

复习资料

基础知识

1. 导体、绝缘体和半导体的能带结构有什么不同？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：导体有不满带，绝缘体和半导体都只有满带和空带，但半导体禁带宽度较小。半导体是两种载流子时参与导电，而金属只有电子导电。

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：当满带附近有空状态 k' 时，整个能带中的电流，以及电流在外场作用下的变化，完全如同存在一个带正电荷 q 和具有正有效质量 $|m_n^*|$ 、速度为 $v(k')$ 的粒子的情况一样，这样假想的粒子称为空穴。

3. 半导体材料的一般特性。

答：1. 半导体的导电能力介于导体与绝缘体之间
2. 半导体受外界光和热的刺激时，其导电能力将会有显著变化。
3. 在纯净半导体中，加入微量的杂质，其导电能力会急剧增强。

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。

答：玻耳兹曼分布仅适用于非简并半导体，而费米分布均适用。
当 $E - E_F \gg kT$ 时，前者可以过度到后者。
通常情况下，半导体都处于轻掺杂状态，因此满足 $E - E_F \gg kT$ 的条件，所以适用玻耳兹曼分布。

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。

6. 何谓准费米能级？它和费米能级的区别是什么？

答：半导体处于非平衡态时，导带电子和价带空穴不再有统一的费米能级，但可以认为它们各自达到平衡，相应的费米能级称为电子和空穴的准费米能级。

一个处于非平衡态，一个处于平衡态。

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

特点：GaAs 是直接带隙半导体，而区分 Si、Ge 的依据就是 Ge 的禁带宽度比 Si 的小。

GaAs 优势： E_g 大，适用于高温

能量利用效率高，可做发光器件。

有多个能谷的存在，存在耿氏效应，适用于高频器件。

8. 重空穴，轻空穴的概念。

答：如取负号，则得到有效质量较大的空穴，称为重空穴。如取正号，则得到有效质量较小的空穴，称为轻空穴。

9. 有效质量、状态密度有效质量、电导有效质量概念。

答：载流子在晶体中的表观质量，它体现了周期场对电子运动的影响。其物理意义：1) 有效质量的大小仍然是惯性大小的量度；2) 有效质量反映了电子在晶格与外场之间能量和动量的传递，因此可正可负。

这两质量都不是真正或实际的质量，是为了求各向异性情况时，与同性情况表达式统一起来记忆，简化和方便理解物理意义引入的；前者 m_{dn} 和 m_{dp} ，为了求导带底部(价带顶部)附近电子(空穴)的能带密度引入的，与椭圆数、横向和纵向有效质量有关(与价带重空穴和轻空穴有关)；后者电导有效质量 m_c ，对于硅和锗而言的导带，与横向和纵向有效质量关系的表达式，要记住，为了可以使多能谷且等能面为椭球的(各向异性)半导体与单能谷且等能面为球面的(各向同性)半导体的电导率表达式，统一起来记忆和理解引入的。

10. 什么是本征半导体和本征激发？

答：没有杂质和缺陷的纯净的半导体。

当半导体的温度 $T > 0K$ 时，有电子从价带激发到导带去，同时价带中产生了空穴，这就是所谓的本征激发。本征激发的容易程度受到禁带宽度的影响。

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-----在半导体中起施予电子作用的杂质。

受主-----在半导体中起接受电子作用的杂质。

浅能级杂质-----杂质能级位于半导体禁带中靠近导带底或价带顶，即杂质电离能很低的杂质。浅能级杂质对半导体的导电性质有较大的影响。

深能级杂质-----杂质能级位于半导体禁带中远离导带底(施主)或价带顶(受主)，

即杂质电离能很大的杂质。深能级杂质对半导体导电性质影响较小，但对半导体中非平衡载流子的复合过程有重要作用。位于半导体禁带中央能级附近的深能级杂质是有效的复合中心。

