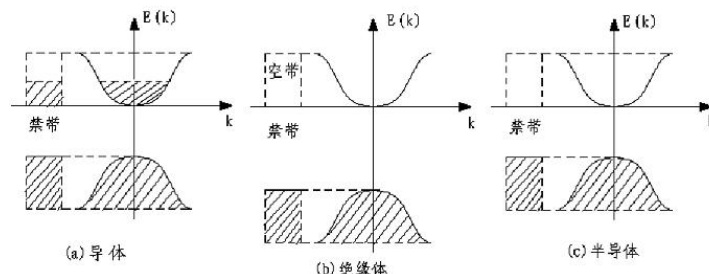


a 基础知识

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？

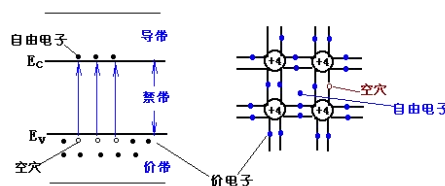


导体能带中一定有不**满带**；绝缘体能带中只有**满带**和**空带**，禁带宽度较宽一般大于 2eV ；半导体 $T=0\text{K}$ 时，能带中只有满带和空带， $T>0\text{K}$ 时，能带中有不满带，禁带宽度较小，一般小于 2eV 。（能带状况会发生变化）

半导体的导带没有电子，但其价带中电子吸收能量，会跃迁至导带，价带中也会剩余空穴。在外电场的情况下，跃迁到导带中的**电子**和价带中的**空穴**都会**参与导电**。而金属中价带电子是非满带，在外场的作用下直接产生电流。

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。

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 e 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。

- (1) 电阻率介于导体与绝缘体之间
- (2) 对温度、光照、电场、磁场、湿度等敏感
- (3) 性质与掺杂密切相关

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？

麦克斯韦-玻尔兹曼统计的粒子是**可分辨的**；费米-狄拉克统计的粒子**不可分辨**，而且每个状态只可能占据一个粒子。低掺杂半导体中载流子遵循玻尔兹曼分布，称为**非简并性系统**；高掺杂半导体中载流子遵循费米分布，称为**简并性系统**。

$$\text{费米分布: } f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{k_0 T}\right)} \quad \text{玻耳兹曼分布: } f(E) = e^{-\frac{E - E_F}{k_0 T}}$$

$$\text{空穴分布函数: } f_v(E) = 1 - f(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{k_0 T}\right) + 1} \quad (\text{能态 } E \text{ 不被电子占据的几率})$$

当 $E - E_F \gg k_0 T$ 时有 $\exp\left(\frac{E - E_F}{k_0 T}\right) \gg 1$ ，所以 $1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{k_0 T}\right) \approx \exp\left(\frac{E - E_F}{k_0 T}\right)$ ，则费米分布函数

转化为 $f(E) = e^{-\frac{E - E_F}{k_0 T}}$ ，即玻耳兹曼分布。

半导体中常见费米能级 E_F 位于禁带中，满足 $E - E_F \gg k_0 T$ 的条件，因此导带和价带中的所有量子态来说，电子和空穴都可以用玻耳兹曼分布描述。

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。

靠近费米能级的能带上的载流子远大于远离费米能级那边，因此将该能带上的载流子称为多数载流子简称多子。反之则为少数载流子，简称少子。

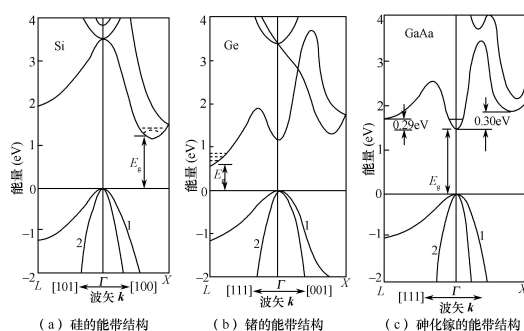
受热不均匀时，费米能级产生倾斜，导致电子从能量高的一侧流向能量低的一侧。

费米能级分裂时，有非平衡载流子产生。

6.何谓准费米能级？它和费米能级的区别是什么？

当外界有大能量注入，或很多载流子注入时，载流子数量会发生突然的变化。不在遵循费米分布，费米能级暂时失灵，将这种情形下的载流子称为非平衡载流子。非平衡态下，统一的费米能级分裂为导带费米能级和价带费米能级，称其为准费米能级

