

量子物理基础

第二章 PN 结

第三章 MOSFET

第四章 双极型晶体管

第五章 金半接触

肖特基接触

基本概念 同质/异质结：同种/不同材料形成的 PN 结。

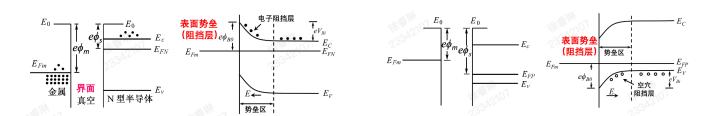
● 金半结 金属与半导体的接触。

定义 在半导体表面形成了表面势垒，也称为阻挡层。类似于 PN 结，具有单向导电性（整流作用）。这就是我们通常所说的肖特基接触。

特性 在界面处形成了反阻挡层，即高电导区。没有整流作用，电流可以双向自由流动。

命名 这就是我们通常所说的肖特基接触。

电子将从功函数小的地方跑到功函数大的地方，空穴则相反。



N 型肖特基接触 ($\phi_m > \phi_s$)

初始条件 $\phi_m > \phi_s \implies E_{Fm} - \phi_m < E_{FN}$

物理过程 电子自发从 N 型半导体流向金属。

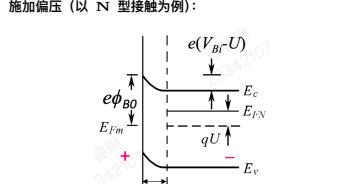
电荷分布 半导体侧失去电子带正电，形成耗尽层；金属带负电。

能带弯曲 表面 n_s 降低，由 $n = N_c \exp[-(E_c - E_F)/kT]$ 知 E_c 向上弯曲。

势垒形成 形成表面势垒 $e\phi_B0$ （阻挡层），阻碍电子进入金属。

平衡状态 热平衡建立，系统费米能级 E_F 处处拉平

施加偏压 (以 N 型接触为例):



正向偏压 (Metal +, Semi -)

势垒变化 外加电压 U 叠加在内建电势上，势垒降低为 $e(V_{Bi} - U)$

物理过程 电子易于越过势垒从半导体流向金属

电流特性 产生巨大的正向电流

N 型计算

费米势 $\phi_n = V_t \ln(\frac{N_d}{N_a})$

肖特基势垒 $e\phi_B0 = e\phi_m - \chi$

内建电势 $V_{bi} = \phi_m - \phi_s = \phi_B0 - \phi_p$

通用特性 (N 表示 N_d 或 N_a)

参数说明 ϕ_B0 一般题干直接给值，否则按上表计算。

耗尽层宽度 $W(x_n) = \left[\frac{2e(V_{bi} + V_R)}{eN} \right]^{1/2}$ (与单边突变一致)，其中 V_R 为外加反向偏压。

最大电场 $E_{max} = \frac{eN W}{\varepsilon}$

势垒电容 $C = A \frac{\varepsilon}{W} = A \left[\frac{e\varepsilon N}{2(V_{bi} + V_R)} \right]^{1/2}$

C - V 特性 $\frac{1}{C^2} = \frac{2}{e\varepsilon N A^2} (V_R + V_{bi})$ ，可由曲线斜率求 N ，截距求 V_{bi}

● 整流特性： 正偏时半导体侧势垒降低，电流大；反偏时势垒升高，电流极小。由于金属电子浓度极高，金属侧势垒 $q\phi_B$ 随偏压几乎不变。

非理想因素 从这里开始讨论非理想因素，即为什么实际势垒不完全等于 $\phi_m - \chi$ 。

● 肖特基效应 (镜像力降低):

势能修正 和大物一样，靠近金属的电荷会感应出镜像电荷，引入负电势能项 $-\frac{e}{16\pi\varepsilon_s x}$ ，与电场叠加。

势垒降低 $\Delta\phi = \sqrt{\frac{eE}{4\pi\varepsilon_s}}$

总势能最高 $x_m = \sqrt{\frac{e}{16\pi\varepsilon_s E}}$

电流-电压关系 • 热电子发射理论:

适用范围

描述肖特基接触电流传输的主流模型（适用于 Si, GaAs 等高迁移率半导体）。只有能量足够高 ($E > E_F + e\phi_Bn$) ($\phi_Bn = \phi_B0 - \Delta\phi$ ，是修正后的肖特基势垒）的“热电子”才能从半导体进入金属，电流的大小取决于单位时间内能够“跳过”势垒高度的电子数量。

核心假设

半导体 → 金属：电子需克服势垒 $e(V_{bi} - V_a)$ 。正偏时势垒降低，电流指数级增加。

$J_{s \rightarrow m} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_Bn}{kT}\right) \exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right)$

金属 → 半导体

电子需克服势垒 $e\phi_B0$ ，势垒固定，此分量视为常数（反向饱和电流）。

$J_{m \rightarrow s} = -A^* T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_Bn}{kT}\right)$