浅能级杂质的主要作用是调节载流子浓度，深能级杂质的主要作用复合中心。

12. 何谓杂质补偿？举例说明有何实际应用。

答：半导体中同时存在施主杂质和受主杂质时，它们之间有相互抵消的作用——杂质补偿作用。

应用：PN 结

13. 金原子的带电状态与浅能级杂质的关系？

答：金原子一般做复合中心，是深能级杂质。

首先我们要知道，金是一种深能级杂质，它的一些知识点，它既可以做为施主杂质也可以作为受主杂质，以及它的作用，调节非少子寿命的，我们曾讲过光开关的例子。再来分析，例如，浅能级为 n 型半导体，掺杂的是磷 p，为施主杂质，当金作为受主杂质时，首先发生杂质补偿作用，施主杂质的电子跃迁到受主杂质能级上，然后在温度下，剩下的施主杂质电离后激发到导带上去，这时使得金是带负电的；当金作为施主杂质时，在电离时，首先电离 p 施主杂质，全电离，如果温度还挺高，还会发生金施主杂质电离，金能级上电子激发到导带上而这时电离后金带正电（如果温度再高，才会发生本征激发，价带电子激发到导带上，价带产生空穴，导带产生电子）。同理，分析 p 型半导体，金作为施主和受主情况，带点情况。

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

15. 重掺杂的半导体其能带结构会发生何种变化？

在重掺杂的简并半导体中, 杂质浓度很高. 杂质原子相互靠近, 被杂质原子束缚的电子的波函数显著重叠, 这时电子作共有化运动. 那么, 杂质能级扩展为杂质能带.

杂质能带中的电子, 可以通过杂质原子间共有化运动参加导电——杂质带导电.

大量杂质中心的电势会影响晶体周期势场, 从而对能带产生扰动, 使得在禁带中靠近导带或价带处出现带尾。

当杂质能带展宽, 并与导带底或价带顶连接上时, 相当于禁带宽度变窄。

16. 何谓非简并半导体、简并半导体？简并化条件？

当掺杂浓度很高时, 会使 E_F 接近或进入了导带——半导体简并化了.

$E_C - E_F > 2k_0T$	非简并
$0 < E_C - E_F \leq 2k_0T$	弱简并
$E_C - E_F \leq 0$	简并

17. 写出热平衡时, 非简并半导体的表达式, n_0 、 p_0 用 n_i 表示的表达式。

18. n 型、p 型（包括同时含有施主和受主杂质）半导体的电中性方程。

$$n_0 + p_A^- = p_0 + n_D^+$$

19. 解释载流子浓度随温度的变化关系, 并说明为什么高温下半导体器件无法工作。

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

高温下，本征激发占主要地位，不受人的控制，器件不能再按预期一样正常工作。

载流子的各种运动

1. 何谓直接复合？间接复合？

直接复合：导带电子与价带空穴直接复合。

间接复合：通过禁带中的复合中心过渡进行复合。

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。

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。

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。

5. 半导体的主要散射机制？温度对它们的影响，原因？

散射是指运动粒子受到力场（或势场）的作用时运动状态发生变化的一种现象。

电离杂质散射： $T \uparrow \rightarrow v_{\text{载}} \uparrow \rightarrow \text{越易掠过杂质中心} \rightarrow P_i \downarrow$

晶格振动散射： $T \uparrow \rightarrow \text{晶格振动} \uparrow \rightarrow \text{晶格散射} \uparrow \rightarrow P_L \uparrow$

