第一课：导论

Monday, August 26, 2019 05:26

1. 主讲教师：李贤斌
    a. E-Mail：lixianbin@jlu.edu.cn
2. 选用教材：《半导体物理学》，孟宪章
    a. 参考教材：
        i. 《半导体物理学》，刘恩科，国防工业出版社；
        ii. 《半导体物理与器件-基本原理(英文第三版)》，Donald A. Neamen，清华大学出版社；
3. PPT到27页。

第二课：晶体结构

Wednesday, August 28, 2019 1:21 PM

1. 期中考试(重理解图像)：
   a. 第二章(自学)；
   b. 第三章；
   c. 第四章；
2. 期末考试(理解图像和演算并重)；
3. 基矢：确定原胞(晶胞)大小的矢量。原胞(晶胞)以基矢为周期排列，因此，基矢的大小为晶格常数；
4. 格矢：
   a. $\vec{R} = p\vec{a} + q\vec{b}$(p,q为整数)；
   b. $\vec{\mathrm{R}} = \mathrm{p}\vec{\mathrm{a}} + \mathrm{q}\vec{\mathrm{b}} + \mathrm{s}\vec{\mathrm{c}}$(p,q,s为整数)；
5. 晶格：由平移矢量R形成的有规则排列的空间点阵；
6. 格点：以R指定的点，称为格点；即空间点阵中的点；
7. 晶胞：晶体中最小的重复单元；
8. 原胞：只含有一个格点的晶胞；
9. 正格子：实空间中，晶体中的原子排列成的晶格点阵，称为正格子；
10. 倒格子**(VIP)**：为了方便描述和讨论晶体中传播的晶格振动或电子的运动及其状态等，引入的一个与正格子相关联的空间关系。描述倒格子所存在的空间也称为倒空间或K空间(K为波矢量)；
    a. $\frac{1}{L}, \frac{2\pi}{\lambda} = k, p = \bar{h}k;$
    b. 电子状态：$\mathrm{E}, \mathrm{k}, \Phi$ ；
    c. 假设倒格子的基矢为$\vec{\mathrm{b}}_1, \vec{\mathrm{b}}_2, \vec{\mathrm{b}}_3$，它们与正格子基矢$\vec{\mathrm{a}}_1, \vec{\mathrm{a}}_2, \vec{\mathrm{a}}_3$的关系为：

$$\vec{b}_1 \cdot \vec{a}_1 = \vec{b}_2 \cdot \vec{a}_2 = \vec{b}_3 \cdot \vec{a}_3 = 2\pi$$

$$\vec{b}_1 \cdot \vec{a}_2 = \vec{b}_1 \cdot \vec{a}_3 = \vec{b}_2 \cdot \vec{a}_3 = \vec{b}_2 \cdot \vec{a}_1 = \vec{b}_3 \cdot \vec{a}_1 = 0$$

或写成：

$$\vec{b}_i \cdot \vec{a}_j = 2\pi\delta_{ij} \quad (i,j = 1,2,3)$$

其中：

$$\vec{b}_1 = 2\pi \frac{\vec{a}_2 \times \vec{a}_3}{\vec{a}_1 \cdot \vec{a}_2 \times \vec{a}_3}$$

$$\vec{b}_2 = 2\pi \frac{\vec{a}_3 \times \vec{a}_1}{\vec{a}_1 \cdot \vec{a}_2 \times \vec{a}_3}$$

$$\vec{b}_3 = 2\pi \frac{\vec{a}_1 \times \vec{a}_2}{\vec{a}_1 \cdot \vec{a}_2 \times \vec{a}_3}$$

第三课：半导体中的电子状态

Monday, September 2, 2019 5:30 AM

1. 半导体的物理性质与半导体中的电子状态，特别是与电子的能量谱值有密切关系；
2. 孤立原子中的电子：只受原子核和该原子其它电子的势场作用，其能量是分立能级；
3. 自由电子(完全自由的)：由于不受任何外力的作用，在恒定为零的势场中运动，能量是连续的；
4. 晶体中的电子：在周期性势场中运动，能量为一系列密集能级组成的能带，能带与能带之间为禁带；
5. 能带理论：采用单电子近似来确定半导体中电子状态的理论，得出的电子的能量谱值组成能带；
6. 电子的共有化运动(重要)：当原子和原子相互接近形成晶体时，不同原子的内外各层轨道将发生程度不同的交叠。由于电子轨道的重叠，原来属于某一原子的电子不再局限于这个原子，它可以转移到相邻的原子上去，电子在相邻的原子之间转移，这表明电子可以在整个晶体中运动，晶体中电子的这种运动称为电子的共有化运动；
7. 电子共有化运动的特点：
   a. 外层电子轨道重叠大，共有化运动显著；
   b. 无外力作用时，电子只能在能量相同的轨道内运动；
8. 晶体中电子共有化运动时的能量：能量是简并的；
9. 简并：如果对应于魔偶一个本征值的本征函数不止一个(不考虑相位因素造成的区别)，我们就说该算符对于这个本征值时简并的；同理认为，对应于某一能量为E的能级，存在不同的波函数(不同的电子)，则称体系在这一能级上简并；
10. 能带的形成：原子相互靠近时，由于之间的相互作用使简并解除，原来具有相同能量的能级分裂成具有不同能量的一些能级组成的带(准连续)，成为能带。原子之间的距离愈小它们之间的相互作用愈强，能带的宽度也愈大；
11. 定性理论(物理概念)：晶体中原子之间的相互作用，使能级分裂形成能带；
12. 定量理论(量子力学计算)：电子在周期场中运动，其能量不连续形成能带；
13. 能带(Energy Band)：允带和禁带；
14. 允带(Allowed Band)：允许电子能量存在的能量范围；
    a. 空带：未被电子占据的允带；
    b. 满带：允带中的能量状态(能级)均被电子占据；
    c. 导带：电子未占满的允带(有部分电子)；
    d. 价带：被价电子占据的允带(低温下通常被价电子占满)；
15. 禁带：不允许电子能量存在的能量范围；
16. 形成能带后电子态数目保持不变，每个电子态不再属于个别原子，而是延展于整个晶体；
17. 布洛赫定理(重要)：在周期性势场中运动的电子，若势函数V(x)具有晶格的周期性，即：$V(x+na)=V(x)$，则晶体中电子的波函数ψ；(需要补充)
18. 布里渊区；

