

电子学院学习部 三班

基础知识

- 更有不简并的半导体，没有不简并的半导体。T=0K时，无简并，但禁带宽度小于绝缘体，因此仅靠少数电子，绝缘体和半导体的能带结构有什么不同？
P123---124
并以此说明半导体的导电机理（两种载流子参与导电）与金属有何不同？
答：金属中的电子，只能在导带上传输，而半导体中的载流子，电子和空穴，却能在价带和导带上分别传输。

2. 什么是空穴？它有哪些基本特征？以硅为例，对照能带结构和价键结构图理解空穴概念。

答：*空穴是满带附近有空状态k时，整个能带中的电流，以及电流在外场作用下的变化，完全如同假想的带有正电荷e和具有正有效质量 $|m^*|$ 、速度为 $v(k')$ 的粒子。
$$j(k) + eEv(k) = 0$$

特征：带有正电荷e和具有正有效质量 $|m^|$ 、速度为 $v(k')$ (P124) $j(k) = eEv(k')$
带有正电荷。

3. 半导体材料的一般特性。

答：可控性 (P123)；半导体的载流子电子和空穴能在价带和导带上分别传送信息。

4. 费米统计分布与玻耳兹曼统计分布的主要差别是什么？什么情况下费米分布函数可以转化为玻耳兹曼函数。为什么通常情况下，半导体中载流子分布都可以用玻耳兹曼分布来描述。

P126---127 (有公式)

答：*差别是玻耳兹曼统计分布的粒子可区分，且不受泡利原理限制，而费米两者相反。

*简并情况下，可代替。

*一般为低掺杂，当费米能级距导带和价带位置都较远时，导带/价带上的电子/空穴数量很少，因此不容易出现多个能态电子处于同一能级的简并情况。

公式：

$$\text{费米分布函数 } f = \frac{1}{e^{\frac{E - E_F}{kT}} + 1}$$

$$\text{玻耳兹曼分布函数 } f = \frac{1}{e^{\frac{E - E_F}{kT}}}$$

5. 由电子能带图中费米能级的位置和形态（如，水平、倾斜、分裂），分析半导体材料特性。

答：

水平：热平衡状态

分裂：非平衡载流子的稳定分布状态

倾斜：电子流动

6. 何谓准费米能级？它和费米能级的区别是什么？

答：*准费米能级是对于非平衡状态的半导体，当导带和价带分别处于准平衡状态，对非平衡载流子的分布状态的一种近似描述。

*区别：非平衡半导体中存在两条准费米能级，准费米能级适用于非平衡载流子，费米能级适用于热平衡状态的导体。

7. 比较 Si, Ge, GaAs 能带结构的特点，并说明各自在不同器件中应用的优势。

P130—131

Si：导带/价带如何... 导带底在[100]轴，6个导带底，等能面为球面

Ge：

GaAs

8. 重空穴、轻空穴的概念。

P131

答：*价带中，E-k 关系曲率大的，对应的有效质量小，相应的空穴称为轻空穴。

禁带宽度随温度变化: $E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha}{T + \beta}$ $T \uparrow, E_g(T) \downarrow$

* 曲率小的价带对应的有效质量大, 称为重空穴。

9. 有效质量、状态密度有效质量、电导有效质量概念。

P132

答: *有效质量是将晶体内部周期势场的作用和电子的真实质量概括一起。 P117+P119

状态密度有效质量指 $m_n^ = m_{dn} = \frac{1}{3}(m_e m_c^2)^{\frac{1}{3}}$

*电导有效质量指

公式: 能态密度 $g_c(E) = 4\pi V_0 \left(\frac{2m_n^*}{h^2} \right)^{\frac{1}{2}} (E - E_c)^{\frac{1}{2}}$

$\frac{1}{m_c} = \frac{1}{3} \left(\frac{2}{m_e} + \frac{1}{m_c} \right)$

$m_n^* = m_{dn} = \left(\frac{2}{3} \right) (m_e m_c^2)^{\frac{1}{3}}$ (导带底的电子的状态密度有效质量)

$m_p^* = m_{dp} = \left[\frac{(m_p)^{\frac{3}{2}}}{2} + \frac{(m_p)^{\frac{3}{2}}}{2} \right]^{\frac{2}{3}}$ (价带顶空穴的状态密度有效质量)

电导有效质量

$$\frac{1}{m_c} = \frac{1}{3} \left(\frac{2}{m_1} + \frac{1}{m_1} \right)$$

10. 什么是本征半导体和本征激发?

