

第一章 半导体物理基础

能带的产生		
允带与禁带	价带 E_v 导带 E_c 禁带宽度 E_g	被价电子填满的能带 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		
机制	温度升高 \rightarrow 晶格膨胀 \rightarrow 原子间作用减弱	掺杂影响
结果	E_g 变窄 ($dE_g/dT < 0$)	机制 结果 掺杂浓度增加 \rightarrow 能带变窄效应 影响能带结构

本征激发	定义 载流子 意义	价带电子吸收热能跃迁至导带的过程 成对产生电子（导带）和空穴（价带） 半导体存在两种载流子的基本物理事实
------	-----------------	--

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	
费米能级 E_F	化学势的具体体现， $f(E_F) = 1/2$ ，是表征半导体统计性质的参考能级	
导带电子浓度	$n_0 = N_c \exp[-(E_c - E_F)/kT]$ ，其中 N_c 为导带有效状态密度	
价带空穴浓度	$p_0 = N_v \exp[-(E_F - E_v)/kT]$ ，其中 N_v 为价带有效状态密度	
质量作用定律	$n_0 p_0 = n_i^2 = N_c N_v \exp(-E_g/kT)$ ，本征载流子浓度 n_i 只与温度和 E_g 有关	

掺杂对载流子浓度的影响	N 型掺杂 P 型掺杂 补偿掺杂	施主原子提供电子， $n_0 \approx N_d$ （室温全电离）， E_F 靠近 E_c 受主原子提供空穴， $p_0 \approx N_a$ （室温全电离）， E_F 靠近 E_v 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	温度区域划分：		
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
结果	载流子浓度随温度升高而增加	结果	载流子浓度基本恒定， $n_0 \approx N_d$
		特征	本征激发占主导
		结果	n_i 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）	

半导体的载流子输运		
定义	载流子在电场作用下的定向运动	
漂移速度	$v_d = \mu E$ ，其中 μ 为迁移率	
漂移电流密度	$J_{drift} = nq\mu_n E + p q \mu_p E$	

- 迁移率 μ ：单位电场下载流子的平均漂移速度，单位 $\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ，受晶格散射和杂质散射影响
- 饱和速度 v_{sat} ：强电场下漂移速度趋于上限（Si 中约 10^7 cm/s ），限制器件速度

扩散运动	定义 扩散电流密度	载流子在浓度梯度驱动下从高浓度向低浓度区的运动 $J_{diff} = qDn \frac{dn}{dx} - qDp \frac{dp}{dx}$ ，其中 D 为扩散系数
------	--------------	---

扩散系数 D ：		
物理意义	描述载流子扩散能力的参数	
爱因斯坦关系	$D = \frac{kT}{q} \mu$ ，扩散与漂移受相同散射机制限制	

电子电流	$J_n = qn\mu_n E + qDn \frac{dn}{dx}$	
总电流密度	空穴电流 总电流	$J_p = qp\mu_p E - qDp \frac{dp}{dx}$ $J = J_n + J_p$ （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 过剩载流子	外界作用（光照、电压）使载流子浓度偏离平衡， $n_p \neq n_i^2$ $\Delta n = n - n_0$ ， $\Delta p = p - p_0$ 。小注入条件下 $\Delta n = \Delta p$
-------	---------------	--

复合与产生	复合 产生 平衡态	电子从导带跃迁至价带，与空穴湮灭，释放能量（光子或声子） 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），载流子浓度恒定
复合机制：	直接复合	间接复合
机制	电子直接跃迁至价带	通过复合中心（杂质、缺陷）
特点	发光（GaAs 等直接带隙）	Si、Ge 等间接带隙半导体
特点		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 扩散长度 L	过剩载流子衰减至 $1/e$ 的时间， $\Delta n(t) = \Delta n(0)e^{-t/\tau}$ 过剩载流子在寿命期内扩散的平均距离， $L = \sqrt{D\tau}$
------------	-----------------------	---

定义	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）	
准费米能级	载流子浓度 平衡态极限	$n = n_i e^{(E_{Fn} - E_i)/kT}$ ， $p = n_i e^{(E_i - E_{Fp})/kT}$ $E_{Fn} = E_{Fp} = E_F$ ， $n_p = n_i^2$