第四课：半导体中的电子状态

Wednesday, September 4, 2019 5:35 AM

1. 薛定谔方程的近似解：
   a. 玻恩-奥本海默近似(绝热近似)：假定原子核静止不动，只分析电子的状态；
   b. 单电子近似：假定在凝聚态物质中电子是全同的，只分析单个电子的状态；
2. 每一个布里渊区中有N(原胞数)个k状态。与每一个k值对应有一个能量状态(能级)，由于k值是分立的，所以布里渊区中的能级是准连续的，每一个能带中有N个能级。N为晶体的固体物理学原胞数；
3. 证明：每一个布里渊区中有N(原胞数)个k状态。
   a. 在一维上有一个晶体长$L_x = N \cdot a$；
   b. 由周期性边界条件($x = 0$到$x = L_x$)；
   c. $\Rightarrow \psi(x) = \psi(x + L_x) = e^{ik(x+L_x)} \cdot \mu_k(x + L_x) = e^{ik_x} \cdot \mu_k(x)$；
   d. $\Rightarrow e^{ik_x \cdot L_x} = 1, k_x \cdot L_x = 2\pi m (m \in Z), k_x = \frac{2\pi m}{L_x} = \frac{2\pi m}{N \cdot a}$；
   e. $\Rightarrow -\frac{\pi}{a} \le k_x \le \frac{\pi}{a} \Rightarrow -\frac{N}{2} \le m \le \frac{N}{2} (m \in Z)$；
4. 原子势场：$\mu \propto -\frac{e}{r}$；
5. 晶体中电子的能量谱值：若得知晶体中势函数V(x)的具体表达式，就可求解薛定谔方程，得出电子的能量谱值。可以采用Kronig-Penney势场模型；
6. 推导：Kronig-Penney势场模型。
   a. $-\frac{\hbar^2}{2m} \cdot \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + V(x) \cdot \psi(x) = E \cdot \psi(x)$;
   b. $\Rightarrow \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - V) \cdot \psi(x) = 0$;
   c. $\because \psi(x) = e^{ik \cdot x} \cdot \mu(x)$;
   d. $\Rightarrow \mu_k''(x) + 2ik \cdot \mu_k'(x) + \left[\frac{2m}{\hbar^2}(E - V) - k^2\right] \cdot \mu_k(x) = 0$;
   e. $\because \mu(x) = A \cdot e^{r_i x} + B \cdot e^{r_i x}$;
   f. $1'.$势阱区$0 \le x \le a, V(x) = 0 \Rightarrow \mu_1(x) = A \cdot e^{i(\alpha - k)x} + B \cdot e^{-i(\alpha + k)x}$
   g. $2'.$势垒区$-b \le x \le 0, V(x) = V_0$，令$\frac{2m}{\hbar^2}(V_0 - E) = \beta^2 \Rightarrow \mu_2(x) = C \cdot e^{(\beta - ik)x} + D \cdot e^{(-\beta - ib)x}$
   h. 边界条件(A,B,C,D)->四个方程；
      i. $\mu_1(0) = \mu_2(0)$;
      ii. $\left.\frac{d\mu_1}{dx}\right|_{x=0} = \left.\frac{d\mu_2}{dx}\right|_{x=0}$;
      iii. $\mu_1(a) = \mu_2(-b)$;
      iv. $\left.\frac{d\mu_1}{dx}\right|_{x=a} = \left.\frac{d\mu_2}{dx}\right|_{x=-b}$;
   i. $f_1(A, B, C, D) = 0$
      $f_2(A, B, C, D) = 0$
      $f_3(A, B, C, D) = 0$
      $f_4(A, B, C, D) = 0$
   j. $\because (L) \cdot (A\ B\ C\ D)^T = 0$
   k. $|L| \Rightarrow f'(\alpha, \beta, k, a, b) = 0$;
   l. $\because E \sim k$
   m. $\Rightarrow f(k, v_0, E, a, b) = 0$;
   n. $\frac{\beta^2 - \alpha^2}{\quad} \cdot sh(b \cdot \beta) \cdot \sin(2a) + ch(b \cdot \beta) \cdot \cos(2a) = \cos[k(a + b)]$;

第五课：半导体中的电子状态

Tuesday, 10 September, 2019 05:24

1. 在外力作用下电子状态的变化：$v=\frac{1}{\hbar}\cdot\frac{dE}{dk},\frac{dE(\vec{k})}{dt}=\vec{v}\cdot\vec{F}$;
2. 电子的加速度和有效质量：
   a. $\overrightarrow{a_i}=\frac{d\overrightarrow{y_i}}{dt}=\Sigma_{j=1}^{3}\frac{1}{\hbar}\frac{\partial^2 E}{\partial k_i\partial k_j}\cdot\overrightarrow{F_j},i=1(x),2(y),3(z)$ ；
   b. $\because\vec{a}=\frac{d\vec{v}}{dt}=\frac{d}{dt}\left[\frac{1}{\hbar}\nabla_{\vec{k}}E(\vec{k})\right]=\frac{1}{\hbar^2}\nabla_{\vec{k}}\nabla_{\vec{k}}E(\vec{k})\cdot\vec{F}$;
   c. 有效质量：$m^{-1}=\frac{1}{\hbar^2}\nabla_{\vec{k}}\nabla_{\vec{k}}E(\vec{k})$;
3. 有效质量的意义：涵盖了周期势场对电子运动的影响。如此，在解决晶体中电子受外力作用下的运动规律时，不必考虑内部势场的影响;
4. 有效质量的泰勒展开推导：
   a. $E(k)=E(0)+\frac{dE}{dk}\cdot k|_{k=0}+\frac{1}{2}\cdot\frac{d^2E}{dk^2}\cdot k^2|_{(k=0)}+$;
   b. $\Rightarrow E(k)-E(0)=\frac{1}{2}\cdot\frac{d^2E}{dk^2}\cdot k^2$;
   c. $\because E=\frac{p^2}{2m}=\frac{\hbar^2k^2}{2m}$;
   d. $m^{-1}=\frac{1}{\hbar^2}\cdot\frac{d^2E}{dk^2}$;
5. 电子的有效质量再带底附近>0，在带顶附近<0，半导体不带电;
6. 导带电子和价带空穴：
   a. 每个电子对电流的贡献：$\overrightarrow{j_{\vec{k}}}=\frac{-e}{V}\cdot\vec{v}(\vec{k})$(晶体中的总电流J=0);
   b. $\because(-e)l=jVt\Rightarrow(-e)=\frac{jV}{v}\Rightarrow\overrightarrow{j_{\vec{k}}}=\frac{(-e)}{V}\cdot\vec{v}(\vec{k})$;

第六课：Ge、Si、GaAs的电子结构

Monday, September 16, 2019 5:26 AM

1. 等能面：
   a. $\mathrm{E(k)} = \mathrm{cont.}$；
   b. 在倒空间中能量相等的k点的包络面，叫做等能面。可以反映出能带对称性；
   c. 自由电子：$E(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{2} \cdot \left(\frac{k^2 x}{m} + \frac{k^2 y}{m} + \frac{k^2 z}{m}\right) = constant$；
   d. 半导体中导带底和价带顶的电子态($k: k_0 \sim \Delta k$)：
      i. $E(k) = E(k_0) + \frac{1}{2} \cdot [\left(\frac{\partial^2 E}{\partial k_1^2}\right)_{k_0} \cdot (k_1 - k_{01})^2 + \left(\frac{\partial^2 E}{\partial k_2^2}\right)_{k_0} \cdot (k_2 - k_{02})^2 + \left(\frac{\partial^2 E}{\partial k_3^2}\right)_{k_0} \cdot (k_3 - k_{03})^2]$(一价导数位为0，极值附近)；
      ii. $\Rightarrow \mathrm{E(k_0)} + \frac{\hbar^2}{2} \cdot \left(\frac{(k_1 - k_{01})^2}{m} + \frac{(k_2 - k_{02})^2}{m} + \frac{(k_3 - k_{03})^2}{m}\right) = constant$；
2. 回旋共振实验：E~k；
   a. $\because V_\perp = W_c \cdot r,\ a = \frac{V_\perp^2}{r}$；
   b. $\Rightarrow r = \frac{V_\perp^2}{r} = \frac{f}{m_n^*},\ W_c = \frac{V_\perp}{r} = \frac{a}{V_\perp} = \frac{e \cdot B}{m_n^*}$；
   c. $\because m_1 \neq m_2 \neq m_3$；
   d. $\Rightarrow f = (-e) \cdot \vec{v} \times \vec{B} = (-e) \cdot \begin{vmatrix} i & j & k \\ v_1 & v_2 & v_3 \\ B_1 & B_2 & B_3 \end{vmatrix}$；
   e. $\Rightarrow f_1 = m_1 \cdot \frac{dv_1}{dt} = (-e)(V_2 B_3 - V_3 B_2)(1)$；
   f. $\Rightarrow f_2 = m_2 \cdot \frac{dv_2}{dt} = (-e)(V_1 B_3 - V_3 B_1)(-1)$；
   g. $\Rightarrow f_3 = m_3 \cdot \frac{dv_3}{dt} = (-e)(V_1 B_2 - V_2 B_1)(1)$；
3. CBM(Conclution Band Minimum)：导带底；
4. VBM(Valence Band Max)：价带顶；
5. 作业待办：上次的以及3.7和3.9；

