

第一章 半导体物理基础

能带的产生

价带 E_v	被价电子填满的能带
禁带 E_g	主要由自由电子占据的能带 $E_g = E_c - E_v$, 区分金属、半导体和绝缘体的关键参数

能带影响因素 能带受多种因素影响, 主要包括温度和掺杂。

温度影响	掺杂影响	本征激发
机制 温度升高 \rightarrow 晶格膨胀 \rightarrow 机制 掺杂浓度增加 \rightarrow 能带变窄 定义 价电子吸收热能跃迁至导带 原子间作用减弱 结果 E_g 变窄 结果 影响能带结构		空间电荷区形成: 扩散过的电子-空穴在交界面附近相遇并复合, 两侧各失去多子, 留下带正、负电的施、受主离子: N_D^+ 和 N_A^- 。交界面附近自由载流子被消耗殆尽, 形成空间电荷区 (也称耗尽区)

载流子统计分布

费米分布与载流子浓度 费米-狄拉克分布描述了量子态被电子占据的概率, 进而决定了半导体中载流子的浓度。

费米-狄拉克分布	$f(E) = \frac{1}{1 + \exp[(E - E_F)/kT]}$, 描述能量为 E 的量子态被电子占据的概率
费米-狄拉克分布	化学势的具体体现, $f(E_F) = 1/2$, 是表征半导体物理性质的参考能级
费米能级 E_F	$n_0 = N_c \exp[-(E_c - E_F)/kT]$, 其中 N_c 为导带有效状态密度
导带电子浓度	$p_0 = N_v \exp[-(E_F - E_v)/kT]$, 其中 N_v 为价带有效状态密度
价带空穴浓度	$n_0 p_0 = n_i^2 = N_c N_v \exp[-(E_g/kT)]$, n_i 只与温度和 E_g 有关
质量作用定律	

N型掺杂	施主原子提供电子, $n_0 \approx N_d$ (室温全电离), E_F 靠近 E_c
P型掺杂	受主原子提供空穴, $p_0 \approx N_a$ (室温全电离), E_F 靠近 E_v
补偿掺杂	同时掺入施主和受主, 多数载流子浓度由 $ N_d - N_a $ 决定

温度对载流子浓度的影响		
低温区 (冻结区)	中温区 (饱和区)	高温区 (本征区)
特征 杂质未完全电离	特征 杂质全电离, 本征激发可忽略	特征 本征激发占主导
结果 载流子浓度随温度升高而增加	结果 基本恒定, $n_0 \approx n_i$	结果 指数增长, $n_0 \approx p_0 \approx n_i$

费米能级位置的物理意义		
为后面 PN 结等接触分析做铺垫		
本征半导体	$E_F = E_i \approx (E_c + E_v)/2$ (禁带中央), $n_0 = p_0 = n_i$	
N型半导体	E_F 上移靠近 E_c , 掺杂越重 E_F 越接近 E_c	
P型半导体	E_F 下移靠近 E_v , 掺杂越重 E_F 越接近 E_v	
接触电势	不同材料接触时费米能级必须拉平, 形成内建电场 (PN 结、金半接触的基础)	

半导体的载流子运输

漂移运动		
定义	载流子在电场作用下的定向运动	定义 载流子在浓度梯度驱动下从高浓度向低浓度区的运动
漂移速度	$v_d = \mu E$, 其中 μ 为迁移率	扩散运动
漂移电流密度	$J_{drift} = nq\mu_n E + p\mu_p E$	

• 迁移率 μ : 单位电场下载流子的平均漂移速度, 反映运动能力, 单位 $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 受晶格散射和杂质散射影响		
$D = \frac{kT}{q}$	$\mu = \frac{q}{2e}$	扩散系数 $D = \text{扩散系数} \times \text{迁移率}$

电子电流		
$J_n = qn\mu_n E + qD_n \frac{dn}{dx}$		
总电流密度	$J_p = qp\mu_p E - qD_p \frac{dp}{dx}$	
空穴电流		$J = J_n + J_p$ (漂移 + 扩散)