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。



锗、硅的导带在简约布里渊区分别存在四个（8个半个的椭球等能面）和六个能量最小值，导带电子主要分布在这些极值附件，称为锗、硅的导带具有**多能谷结构**。

硅和锗的导带底和价带顶在 k 空间处于不同的 k 值，电子跃迁时伴随着声子的发射和吸收，称为**间接带隙半导体**。适用于制作半导体器件。

砷化镓的导带底和价带顶位于 k 空间的同一 k 值，电子发生跃迁时，仅电子的能量发生变化，称为**直接带隙半导体**。用于制备**发光器件**时，其内部量子效率较高。

8.重空穴，轻空穴的概念。

当存在极大值相重合的两个价带时，外能带**曲率小**，对应的**有效质量大**，称该能带中的空穴为**重空穴** ($m_p)_h$ ；内能带**曲率大**，对应的**有效质量小**，称该能带中的空穴为**轻空穴** ($m_p)_l$ 。

9.有效质量、状态密度有效质量、电导有效质量概念。

有效质量概括了**半导体内部势场**的作用，使得我们在解决电子的运动规律时不涉及内部势场作用。

$$\text{有效质量: } \frac{1}{m_n^*} = \frac{1}{\hbar^2} \cdot \frac{d^2 E}{dk^2}$$

$$\text{电导有效质量: } \frac{1}{m_c} = \frac{1}{3} \left(\frac{2}{m_t} + \frac{1}{m_l} \right)$$

状态密度有效质量:

$$\text{导带底电子能态密度有效质量: } m_{dn} = s^{\frac{2}{3}} (m_l m_t^2)^{\frac{1}{3}}:$$

$$\text{价带顶空穴能态密度有效质量: } m_{dp} = \left[(m_p)_l^{\frac{3}{2}} + (m_p)_h^{\frac{3}{2}} \right]^{\frac{2}{3}}$$

10.什么是本征半导体和本征激发？

本征半导体：没有杂质和缺陷的纯净半导体。

本征激发：T>0K 时，**电子通过热运动**从价带激发到导带，同时价带中产生空穴。

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。

施主杂质：电离时能够释放电子而产生导电电子，并形成正电中心的杂质。

受主杂质：电离时能够获取电子而产生导电空穴，并形成负电中心的杂质。

浅能级杂质：电离能小的杂质称为浅能级杂质。所谓浅能级，是指施主能级靠近导带底，受主能级靠近价带顶。可以通过控制掺杂杂质数量控制载流子数量，并可以通过补偿掺杂进行追加式的浓度控制。

深能级杂质：非 III、V 族元素在硅、锗的禁带中产生的施主能级距离导带底较远和受主能级距离价带顶较远，形成深能级，称为深能级杂质。深能级能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。

半导体中同时存在施主杂质和受主杂质时，施主和受主之间有相互抵消的作用。利用杂质的补偿作用，根据扩散或离子注入的方法来改变半导体某一区域的导电类型，制成各种器件。在一块 n 型半导体基片的一侧掺入较高浓度的受主杂质，由于杂质的补偿作用，该区就成为 p 型半导体。

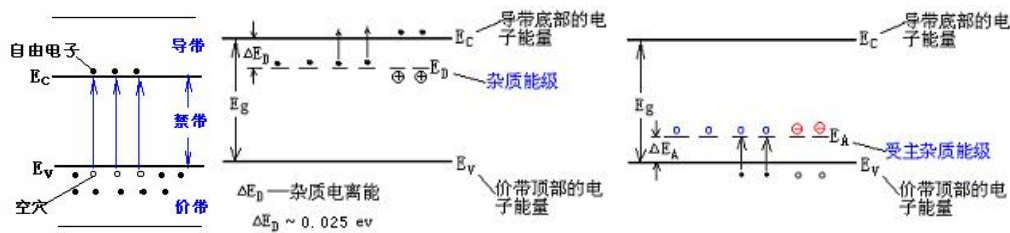
13.金原子的带电状态与浅能级杂质的关系？

不容易电离，对载流子浓度影响不大。

深能级杂质能够产生多次电离，每次电离均对应一个能级，甚至既产生施主能级也产生受主能级。

深能级杂质的复合作用比浅能级杂质强，可作为复合中心。

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？

非简并半导体：可用玻尔兹曼分布近似费米分布的半导体。

简并半导体：不可用玻尔兹曼分布近似费米分布的半导体。

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
$0 < E_c - E_F < 2k_0T$	弱简并
$E_c - E_F < 0$	简并