第二章 PN 结

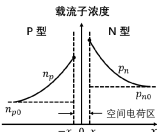
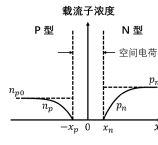
PN 结的形成过程					
制备方法		通过不同工艺引入杂质，形成特定的杂质浓度分布 $N(x)$ ，进而影响 PN 结的电学特性。			
扩散法		合金法		离子注入法	
过程	杂质从表面向内部扩散	过程	金属杂质溶解后重结晶	过程	高能离子束轰击半导体
结类型	缓变结、线性缓变结	结类型	突变结（理想模型）	结类型	高斯分布
特点	浓度随深度 x 逐渐变化	特点	在 x_j 处浓度阶跃突变	特点	峰值在投影射程 R_p 处

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：	扩散过界的电子-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：	
内建电场	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
平衡条件	扩散密度 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：
定义表达式	$eV_{bi} = E_{c,n} - E_{c,p} = E_{v,p} - E_{v,n} = \phi_{Fp} + \phi_{Fn} $
表达式	$V_{bi} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right)$ $= V_t \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right)$
影响因素	掺杂浓度 N_a 、 N_d 和温度 T

- 电中性条件： $N_A x_p = N_D x_n$ ，耗尽层宽与掺杂浓度成反比
- 内建电场 $E(x)$ ：单边突变结自动忽略掺杂侧量。

P 区耗尽层	$E(x) = \frac{-eN_A}{\epsilon_s} (x + x_p)$	P 侧宽度	$x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_s V_{bi}}{eN_A} \frac{N_D}{N_A + N_D}}$
N 区耗尽层	$E(x) = \frac{-eN_D}{\epsilon_s} (x_n - x)$	N 侧宽度	$x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_s V_{bi}}{eN_D} \frac{N_A}{N_A + N_D}}$
积分可得	$V_{bi} = \frac{e}{2\epsilon_s} \left(N_D x_n^2 + N_A x_p^2 \right)$	总宽度	$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s V_{bi}}{e} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D}}$
最大场强	$E_{max} = \frac{eN_D x_n}{2\epsilon_s} = \frac{2V_{bi}}{W}$		

PN 结的直流特性	能带图正偏让 N 侧能级上升 ($V_{bi} - V_a$)，反偏让 N 侧能级下降 ($V_{bi} + V_R$)		
PN 结正偏	$n_p(-x_p) = n_{p0} \exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right)$	PN 结反偏	少子分布如图所示：
$p_n(x_n) = p_{n0} \exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right)$			
			

通过解双极输运方程，得到通解（少子分布）：	考虑复合产生过程：
$\delta p_n(x) = p_{n0} \left[\exp \left(\frac{eV_a}{kT} \right) - 1 \right] \exp \left(\frac{x_n - x}{L_p} \right)$	反偏产生 $J_{gen} = \frac{en_i W}{2\tau_0}$
$\delta n_p(x) = n_{p0} \left[\exp \left(\frac{eV_a}{kT} \right) - 1 \right] \exp \left(\frac{x_p + x}{L_n} \right)$	反偏总电流 $J_R = J_S + J_{gen}$
正偏为少子扩散电流，通过扩散电流公式可求边界电压：	正偏复合 $J_{rec} = \frac{eWn_i}{2\tau_0} \exp \left(\frac{eV_a}{2kT} \right)$
$J_p(x_n) = \frac{eD_p p_{n0}}{L_p} \left[\exp \left(\frac{eV_a}{kT} \right) - 1 \right]$	正偏总电流 $J = J_{rec} + J_D$
$J_n(-x_p) = \frac{eD_n n_{p0}}{L_n} \left[\exp \left(\frac{eV_a}{kT} \right) - 1 \right]$	电流较小时以复合为主，电流较大时以扩散为主。
总电流（肖克利方程）为 $J = J_s \left[\exp \left(\frac{eV_a}{kT} \right) - 1 \right]$	● 通用表达式（修正后）： $I = I_s \left[\exp \left(\frac{eV_a}{nkT} \right) - 1 \right]$