非平衡载流子的产生与复合		
过剩载流子	非平衡态 (光照、电压) 使载流子浓度偏离平衡, $n_p \neq n_i^2$	外界作用 (光照、电压) 使载流子浓度偏离平衡, $n_p \neq n_i^2$
过剩载流子	$\Delta n = n - n_0$, $\Delta p = p - p_0$. 小注入条件下 $\Delta n = \Delta p$	$\Delta n = n - n_0$, $\Delta p = p - p_0$. 小注入条件下 $\Delta n = \Delta p$
复合与产生	复合产生: 电子从导带跃迁至价带, 与空穴湮灭, 释放能量 (光子或声子)	复合产生: 电子从导带跃迁至价带, 与空穴湮灭, 释放能量 (光子或声子)
平衡态	价带电子吸收能量跃迁至导带, 产生电子-空穴对	价带电子吸收能量跃迁至导带, 产生电子-空穴对
G = R (产生率 = 复合率)		$G = R$ (产生率 = 复合率), 载流子浓度恒定

• 复合机制:		
直接复合	间接复合	俄歇复合
机制 特点 电子直接跃迁至价带发光 (GaAs 等直接带隙)	机制 特点 通过复合中心 (杂质、缺陷) S、G、等间接带隙半导体	机制 特点 能量转移给第三个载流子重掺杂或高注入下显著

载流子寿命与扩散长度		
寿命 τ	过射载流子衰减至 $1/e$ 的时间, $\Delta n(t) = \Delta n(0)e^{-t/\tau}$	扩散长度 L 过射载流子在寿命内扩散的平均距离, $L = \sqrt{D\tau}$

定义		
准费米能级	非平衡态下, 电子和空穴各有独立的费米能级: E_{Fn} (电子)、 E_{Fp} (空穴)	$n = n_i e^{(E_{Fn} - E_i)/kT}$, $p = n_i e^{(E_i - E_{Fp})/kT}$
载流子浓度	$E_{Fn} = E_{Fp} = E_F$, $np = n_i^2$	
平衡态极限		

PN 结的形成过程		
制备方法	通过不同工艺引入杂质, 形成特定的杂质浓度分布 $N(x)$, 进而影响 PN 结的电学特性。	
扩散法	合金法	离子注入法

过程		
杂质从表面向内部扩散	金属杂质熔化后重结晶	高能离子束轰击半导体
类型	线性递变	结类型
特点	在 x_j 处浓度阶跃突变	特点

PN 结平衡过程		
• 初始状态: 因浓度梯度, P 区空穴向 N 区扩散, N 区电子向 P 区扩散		

• 空间电荷区形成: 扩散过的电子-空穴在交界面附近相遇并复合, 两侧各失去多子, 留下带正、负电的施、受主离子: N_D^+ 和 N_A^- 。交界面附近自由载流子被消耗殆尽, 形成空间电荷区 (也称耗尽区)

• 内建电场与动态平衡:

空间电荷区分离正负电荷, 形成从 N 区指向 P 区的电场 E_i
扩散流密度 J_{diff} 与漂移流密度 J_{drift} 大小相等、方向相反, $J_{total} = 0$
热平衡态 费米能级 E_F 拉平, 无宏观净电流, 但微观载流子交换持续

平衡 PN 结 平衡状态下 PN 结的能带结构:



电子从 N 区向 P 区运动需克服势能差 eV_{bi} (阻挡多子继续扩散的势垒高度), 维持动态平衡。

• 电荷中性条件: $N_A x_p = N_D x_n$, 耗尽层展宽与掺杂浓度成反比

内建电场 $E(x)$: 单边突变结自动删除高掺杂侧:

$$P \text{ 区耗尽层 } E(x) = \frac{-eN_A}{x - x_p}$$

$$N \text{ 区耗尽层 } E(x) = \frac{-eN_D}{x - x_n}$$

$$\text{积分得 } V_{bi} = \frac{e}{2\varepsilon_s} \ln \left(\frac{N_D}{N_A} \right)$$

