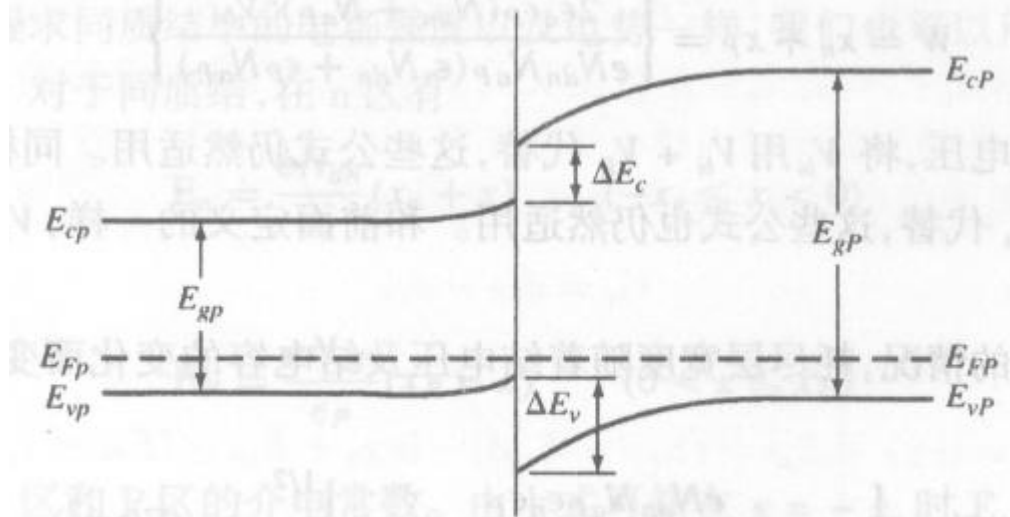
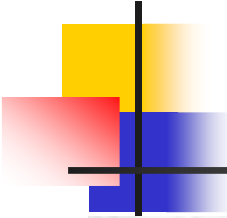


图 9.24 pP 异质结在热平衡时的能带图

小结

- 轻掺杂半导体上的金属可以与半导体形成整流接触,这种接触称为肖特基势垒二极管。金属与半导体间的理想势垒高度会因金属功函数和半导体电子亲和能的不同而不同。
- 当在 n 型半导体与金属之间加一个正电压时(即反偏),半导体与金属之间的势垒增加,因此基本上没有载流子的流动。当在金属与 n 型半导体之间加一个正电压时(即正偏),半导体与金属之间的势垒降低,因此电子很容易从半导体流向金属,这种现象称为热电子发射。
- 肖特基势垒二极管的理想 I - V 关系与 pn 结二极管的相同。然而,电流值的数量级与 pn 结二极管的不同,肖特基二极管的开关速度要更快一些。另外,肖特基二极管的反向饱和电流比 pn 结的大,所以在达到与 pn 结二极管一样的电流时,肖特基二极管需要的正偏电压要低。
- 金属-半导体结也能形成欧姆接触,这种接触的接触电阻很低,使得结两边导通时结上的压降很小。
- 两种不同能带隙的半导体材料可以形成半导体异质结。异质结一个有用的特性就是能在表面形成势阱。在与表面垂直的方向上,电子的活动会受到势阱的限制,但电子在其他两个方向上可以自由地流动。



重要术语解释

反型异质结:掺杂剂在冶金结处变化的异质结。

电子亲合规则:这个规则是指,在一个理想的异质结中,导带处的不连续性是由于两种半导体材料的电子亲合能不同引起的。

异质结:两种不同的半导体材料接触形成的结。

镜像力降低效应:由于电场引起的金属-半导体接触处势垒峰值降低的现象。

同型异质结:掺杂剂在冶金结处不变的异质结。

欧姆接触:金属半导体接触电阻很低,且在结两边都能形成电流的接触。

理查德森常数:肖特基二极管的 $I-V$ 关系中的一个参数 A^* 。

肖特基势垒高度:金属-半导体结中从金属到半导体的势垒 ϕ_{Bn} 。

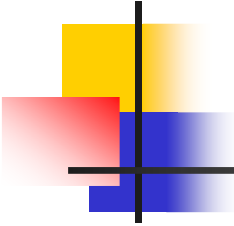
肖特基效应:镜像力降低效应的另一种形式。

单位接触电阻:金属半导体接触的 $J-V$ 曲线在 $V=0$ 时的斜率的倒数。

热电子发射效应:载流子具有足够的热能时,电荷流过势垒的过程。

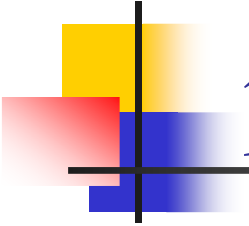
隧道势垒:一个薄势垒,在薄势垒中,起主要作用的电流是隧道电流。

二维电子气(2-DEG):电子堆积在异质结表面的势阱中,但可以沿着其他两个方向自由流动。



知识点

- 能大致画出肖特基势垒二极管在零偏、反偏以及正偏时的能带图。
- 描述肖特基势垒二极管正偏时的电荷流动情况。
- 解释肖特基势垒降低现象以及这种现象对肖特基势垒二极管反向饱和电流的影响。
- 解释表面态对肖特基势垒二极管的影响。
- 说出肖特基势垒二极管反向饱和电流比 pn 结二极管反向饱和电流大的一个应用。
- 解释欧姆接触。
- 绘出 nN 异质结的能带图。
- 解释二维电子气的含义。



复习题

1. 什么是理想肖特基势垒高度？在能带图上指出肖特基势垒高度。
2. 用能带图简要地说明肖特基势垒降低的影响。
3. 肖特基势垒二极管正偏时的电荷流动情况是怎样的？
4. 比较肖特基势垒二极管与 pn 结二极管正偏时的 $I-V$ 特性。
5. 大致绘出金属-半导体结在 $\phi_m < \phi_s$ 时的能带图,并解释为什么这是一个欧姆接触？
6. 大致绘出隧道结的能带图,并解释为什么这是一个欧姆接触？
7. 什么是异质结？
8. 什么是二维电子气？



END