P135

答: *本征半导体是指最理想和纯净的, 没有杂质和缺陷的半导体 (在绝对零度时, 价带全满, 导带全空, 只需一定温度, 晶格振动, 载流子产生)。

*本征激发指本征半导体中价带电子通过热运动激发到导带中成为导带电子, 并在价带产生一空穴的过程。

11. 何谓施主杂质和受主杂质? 浅能级杂质与深能级杂质? 各自的作用。

答: *施主杂质是因为磷等 VI 族元素具有提供载流电子的能力; P-As P137 能够提供一个电子并留下一个正电

*受主杂质是因为硼等 III 族元素具有提供载流空穴的能力 (B) 能够提供一个空穴并留下一个负电

浅能级杂质的作用: 浅能级杂质是常温下, 掺入 III 族或 VI 族杂质, 施主能级靠近导带底, 受主能级靠近价带顶。

1. 可以通过控制掺杂的浓度来控制 1. 室温下有很低的电离能; 2. 可以进行追加式的浓度控制 P138

深能级杂质是在半导体中掺入的不是 III 族或 VI 族杂质, 它们任然会在远离导带底或价带顶的禁带深处引入能级。(区别重掺杂)

作用是有些可发生多次电离, 形成多个能级; 有的既能引入施主能级, 又能引入受主能级; 电离能比较大, 起到减少非平衡载流子寿命

深能级杂质可以起到减少非平衡载流子寿命的作用。

12. 何谓杂质补偿? 举例说明有何实际应用。

P138

答: *杂质补偿旨在改变导电性的追加式掺杂。

*补偿掺杂可以实现更加精密的导电性 (可以增强、减弱、抵消甚至逆转导电性)。

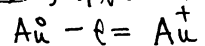
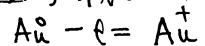
13. 金原子的带电状态与浅能级杂质的关系?

P138 底

答: 为能级距导带和价带的深浅??

当掺入的浅能级杂质为施主杂质时, 金原子作为受主杂质。

受主杂质时, 金原子作为施主杂质。



14. 画出 (a) 本征半导体、(b) n 型半导体、(c) p 型半导体的能带图, 标出费米能级、导带底、价带顶、施主能级和受主能级的位置

答: 略

15. 重掺杂的半导体其能带结构会发生何种变化?

P139

答: *杂质能级将扩展成具有一定宽度的杂质能带 (杂质原子间距过小, 电子波函数交叠, 形成有化运

费米能级		
低温	$E_F = \frac{1}{2}(E_C + E_D) + \frac{1}{2}k_0T \ln\left(\frac{N_D}{2N_C}\right)$	$n_0 = \left(\frac{N_D N_C}{2}\right)^{1/2} e^{-\frac{\Delta E_D}{2k_0T}}$
中温	$E_F = E_C + k_0T \ln\left(\frac{N_D}{N_C}\right)$	$n_0 \approx N_D$
高温	$E_F = E_i = \frac{1}{2}(E_C + E_V) + \frac{1}{2}k_0T \ln \frac{N_V}{N_C}$	$n_0 \approx p_0 = n_i$ $= (N_C N_V)^{1/2} e^{-\frac{E_g}{2k_0T}}$

答:

21. 热平衡态、非平衡态、稳态概念。

P142

答: *热平衡态是电子产生和复合运动相互抵消, 电子在各个能级上都保持稳定分布。

*非平衡态是获外界额外能量的电子和空穴不在符合费米-狄拉克分布, 存在净产生或净复合。

*稳态是 外界提供的能量恒定不变, 电子和空穴达到稳定分布。

22. 非平衡状态下载流子浓度表达式 (用准费米能级表示), 比较平衡与非平衡下电子浓度 n 和空穴浓度 p 的乘积。

公式:

$$n = N_C e^{-\frac{E_C - E_{Fn}}{k_0T}}$$

$$np = N_C N_V e^{-\frac{E_C + E_{Fn} - E_V - E_{Fp}}{k_0T}} \quad P134$$

$$p = N_V e^{-\frac{E_V - E_{Fp}}{k_0T}}$$

$$= N_C N_V e^{-\frac{E_g + E_{Fn} - E_{Fp}}{k_0T}}$$

载流子的各种运动

1. 何谓直接复合? 间接复合?