第七课：杂质和缺陷能级

Wednesday, September 18, 2019 5:42 AM

1. GaAs的Eg：直接带隙半导体，300K时，Eg=1.424eV；
2. $Si_{1-x}Ge_x$：
   a. Ge的比例$0\% \le x \le 85\%$(Si:$15\% \le 1-x \le 100\%$)，呈现出Si的特点，CBM出现在T→X；
   b. Ge的比例$85\% \le x \le 100\%$(Si:$0\% \le 1-x \le 15\%$)，呈现出Ge的特点，CBM出现在L点；
3. Si的导带：极小值在[100]方向上，6个能谷，等能面为旋转椭球；
4. Ge的导带：极小值在[111]方向的BZ边界上，4个能谷，等能面为旋转椭球；
5. Si和Ge的价带：极大值在BZ中心(k=0处)，3个能带，重空穴带，轻空穴带，自选-轨道耦合劈裂带；
6. Si和Ge：导带极小值和价带极大值在k空间不同点->间接带隙半导体；
7. GaAs的导带和价带：导带极小值和价带极大值皆在BZ中心->直接带隙半导体；
8. 完美晶体：晶格完整、无杂质，波函数符合布洛赫定律:
   a. 电子在严格的周期势场中运动,其能量谱值形成能带；
   b. 价带和导带之间被禁带分开，在禁带中不存在电子状态；
   c. 能带中电子的波函数是布洛赫函数，电子在晶体中的各个元胞的对应点上，出现的机率相同；
   d. 电子可以在整个晶体中运动，这种电子态称为扩展态；
9. 真实半导体：振动(格波)，杂质(意外引入)，缺陷：
   a. 缺陷的作用：
      i. 电学作用；
      ii. 引入局域电子态(不随动量变化的电子态)；
   b. 杂质和缺陷破坏周期性势场，在禁带中引入能级；
10. 硅和锗的中的杂质能级：
    a. 替位式杂质：Si、Ge中的III族(B,Al,Ga,In)和V族元素(N,P,As,Sb)通常在晶格中占据Si和Ge的位置；
       i. 杂质电离：如果在硅晶体中有一个磷原子占据了硅原子的位置，磷原子由五个价电子，其中四个价电子与邻近的四个硅原子形成共价键，还多余出来一个电子。这个电子容易摆脱磷原子的束缚，在晶体中自由运动，成为导带中的电子；而磷原子形成一价的正离子，形成一个固定不动的正电中心。这个过程被称作杂质电离。
       ii. 杂质电离能(施主电离能:Ionization Energy)E_I：电子从磷原子中挣脱出来所需要的最小能量；
       iii.

第八课：III-V族化合物杂质

Monday, September 23, 2019 5:32 AM

1. GaAs(Se，Te)：施主；
2. GaAs(Zn，Mg，Cd)：受主；
3. 等电子杂质：当杂质原子和晶格原子的价电子数相等时，杂质通常称为等电子杂质；
    a. 等电子杂质替代相同价电子数的晶格原子(组分原子)后，由于其负电性不同，可以束缚电子；
4. 等电子陷阱：由等电子杂质形成的陷阱称为等电子陷阱；
    a. 应用：如GaP:N LED；
5. 类氢模型：用于分析浅能级杂质束缚态的方法，只是实际情况的一个粗糙的近似。各种杂质的电离能并不完全相同，是由于各种杂质的势场不相同；
    a. 氢原子基态电离能：$E_H = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} = 13.6eV$；
    b. 其他电离能：$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$, $\frac{E_I}{E_H} = \frac{m^*}{m_0} \cdot \frac{1}{\varepsilon_2^2}$ ；
    c. 基态轨道半径：$a = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r h^2}{\pi m_n^* e^2} = \varepsilon_r \cdot \frac{m}{m_n^*} \cdot a_0$；
6. 深能级：除了之前讲的浅能级(禁带中引入浅能级)杂质，实际上半导体中还存在另一类杂质，他们的能级在禁带中心附近，这样的能级称为深能级；
    a. 深能级杂质的特点：
        i. 电离能大，对热平衡(室温热动能：40meV)中的载流子浓度无显著影响，但对半导体的其他性质有显著影响；
        ii. 作为电子和空穴的复合中心，可以缩短非平衡载流子的寿命；
        iii. 深能级杂质可以产生多次电离，每次电离相应地形成一个能级，因而可在禁带中引入多重杂质能级。有的杂质既可以作为施主，又可以作为受主，称之为两性杂质；
7. 缺陷能级：
    a. 点缺陷：间隙中的正(或负)以及正(或负)离子空位；
    b. 例如：
        i. 施主：GaAs中阳离子间隙时Ga_i，阴离子空位V_{As}；
        ii. 受主：阴离子间隙As_i，阳离子空位V_{Ga}；
8. 电子和空穴的统计分布：
    a. 倒空间中状态k的密度：
        i. 每个布里渊区(BZ)中有(原胞数)N个k状态，正空间原胞体积是Ω，倒原胞体积是$\frac{(2\pi)^3}{\Omega}$，倒空间的状态密度是$\frac{N\Omega}{(2\pi)^3} = \frac{V}{(2\pi)^3}$(含自旋则×2)；
    b. Si导带底附近电子态：
        i. E~Ec：
            1) $E(k) = E_c + \frac{\hbar^2}{2} \cdot [\frac{(k_1 - k_{o1})^2}{m_1} + \frac{(k - k_{o2})^2}{m_2} + \frac{(k - k_{o3})^2}{m_3}]$；
            2) 总E~Ec椭球体积：$\times M \times K$的倒空间密度=$\frac{4}{3}\pi(a \cdot b \cdot c) \times M \times \left[\frac{2V}{(2\pi)^2}\right]$；
            3) $A = \frac{8}{3}\pi \cdot \sqrt{8m_1 m_2 m_3} \cdot M \cdot V \cdot (E - E_c)^{\frac{3}{2}}$；

第九课：费米分布函数

Wednesday, September 25, 2019 5:33 AM

1. 导出费米分布函数的条件(适用性)：
   a. 把半导体中的电子看作是近独立体系，即认为电子之间的相互作用很微弱；
   b. 电子的运动是服从量子力学规律的，用量子态描述它们的运动状态，电子的能量是量子化的，即其中一个量子态被电子占据，不影响其他的量子态被电子占据，并且每一能级可以认为是双重简并的，这对应于自旋的两个容许值；
   c. 在量子力学中，认为同一体系中的电子是全同的，不可分辨的。任意两个电子的交换，不引起新的微观状态；
   d. 电子在状态中的分布，要受到泡利不相容原理的限制；
2. 费米-狄拉克统计规律：$f(E)=\frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}}+1}$；
   a. E:电子能量；
   b. E_F:费米能级，专门描述电子系统在半导体中的填充水平；
3. 费米能级：$E_F=\mu=\left(\frac{\partial F}{\partial N}\right)_T$；
   a. μ代表系统的化学势，F是系统的自由能;
   b. 意义：热平衡时，系统每增加一个电子，引起的系统自由能的变换等于系统的化学势，即系统的费米能级；
4. 费米分布函数的性质：
   a. 量子态：空着的，或被电子占据的；
      i. 能量为E的量子态未被电子占据的几率是：$1-f(E)=\frac{1}{e^{\frac{E_F-E}{kT}}+1}$；
   b. 费米分布函数的性质：
      i. 随着能量E的增加，每个量子态被电子占据的几率f(E)逐渐减小，而空着的几率(1-f(E))则逐渐增大，即电子优先占据能量较低的能级；当E=E_F时，有$f(E_F)=1-f(E_F)=\frac{1}{2}$；
      ii. 当$E-E_F\gg kT$时：$f(E)\approx e^{-\frac{E-E_F}{kT}}=e^{\frac{E_F}{kT}}e^{-\frac{E}{kT}}$。此时，分布函数的形式同经典的玻尔兹曼分布是一致的。对于能级比E_F高很多的量子态，被电子占据的几率非常小，因此泡利不相容原理的限制就显得不重要了；
      iii. 当$E_F-E\gg kT$时：$1-f(E)\approx e^{-\frac{E_F-E}{kT}}=e^{-\frac{E_F}{kT}}e^{\frac{E}{kT}}$。此式给出的是能级比$E_F$低很多的量子态，被空穴占据的几率。因子$e^{\frac{E}{kT}}$中无负号是因为式子中的E表示电子的能级;
5. 能带的电子和空穴浓度：
   a. 非简并半导体：N/P浓度适中(不高)；
   b. 导带电子浓度：
      i. $n=\int_{E_c}^{\infty}f(E)N_c(E)\cdot dE=\int_{E_c}^{\infty}\left[\frac{4\pi(2m_{dn})^{\frac{3}{2}}}{h^3}\right]\cdot[E-E_c]^{\frac{1}{2}}\cdot\frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}}}\cdot dE$；
      ii. 设$\frac{E-E_c}{kT}=\xi\Rightarrow n=\frac{4\pi(2m_{dn}\cdot kT)^{\frac{3}{2}}}{h^3}\cdot\frac{1}{e^{\frac{E_c-E_F}{kT}}}\cdot\int_0^{\infty}\xi^{\frac{1}{2}}\cdot e^{-\xi}\cdot d\xi=\frac{2(2\pi m_{dn}kT)^{\frac{3}{2}}}{h^3}\cdot e^{-\frac{E_c-E_F}{kT}}$；
      iii. $\Rightarrow n=N_c\cdot e^{-\frac{E_c-E_F}{kT}}$；
      iv. N_c：导带有效状态密度；