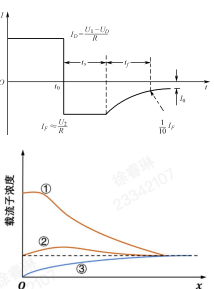
PN 结电容	两种电容：势垒电容和扩散电容。		$T^{3/2} e^{-E_g/(2kT)}$
势垒电容	● 单位面积势垒电容： $C_T' = \frac{\epsilon_s}{x_j}$	扩散电容 $C_D = \frac{e^2}{kT} (L_p p_{n0} + L_n n_{p0}) \exp$	
● 小信号模型下计算扩散电阻、电容：			
扩散电导	$g_d = \frac{(I_{p0} + I_{n0})}{V_t} = \frac{I_D Q}{V_t}$		
扩散电容	$C_d = \frac{1}{2V_t} (I_{p0} \tau_{p0} + I_{n0} \tau_{n0})$		

非均匀掺杂 PN 结

PN 结击穿

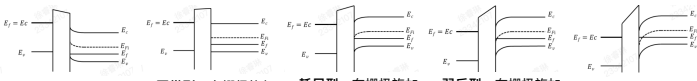
PN 结的小信号模型

- 动态开关特性：从关态变到开态所需开启时间很短，从开态变到关态（ $+U \rightarrow -U$ ）所需关闭时间却很长。● 根本原因：反向延迟由 PN 结的电荷贮存引起（正向导通时，互相注入少子，非平衡少子（ p_n 、 n_p ）在耗尽层附近扩散区大量积累，形成贮存电荷 Q ）
- 关联规律：正向电流 $I_F \uparrow \Rightarrow$ 注入少子 $\uparrow \Rightarrow$ 贮存电荷 $Q \uparrow \Rightarrow$ 关断时清理时间 \uparrow ，恢复时间 \uparrow

	正向导通（ $t < t_0$ ） 反偏施加（ $t = t_0$ ） 切换瞬间（ $t = t_0$ ） 贮存时间 t_s	物理过程 物理过程 物理过程 物理过程
	● 衰减时间 t_f ：电流从 I_R 降至 $0.1I_R$ ，耗尽层建立，恢复高阻	● 恢复时间： $t_{rr} = t_f + t_s$ ，让输出伴有延迟，决定了工作频率。
	● 全流程详解：	
	正向导通（1） 反偏施加（1 \rightarrow 2） t_s 结束（2） t_f （2 \rightarrow 4） t_{rr} 影响因素	积累大量少子，形成贮存电荷 Q 边界少子浓度瞬间下降但仍高于 p_{n0} ，扩散梯度维持“导通”特征，外部电流恒定为 I_R 边界浓度降至 p_{p0} ，耗尽层开始建立 边界处载流子抽干，耗尽层已建立，深层残余电荷靠扩散/复合消失，电流从 I_R 逐渐降至 0 贮存电荷量 Q 越大 t_{rr} 越长；抽取速度 $I_R = U_2/R$ 越大 t_{rr} 越短

提高开关速度的措施	● 途径一：减小贮存电荷 Q ：
减小正向电流 I_D	降低少子寿命 τ
原理	$I_D \downarrow \Rightarrow V_a \downarrow \Rightarrow n_{p0} e^{eV_a/kT} \downarrow$ 结果 注入少子浓度降低， Q 减小
● 途径二：加快 Q 消失（最有效）：	增大反向抽取电流
方法	使 $I_R = (U_2 - V)/R$ 增大
效果	$I_R \uparrow \Rightarrow t_{rr} \downarrow$
效果	效果
● 定量关系：在 $I_D = I_F$ 条件下：突变结 $t_{rr} \approx 0.9\tau$ ；缓变结 $t_{rr} \approx 0.5\tau$	

第三章 MOSFET 初探

MOS 电容	随表面势的不同，半导体表面可以处于积累、平带、耗尽、弱反型，下面能带图为 P 型衬底。
	
● 积累型：在栅极施加负电压，吸引空穴到表面，形成积累层。	● 平带型：在栅极施加适当电压，使半导体表面电势为零，能带平坦。
● 耗尽型：在栅极施加正电压，驱赶空穴离开表面，形成耗尽层，但本征费米能级仍高于表面费米能级。	● 弱反型：在栅极施加更大正电压，使表面费米能级低于本征费米能级，形成反型层，但未达到掺杂浓度。
● 强反型：在栅极施加足够大正电压，使沟道处载流子浓度达到掺杂浓度，形成强反型层（沟道）。	