P144 和 145

答: *直接复合是带中的电子直接跃迁到价带和空穴复合, 使一对电子、空穴消失 (砷化镓);

*间接复合是非平衡载流子通过禁带中杂质和缺陷能级的复合。

2. 推导直接复合的非平衡载流子寿命公式, 从直接复合的非平衡载流子寿命公式出发说明小注入条件下, 寿命为定值。

推导:

$$\tau = \frac{\Delta p}{U_{dc}} = \frac{\Delta p}{R - G} \quad P144$$

$$= \frac{\Delta p}{r_{np} - r_{np0}} = \frac{\Delta p}{r(n_0 + \Delta p)(p_0 + \Delta p) - r_{np0}}$$

$$= \frac{1}{r(n_0 + p_0 + \Delta p)}$$

3. 了解间接复合的净复合率公式中各参量代表的意义, 并从间接复合的净复合率公式出发说明深能级是最有效的复合中心。

P145——147

$$U_{dc} = \frac{N + G_C C_p (np - n_0 p_0)}{G_C (n_1 + n) + G_V (p_1 + p)}$$

答: 深能级的 E_t 十分接近禁带中心 E_i , 从而使净复合率 U 最大。

4. 已知间接复合的非平衡载流子寿命公式的一般形式，会化简不同费米能级位置下的寿命公式。

答：见 ppt，共 4 中，强 n 型，弱 n 型，强 p 型，弱 p 型（这个存在疑惑）

$$\tau = \frac{\Delta p}{\text{Vol}} = \frac{\Delta p}{N_t(G_p(N_p - n_0 - p_0))} = \frac{C_n(n_0 + \Delta n + n_1) + C_p(p_0 + \Delta p + p_1)}{N_t \cdot C_n \cdot C_p \cdot (n_0 + p_0 + \Delta p)}$$

强 P, 弱 P, 强 n, 弱 n.

5. 半导体的主要散射机制？温度对它们的影响，原因？

答：*半导体的主要散射机制是一种是外部热引起的晶格振动散射；
另一种内部杂质电荷引起的电离杂质散射。

6. 何谓漂移运动？

答：由电场引起的载流子的定向运动。

7. 迁移率的定义、量纲。影响迁移率的因素。

$$V_d = \mu E \Rightarrow \mu = \frac{V_d}{E} \quad \text{指单位场强下的电子的平均漂移速度}$$

答：*定义：单位场强下电子的平均漂移速度。

*影响因素：散射和有效质量

$$\mu = \frac{q\tau}{m^*} \quad \tau - \text{平均自由时间，两次散射之间的平均空闲}$$

8. 解释迁移率与杂质浓度、温度的关系。

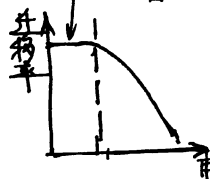
$$\mu = \frac{q\tau}{m^*} = \frac{q}{m^*} \frac{1}{\frac{1}{A\tau} + \frac{B N_i}{\tau}}$$

答：*与杂质浓度：浓度越高，迁移率越低

即解释 τ 与杂质浓度、温度的关系。

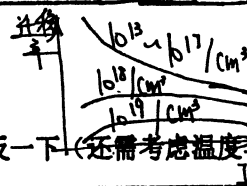
*温度：纯净半导体，只有晶格振动散射， T 升高，迁移率下降；

掺杂半导体，低温时， T 升高，电离杂质散射主导，迁移率升高；
温度上升一定后，晶格振动散射主导， T 升高，迁移率下降。

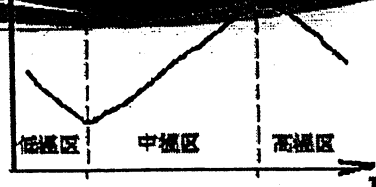


9. 解释电阻率随温度的变化关系。

答：电阻率与迁移率成反比，所以在上面 8 的结论下反一下（还需考虑温度与载流子浓度间的关系）。



(2) 电阻率与温度的关系



*低温 $\left\{ \begin{array}{l} \mu: T \uparrow \rightarrow \text{电离杂质散射} \downarrow \rightarrow \mu \uparrow \rightarrow \rho \downarrow \\ n \text{ (未全电离)}: T \uparrow \rightarrow n \uparrow \rightarrow \rho \downarrow \end{array} \right. \rightarrow \rho \downarrow$