iv. N_c：导带有效状态密度；

c. 价带空穴浓度：

i. $p = \int_{-\infty}^{E_V}[1 - f(E)] \cdot N_V(E) \cdot dE = N_V \cdot e^{-\frac{(E_F - E_V)}{kT}}$；

ii. N_V：价带有效状态密度；

6. 本征半导体：

a. 电中性条件：所谓的本征半导体，就是完全没有杂质和缺陷的半导体。导带中的电子都是由价带激发得到的，(只有导带和价带，禁带中没有杂质能级)，即半导体中共价键是饱和的、完整的。T>0K时，电子从价带激发到导带，称为本征激发。若要求电子总数不变，必须导带中的电子浓度等于价带中的空穴浓度，即n=p。当上式满足时，导带电子的电荷密度(-e)n同价带空穴的电荷密度(+e)p大小相等，符号相反，半导体处于电中性状态，(-e)n+(+e)p = 0.
通常称这种关系为电中性条件或电中性方程；

i. 在任何温度下，要求半导体保持电中性条件，同保持电子总数不变的条件是一致的；

ii. $n_i = n_p = (N_c \cdot N_v)^{\frac{1}{2}} \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT}}$；

第十课：器件稳定工作范围

Monday, September 30, 2019 5:29 AM

1. 载流子浓度保持稳定，器件就能稳定工作；
2. 饱和电离区范围：

   $$n_d = N_d f_d = \frac{N_d}{\frac{1}{g_d} e^{\frac{E_d - E_F}{kT}} + 1}$$

   a. 杂质基本上全部电离的条件；

      i. 施主杂质基本上全部电离，意味着中性施主浓度远小于施主浓度，即 $n_d \ll N_d$。此时有：$n_d \approx g_d N_d e^{-\frac{E_d - E_F}{kT}}$；

      ii. 将$E_F = E_c - kT \cdot \ln\frac{N_c}{N_d}$带入上式，有：$\frac{n_d}{N_d} = g_d \cdot \frac{N_d}{N_c} \cdot e^{\frac{E_I}{kT}}$，式中$E_I$是施主电离能，$\frac{n_d}{N_d}$是中性施主占施主总数的百分比；
3. 有/的半导体；
4. 作业4.1，4.2，4.4(作业待办)；

第十一课：讨论载流子简并化度载流子分布的影响

Saturday, October 12, 2019 5:22 AM

1. 费米积分：$F_{\frac{1}{2}}(\eta_n)=\int_0^{\infty}\frac{\xi^{\frac{1}{2}}d\xi}{e^{\xi-\eta_n+1}}$;
2. 载流子浓度($if\ k=300K, kT=0.026$)：
   a. 导带电子浓度：

      无量纲变数$\xi=\frac{E-E_c}{kT}$,简约费米能级$\eta_n=\frac{E_F-E_c}{kT}$

      $n=N_c\cdot e^{-\frac{E_c-E_F}{kT}}$(非简并)

      $f(E)=\frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}}+1}$

      $n=N_c\cdot\frac{2}{\sqrt{\pi}}\cdot F_{\frac{1}{2}}(\eta_n)$

      $n=\int_{E_c}^{E_c'}N_c(E)f(E)dE=\frac{4\pi(2m_{dn})^{\frac{3}{2}}}{h^3}\int_{E_c}^{E_c'}\frac{(E-E_c)^{\frac{1}{2}}}{e^{\frac{E-E_F}{kT}}+1}dE$ (费米积分)

   b. 价带空穴浓度：

      $\eta_p=\frac{E_v-E_F}{kT}$

      $p=\frac{2}{\sqrt{\pi}}N_vF_{\frac{1}{2}}(\eta_p)$
3. 标准：

$$\begin{cases}\eta_n=-2, n=0.1N_c(\text{简并标准})\\ \eta_n<-2\text{时}, n<0.1N_c(\text{非简并半导体})\\ \eta_n>-2\text{时}, n>0.1N_c(\text{进入简并})\begin{cases}0>\eta_n>2(\text{弱简并})\\ \eta_n>0(\text{强简并})\end{cases}\end{cases}$$

4. 带尾效应：载流子简并化引起禁带变窄；

   杂质浓度高 → 电子相互间靠近，相互作用加剧 → 电子波函数重叠
   → 杂质能级变能带 → 杂质电离能减小 → 杂质能带进入导带 → 形成新的简并能级
   → 简并能带的带尾深入禁带 → 禁带变窄

第十二课：电子输运现象

Saturday, October 12, 2019 6:15 AM

1. 载流子散射：势场引起的载流子状态的改变就是载流子散射；
   a. 散射机理(VIP)：
      晶格原子振动、杂质和缺陷 → 附加势场 → 改变载流子状态 → 载流子散射 → 载流子无规则运动 → 热平衡状态 → 半导体内无电流
2. 散射几率和弛豫时间：
   a. 散射(电阻的微观来源)几率：
      $\mathrm{P}=\frac{\mathrm{M}}{\mathrm{t}\cdot\mathrm{N}}$, M: 时间t内被散射的载流子
      $P_{总}=\frac{1}{\tau_a}=\int P(\theta)d\Omega\,, d\Omega=\sin\theta\, d\theta d\phi, \theta$: 散射角
      i. 单位时间内，每个载流子被散射的几率；
      ii. 单位时间内，被散射的载流子数占总载流子数的比例；
      iii. 推导：
         $t_0=0, N_0$, 经过一次散射, 在时间t后，剩下多少N(t);
         $t\sim t+dt$
         $-dN(t)=P\cdot N(t)\cdot dt$
         $\frac{dN}{dt}=-P\cdot N$
         $N(t)=N_0\cdot e^{-p\cdot t}=\begin{cases}N_0, & t=0\\ 0, & t\to\infty\end{cases}$
   b. 平均自由时间τ_a：两次散射的时间的平均值；
      $t\sim t+dt$, 被散射载流子
      $\mathrm{d}N=-P\cdot N_0\cdot e^{-p\cdot t}\cdot dt$
      $\bar{t}=\int_0^\infty \frac{t\cdot|-p\cdot N_0\cdot e^{-p\cdot t}|dt}{N_0}=\frac{1}{p}=\tau_a$
      $\frac{1}{\tau_a}=\int p d\Omega$ (散射几率), τ_a: 平均自由时间
      $\frac{1}{\tau}=\int p\cdot(1-\cos\theta)d\Omega$

