

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

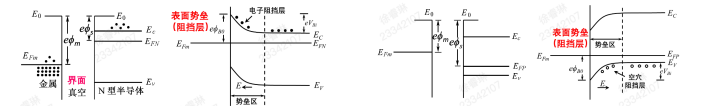
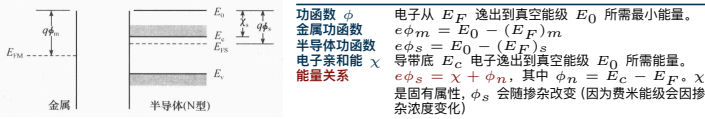
基本概念

- 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。
- 整流接触：

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。

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 $\phi_m > \phi_s \implies E_{FM} < E_{FN}$
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**;
金属侧带负电
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 抵消内建电势,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 $\phi_n = V_t \ln(\frac{N_c}{N_d})$
肖特基势垒 $e\phi_{B0} = e\phi_m - \chi$
内建电势 $V_{bi} = \phi_m - \phi_s = \phi_{B0} - \phi_n$

通用特性 (N 代表 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 $W(x_n) = \left[\frac{2\epsilon(V_{bi} + V_R)}{eN} \right]^{1/2}$ (与单边突变结一致),其中 V_R 为外加反向偏压。

最大电场 $E_{max} = \frac{eNW}{\epsilon}$

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

$C - V$ 特性 $\frac{1}{C^2} = \frac{2}{e\epsilon NA^2} (V_R + V_{bi})$,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 $-\frac{e}{16\pi\epsilon_s x}$,与电场叠加。

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

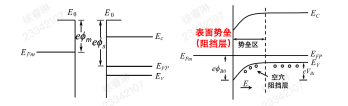
总势能最高点 $x_m = \sqrt{\frac{e}{16\pi\epsilon_s E}}$

点

- 非整流接触:

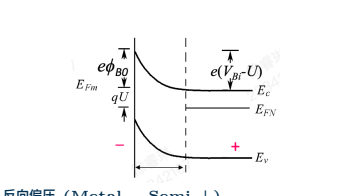
定义：在界面处形成了**反阻挡层**,即高电导区。没有整流作用,电流可以双向自由流动。这就是我们通常所说的**欧姆接触**。

功函数 ϕ 电子从 E_F 逸出到真空能级 E_0 所需最小能量。
金属功函数 $e\phi_m = E_0 - (E_F)_m$
半导体功函数 $e\phi_s = E_0 - (E_F)_s$
电子亲和能 χ 导带底 E_c 电子逸出到真空能级 E_0 所需能量。
能量关系 $e\phi_s = \chi + \phi_n$, 其中 $\phi_n = E_c - E_F$, χ 是固有属性, ϕ_s 会随掺杂改变 (因为费米能级会因掺杂浓度变化)



P 型肖特基接触 ($\phi_s > \phi_m$)

初始条件 $\phi_s > \phi_m \implies E_{FM} > E_{FP}$
物理过程 电子从金属流向半导体 (空穴从 P 型流向金属)
电荷分布 半导体侧受主得到电子带负电,形成**耗尽层**;
金属侧带正电
能带弯曲 表面 p_s 降低,能带 (E_c, E_v) 向下弯曲
势垒形成 形成表面势垒 $e\phi_{B0}$ (阻挡层),阻碍空穴进入金属
平衡状态 热平衡建立,系统费米能级 E_F 处处拉平



反向偏压 (Metal -, Semi +)

势垒变化 外加电压 U 叠加在内建电势上,势垒增加为 $e(V_{bi} + U)$
物理过程 半导体侧电子无法越过更高的势垒
电流特性 金属侧电子受限于固定势垒 $e\phi_{B0}$,电流极小,反向截止

P 型计算

费米势 $\phi_p = V_t \ln(\frac{N_v}{N_a})$
肖特基势垒 $e\phi_{B0} = E_g - (e\phi_m - \chi)$
内建电势 $V_{bi} = \phi_s - \phi_m = \phi_{B0} - \phi_p$

通用特性

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 $W(x_n) = \left[\frac{2\epsilon(V_{bi} + V_R)}{eN} \right]^{1/2}$ (与单边突变结一致),其中 V_R 为外加反向偏压。

最大电场 $E_{max} = \frac{eNW}{\epsilon}$

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

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

- 肖特基效应 (镜像力降低):