*中温 $\left\{ \begin{array}{l} \mu: T \uparrow \rightarrow \text{晶格振动散射} \uparrow \rightarrow \mu \downarrow \rightarrow \rho \uparrow \\ n \text{ (全电离)}: n = N_D \text{ 饱和} \end{array} \right. \rightarrow \rho \uparrow$

*高温 $\left\{ \begin{array}{l} \mu: T \uparrow \rightarrow \text{晶格振动散射} \uparrow \rightarrow \mu \downarrow \rightarrow \rho \uparrow \\ n \text{ (本征激发开始)}: T \uparrow \rightarrow n \uparrow \rightarrow \rho \downarrow \end{array} \right. \rightarrow \rho \downarrow \downarrow$

本征激发的剧烈

电导率与迁移率成正比。

$$v_d = \mu E, \quad \mu = \frac{q}{m^*} \cdot \tau = \frac{L}{V_A + V_d}$$

10. 强电场下 Si、Ge 和 GaAs 的漂移速度的变化规律，并解释之。

P155

答：*硅、锗的漂移速度随电场增强而增大到一个饱和值，且增长曲线为亚线性增加。硅、锗是单能谷。

*砷化镓明显不同：漂移速度随电场增强而增大到一个极大值后，漂移速度反而下降。

解释：这是由砷化镓的多能谷的能带结构决定的。随电场增强，有效质量小的能谷 1 中的电子不断散射到有效质量大的能谷 2 中，使得平均迁移率下降，从而漂移速度下降，电导率也下降。

(微分电导区)

11. 何谓热载流子？

答：指在强电场作用下，能量很大的载流子不再与晶格处于热平衡状态，这时载流子的平均能量比热平衡时大，即载流子的动能高于平均热运动能量。换句话说，载流子温度明显高于晶格温度。

12. 载流子在什么情况下做扩散运动？扩散系数的定义、量纲。

P156

答：*存在浓度差，从浓度高区域流向浓度低。

*扩散系数的定义为少数载流子在一定分布下扩散的快慢，主要有晶体内部的散射机制决定。

*cm²/s

少数载流子在一定分布下扩散的快慢

13. 爱因斯坦关系式？理解推导过程。

公式：

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{k_B T}{q}, \quad \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{k_B T}{q}$$

14. 扩散长度和牵引长度的定义。

答：*扩散长度标志着非平衡载流子深入半导体样品的平均距离，扩散过程中当少数载流子浓度减少到原来值的 1/e 时，走过的这一段距离就是扩散长度。

P157

*牵引长度指载流子在寿命时间内所迁移的距离。由表面注入的非平衡载流子深入样品的平均距离，在电场很强时为牵引长度，而电场很弱时为扩散长度。

Pdf

PPT

15. 在不同条件下，对连续性方程进行化简。

答：

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + q G - q \frac{\partial n}{\partial x} - \frac{\Delta n}{\tau_n} + g_n$$

16. 平均自由时间、非平衡载流子寿命概念。

答：*平均自由时间指载流子连续两次散射间自由运动的平均时间，与散射几率成倒数。

*非平衡载流子寿命指光照停止后，非平衡载流子浓度衰减到原来数值的 1/e 所经历的时间。

17. 平均自由程与扩散长度概念。

答：*平均自由程指载流子连续两次散射间自由运动的平均路程。

*扩散长度标志着非平衡载流子深入半导体样品的平均距离，扩散过程中当少数载流子浓度减少到原来值的 1/e 时，走过的这一段距离就是扩散长度，其对应的时间就是非平衡载流子寿命。