第十三课：散射机制

Monday, October 14, 2019 5:28 AM

1. 格波：晶体的原振动，总体看来是以波形式在晶体中传递，我把晶体中这种原子震动的传播叫格波；
   a. 纵波：原子的振动方向与波传播方向相平行；
   b. 横波：原子的振动方向与波传播方向相垂直；
   c. 声学波：原胞中的两个原子沿同一方向振动，长波的声学波代表原胞质心的振动；
   d. 光学波：原胞中的两个原子的振动方向相反，长波的光学波原胞质心不动；
2. 电子的特征波长：$\lambda_{电} \approx 10nm = 100\ \mathrm{A}$
3. 散射：τ；
4. 有效质量：m^*；
5. 电子迁移率：$\mu_n = \frac{e\tau_n}{m_n^*}$；
6. 空穴迁移率：$\mu_p = \frac{e\tau_p}{m_p^*}$；
7. 载流子漂移速率：
   $\begin{cases} v_n = -\mu_n E \\ v_p = \mu_p E \end{cases}$
8. 散射率：$\frac{1}{\tau_{总}} = \frac{1}{\tau_{ac}} + \frac{1}{\tau_{opt}} + \frac{1}{\tau_i}$；
   a. τ_{ac}：声学质散射；
   b. τ_{opt}：光学质散射；
   c. τ_i：杂质散射；
9. 总迁移率：$\frac{1}{\mu_{总}} = \frac{1}{\mu_{ac}} + \frac{1}{\mu_{opt}} + \frac{1}{\mu_i}$, $(\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\tau} \times \frac{m^*}{e})$；
   a. $\mu_{ac} = \frac{e\tau_{ac}}{m^*} \propto \frac{T^{-\frac{3}{2}}}{(m^*)^{\frac{5}{2}}}$
      i. $\frac{\mu_n}{\mu_p} \approx \left(\frac{m_n^*}{m_p^*}\right)^{\frac{5}{2}}$
   b. $\mu_{opt} = \frac{e\tau_{opt}}{m^*} \propto \frac{e^{\frac{\hbar\omega_0}{kT}} - 1}{(m^*)^{\frac{3}{2}}}$
   c. $\mu_I = \frac{e\tau_I}{m^*} \propto \frac{T^{\frac{3}{2}}}{N_I(m^*)^{\frac{1}{2}}}$

第十四课：霍尔效应

Monday, October 21, 2019 5:31 AM

1. 霍尔效应：把有电流通过的半导体样品放在磁场中，如果磁场的方向与电流的方向垂直，将在垂直于电流和磁场的方向上产生一个横向电势差，这种现象称为霍尔效应；
   a. 半导体的霍尔效应比金属更为显著；
   b. 机理：做漂移运动的载流子在磁场作用下受到洛伦兹力的作用，使得载流子发生偏转，并在半导体两端积累电荷，产生附加电场(霍尔电场)，导致横向电势差(霍尔电势差)；
   c. 本节假设：半导体的温度是均匀的，所有载流子的速度相同，载流子的弛豫时间是与速度无关的常数；
2. 霍尔系数：
   $\varepsilon_y = Rj_xB_z$
   其中：R为霍尔系数，ε_y为y方向的霍尔电势差，j_x为x方向的电流大小，B_z为z方向的磁场强度；
   a. 洛伦兹力：$f_{洛} = (-\mathrm{e}) \cdot \mathrm{v} \times \mathrm{B_z}$；
   b. $-e \cdot \varepsilon_y + e \cdot v_x \cdot B_z = 0$
   c. $\Rightarrow \varepsilon_y = v_x \cdot B_z$
   d. $\because j_x = e \cdot n \cdot v_x$
   e. $\Rightarrow \varepsilon_y = -\frac{1}{e \cdot n} \cdot j_x \cdot B_z$
   f. $\Rightarrow \begin{cases} R_n = -\frac{1}{e \cdot n} \\ R_p = \frac{1}{p \cdot e} \end{cases}$
   g. 霍尔效应反应载流子浓度和载流子类型；
3. 霍尔角：由于霍尔电场的存在，导致电流和总电场方向不再相同，它们之间的夹角θ称为霍尔角；
   $\tan\theta = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}$
   a. 在弱磁场下，霍尔电场很小，霍尔角也很小，则：
      $\theta \approx \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = \frac{Rj_xB_z}{\varepsilon_x} = \frac{R(\sigma\varepsilon_xB_z)}{\varepsilon_x} = (R\sigma)B_z$
   b. 霍尔角的符号和霍尔系数一样，对于P型半导体时正值(ε转向y轴的正方向)，对于N型半导体是负值(ε转向y轴的负方向)；
   c. $\begin{cases} \theta_n = -\frac{e\tau_n}{m_n^*}B_z = -\mu_nB_z = -\frac{eB_z}{m_n^*} \cdot \tau_n \\ \theta_p = \mu_pB_z = \frac{eB_z}{m_n^*} \cdot \tau_p \end{cases}$ 其中，τ为载流子的弛豫时间，$\pm\frac{\mathrm{eB_z}}{\mathrm{m^*}}$时在磁场作用下载流子旋转的角速度；
   d. 霍尔角可以测量大多数的半导体参数；
4. 霍尔效应的电流成分(N型)：
   a. $\downarrow \varepsilon_x$导致x方向的漂移电流：$j_{nx} = \sigma_x \cdot \varepsilon_x$；
   b. $\downarrow B_z \rightarrow f_{洛}$导致y方向(横向)偏移电流：$j_{ny} = -\sigma_n \cdot \varepsilon_y$；
   c. $\downarrow \varepsilon_y$(横向霍尔电场)导致横向漂移电流：$j'_{ny} = \sigma_n \cdot \varepsilon_y$；
   d. 平衡时$j_{ny} = -j'_{ny}$
   e. 总电流：$j_{总} = j_{nx}\vec{\imath} + j_{ny}\vec{\jmath} + j'_{ny}\vec{\jmath} = j_{nx}\vec{\imath}$；
   f. 定义电流分量相关角度φ：j_{ny}与j_{nx}合成电流方向与x方向的夹角；
      $\tan\varphi = \frac{j_{ny}}{j_{nx}} = -\frac{\sigma_n\varepsilon_y}{\sigma_n\varepsilon_x} = -\tan\theta$
      $\begin{cases} \varphi_n = -\theta_n = -(-\mu_n \cdot B_z) = \mu_nB_z \\ \varphi_p = -\theta_p = -(\mu_p \cdot B_z) = -\mu_pB_z \end{cases}$
5. 两种载流子共存时的霍尔效应：
   a. y方向总偏移电流：
      $j_y = j_{ny} + j_{py} = (ne\mu_n^2 - pe\mu_p^2)B_z\varepsilon_x$

b. y方向总漂移电流：

$$j_y' = j_{ny}' + j_{py}' = (ne\mu_n + pe\mu_p) \cdot \varepsilon_y$$

c. 稳态时：

$$j_y + j_y' = 0$$

$$\begin{cases} \varepsilon_y = \dfrac{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}{n\mu_n + p\mu_p} \cdot B_z\varepsilon_x \\ \varepsilon_x = \dfrac{j_x}{\sigma_x} = \dfrac{j_x}{ne\mu_n + pe\mu_p} \end{cases}$$

d. 两种载流子的霍尔系数：

$$R_H = \frac{\mathrm{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}}{\mathrm{e(n\mu_n + p\mu_p)}}$$

$$b = \frac{\mu_n}{\mu_p} > 1$$

$$\Rightarrow R_H = \frac{1}{e} \cdot \frac{p - n \cdot b^2}{(p + n \cdot b^2)^2}$$

i. 极端分析：

1) $N: n \gg p, R_H = -\frac{1}{ne}$;
2) $P: p \gg n, R_H = \frac{1}{pe}$;

e. 霍尔系数与温度T的关系：

i. 对于本征半导体：$n = p = n_i$

$$R_H = \frac{1}{e} \cdot \frac{1 - b}{n_i(1 + b)} < 0, \because b > 1$$

ii. 对于P型半导体：

1) 杂质电离：$R_H > 0$
2) 随着温度T升高，当$p = nb^2$，$R_H = 0$
3) 进入本征激发区，$\mathrm{R_H} < 0$

iii. 对于N型半导体：

$$R_H < 0$$

6. 作业待办：Q5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8;