6. 何谓漂移运动？

答：半导体中的载流子在外场的作用下，作定向运动

7. 迁移率的定义、量纲。影响迁移率的因素。

单位电场下，载流子的平均漂移速度。迁移率的大小反映了载流子迁移的难易程度。

$$(cm^2 / V \cdot s)$$

迁移率 \sim 杂质浓度，迁移率 \sim 温度

8. 解释迁移率与杂质浓度、温度的关系。

1. 迁移率 \sim 杂质浓度

(1) 轻掺杂对迁移率影响很小

(2) 杂质浓度 $\uparrow \rightarrow$ 电离杂质散射 $\uparrow \rightarrow$ 迁移率 \downarrow

2. 迁移率 \sim 温度

(1) 掺杂很轻：忽略电离杂质散射

$T \uparrow \rightarrow$ 晶格振动散射 $\uparrow \rightarrow \mu \downarrow$

(2) 一般掺杂情况：

低温： 电离杂质散射为主

$T \uparrow \rightarrow$ 电离杂质散射 $\downarrow \rightarrow \mu \uparrow$

高温： 晶格振动散射为主

$T \uparrow \rightarrow$ 晶格振动散射 $\uparrow \rightarrow \mu \downarrow$

9. 解释电阻率随温度的变化关系。



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

11. 何谓热载流子？

在如此强的电场下, $T_e > T_l$ 的载流子称为 热载流子。

强电下的载流子

12. 载流子在什么情况下做扩散运动？扩散系数的定义、量纲。

载流子依靠浓度梯度所产生的一种定向运动/。

D_n --电子扩散系数 cm^2/s (反映了非少子扩散本领的大小)

13. 爱因斯坦关系式？理解推导过程。

$$\frac{D}{\mu} = \frac{k_0 T}{q}$$

14. 扩散长度和牵引长度的定义。

扩散长度：非平衡载流子深入样品的平均距离

牵引长度：在外加电场下在寿命时间内所漂移的距离

2--半导体中的载流子，在浓度梯度的作用下其深入样品的平均距离称为扩散长度，在外加电场的作用其深入样品的平均距离称为牵引长度。

15. 在不同条件下，对连续性方程进行化简。

(1) 光照恒定	$\frac{\partial n}{\partial t} = 0$
(2) 材料掺杂均匀	$\frac{\partial n}{\partial x} = \frac{\partial \Delta n}{\partial x}$
(3) 外加电场均匀	$\frac{d\varepsilon}{dx} = 0$
(4) 光照恒定，且被半导体均匀吸收 (光均匀照射在半导体上)	$\frac{\partial n}{\partial t} = 0 \quad \frac{\partial \Delta n}{\partial x} = 0$
(5) 材料均匀	$\Delta p = p, \Delta n = n$

16. 平均自由时间、非平衡载流子寿命概念。

平均自由时间：粒子在两次散射之间经历的平均时间，其倒数即为散射几率。

非平衡载流子的平均生存时间——非平衡载流子的寿命 τ 。

17. 平均自由程与扩散长度概念。

相邻两次碰撞之间的平均距离，即称为载流子的平均自由程

扩散长度：非平衡载流子深入样品的平均距离

18. 小注入、大注入概念。

小注入： $\Delta p \ll (n_0 + p_0)$

大注入： $\Delta p \gg (n_0 + p_0)$

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。

光、热、磁、力和杂质浓度

2. 请说出判断半导体导电类型的实验方法。

温差效应（利用热探针法判断半导体导电类型）和霍尔效应

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。

当 p 型半导体和 n 型半导体接触在一起时,扩散和漂移这一对相反的运动最终达到动态平衡，相当于两个区之间没有电荷运动，空间电荷区的宽度固定不变。在两者的交界面处存在着一个过渡区，通常称为 p-n 结。

4. 内建电势差 V_D 的公式。分析影响接触电势差的因素。

$$V_D = \frac{k_0 T}{q} \ln \frac{n_{n0}}{n_{p0}} = \frac{k_0 T}{q} \ln \frac{n_{n0} p_{p0}}{n_i^2}$$