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

$$n_0 = N_c e^{\frac{-(E_c - E_F)}{k_0 T}}$$

$$p_0 = N_v e^{\frac{-(E_F - E_v)}{k_0 T}}$$

$$n_D^+ = \frac{N_D}{1 + 2e^{\frac{E_F - E_D}{k_0 T}}}$$

$$p_A^- = \frac{N_A}{1 + 4e^{\frac{E_A - E_F}{k_0 T}}}$$

$$n_0 = n_i e^{\frac{(E_F - E_i)}{k_0 T}}$$

$$p_0 = n_i e^{\frac{(E_i - E_F)}{k_0 T}}$$

$$n_0 p_0 = n_i^2$$

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。

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

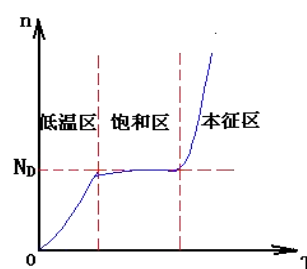
19. 解释载流子浓度随温度的变化关系，并说明为什么高温下半导体器件无法工作。

低温时半导体获得能量小于杂质电离能，杂质电离不充分。

中温时杂质完全电离，本征激发未开始，载流子浓度较稳定。

高温时始本征激发占主导作用，大量电离。

本征激发产生的载流子远多于杂质电离产生的载流子，半导体器件失去控制。



20. 温度、杂质浓度对费米能级位置的影响。

n 型半导体费米能级靠近导带底。

p 型半导体费米能级靠近价带顶。

随着温度升高，无论 n 型还是 p 型半导体都将转变为（高温）本征半导体，从而半导体中费米能级随着温度的升高逐渐趋近于禁带中央。

21. 热平衡态、非平衡态、稳态概念。

热平衡态：没有外界作用，电子的复合率等于热产生率。

非平衡态：在外界作用下，热平衡条件被破坏，偏离了热平衡状态，称为非平衡状态

稳态：外界能量恒定时为稳态。

22. 非平衡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。

$$n = N_c e^{\frac{-(E_c - E_{Fn})}{kT}} = n_i e^{\frac{(E_{Fn} - E_i)}{kT}}$$

$$p = N_v e^{\frac{-(E_{Fp} - E_v)}{kT}} = n_i e^{\frac{(E_i - E_{Fp})}{kT}}$$

$$np = n_i^2 e^{\frac{(E_{Fn} - E_{Fp})}{kT}}$$

载流子的各种运动

1.何谓直接复合？间接复合？

直接复合：导带电子直接跃迁到价带与空穴复合。

间接复合：通过位于禁带中的杂质或缺陷能级的中间过渡。

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。

复合率： $R = rnp$

产生率： $G = rn_0p_0$

净复合率： $U_d = R - G = r(np - n_0p_0)$

将 $n = n_0 + \Delta n$ 、 $p = p_0 + \Delta p$ 代入得： $U_d = r(n_0 + p_0)\Delta p + r(\Delta p)^2$

非平衡载流子寿命： $\tau = \frac{\Delta p}{U_d} = \frac{1}{r[(n_0 + p_0) + \Delta p]}$

小注入情况下 $\Delta p \ll (n_0 + p_0)$ ，则有： $\tau = \frac{\Delta p}{U_d} = \frac{1}{r(n_0 + p_0)}$

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。

$$U = \frac{1}{\tau} \frac{np - n_i^2}{(n + p) + 2n_1 \cosh\left(\frac{E_t - E_i}{k_0T}\right)}$$