表面态 禁带中由缺陷等引起的能级。施主型 (失电子正电)、受主型 (得电子负电)。
中性能级 $E_F < \phi_0$ 呈正电, $E_F > \phi_0$ 呈负电。
物理机制 若 D_{it} 很大,表面态储存大量电荷,使 E_F 被“钉扎”在 ϕ_0 附近,势垒高度几乎与 ϕ_m 无关。就是一个经验值了。

电流-电压关系

- 热电子发射理论:

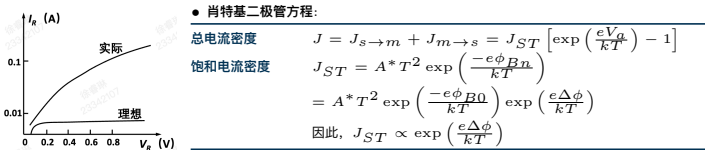
适用范围 描述肖特基接触电流传输的主流模型 (适用于 Si, GaAs 等高迁移率半导体)。
核心假设 只有**能量足够高** ($E > E_F + e\phi_{Bn}$) ($\phi_{Bn} = \phi_{B0} - \Delta\phi$, 是修正后的肖特基势垒) 的“热电子”才能从半导体进入金属,电流的大小取决于单位时间内能够“跳过”势垒高度的电子数量。

电流分量分析:

$J_{s \rightarrow m}$ 半导体 \rightarrow 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**。
 $J_{m \rightarrow s}$ 金属 \rightarrow 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^* :

表达式 $A^* = \frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3}$
物理意义 在理查德森常数中用有效质量 m^* 代替 m_0 ,反映了晶格势场对电子运动的影响。



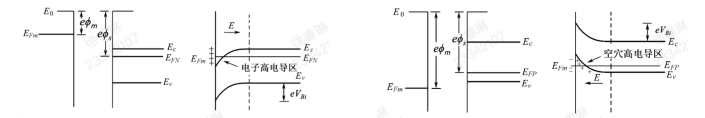
肖特基二极管与 PN 结对比 从电流运输机制和数量级两个维度,对比了两种二极管的特性

肖特基二极管 (SBD)	PN 结二极管
载流子类型 多子器件	载流子类型 少子器件
电流机制 热电子发射理论	电流机制 少子扩散理论
反向电流 J_{ST} 较大,随电压增加而增加 (非饱和)	反向电流 J_S 极小,具有良好的饱和特性
导通电压 低 (约 0.3 V)	导通电压 高 (约 0.7 V)
开关速度 极快,无少子存储效应,仅受 RC 限制	开关速度 较慢,存在 电荷存储效应 和反向恢复时间
应用 高频检波、高速开关、肖特基钳位	应用 整流、稳压、一般逻辑电路

欧姆接触

由于表面态的存在,欧姆接触只是一个**理想化模型**。

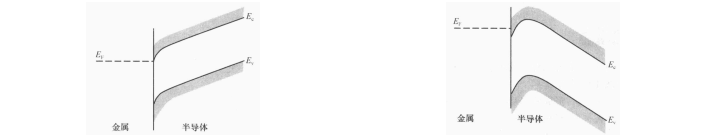
- 反阻挡层：通常 Schottky 接触形成耗尽层起阻挡作用,而此处形成积累层,电导率极高,不仅不阻挡电流反而比体内更利于导电,故称“反”阻挡层。



N 型 ($\phi_m < \phi_s$)

形成条件 $E_{FM} > E_{FN}$
载流子运输 电子 $M \rightarrow S$
弯曲 能带向下弯曲
表面 积累层 ($n_s \gg n_0$)

- 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)

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的影响
一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。

肖特基势垒二极管与 PN 结二极管的区别 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:

- 无少数载流子存储。存储时间可忽略,适合高频和快速开关;
- 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;
- 对同样电流,肖特基势垒上的正向电压远低于 PN 结,适合钳位和限幅应用;
- 多子数目起伙小,噪声小;
- 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**而为何可形成欧姆接触 不越过势垒。两侧电子均可隧穿,正反向偏压 $I-V$ 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
可。然后根据半导体类型以及载流子的流向标注是阻挡层还是反阻挡层。
带图

第六章 结型场效应晶体管

基本概念

器件特性

非理想因素

等效电路和频率限制

1