18. 小注入、大注入概念

P143

答：*小注入指如果获取能量后，非平衡载流子，尤其是非平衡少子的数量远小于原热平衡时的多子数量。

*大注入指非平衡少子数量已到达或超过热平衡多子的数量，出现所有少子总量达到与多子总量接近的程度，产生少子不少，多子不多情形。

半导体与外界作用、半导体接触现象

1. 本课程中哪几种外界作用能够改变单一半导体的电导率？试述原理。（具体见哪一部分）

答：温度、电场、载流子浓度（光、热、电、磁、声、力）

P148+P164 开始

2. 请说出判断半导体导电类型的实验方法。

答：霍尔效应可以测定载流子浓度及载流子迁移率等重要参数，以及判断材料的导电类型

(1) 判断导电类型 $\begin{cases} n\text{型} & R_H < 0 \\ p\text{型} & R_H > 0 \end{cases}$ 霍尔电压的正负相反

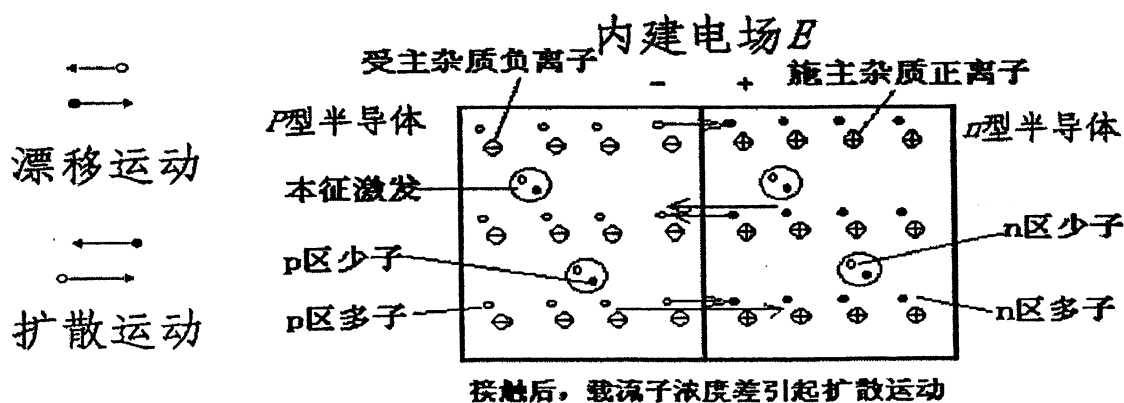
n型 电场力 洛伦兹力 $-qE_z = qv_x B_y$ 对p型半导体，同理

$$E_z = -v_x B_y = -\frac{J_x}{nq} B_y = R_H J_x B_y \quad R_H = \frac{1}{pq} > 0$$

$$R_H = -\frac{1}{nq} < 0$$

3. 试述平衡 p-n 结形成的物理过程，画出势垒区中载流子漂移运动和扩散运动的方向。

答：刚接触，扩散→建立内建电场→漂移（增加）→扩散=漂移（达到动态平衡）



4. 内建电势差 V_D 的公式。分析影响接触电势差的因素。

P177

答：*因素：pn 结两侧掺杂浓度、温度、材料等参数有关（从公式看）

*公式：

5. 平衡 p-n 结, 正向偏置 p-n 结, 反向偏置 p-n 结的空间图、能带图, 各区域载流子浓度表达式、载流子运动方向、电流方向。

答: 见 ppt

6. 分别说明空间电荷区、耗尽区、势垒区的三个概念

答: *空间电荷区: 在 PN 结中, 由于自由电子的扩散运动和内电场导致的漂移运动, 使 PN 结中间的部位 (P 区和 N 区交界面) 产生一个很薄的电荷区, 它就是空间电荷区。

*耗尽区: 在这个区域内, 多数载流子已扩散到对方并复合掉了, 或者说消耗殆尽了, 因此, 空间电荷区又称为耗尽层。

*势垒区: 就是势能比附近的势能都高的空间区域, 基本上就是极值点附近的一小片区域。

补: 扩散运动使空间电荷区加宽, 内电场增强, 有利于少子的漂移而不利于多子的扩散, 而漂移运动使空间电荷区变窄, 内电场减弱, 有利于多子的扩散而不利于少子的漂移。

7. 理想 p-n 结 I-V 方程。(书上写的是典型 I-V 方程)