$$\text{最大场强 } E_{max} = \frac{eN_D x_n}{W}$$

$$= \frac{eN_D}{2\varepsilon_s} \ln \left(\frac{N_A}{N_D} \right)$$

• PMOS 转换说明：对于 P 型衬底 PMOS：(1) 将电压符号改为 V_{SG} 、 V_{SD} ，阈值电压改为 $|V_{TP}|$ ；(2) 移速率 $\mu_n \rightarrow \mu_p$ ；(3) 反型电荷为空穴 Q'_p ；(4) 电流方向从源极到漏极，公式形式不变： $I_D = \frac{W\mu_p C_{ox}}{L} [(V_{SG} - |V_{TP}|) V_{SD} - \frac{1}{2} V_{SD}^2]$ 。

截止频率 截止频率 f_T 是电流增益为 1 时的频率。 $f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_M)} = \frac{g_m}{2\pi C_G}$

在理想饱和区， $f_T = \frac{\mu_n}{2\pi L^2} (V_{GS} - V_T)$ ，提高频率特性的途径：

提高迁移率 μ_n
优化晶向 选择高迁移率晶向（如硅的 100 方向）
新材料 使用 GaAs 等高迁移率材料

编道沟长度 L

效果 $f_T \propto 1/L^2$, 最有效方法
双重收益 减小寄生电容 C_{gs} ；增大跨导 g_m

第四章 MOSFET 深入

非理想效应

这里的图也需要记一记，可能没有那么多空来画。

亚阈值导电 • 定义：在弱反型 ($\phi_f p \leq \phi_s \leq 2\phi_f p$) 中，电流 I_D 并没有截止，而是呈指数衰减。

• 理想与实际过渡区对比：在 V_T 以下，电流平滑过渡，存在“尾巴”，即亚阈值电流。
• 物理机理：弱反型势垒较低，根据玻尔兹曼分布，源区总有一部分高能电子通过越过势垒。此时电流的主要驱动机制是扩散，而非漂移

• I-V 特性影响： $I_D(sat) \propto [\exp(\frac{-eV_{DS}}{kT})]$ 。
 $[1 - \exp(\frac{-eV_{DS}}{kT})]$ ， V_{DS} 过大时， $I_D(sat)$ 趋于饱和。

速度饱和 • 定义：饱和和漂移速度 v_{sat} ，漏源电流提前饱和。实际的饱和电压小于理想值

$I_D(sat) = W C_{ox} (V_{GS} - V_T) v_{sat}$ (成线性关系)
 $f_T = \frac{v_{sat}}{2\pi L}$

按比例缩小 尺寸与电压按同样比例缩小，电场强度保持不变，**最理想**，但**难以实现**

$W', L', t'_{ox}, x'_D = kW, kL, kt_{ox}, kx_D$
 $V'_{DS}, V'_{GS}, V'_T = kW_{DS}, kV_{GS}, kV_T$
• 杂散调整： $N_A' = N_A/k$ • 功率： $P' = k^2 P$
• 电流： $I'_D = kI_D$ • 电阻： $R' = R$
• 电容： $C'_{ox} = kC_{ox}$

• 阈值电压不按比例缩小：

原因 $\phi_f p = V_t \ln(N_A/n_i) \approx \text{const}$, $\phi_m s \approx \text{const}$
实际 $V'_T \approx V_T \neq kV_T$
后果 $V_D \downarrow \Rightarrow (V_{GS} - V_T) \downarrow \Rightarrow I_D, f_T \downarrow$

恒压按比例缩小 尺寸缩小： L, W 缩小（按 k ）。电压不变：**一般化按比例缩小** 尺寸：按比例因子 k 缩小。电场：按另一个因子缩小（电压稍微降低一点，但降得没尺寸那么快）。目的：在保证可靠性和性能之间寻找平衡

阈值电压修正 短沟道效应 源和漏的 N+ 掺杂，与 P 型衬底之间会形成耗尽区。源和漏的电场会“协助”耗尽沟道两端的区域，使栅极需要耗尽的一部分电荷被源和漏分担了，受栅极控制的耗尽层形状成为梯形（即 L' 的区域）。