第十五课：半导体中的热效应

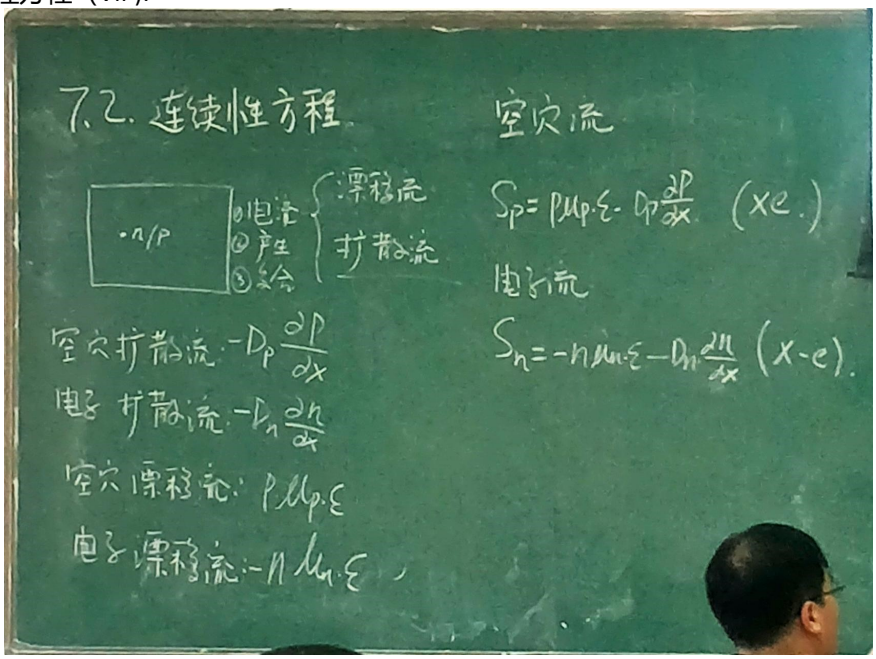
Monday, October 28, 2019 1:28 PM

1. 热电效应：
    a. 塞贝克效应；
    b. 珀尔帖效应；
    c. 汤姆逊效应；
2. 塞贝克效应：热生电；
    a. 塞贝克效应定义：在半导体两侧若存在温度差，那么就会在这个半导体上产生电动势(电压)：P型半导体高温端为负，N型半导体反之；
    b. 应用：
        i. 热探针法判断半导体导电类型；
        ii. 温差热电偶；
        iii. 半导体温差发电机；
    c. 材料要求：电导高，热导低；
3. 珀尔帖效应：电生热；
    a. 珀尔帖效应的定义：处于相同温度的两种材料的接触(导体或(和)半导体)，通电后将会产生(或吸收)热量：P型半导体高电压端吸热，N型半导体反之；
    b. 应用：
        i. 半导体制冷；
4. 汤姆逊效应：热电混合；
    a. 汤姆逊效应的定义：当电流流过有恒定温度梯度的半导体时，打破原来的温度梯度，半导体为了保持温度梯度会放热或吸热；

$$\Delta E = -e|\Delta V| + \frac{3}{2}k(T_H - T_L)\begin{cases} > 0(\text{吸热}) \\ < 0(\text{放热}) \end{cases}$$

第十六课：非平衡载流子的产生和复合

Monday, October 28, 2019 2:27 PM

1. 非平衡载流子的产生：
   a. 平衡载流子：处于热平衡态的半导体，在一定温度下，载流子浓度是恒定的。本章用n_0和p_0分别表示平衡电子浓度和平衡空穴浓度；
   b. 非平衡载流子：对半导体施加外界作用，可使其处于非平衡状态，此时比平衡态多出来的载流子，被称为过剩载流子，或非平衡载流子；
      i. G，产生率：单位时间内单位体积产生载流子的数目；
      ii. R，符合率：单位时间内单位体积复合掉载流子的数目；
      iii. 非平衡载流子产生的条件：
         1) 半导体处于热平衡状态:
            $G_0 = R_0,\quad n_0, p_0$不变
         2) 光照等外界作用激励；
            $G = G_0 + G_{光}, (\mathrm{G} > \mathrm{R})\ \ \mathrm{R} \propto \mathrm{n}, \mathrm{p}$
         3) $n, p \uparrow (\Delta n, \Delta p \uparrow) \rightarrow R \uparrow$
         4) $\mathrm{G}_{稳} = \mathrm{R}, \Delta\mathrm{n}, \Delta\mathrm{p}$恒定；
         5) 去掉光信号：
            $G_0 > R \rightarrow \Delta p, \Delta n \downarrow \rightarrow R \downarrow$
         6) 回到热平衡状态：
            $G_0 = R = R_0$
2. 一般$\frac{d\Delta p(t)}{dt} \propto -\Delta p(t)$，设比例系数$-\frac{1}{\tau}$，则$\frac{d\Delta p(t)}{dt} = -\frac{1}{\tau} \cdot \Delta p(t), \Delta p(t) = \Delta p(t=0) \cdot$
   a. τ反映出复合之前平均存在的时间，称为非平衡载流子的寿命(一般$10^{-9}s(1ns) \sim 10^{-2}s(10ms)$)；
3. 基准费米能级(统计非平衡载流子的统计分布)：
4. 连续性方程（VIP):
   a. 

第十七课：直接俄歇复合

Monday, November 18, 2019 5:22 AM

1. 直接俄歇复合(带间俄歇复合)：在电子和空穴直接复合的过程中，把第三个载流子激发到能量更高的状态的复合过程(无辐射跃迁)；
2. 带间俄歇复合过程：
   a. 两个电子和一个空穴的复合：带间俄歇复合过程的复合率R_{nn}与n^2p成正比：$R_{nn} = \gamma_n n^2 p$，其中γ_n是这种过程的复合系数；
   b. 两个空穴和一个电子的产生：$\frac{G_{nn}}{G_{nn_0}} = \frac{n}{n_0}$；
   c. 热平衡时：$R_{nn_0} = G_{nn_0} \Rightarrow G_{nn} = R_{nn_0}\frac{n}{n_0}$；

$$
\begin{aligned}
u_{nn} &= R_{nn} - G_{nn} \\
&= R_{nn_0}\frac{n^2 p}{n_0^2 p_0} - R_{nn_0}\frac{n}{n_0} \\
&= R_{nn_0}\cdot\left(\frac{np - n_0 p_0}{n_0 p_0}\right)\cdot\frac{n}{n_0}
\end{aligned}
$$

   d. 类似地有：$R_{pp} = R_{pp_0}\frac{np^2}{n_0 p_0^2}$，$G_{pp} = R_{pp_0}\frac{p}{p_0}$；

$$
\begin{aligned}
u_{pp} &= R_{pp} - G_{pp} \\
&= R_{pp_0}\cdot\frac{pn - p_0 n_0}{p_0 n_0}\frac{p}{p_0} \\
R_{pp} &= \gamma_p n p^2
\end{aligned}
$$

   e. 俄歇复合净复合率：

$$
\begin{aligned}
u &= u_{nn} + u_{pp} \\
&= R_{nn_0}\cdot\frac{np - n_i^2}{n_i^2}\cdot\frac{n}{n_0} + R_{pp_0}\cdot\frac{(pn - n_i^2)}{n_i^2}\cdot\frac{p}{p_0} \\
&= \left(R_{pp_0} n_0 p + R_{pp_0} n p_0\right)\cdot\frac{pn - n_i^2}{n_i^4}
\end{aligned}
$$

$$
\because \begin{cases} n = n_0 + \Delta n \\ p = p_0 + \Delta p \\ \Delta p = \Delta n \\ u = \dfrac{\Delta p}{\tau} \\ \tau = \dfrac{\Delta p}{u} \end{cases}
$$

$$
\Rightarrow \tau = \frac{n_i^4}{\left(R_{pp_0}\cdot n_0 p + R_{nn_0}\cdot n p_0\right)\cdot(n_0 + p_0 + \Delta n)}
$$