$E_t = E_i$ 时双曲函数 $\cosh\left(\frac{E_t - E_i}{k_0T}\right)$ 有最小值，此时净复合率 U 取最大值，非平衡载流子的寿命达到极小值。这意味着复合中心能级 E_t 的位置越靠近禁带中央，复合中心的复合作用越强。因此，通过掺入深能级杂质来降低非平衡载流子寿命是确实有效的。

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。

$$\tau = \frac{\Delta p}{U_d} = \frac{\tau_p(n_0 + n_1) + \tau_n(p_0 + p_1)}{(n_0 + p_0)}$$

强 n 型区 ($E_t < E_F < E_c$): $\tau = \tau_p = \frac{1}{c_p N_t}$

弱 n 型区 ($E_i < E_F < E_t$): $\tau = \tau_p \cdot \frac{n_1}{n_0} = \frac{1}{c_p N_t} \cdot \frac{n_1}{n_0}$

弱 p 型区 ($E_t < E_F < E_i$): $\tau = \tau_p \cdot \frac{n_1}{p_0} = \frac{1}{c_p N_t} \cdot \frac{n_1}{p_0}$

强 p 型区 ($E_v < E_F < E_t$): $\tau = \tau_n = \frac{1}{c_n N_t}$

5.半导体的主要散射机制？温度对它们的影响，原因？

晶格振动（声子）散射： $P_s \propto T^{3/2}$ ，温度升高散射增加。温度越高电子热运动速度越大或者声子数目越多，电子遭声学波声子散射的概率越大。

电离杂质散射： $P_i \propto N_i T^{-3/2}$ ，温度升高散射减少。温度越高载流子热运动的平均速度越大，于是可以很快掠过杂质中心，偏转小，受到电离杂质的影响小。

对于杂质半导体，温度低时，电离杂质散射起主要作用；温度高时，晶格振动散射起主要作用

6. 何谓漂移运动？

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。

漂移速度 v_d ：因电场加速而获得的平均速度。

迁移率：单位电场下，载流子的平均漂移速度 ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)

$$\mu = \frac{|v_d|}{\varepsilon}$$

$$\mu_n = \frac{q\tau_n}{m_n^*}$$

$$\mu_p = \frac{q\tau_p}{m_p^*}$$

影响因素：有效质量、散射

8. 解释迁移率与杂质浓度、温度的关系。

掺杂很轻（忽略电离杂质散射）： $T \uparrow \rightarrow$ 晶格振动散射 $\uparrow \rightarrow \mu \downarrow$

一般情况低温： $T \uparrow \rightarrow$ 电离杂质散射 $\downarrow \rightarrow \mu \uparrow$

一般情况高温： $T \uparrow \rightarrow$ 晶格振动散射 $\uparrow \rightarrow \mu \downarrow$

9. 解释电阻率随温度的变化关系。

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

n （未全电离）： $T \uparrow \rightarrow n \uparrow \rightarrow \rho \downarrow$

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

n （全电离）： $n = N_D$ 饱和

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

n （本征激发开始）： $T \uparrow \rightarrow n \uparrow \rightarrow \rho \downarrow \downarrow$

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

无电场时：载流子与晶格散射，交换的净能量为零，载流子与晶格处于热平衡状态。

弱电场时：载流子从电场获得能量，与声子作用过程中，一部分通过发射声子转移给晶格，其余部分用于提高载流子的漂移速度。但漂移速度很小，仍可认为载流子系统与晶格系统近似保持热平衡状态。

电场较强时：载流子从电场获得很多能量，载流子的平均能量比热平衡状态时的大，因而载流子系统与晶格系统不再处于热平衡状态。

电场很强时：载流子从电场获得的能量与晶格散射时，以光学波声子的方式转移给了晶格。所以获得的大部分能量又消失，故平均漂移速度可以达到饱和。

GaAs 特殊性：因为 GaAs 的多能谷结构决定的。卫星能谷的曲率比中心能谷要小，因此有效质量大。当电场不强时，导带电子都集中在中心能谷，但是随着电场强度的增加，能谷 1 中的电子从电场中获得足够能量后开始转移到卫星能谷中，发生能谷间的散射。由于卫星能谷有效质量大，所以电子转移的结果使平均迁移率下降，从而出现电场强度增加漂移速度下降，即电导率下降的负微分电导区域。