窄沟道效应 短沟道： $\Delta L = r_j (\sqrt{1 + \frac{2x_{dT}}{r_j}} - 1)$
宽沟道： $\Delta V_T = -\frac{eN A x_{dT}}{C_{ox}} \left[\frac{\Delta L}{L} \right] < 0$
 r_j 为结深， L 和 r_j 同量级时，短沟道效应显著。

窄沟道效应 当沟道变窄，源/漏结及沟道边缘的耗尽区会向沟道中心延伸，在沟道宽度的两侧存在附加的空间电荷区；这些附加的电荷也受栅极控制，栅极要使剩余的栅区反型，就需要施加更高的栅电压。因此，阈值电压增大。

当沟道变窄，源/漏结及沟道边缘的耗尽区会向沟道中心延伸，在沟道宽度的两侧存在附加的空间电荷区；这些附加的电荷也受栅极控制，栅极要使剩余的栅区反型，就需要施加更高的栅电压。因此，阈值电压增大。

• 阈值电压变化 $\Delta V_T = V_T - V_T(\text{宽})$
• 特性 $\phi_f p = \frac{eN A x_{dT}}{C_{ox}} \cdot \frac{\xi x_{dT}}{W} > 0$
• 用途 ξ 是几何因子，当 W 和 x_{dT} 同量级时，窄沟道效应显著。

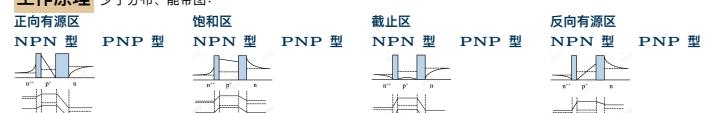
离子注入效应 离子注入主要改变的是半导体表面的杂质浓度，进而改变耗尽层内的空间电荷密度 $|Q'_{SD(max)}|$

$V_T = V_{T0} \pm \frac{eD_L}{C_{ox}}$, + 为同性掺杂 - 为异性掺杂

第五章 双极型晶体管

工作原理

少子分布、能带图：



理想情况下，集电结边界的少子的浓度为零，希望从发射区注入的电子能越过基区扩散到集电结的空间电荷区，尽可能多的电子被集电极收集，而不是在基区复合，因此需要基区的宽度与扩散长度相比很小。

BJT 有共射、共基、共集三种接法，为了使三极管处于正向有源区，从而实现正常的电流放大作用，必须同时满足以下两个条件：

• 射结正向偏置：降低发射结势垒，使发射区的高浓度多子（NPN 是电子）能够顺利注入到基区。

低频共基极电流增益

非理想效应

等效电路模型

频率上限

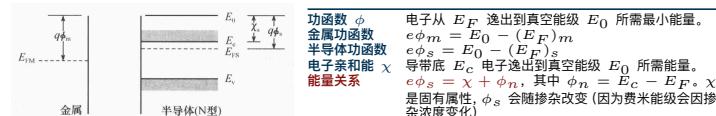
大信号开关

第六章 金半接触

肖特基接触 基本概念 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。

整流接触：

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。



功函数 ϕ
金属功函数
半导体功函数
电子亲和能 χ
能量关系

电子从 E_F 逸出到真空能级 E_0 所需最小能量。
 $e\phi_m = E_0 - (E_F)_m$
 $e\phi_s = E_0 - (E_F)_s$
 $e\phi_{BO} = E_C - (E_F)_B$
 $\phi_m = E_C - E_F$

迁移率变化 • 定义：
 $V_{GS} \uparrow \Rightarrow E_{\text{纵}} \uparrow \Rightarrow$ 载流子靠近界面 \Rightarrow 表面散射增强 $\Rightarrow \mu_{\text{eff}} = \frac{\mu_0}{1 + \theta [V_{GS} - V_T(x)]}$

• 弹道输运
• 定义：由于沟道长度非常短 ($L <$ 散射平均自由程)，载流子在沟道内几乎没有散射，直接从源极到达漏极，速度极快（主要出现在先进制程的短沟道器件中）