势垒区高度 $qV_D \sim N_D, N_A, E_g$

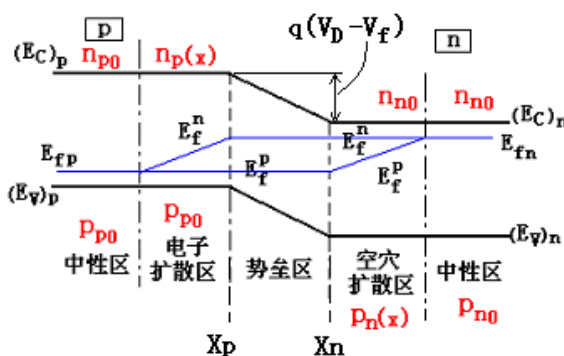
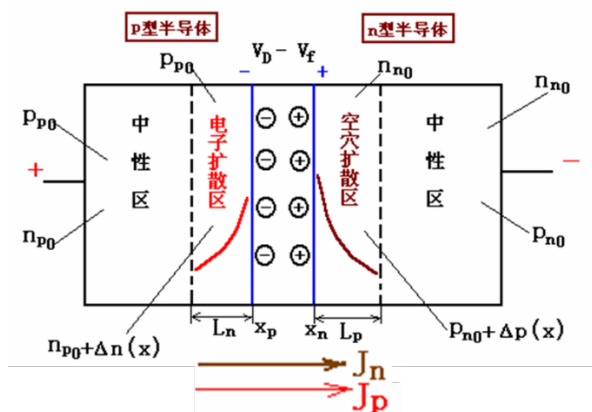
5. 平衡 p-n 结，正向偏置 p-n 结，反向偏置 p-n 结的空间图、能带图，各区域载流子浓度表达式、载流子运动方向、电流方向。

平衡 p-n 结

$$n(x) = n_{n0} e^{-\frac{qV_D - qV(x)}{k_0 T}} \quad n(x) = n_{p0} e^{\frac{qV(x)}{k_0 T}}$$

$$p(x) = p_{n0} e^{\frac{qV_D - qV(x)}{k_0 T}} \quad p(x) = p_{p0} e^{-\frac{qV(x)}{k_0 T}}$$

正偏：

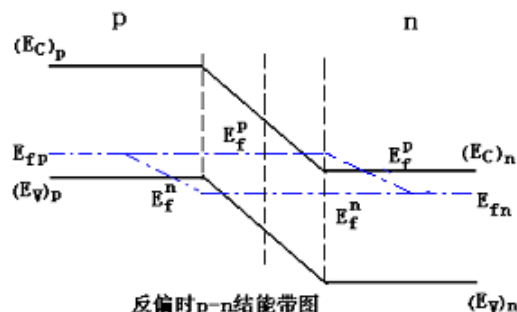
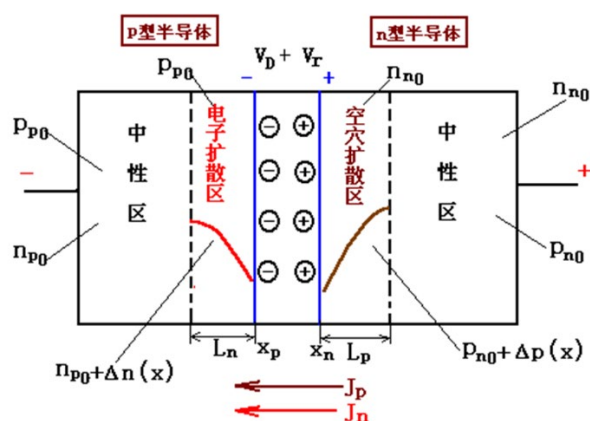


$$J_p(x_n) = -qD_p \frac{d\Delta p(x)}{dx} \Big|_{x_n} = q \frac{D_p}{L_n} \Delta p(x_n)$$

$$J_n(-\mathbf{x}_p) = qD_n \left. \frac{d\Delta n(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}} \right|_{x_p} = q \frac{D_n}{L_n} \Delta n(-\mathbf{x}_p)$$