讨论小注入条件：$\Delta p \ll n_0, p_0$

$$
\begin{aligned}
\tau &= \frac{n_i^4}{\left(R_{pp_0} + R_{nn_0}\right)\cdot n_i^2\cdot(n_0 + p_0)} \\
&= \frac{n_i^2}{\left(R_{pp_0} + R_{nn_0}\right)\cdot(n_0 + p_0)}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{cases} R_{nn_0} = \gamma_n n_0^2 p_0 = \gamma_n n_i^2 n_0 \\ R_{pp_0} = \gamma_p n_0 p_0^2 = \gamma_p n_i^2 p_0 \end{cases}
$$

$$
\Rightarrow \tau = \frac{1}{(\gamma_n n_0 + \gamma_p p_0)(n_0 + p_0)}
$$

$1°.\ \mathrm{n}_0 \gg \mathrm{p}_0$(N型半导体)：

$$
\tau_n = \frac{1}{\gamma_n n_0^2}
$$

$2°.\ \mathrm{p}_0 \gg \mathrm{n}_0$(P型半导体)：

2°. $p_0 \gg n_0$(P型半导体):

$$\tau_p = \frac{1}{\gamma_p p_0^2}$$

3°. $n_0 = p_0 = n_i$(本征半导体):

$$\tau_i = \frac{1}{2n_i^2 \cdot (\gamma_n + \gamma_p)}$$

3. 通过复合中心的复合:

a. 设复合中心浓度为N_t，复合中心电子填充浓度为n_t;

i. 电子俘获过程:

俘获率:

$R_n = c_n n(N_t - n_t)$,其中c_n为电子俘获系数;

ii. 电子产生过程:

产生率:

$G_n = s_n n_t$,其中s_n为电子激发几率;

iii. 热平衡时(电子):

$$R_{n_0} = G_{n_0} \Rightarrow c_n n_0 (N_t - n_{t_0}) = s_n n_{t_0}$$

$$s_n = \frac{c_n n_0 (N_t - n_{t_0})}{n_{t_0}}$$

$$= c_n N_c e^{-\frac{E_f - E_c}{kT}}$$

$= c_n n_1$(n_1表示当E_f与E_t完全重合时的电子浓度)

iv. 空穴俘获过程:

$R_p = c_p p n_t$

v. 空穴产生过程:

$G_p = s_p(N_t - n_t)$

vi. 热平衡时(空穴):

$s_p = c_p p_1$

$p_1 = N_v e^{-\frac{(E_f - E_v)}{kT}}$*(反应复合中心的位置)*

vii. 电子与复合中心之间的交换作用

$u_n = R_n - G_n = c_n n(N_t - n_t) - s_n n_t = c_n(n(N_t - n_t) - n_1 n_t)$

viii. 空穴与复合中心的交换过程:

$u_p = R_p - G_p = c_p(p n_t - p_1(N_t - n_t))$

b. 通过复合中心复合的寿命:

$u = \frac{\Delta p}{\tau}$

平衡时:

$u_n = u_p$

$$n_t = \frac{(c_n n + c_p p_1) \cdot N_t}{c_n(n + n_1) + c_p(p + p_1)}$$

$$\Rightarrow u = \frac{c_n N_t c_p \cdot (np - n_1 p_1)}{c_n(n + n_1) + c_p(p + p_1)} = \frac{c_n N_t c_p \cdot (np - n_i^2)}{c_n(n + n_1) + c_p(p + p_1)}$$

$$\because np - n_i^2 = (n_0 + \Delta n)(p_0 + \Delta p) - n_i^2$$

$$= n_i^2 + (n_0 + p_0)\Delta p + \Delta p \Delta n - n_i^2$$

$$= (n_0 + p_0)\Delta p$$

$$\Rightarrow u = \frac{c_n N_t c_p \cdot (n_0 + p_0)\Delta p}{c_n(n + n_1) + c_p(p + p_1)}$$

$$= \frac{(n_0 + p_0)\Delta p}{\frac{1}{c_p N_t}(n + n_1) + \frac{1}{c_n N_t}(p + p_1)}$$

设τ_p用于描述俘获空穴的特征时间：$\tau_p = \frac{1}{c_p N_t}$

同理：$\tau_n = \frac{1}{c_n N_t}$

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

c. 讨论小注入条件：$\Delta p \ll n_0, p_0$,得到肖克莱-瑞德公式：

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

4. 作业待办：

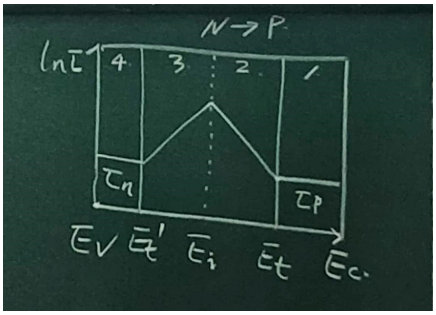
a. 7.1，7.2，7.3，7.4，7.6，7.7，7.8，7.9，7.10，7.11，7.13，7.14(12月9日交)；

第十八课：肖克莱-瑞德公式

Wednesday, November 20, 2019 5:26 AM

1. 肖克莱-瑞德公式：
   a. $\tau = \tau_p \frac{n_0 + n_1}{n_0 + p_0} + \tau_n \frac{p_0 + p_1}{n_0 + p_0}$；
   b. 一般情况下，复合中心上电子浓度有变化Δn_t，这时电中性条件为：$\Delta p = \Delta n + \Delta n_t$；

      有：$u = \frac{\Delta n}{\tau_n'} = \frac{\Delta p}{\tau_p'}$， 但当复合中心很少时，依然满足$\Delta n = \Delta p$;
2. 载流子寿命τ随着载流子浓度的变化：



   禁带：$E_v < E_t' < E_i < E_t < E_c$，复合中心：$E_t$

   $n = N_c \cdot e^{-\frac{E_c - E_F}{kT}}$， $p = N_V \cdot e^{-\frac{(E_F - E_V)}{kT}}$
   a. 强N型：费米能级E_f满足$E_t < E_f < E_c$；

      $\because E_f > E_t \Rightarrow n_0 \gg n_1 \gg p_1 \gg p_0$

      $\tau = \tau_p$
   b. 弱N型(高阻区)：$E_i < E_f < E_t$;

      $\because n_1 \gg n_0 \gg p_0 \gg p_1$

      $\tau = \frac{n_1}{n_0}\tau_p$
   c. 弱P型：$E_t' < E_f < E_i$;

      $\because n_1 \gg p_0 \gg n_0 \gg p_1$

      $\tau = \frac{n_1}{n_0}\tau_p$
   d. 强P型：$E_v < E_f < E_t'$;

      $\because p_0 \gg n_1 \gg p_1 \gg n_0$

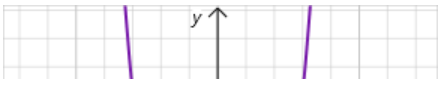
      $\tau = \tau_n$
3. E_t与τ(E_t在什么位置时，复合中心复合是最有效的)：

   $$u = \frac{np - n_i^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)}$$

   在复合中心时，因为$E_t \approx E_i$，所以$c_n \approx c_p \Rightarrow \tau_p \approx \tau_n = \tau_0$

   $$u = \frac{np - n_i^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)}$$

   $1 \qquad np - n_i^2$

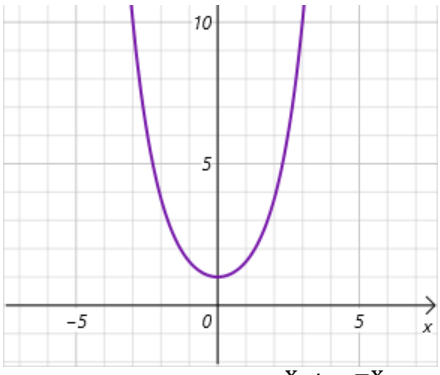


$$= \frac{1}{\tau_0} \cdot \frac{np - n_i^2}{(n+p) + (n_1 + p_1)}$$

$$= \frac{1}{\tau_0} \cdot \frac{np - n_i^2}{(n+p) + 2n_i \cosh \frac{E_t - E_i}{kT}}$$