迁移率变化 • 定义：
 $V_{GS} \uparrow \Rightarrow E_{\text{纵}} \uparrow \Rightarrow$ 载流子靠近界面 \Rightarrow 表面散射增强 $\Rightarrow \mu_{\text{eff}} = \frac{\mu_0}{1 + \theta [V_{GS} - V_T(x)]}$

• 弹道输运
• 定义：由于沟道长度非常短 ($L <$ 散射平均自由程)，载流子在沟道内几乎没有散射，直接从源极到达漏极，速度极快（主要出现在先进制程的短沟道器件中）

• 有效理查德森常数 A^* ：

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

• 有效理查德森常数 A^* ：

表达式 $J_{S \rightarrow m} = A^* T^2 \exp(-\frac{e\phi_{BO}}{kT}) \exp(\frac{eV_a}{kT})$
物理意义 在理查德森常数中有效质量 m^* 替代 m_0 ，反映了晶格势场对电子运动的影响。

• 有效理查德森常数 A^* ：

表达式 $J_{m \rightarrow S} = A^* T^2 \exp(-\frac{e\phi_{BO}}{kT})$
物理意义 在理查德森常数中有效质量 m^* 替代 m_0 ，反映了晶格势场对电子运动的影响。

• 有效理查德森常数 A^* ：

表达式 $J_{S \rightarrow m} = A^* T^2 \exp(-\frac{e\phi_{BO}}{kT}) \exp(\frac{e\Delta\phi}{kT})$
物理意义 因此， $J_{ST} \propto \exp(\frac{e\Delta\phi}{kT})$

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

PN 结二极管 (SBD)

载流子类型 多子器件
电流机制 热电子发射理论
反向电流 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 极快，无少子存储效应，仅受 RC 限制

载流子类型 少子器件
电流机制 少子扩散理论
反向电流 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 应用

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

PN 结二极管 (SBD)

载流子类型 多子器件
电流机制 热电子发射理论
反向电流 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 极快，无少子存储效应，仅受 RC 限制

载流子类型 少子器件
电流机制 少子扩散理论
反向电流 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 应用

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

PN 结二极管 (SBD)

载流子类型 多子器件
电流机制 热电子发射理论
反向电流 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 极快，无少子存储效应，仅受 RC 限制

载流子类型 少子器件
电流机制 少子扩散理论
反向电流 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 应用

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

PN 结二极管 (SBD)

载流子类型 多子器件
电流机制 热电子发射理论
反向电流 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 极快，无少子存储效应，仅受 RC 限制

载流子类型 少子器件
电流机制 少子扩散理论
反向电流 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 应用

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

PN 结二极管 (SBD)

载流子类型 多子器件
电流机制 热电子发射理论
反向电流 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 极快，无少子存储效应，仅受 RC 限制

载流子类型 少子器件
电流机制 少子扩散理论
反向电流 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 应用

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

PN 结二极管 (SBD)

载流子类型 多子器件
电流机制 热电子发射理论
反向电流 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 极快，无少子存储效应，仅受 RC 限制

载流子类型 少子器件
电流机制 少子扩散理论
反向电流 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 应用

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

PN 结二极管 (SBD)

载流子类型 多子器件
电流机制 热电子发射理论
反向电流 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 极快，无少子存储效应，仅受 RC 限制

载流子类型 少子器件
电流机制 少子扩散理论
反向电流 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 应用

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

PN 结二极管 (SBD)

载流子类型 多子器件
电流机制 热电子发射理论
反向电流 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 极快，无少子存储效应，仅受 RC 限制

载流子类型 少子器件
电流机制 少子扩散理论
反向电流 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 应用

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

PN 结二极管 (SBD)

载流子类型 多子器件
电流机制 热电子发射理论
反向电流 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 极快，无少子存储效应，仅受 RC 限制

载流子类型 少子器件
电流机制 少子扩散理论
反向电流 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 应用

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

PN 结二极管 (SBD)

载流子类型 多子器件
电流机制 热电子发射理论
反向电流 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 极快，无少子存储效应，仅受 RC 限制