P180-181

p-n 结的正向和反向电流密度公式可统一用下列公式表示:

$$J = J_s \left(e^{\frac{qV}{k_0 T}} - 1 \right)$$

$$\begin{aligned} \text{正向: } V &= V_f \\ \text{反向: } V &= -V_r \end{aligned}$$

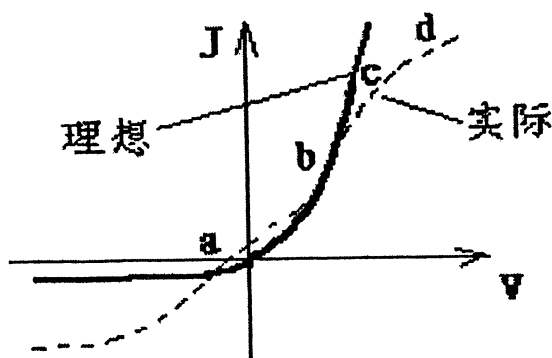
$$J = J_s \left(e^{\frac{qV}{k_0 T}} - 1 \right)$$

$$J_s = q \left(\frac{n_{p0} D_n}{L_n} + \frac{p_{n0} D_p}{L_p} \right)$$

$$J_s = q \left(\frac{n_{p0} D_n}{L_n} + \frac{p_{n0} D_p}{L_p} \right)$$

答:

8. p-n 结的理想伏-安特性与实际伏-安特性有哪些区别? 定性分析原因。



答:

产生偏差原因: (1) 正向小电压时忽略了势垒区的复合; 正向大电压时忽略了扩散区的漂移电流和体电阻上的压降

(2) 在反向偏置时忽略了势垒区的产生电流

9. p-n 结电容包括哪两种? 在正向偏置或反向偏置下哪种电容起主要作用? 为什么?

答: *势垒电容, 反向偏置起主要作用。反向电压使势垒区变宽, 电容变大。

*扩散电容, 正向偏置。正偏时, 扩散区才存在足够多数量的非平衡少子, 电容大。

10. 定性分析影响 p-n 结电容大小的因素? 并举例说明 p-n 结电容对器件性能的影响。 P182

答: *p-n 结的面积、外加电压、温度 (从公式中看分析)。

*寄生电容能够短路高频信号, 会使 pn 结的整流特性显著削弱甚至消除, 它的常规功能也将失效。

11. p-n 结击穿主要有哪几种? 说明各种击穿产生的原因和条件。并分析影响它们的主要因素

答: *雪崩击穿: p-n 结中的电场随着反向电压的增加而增加, 少数载流子通过反向扩散进入势垒区时获得的动能也就越来越大, 当载流子的动能大到一定数值后, 当它与中性原子碰撞时, 可以把中性原子的价电子激发到导带, 形成电子-空穴对——碰撞电离。连锁反应, 使载流子的数量倍增式的急剧增多, 因而 p-n 结的反向电流也急剧增大, 形成了雪崩击穿。

1. 掺杂浓度: 掺杂浓度大, 击穿电压小 *掺杂浓度大, 则接触电势差大, 则空间电荷区的内建电场强, 有利于加速*
2. 势垒宽度: 势垒宽度足够宽, 击穿电压小 *势垒宽有利于加速*
3. 禁带宽度: 禁带宽度越宽, 击穿电压越大
4. 温度: 温度升高, 击穿电压增大 *不利于加速*

*齐纳击穿或隧道击穿: 掺杂浓度较高的非简并 p-n 结中的击穿机制。根据量子力学的观点, 当势垒宽度 x_{AB} 足够窄时, 将有 p 区电子穿透禁带。当外加反向电压很大时, 能带倾斜严重, 势垒宽度 x_{AB} 变得更窄, 造成很大的反向电流, 使 p-n 结击穿。

1. 掺杂浓度: 掺杂浓度大, 击穿电压小 *与 $E_g \rightarrow x_0 \rightarrow x_{AB}$ 有关*
2. 禁带宽度: 禁带宽度越宽, 击穿电压越大
3. 温度: 温度升高, 击穿电压下降

*热击穿: 禁带宽度较窄的半导体易发生这种击穿 (高温引起的本征激发的恶性增强)