两者之和为正偏电流 $\therefore p-n$ 结的正向电流 $J_f \approx J_s e^{\frac{qV_f}{k_0T}}$

反偏:



一般 $qV_r \gg k_0T$, 那么 $J_r = -J_s$

6. 分别说明空间电荷区、耗尽区、势垒区的三个概念。（一个意思）

空间电荷区也称耗尽层，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。

7. 理想 p-n 结 I-V 方程。

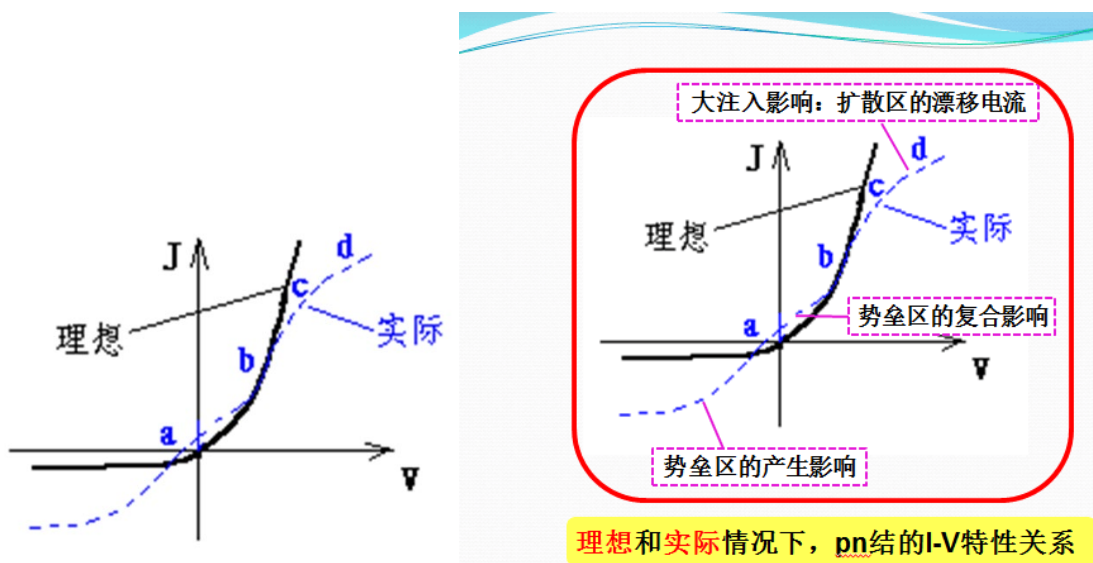
(3) I-V characteristic of a p-n junction

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：

$$J = J_s \left(e^{\frac{qV}{k_0T}} - 1 \right) \begin{cases} \text{正向: } V = V_f \\ \text{反向: } V = -V_r \end{cases} \begin{cases} |qV| \gg k_0T \\ \end{cases} \begin{cases} J_{\text{正向}} = J_s e^{\frac{qV}{k_0T}} \\ J_{\text{反向}} = -J_s \end{cases}$$

$$J_s = q \left(\frac{n_{p0} D_n}{L_n} + \frac{p_{n0} D_p}{L_p} \right) \quad \text{反向饱和电流密度}$$

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。



原因：（1）正向小电压时忽略了势垒区的复合电流；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？

p-n 结电容包括势垒电容和扩散电容两部分

大正向偏置 p-n 结时，以 C_D 为主， $C_j \approx C_D$

小正向偏置或反向偏置 p-n 结时，以 C_T 为主， $C_j \approx C_T$

（看内建电场，大正偏有分压）

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。

$$C_T = A \left[\frac{eq}{2} \times \frac{1}{V_D - V} \times \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right]^{1/2} \quad C_D = \frac{Aq^2}{kT} (L_p p_{n0} + L_n n_{p0}) e^{\frac{q}{kT} V}$$