载流子类型 少子器件
电流机制 少子扩散理论
反向电流 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 应用

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

PN 结二极管 (SBD)

载流子类型 多子器件
电流机制 热电子发射理论
反向电流 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 极快，无少子存储效应，仅受 RC 限制

载流子类型 少子器件
电流机制 少子扩散理论
反向电流 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 应用

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

PN 结二极管 (SBD)

载流子类型 多子器件
电流机制 热电子发射理论
反向电流 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 极快，无少子存储效应，仅受 RC 限制

载流子类型 少子器件
电流机制 少子扩散理论
反向电流 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 应用

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

PN 结二极管 (SBD)

载流子类型 多子器件
电流机制 热电子发射理论
反向电流 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 极快，无少子存储效应，仅受 RC 限制

载流子类型 少子器件
电流机制 少子扩散理论
反向电流 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 应用

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

PN 结二极管 (SBD)

载流子类型 多子器件
电流机制 热电子发射理论
反向电流 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 极快，无少子存储效应，仅受 RC 限制

载流子类型 少子器件
电流机制 少子扩散理论
反向电流 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 应用

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

PN 结二极管 (SBD)

载流子类型 多子器件
电流机制 热电子发射理论
反向电流 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 极快，无少子存储效应，仅受 RC 限制

载流子类型 少子器件
电流机制 少子扩散理论
反向电流 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 应用

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

PN 结二极管 (SBD)

载流子类型 多子器件
电流机制 热电子发射理论
反向电流 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 极快，无少子存储效应，仅受 RC 限制

载流子类型 少子器件
电流机制 少子扩散理论
反向电流 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 应用

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

PN 结二极管 (SBD)

载流子类型 多子器件
电流机制 热电子发射理论
反向电流 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 极快，无少子存储效应，仅受 RC 限制

载流子类型 少子

MESFET: 用金属代替了 P 型半导体的地位, 行成肖特基势垒, 也是扩张耗尽层达到控制目的。沟道: n-GaAs 外延层 (高电子迁移率)。栅极 (G) = 肖特基接触 (控制); 源/漏 (S/D) = 欧姆接触。分为增强型和耗尽型两种, 可能会考画图。

高频高速 多子导电 \rightarrow 无少子存储 $\rightarrow C_{diss} \approx 0$
高输入阻抗 $R_{in} \gg R_{in(BJT)}$ (电压控制)
强抗辐射 多子器件 \rightarrow 不受少子寿命 τ 影响

器件特性

pnJFET

N 沟道 JFET P 沟道 JFET

$$V_{P0} = \frac{e\alpha^2 N_d}{2\epsilon_s} \quad V_P = V_{P0} = \frac{e\alpha^2 N_a}{2\epsilon_s}$$

$$V_{bi} - V_{P0} \quad V_P = V_{P0} - V_{bi}$$

$$h = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi}-V_{GS})}{eN_d}} \quad h = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi}+V_{GS})}{eN_a}}$$

$$V_{sat} = V_{P0} - (V_{bi} - \frac{V_{sat}}{V_{SG}}) = V_{P0} - (V_{bi} + V_{GS})$$

夹断电流 (栅极零偏且内建电势忽略时的理论最大漏极电流): $I_{P1} =$

$$\mu_n \frac{(eN_d)^2 W a^3}{6\epsilon_s L}$$

$$\text{漏源电流: } I_{D1} = I_{P1} \left[3 \frac{V_{DS}}{V_{P0}} - 2 \left(\frac{V_{DS} + V_{bi} - V_{GS}}{V_{P0}} \right)^{3/2} \right]$$

$$+ 2 \left(\frac{V_{bi} - V_{GS}}{V_{P0}} \right)^{3/2}$$

$$\text{沟道电导: } g_d = \frac{3I_{P1}}{V_{P0}} \left[1 - \left(\frac{V_{bi} - V_{GS}}{V_{P0}} \right)^{1/2} \right]$$

$$\text{最大电导: } G_{01} = \frac{3I_{P1}}{V_{P0}}$$

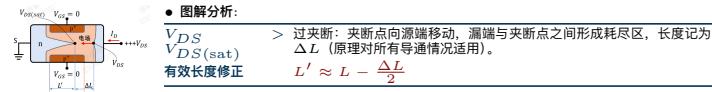
饱和电流:

$$I_{D1(sat)} = I_{P1} \left[1 - 3 \frac{(V_{bi} - V_{GS})}{V_{P0}} \times \left(1 - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{V_{bi} - V_{GS}}{V_{P0}}} \right) \right]$$