11. 何谓热载流子？

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。

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。

扩散系数 D ：表征载流子在一定分布下扩散的快慢，主要由晶体内部的散射机制决定。

单位： cm^2/s

13. 爱因斯坦关系式？理解推导过程。

表征了非简并情况下载流子迁移率和扩散系数之间的关系。

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{k_0 T}{q}$$
$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{k_0 T}{q}$$

14. 扩散长度和牵引长度的定义。

扩散长度：表征少数载流子一边扩散，一边复合所能够走过的平均距离。

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

牵引长度：载流子在寿命时间内所漂移的距离。

$$L_p(\varepsilon) = \varepsilon \mu_p \tau_p$$

15. 在不同条件下，对连续性方程进行化简。

光照恒定： $\frac{\partial n}{\partial t} = 0$ $\frac{\partial p}{\partial t} = 0$

掺杂均匀： $\frac{\partial n}{\partial x} = \frac{\partial \Delta n}{\partial x}$ $\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \Delta p}{\partial x}$

电场均匀： $\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0$

均匀照射： $\frac{\partial \Delta n}{\partial x} = 0$ $\frac{\partial \Delta p}{\partial x} = 0$

16. 平均自由时间、非平衡载流子寿命概念。

平均自由时间：载流子在电场中作漂移运动时，只有在连续两次散射之间的时间内才做加速运动，这段时间称为自由时间，其平均值为平均自由时间。

非平衡载流子寿命：寿命 τ 表示光照停止之后，非平衡载流子**浓度**衰减到原来的数值 $1/e$ 所经历的时间，也表示非平衡载流子的平均生存时间。

17. 平均自由程与扩散长度概念。

扩散长度：非平衡载流子深入样品的平均距离，称为扩散长度。

平均自由程：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。

18. 小注入、大注入概念

小注入：获得能量后非平衡载流子，尤其是非平衡少子的数量远远小于原来热平衡时多子的数量，称为非平衡少子的小注入。

大注入：非平衡少子的数量已达到或超过热平衡多子的数量，那么就会出现所有的少子的总量会达到与多子总量接近的程度，产生多子不多少子不少的情形，将其称为非平衡少子的大注入。

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。

温度：温度可以影响载流子浓度和载流子的分布。低温弱电离，中文全电离，高温本征激发。温度不均匀使载流子浓度不均匀，导致扩散运动，产生温差电动势。

光照：光照使半导体吸收光子，价带电子激发到导带产生非平衡载流子，产生光生伏特效应。

磁场：霍尔效应，通了电流的半导体在垂直电流方向的磁场作用下，在与电流和磁场垂直的方向上形成电荷积累和出现电势差的现象。一些物质如半导体中的载(电)流子在一定的恒定(直流)磁场和高频磁场同时作用下会发生抗磁共振(常称回旋共振)。

外力：对半导体施加外力，使内部晶格间距发生变化，改变半导体内部势场，导致能带变化。由于载流子迁移率的变化，电阻率发生变化

2.请说出判断半导体导电类型的实验方法。

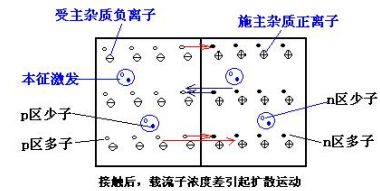
$$E_H = -Bv = R_H JB$$

n 型半导体 $R_H < 0$ ，p 型半导体 $R_H > 0$ 。

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。

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平衡，相当于两个区之间没有电荷运动，空间电荷区的厚度固定不变。在两者的界面处存在着一个过渡区，通常称为 p-n 结。