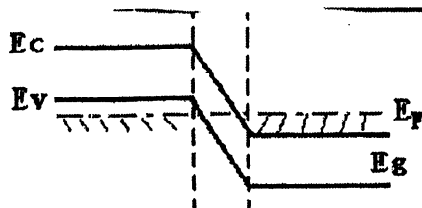
*区别: *齐纳击穿电压具有负的温度系数, 而雪崩击穿电压具有正的温度系数, 这种温度效应是区分两种击穿机构的重要方法。

*掺杂浓度高, 反向偏压不高的情况下, 易发生齐纳击穿。相反, 易发生雪崩击穿。

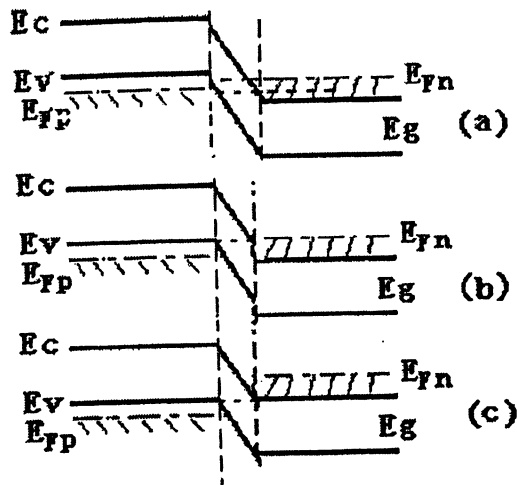
12. 从能带图出发, 分析 p-n 结隧道效应的基本原理, 隧道二极管与一般 p-n 二极管的伏-安特性有什么不同? 它有什么优点?

答:

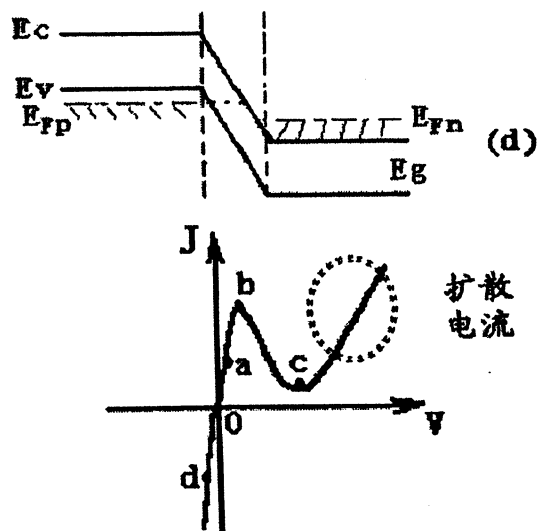
热平衡（无外加电压）



加正向电压的情况



加反向电压的情况



*原理：当p-n结的两边都是重掺杂时：(1) 费米能级分别进入导带和价带。(2) 势垒十分薄。

在外加正向或反向电压下，有些载流子将可能穿透势垒产生额外的电流。—隧道电流。

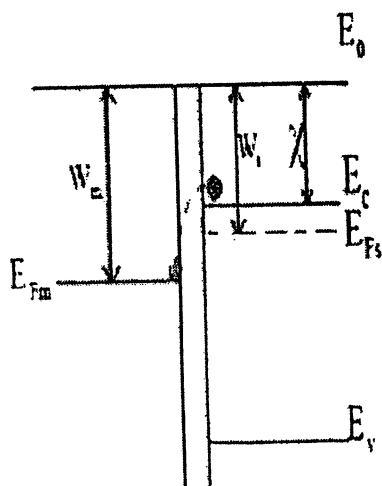
*优点：温度影响小、高频特性良好。应用于低噪声高频放大器及高频振荡器中，也可以被应用于高速开关电路中。

13. 金属与半导体两系统接触前后的能带图，指出何种为肖特基接触，何种为欧姆接触。

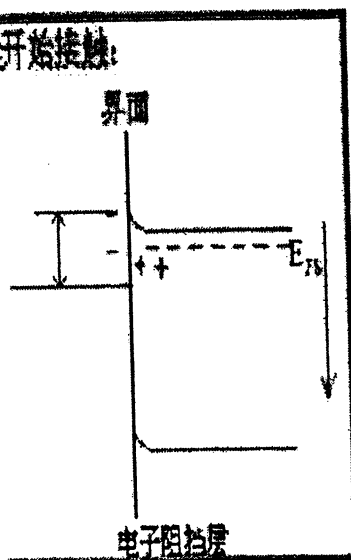
答：

肖特基接触 ($W_m > W_s$)