● 电流分量分析:

半导体 → 金属：电子需克服势垒 $e(V_{bi} - V_a)$ 。正偏时势垒降低，电流指数级增加。

$J_{s \rightarrow m} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_Bn}{kT}\right) \exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right)$

金属 → 半导体：电子需克服势垒 $e\phi_B0$ ，势垒固定，此分量视为常数（反向饱和电流）。

$J_{m \rightarrow s} = -A^* T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_Bn}{kT}\right)$

● 有效理查德森常数 A^* :

$$A^* = \frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3}$$

在理查德森常数中用有效质量 m^* 替代 m_0 ，反映了晶格势场对电子运动的影响。

表达式

物理意义

肖特基二极管方程：

总电流密度 $J = J_{s \rightarrow m} + J_{m \rightarrow s} = J_{ST} \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right]$

饱和电流密度 $J_{ST} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_Bn}{kT}\right)$

$= A^* T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_B0}{kT}\right) \exp\left(\frac{e\Delta\phi}{kT}\right)$

因此， $J_{ST} \propto \exp\left(\frac{e\Delta\phi}{kT}\right)$

肖特基二极管与 PN 结对比

从电流输出机制和数量级两个维度，对比了两种二极管的特性

肖特基二极管 (SBD)

载流子类型

多子器件

热电子发射理论

反向电流

J_{SBD} 较大，随电压增加而增加（非饱和）

导通电压

低（约 0.3 V）

开关速度

很快，无少子存储效应，仅受 RC 限制

应用

高频检测、高速开关、肖特基箝位

PN 结二极管

载流子类型

少子器件

电流机制

少子扩散理论

反向电流

J_{PN} 极小，具有良好的饱和特性

导通电压

高（约 0.7 V）

开关速度

较慢，存在电荷存储效应和反向恢复时间

应用

整流、稳压、一般逻辑电路

欧姆接触

由于界面态的存在，欧姆接触只是一个理想化模型。

● 反阻挡层：通常 Schottky 接触形成耗尽层起阻挡作用，而此处形成积累层，导电率极高，不仅阻挡电流反而比体内更容易导电，故称“反”阻挡层。

N 型 ($\phi_m < \phi_s$)

形成条件

$E_{Fm} < E_{FP}$

载流子输送

弯曲

表面

积累层 ($n_s \gg n_0$)

P 型 ($\phi_m > \phi_s$)

形成条件

$E_{Fm} > E_{FP}$

载流子输送

弯曲

表面

积累层 ($p_s \gg p_0$)

● 结论：只要接触使半导体表面的多数载流子浓度增加（形成积累层），就能实现欧姆接触。

● 施加偏压能带图：高电势一侧能带向下弯曲，低电势一侧能带向上弯曲。



给半导体一侧施加负电压 (N 沟道)

给半导体一侧施加正电压 (N 沟道)

问答题整理

孟庆巨版本教材：红色题干为作业、课件出现过的题目。

界面态对肖特基势垒高度 在大多数实用的肖特基势垒中，界面态在决定 ϕ_B 数值中处于支配地位，势垒高度基本上与两个功函数差以及半导体中的掺杂度无关。由于表面态密度无法预知，势垒高度通常为经验值。

加偏压时肖特基势垒能带 由于金属中电子浓度极高，空间电荷区极薄，电势连续性决定了加偏压时肖特基势垒能带图中图中 $q\phi_B$ 几乎不变的原 $q\phi_B$ 几乎不变。

因

肖特基势垒二极管与 PN 肖特基势垒二极管是多子器件。PN 结二极管是少子器件。主要区别：

(1) 少子载流子存储，存储时间可忽略，适合高频和快速开关；

(2) 多数载流子电流远高于少数载流子，饱和电流远高于同面积 PN 结二极管；

(3) 对同样电流，肖特基势垒上的正向电压降远低于 PN 结，适合箝位和限幅应用；

(4) 多子载流子起伏小，噪声小；

(5) 温度特性好。

金属与重掺杂半导体接触 若半导体为重掺杂（如 10^{19} cm^{-3} 或更高），空间电荷层宽度极薄，载流子可隧道穿透而非常过势垒。两侧电子均可隧穿，正反向偏压下 $I-V$ 曲线基本对称，表现为非整流、低电阻的欧姆接触。

第四次作业相关：

在理想情况下，金属和半前面有导体之间形成非整流接触

势垒的条件是什么？

画出 n 型欧姆接触时，零这三个图前面都有偏、正偏、反偏条件下的能带图

根据给出的金属与半导体，原则就是让金属的费米能级不变，然后让半导体的费米能级和金属对齐，画出弯曲的能带图即画出形成金半接触后的能带图

在理想情况下，金属和半前面有导体之间形成非整流接触