非理想因素

沟道长度调制效应

- 定义 在沟道夹断 (pinch-off) 后, 若继续增大漏极电压 V_{DS} , 电流不会像理想模型那样完全饱和不变。
- 物理过程 当 $V_{DS} > V_{DS(sat)}$ 时, 漏漏 PN 结反向偏置增大 \Rightarrow 漏端耗尽区沿沟道方向扩展。
- 结果 电中性导电沟道的**有效长度** L' 变短。该“ L' 随 V_{DS} 变化”的现象称为沟道长度调制效应。



电流方程修正

- L' 变短 $\Rightarrow I_D$ 增加: 沟道纵向电阻满足 $R \propto \frac{\text{Length}}{\text{Area}}$ 。当有效沟道长度 L' 变短时, 沟道电阻减小, 因此在相同电场驱动下, 漏极电流 I_D 相比理想情况 (长度为 L) 会略有增加。
- 修正因子:

理想关系 理想夹断电流 I_{P1} (即 I_{DSS} /饱和电流) 分母含 L , 因此电流与沟道长度成反比: $I \propto \frac{1}{L}$

$$\text{电流修正} \quad I'_{D1} = I_{D1} \cdot \frac{L}{L - \frac{\Delta L}{2}}, \text{ 验证“长度越短, 电流越大”}.$$

$$\text{耗尽区延伸量 } \Delta L \quad \Delta L \approx \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{DS} - V_{DS(sat)})}{eN_d}}, \text{ 来源于 PN 结耗尽宽度公式。} \Delta L \propto \sqrt{V_{DS} - V_{DS(sat)}} \text{, 即 } V_{DS} \text{ 超过饱和电压越多, 延伸越长。}$$

• 最终修正方程: $I'_{D1(sat)} = I_{D1(sat)}(1 + \lambda V_{DS})$.

其中 $I_{D1(sat)}$ 为理想饱和电流; λ 为沟道长度调制系数

• 小信号输出阻抗 r_{ds} : $r_{ds} = \frac{\partial V_{DS}}{\partial I'_{D1}} \approx \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I'_{D1}}$.

理想情况下饱和区 $\Delta I_D = 0$, 故 $r_{ds} \rightarrow \infty$; 考虑沟道长度调制后 $\Delta I_D \neq 0$, r_{ds} 为有限值。

等效电路和频率限制

附录 A 习题整理-01

这里仅整理作业题以及期中考试习题，不包含章节后习题。

半导体材料物理 • 期中-01：请简述费米能级的物理意义，并说出影响费米能级位置的因素以及在其影响下费米能级如何变化。

• 答：费米能级指半导体中被电子占据概率为 0.5 的假定能级（5 分），标志着电子填充能级的水平，能量低于 E_F 的能级被电子占据的概率大于 0.5，能量高于 E_F 的能级被电子占据的概率小于 0.5。费米能级的位置受温度和半导体掺杂浓度影响。对于 p 型掺杂，随着掺杂浓度增加费米能级向价带方向移动；对于 n 型掺杂，掺杂浓度增加费米能级向导带方向移动；掺杂半导体随着温度升高本征激发逐渐主导时，费米能级向本征费米能级移动（5 分）。

PN 结

PN 结的形成过程 这部分没有习题，所以对应的我前面整理的也比较少。

平衡 PN 结 • 课堂练习-C2-01：硅 pn 结所处环境温度为 300K，掺杂浓度为 $N_a = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_d = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ，计算 pn 结中的空间电荷区宽度 W 和零偏时结内的最大电场 E_{\max} 。