C_T 与 C_D 都与 p-n 结的面积 A 成正比，且随外加电压 V 而变化。

影响：不做高频器件

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。

击穿 { 热击穿
电击穿 { 雪崩击穿
齐纳击穿

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，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。

影响雪崩击穿电压的主要因素:

1. 掺杂浓度: 掺杂浓度高, 击穿电压小。

杂质浓度高—空间电荷区电场强大—载流子能够获得更大动能—利于雪崩倍增

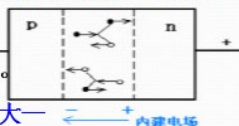
但, 杂质浓度很高—势垒区宽度小—不易完成载流子加速过程—不利于雪崩倍增

$$E_{\max} = -\frac{qN_D}{\epsilon_r \epsilon_0} x_n$$

$$= -\frac{qN_A}{\epsilon_r \epsilon_0} x_p$$

2. 禁带宽度: 禁带宽度越宽, 击穿电压越大。

禁带宽度大—碰撞电离产生电子-空穴对所需能量大—不利于雪崩倍增



3. 温度: 温度升高, 击穿电压增大 (正温度系数)

温度升高—晶格振动散射增加—电子、空穴获得的能量易损失—不利于雪崩倍增效应

齐纳击穿 是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。

影响齐纳击穿电压的主要因素:

1. 掺杂浓度: 掺杂浓度大, 击穿电压小。

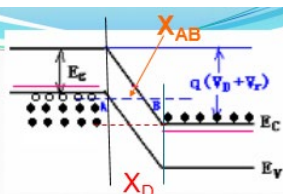
杂质浓度高—势垒区宽度窄—隧道长度短—易发生隧道击穿

2. 禁带宽度: 禁带宽度越宽, 击穿电压越大。

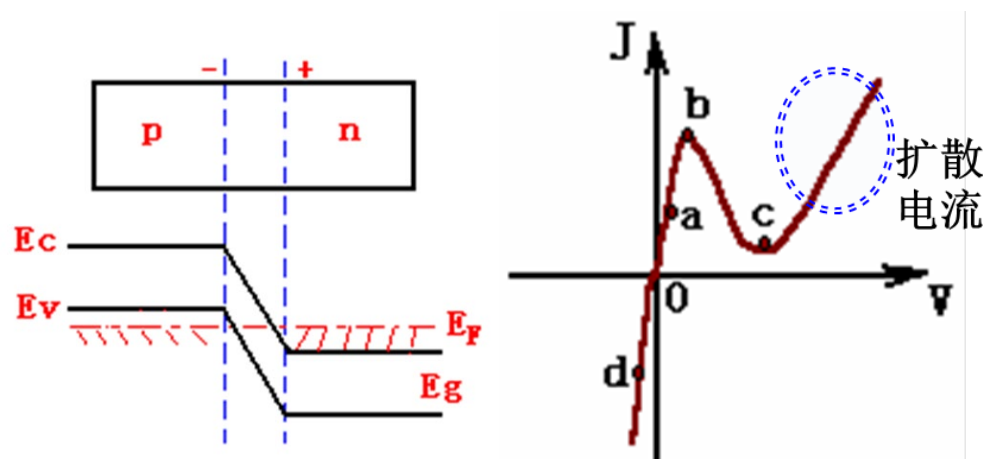
禁带宽度大—隧道长度变长—不易隧道击穿

3. 温度: 温度升高, 击穿电压下降 (负温度系数)。

温度升高—禁带宽度变窄—势垒区宽度变小—隧道长度变短



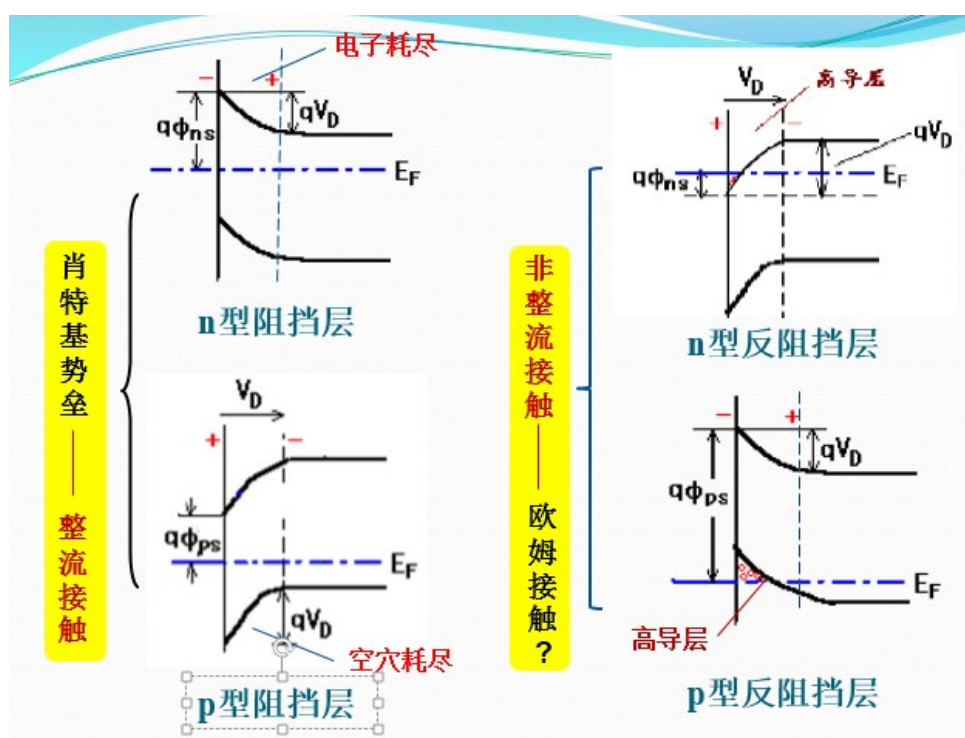
12. 从能带图出发, 分析 p-n 结隧道效应的基本原理, 隧道二极管与一般 p-n 二极管的伏-安特性有什么不同? 它有什么优点?



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(其工作频率可达毫米波段),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。



14. 实际半导体通过什么方式实行欧姆接触？

在生产实际中，主要是利用隧道效应的原理在半导体上制造欧姆接触。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？

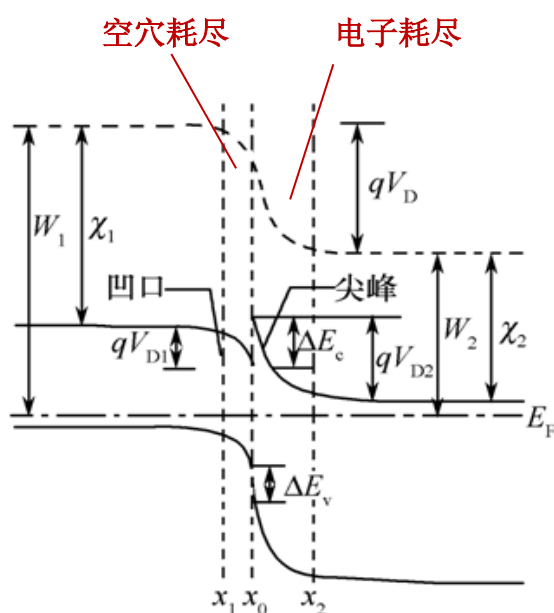
(2) 与p-n结二极管的比较

主要特点是：

1. SDB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.

2. 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. SDB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。

16. 异质结能带结构特点及应用。



(b) 接触后能带图

异质结的主要特点

1. 可提高注入比
2. 窗口效应
3. 限制光子的光波导壁界
4. 限制载流子的势垒

窗口效应应用：1. 太阳能电池
2. 发光二极管