NMOS	PMOS
费米势 $\phi_{fp} = V_t \ln \left(\frac{N_a}{n_i} \right)$	费米势 $\phi_{fn} = V_t \ln \left(\frac{N_d}{n_i} \right)$
表面势 ϕ_s ，体内到表面的势垒	表面势 ϕ_s ，体内到表面的势垒
耗尽层宽度 $x_d = \left(\frac{2\epsilon_s \phi_s}{eN_a} \right)^{1/2}$	耗尽层宽度 $x_d = \left(\frac{2\epsilon_s \phi_s}{eN_d} \right)^{1/2}$
反型临界表面电荷浓度 $n_{st} = n_i \exp \left(\frac{\phi_{fp}}{V_t} \right)$	反型临界表面电荷浓度 $p_{st} = n_i \exp \left(\frac{\phi_{fn}}{V_t} \right)$
功函数差 $\phi_{ms} = \phi'_m - \left(x' + \frac{E_g}{2e} + \phi_{fp} \right)$	功函数差 $\phi_{ms} = \phi'_m - \left(x' + \frac{E_g}{2e} - \phi_{fn} \right)$
n^+ 多晶硅 $\phi_{ms} = - \left(\frac{E_g}{2e} + \phi_{fp} \right)$	n^+ 多晶硅 $\phi_{ms} = \left(\frac{E_g}{2e} - \phi_{fn} \right)$
p^+ 多晶硅 $\phi_{ms} = \left(\frac{E_g}{2e} - \phi_{fp} \right)$	p^+ 多晶硅 $\phi_{ms} = - \left(\frac{E_g}{2e} + \phi_{fn} \right)$

平带电压、阈值电压	主要是公式与影响因素：
NMOS	PMOS
平带电压 $V_{FB} = \phi_{ms} - \frac{Q'_{ss}}{C_{ox}}$	平带电压 $V_{FB} = \phi_{ms} - \frac{Q'_{ss}}{C_{ox}}$
最大耗尽电荷密度 $ Q'_{SD}(\text{max}) = eN_a x_d T$	最大耗尽电荷密度 $ Q'_{SD}(\text{max}) = eN_d x_d T$
阈值电压 $V_{TN} = \frac{ Q'_{SD}(\text{max}) }{C_{ox}} - \frac{Q'_{ss}}{C_{ox}} + \phi_{ms} + 2\phi_{fp}$	阈值电压 $V_{TP} = - \frac{ Q'_{SD}(\text{max}) }{C_{ox}} - \frac{Q'_{ss}}{C_{ox}} + \phi_{ms} - 2\phi_{fn}$
$V_{TN} = \frac{ Q'_{SD}(\text{max}) }{C_{ox}} + V_{FB} + 2\phi_{fp}$	$V_{TP} = - \frac{ Q'_{SD}(\text{max}) }{C_{ox}} + V_{FB} - 2\phi_{fn}$

MOS 电容的 C-V 特性

MOSFET 的工作原理

CMOS 技术

第四章 MOSFET 深入

非理想效应

按比例缩小

阈值电压修正

附加电学特性

辐射和热电子效应

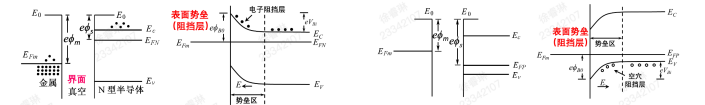
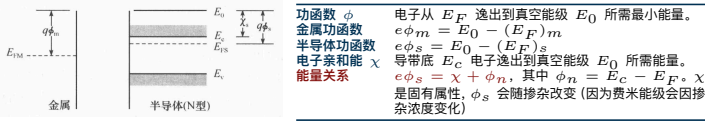
第五章 双极型晶体管

基本结构与工作原理
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
● 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：
● 非整流接触：
定义
特性
命名