• 启示：就是单纯地练习公式，注意单位换算就行。

• 答：

$$\begin{aligned} V_{bi} &= \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) = V_t \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) = 0.635 \text{ V} \\ W &= \left\{ \frac{2\epsilon_s V_{bi}}{e} \left[\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right] \right\}^{1/2} \\ &= \left\{ \frac{2(11.7)(8.85 \times 10^{-14})(0.635)}{1.6 \times 10^{-19}} \left[\frac{10^{16} + 10^{15}}{(10^{16})(10^{15})} \right] \right\}^{1/2} \\ &= 0.951 \times 10^{-4} \text{ cm} = 0.951 \mu\text{m} \\ x_n &= \left(\frac{2\epsilon_s V_{bi}}{e} \cdot \frac{N_A}{N_D} \cdot \frac{1}{N_A + N_D} \right)^{1/2} = 0.864 \times 10^{-4} \text{ cm} \\ E_{\max} &= \frac{-e N_d x_n}{\epsilon_s} = \frac{-(1.6 \times 10^{-19})(10^{15})(0.864 \times 10^{-4})}{(11.7)(8.85 \times 10^{-14})} = -1.34 \times 10^4 \text{ V/cm} \end{aligned}$$

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因素有关：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图中 $q\phi_b$ 几乎不变的原因为 $q\phi_b$ 几乎不变。

肖特基势垒二极管与 PN 结二极管 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：

- 肖特基势垒二极管的区别
- (1) 无少数载流子存储，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，适合倍压和限幅应用；
 - (4) 多子数目起伏小，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越过势垒。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。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。

附录 B 习题整理-02

从此开始完全整理 Neaman 和孟庆臣老师的教材/考研指导后面的计算类习题。(前四章就主要是我在期中之前整理的内容)

半导体物理基础 能带的产生 和 截流子的统计分布 上次也没考计算题相关的，这个记住概念和影响因素就行。

半导体载流子输运 • 5-1: 硅中施主杂质原子的浓度为 $N_d = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。设电子迁移率为 $\mu_n = 1300 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ，空穴迁移率为 $\mu_p = 450 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。(a) 求材料的电阻率；(b) 求材料的电导率。

• 启发意义：多数载流子决定导电性，少数载流子可忽略；掌握 ρ 与 σ 的互逆关系及电导率公式。

• 解答：

$$\rho = \frac{1}{e\mu_n N_d} = \frac{1}{(1.6 \times 10^{-19})(1300)(10^{15})} = 4.808 \Omega\text{-cm}$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = 0.208 (\Omega\text{-cm})^{-1}$$

• 5-6: $T = 300 K$ 时，均匀掺杂的 GaAs 半导体的参数为 $N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_a = 0$ 。(a) 计算热平衡时的电子和空穴浓度；(b) 外加电场为 $E = 10 \text{ V/cm}$ ，计算漂移电流密度；(c) 当 $N_d = 0$, $N_a = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 时，重做 (a) 和 (b) 的计算。

• 启发意义：考查本征载流子浓度、漂移电流密度公式及对 N 型/P 型的迁移率选用。

(a) $N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_a = 0$, $n_i = 1.8 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$

$$n_0 = N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$$p_0 = \frac{n_i^2}{n_0} = \frac{(1.8 \times 10^6)^2}{10^{16}} = 3.24 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$$

(b) 电子迁移率 $\mu_n \approx 7500 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, $E = 10 \text{ V/cm}$

$$J = e\mu_n n_0 E = (1.6 \times 10^{-19}) \times 7500 \times 10^{16} \times 10 = 120 \text{ A/cm}^2$$

(c) $N_d = 0$, $N_a = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

$$p_0 = N_a = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_0 = \frac{n_i^2}{p_0} = 3.24 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$$

空穴迁移率 $\mu_p \approx 310 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$

$$J = e\mu_p p_0 E = (1.6 \times 10^{-19}) \times 310 \times 10^{16} \times 10 = 4.96 \text{ A/cm}^2$$