p 区空穴扩散电子漂移，n 区电子扩散空穴漂移。

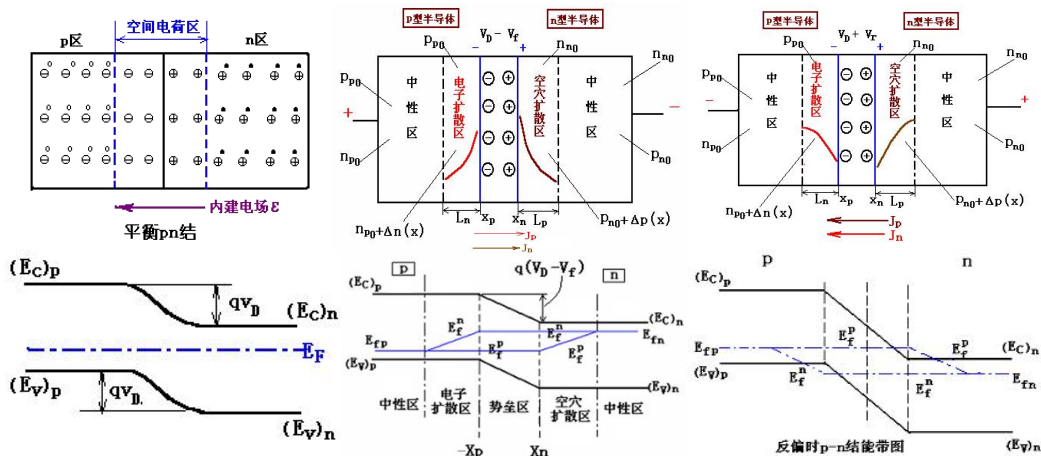


4.内建电势差 V_D 的公式。分析影响接触电势差的因素。

$$V_D = \frac{k_0 T}{q} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2}$$

接触电势差与 PN 结两侧掺杂浓度、温度、材料等参数有关。

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。



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

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

6.分别说明空间电荷区、耗尽区、势垒区的三个概念

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 区界面)产生一个很薄的电荷区, 它就是空间电荷区。

耗尽区: 耗尽区是指在半导体 pn 结、肖特基结、异质结中, 由于界面两侧半导体原有化学势的差异导致界面附近**能带弯曲**, 从而形成**能带弯曲区域**电子或空穴浓度的下降的界面区域。

势垒区: 存在内建电场的区域就是势垒区。

7.理想 p-n 结 I-V 方程。

$$J_s = \frac{qD_n}{L_n} n_{p0} + \frac{qD_p}{L_p} p_{n0}$$
$$J = J_s (e^{\frac{qV}{k_0T}} - 1)$$

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。

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。

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?

势垒电容: 由于势垒区电荷变化导致的 p-n 结电容, 记为 C_T 。反偏电压越大, 势垒电容越大。

扩散区电容: 由于扩散区电荷变化导致的 p-n 结电容, 记为 C_D 。正偏电压越大, 扩散区电容越大, 因为只有此时扩散区才存在足够多数量的非平衡少数子。

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 与 C_D 都与 p-n 结的面积 A 成正比, 与掺杂浓度有关, 且随外加电压而变化。寄生电容能短路高频信号。寄生电容会使 p-n 结的整流特性显著削弱甚至消除。

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

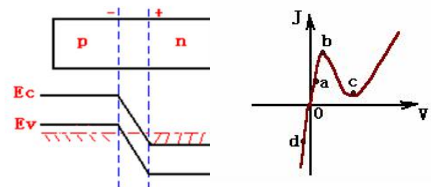
雪崩击穿: p-n 结中的电场随着反向电压的增加而增加, 少数载流子通过反向扩散进入势垒区时获得的动能也就越来越大, 当载流子的动能大到一定数值后, 与中性原子碰撞时, 可以把中性原子的价电子激发到导带, 形成电子-空穴对——**碰撞电离**。连锁反应使载流子的数量倍增式的急剧增多, 因而 p-n 结的反向电流也急剧增大, 形成了**雪崩击穿**。掺杂浓度大, 击穿电压小。禁带宽度越宽, 击穿电压越大。温度升高, 击穿电压增大。

齐纳击穿: 根据量子力学的观点, 当隧道长度 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, 势垒区长度 X_{AB} 变得更窄。造成很大的反向电流, 使 p-n 结击穿。掺杂浓度大, 击穿电压小。禁带宽度越宽, 击穿电压越大。温度升高, 击穿电压下降。

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

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**。

隧道二极管优点是开关特性好, 速度快、工作频率高。



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 (**金半接触**)。

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?

(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。

(3) 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。SDB 中通常存在额外的漏电流。

16. 异质结能带结构特点及应用