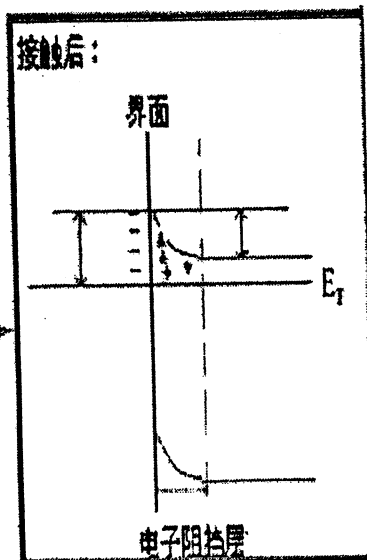
接触前：



开始接触：

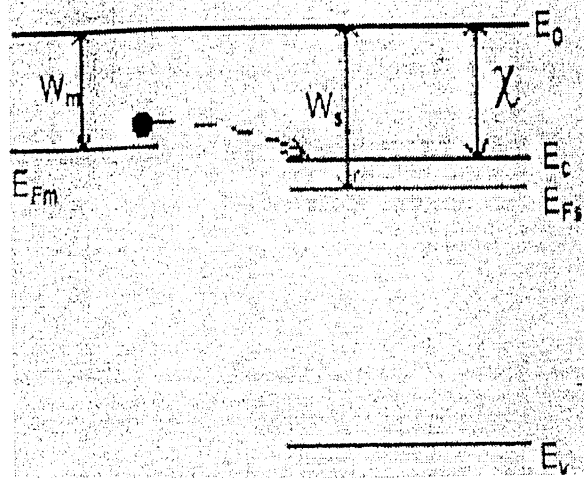


接触后：

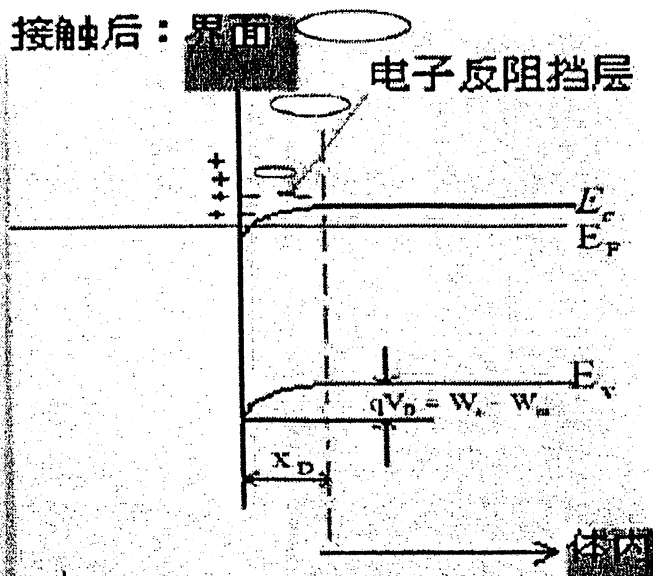


欧姆接触 ($W_m < W_s$)

接触前:



接触后:



14. 实际半导体通过什么方式实行欧姆接触?

答: 主要是利用隧道效应的原理在半导体上制造欧姆接触。
由于表面态的影响，采用重掺杂半导体与金属接触。

15. 比较 pn 结和肖特基结伏安特性的主要异同点。为什么肖特基结更适应高频条件下使用?

答: *肖特基结具有与 p-n 结相似的整流特性，但是 SDB 的正向开启电压比 p-n 的低；而反向饱和电流比 p-n 的大。这是因为多数载流子电流远高于少数载流子电流；肖特基结是多数载流子器件，而 p-n 结二极管电流取决于非平衡少数载流子的扩散运动。

*p-n 结二极管中，少数载流子注入造成非平衡载流子在势垒区两侧界面的积累，外加电压变化，电荷积累和消失需有一弛豫过程(电荷存储效应)，严重影响了 p-n 结二极管的高频性能。而肖特基结器件不发生电荷存储现象，使得它在高频、高速器件中有重要作用。