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。



型肖特基接触 ($\phi_m > \phi_s$)	P 型肖特基接触 ($\phi_s > \phi_m$)
初始条件 物理过程 电荷分布 能带弯曲 势垒形成 平衡状态	初始条件 物理过程 电荷分布 能带弯曲 势垒形成 平衡状态
$\phi_s > \phi_s \implies E_{Fm} < E_{Fn}$ 电子自发从 N 型半导体流向金属 半导体侧失去电子带正电, 形成 耗尽层 ; 金属侧带负电 表面 ψ_s 降低, 由 $n = N_c \exp[-(E_c - E_F)/kT]$ 知 E_c 向上弯曲 形成表面势垒 $e\phi_{B0}$ (阻挡层), 阻碍电子进入金属 热平衡建立, 系统费米能级 E_F 处处拉平	$\phi_s > \phi_m \implies E_{Fm} > E_{Fn}$ 空穴从金属流向半导体 (空穴从 P 型流向金属) 半导体侧受主得到电子带负电, 形成 耗尽层 金属侧带正电 表面 ψ_s 降低, 能带 (E_c, E_v) 向下弯曲 形成表面势垒 $e\phi_{B0}$ (阻挡层), 阻碍空穴进入金属 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, 势垒增加为 $e(V_{bi} + U)$
势垒变化	物理过程	半导体侧电子无法越过更高的势垒
外加电压 U 抵消内建电势, 势垒降低为 $e(V_{bi} - U)$	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
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	P 型计算	
费米势	费米势	$\phi_F = V_t \ln(\frac{N_c}{N_d})$
肖特基势垒	肖特基势垒	$e\phi_{B0} = E_g - e\phi_m - \chi$
内建电势	内建电势	$V_{bi} = \phi_m - \phi_m = \phi_{B0} - \phi_n$
$V_{bi} = \phi_m - \phi_m = \phi_{B0} - \phi_n$		

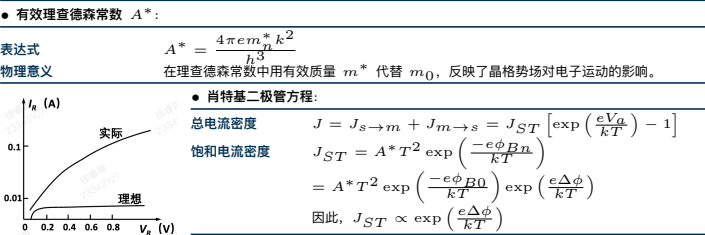
参数说明
耗尽层宽度
最大电场
势垒电容
$C - V$ 特性

● 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):	● 界面态 (费米能级钉扎):
势垒修正	表面态
势垒降低	禁带中缺陷等引起的能级。施主型 (失电子正电)、受主型 (得电子负电)。
总势垒最高	中性能级 物理机制

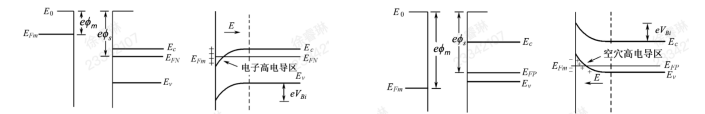
电流-电压关系
适用范围
核心假设
● 电流分量分析：
$J_{S \rightarrow m}$
$J_{m \rightarrow s}$



肖特基二极管与 PN 结对比	肖特基二极管 (SBD)	PN 结二极管
载流子类型	多数器件	少数器件
电流机制	热电子发射理论	少数载流子理论
反向电流	低	I_{RS} 很小, 具有良好的饱和特性
导通电压	$V_{D0} \approx 0.3V$	高 ($\approx 0.7V$)
开关速度	极快, 无少数子存储效应, 仅受 RC 限制	较慢, 存在电荷存储效应和反向恢复时间
应用	高频整流、高速开关、肖特基整流	整流、稳压、一般导电电路

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 ($\phi_m < \phi_s$)	P 型 ($\phi_m > \phi_s$)
形成条件	形成条件
载流子输运	载流子输运
弯曲	弯曲
表面	表面

- 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)

异质结基本知识

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的影响 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图中 $q\phi_b$ 几乎不变的原因 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 $q\phi_b$ 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：
(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，饱和电流密度高于同面积 PN 结二极管；
(3) 对同样电流，肖特基势垒上的正向电压降低远少于 PN 结，适合钳位和限幅应用；
(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为何可形成欧姆接触 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，载流子可隧穿道渗透而非越过势垒。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。

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

课后习题整理

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）**，标志了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：

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