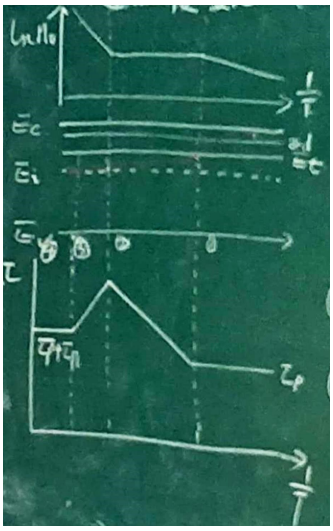
当$E_t = E_i$时，取到u_{max}, τ_{min}

$$u_{max} = \frac{1}{\tau_0} \cdot \frac{np - n_i^2}{(n+p) + 2n_i}$$



$$y = \cosh x = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$$

4. τ随温度变化(N型)：



a. $E_f > E_t$

$\tau = \tau_p$

b. $E_t > E_f, n_0$不变

$$\tau = \frac{n_1}{n_0} \tau_p$$

c. $n_0 = p_0 = n_i$

$$\tau = \frac{\tau_p}{2}\left(\frac{n_i + n_1}{n_i}\right) + \frac{\tau_n}{2}\left(\frac{n_i + p_1}{n_i}\right)$$

$$= \frac{\tau_p}{2}\left(1 + e^{\frac{E_t - E_i}{kT}}\right) + \frac{\tau_n}{2}\left(1 + e^{\frac{E_i - E_t}{kT}}\right)$$

i. 温度不太高的本征激发：$E_t - E_i \gg kT$

$$\tau = \frac{\tau_p}{2} e^{\frac{E_t - E_i}{kT}}$$

ii. 温度很高的本征激发：$E_t - E_i \ll kT$

$\tau = \tau_p + \tau_n$

第十九课：金半接触(M-S)

Wednesday, November 27, 2019 5:20 AM

1. 分析电场下表面电量变化：

由泊松方程：$\frac{dE}{dx}=\frac{\rho(x)}{\varepsilon_r\varepsilon_0}\Rightarrow E=-\frac{dV}{dx}$;

$$\rho(x)=e(N_d^+-n)$$
$$=e\left(n_0-n_0e^{-\frac{u}{kT}}\right)$$
$$=en_0\left(1-e^{-\frac{u}{kT}}\right)$$

弱电场下(能带弯曲不大)：$u\ll kT$

$$\lim_{x\to0}(1-e^{-x})=x$$
$$\rho=en_0\frac{u}{kT}=-\frac{e^2n_0V}{kT}$$
$$L_d=\sqrt{\frac{\varepsilon_r\varepsilon_0kT}{e^2n_0}}$$
$$\frac{d^2V}{dx^2}-\frac{V}{L_d^2}=0$$
$$\Rightarrow V=A_1e^{-\frac{x}{L_d}}+A_2e^{\frac{x}{L_d}}$$

当$x\to\infty,V=0$;

$$V=A_1e^{-\frac{u}{L_d}}\text{(表面势}V_s\text{)}$$
$$=V_se^{-\frac{u}{L_d}}$$
$$E(x)=\frac{dV(x)}{dx}$$
$$=\frac{V_s}{L_d}e^{-\frac{x}{L_d}}$$
$$u=-eV_se^{-\frac{x}{L_d}}$$

其中：L_d为德拜屏蔽长度;

a. 例：
   i. 对于金属：$n_0=10^{22}cm^{-3},\ \varepsilon_r=1,T=300K\Rightarrow L_d\approx0.1nm$;
   ii. 对于Ge：$n_0=10^{14}cm^{-3},\varepsilon_r=16,T=300K\Rightarrow L_d\approx4\mu m$;

2. 金属-半导体接触基础：
   a. 金半接触类型：
      i. 欧姆接触：尽可能不影响半导体性质，仅提供电压;
      ii. 肖特基接触;
   b. 功函数：

      下面的E_{Fx}为对应物质的费米能级;

      i. 金属的功函数(确定的)：$W_M=E_0-E_{FM}$;

ii. 半导体的功函数(不确定的，仅具有统计意义)：$W_S = E_0 - E_{FS}$；

c. 半导体的亲合势：$\chi_s = E_0 - E_c$

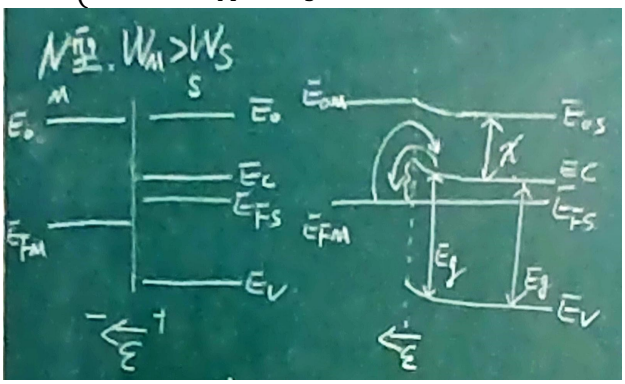
i. 导带底到真空能级的距离；

3. 金半接触：

a. N型半导体：$W_M > W_s, \mathrm{V_s} < 0$,电子耗尽层(阻挡层)

i. 能带图：

势垒$\begin{cases} \mathrm{M \rightarrow S: W_M - \chi_s} \\ \mathrm{S \rightarrow M: W_M - W_s} \end{cases}$

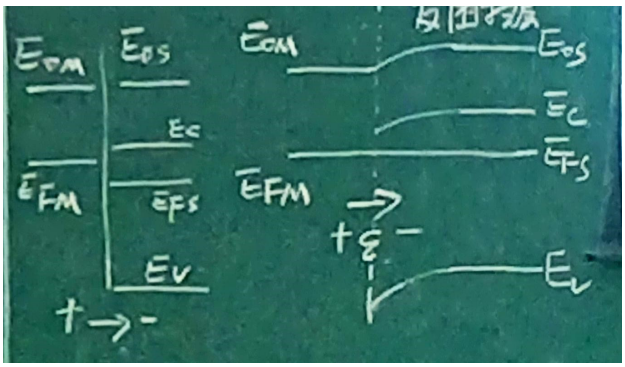


ii. 接触电势差：$V_0 = V_{bulk} - V_{Metal} = \frac{W_M - W_S}{e}$

iii. 半导体表面势：$V_s = V_s - V_{bulk} = V_{Metal} - V_{bulk} = \frac{W_s - W_M}{e}$

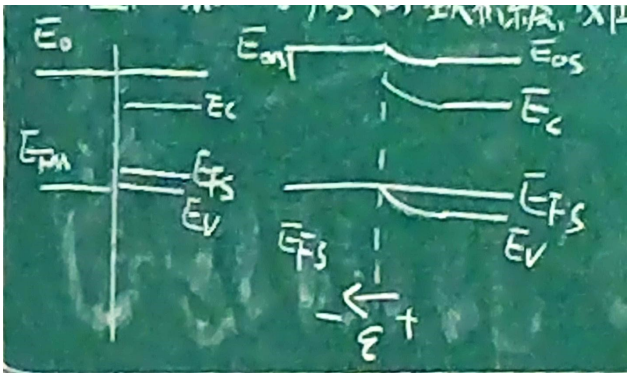
b. N型半导体：$W_M < W_S . \mathrm{V_s} > 0$,电子积累层(反阻挡层)

i. 能带图：



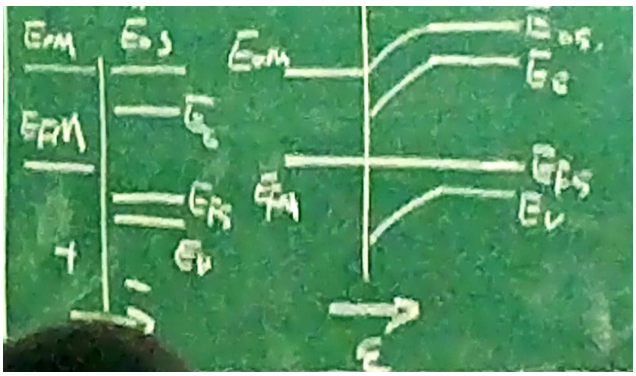
c. P型半导体：$W_M > W_s, \mathrm{V_s} < 0$,空穴积累层(反阻挡层)

i. 能带图：



d. P型半导体：$W_M < W_s, V_s > 0$,空穴耗尽层(阻挡层)

i. 能带图：



4. 对于$M \to S$，能带

   a. 向上弯曲：电子势垒 → 耗尽 →↑→ 反型

      空穴势阱 → 积累 →↑→ 简并

   b. 向下弯曲：电子势阱 → 积累 →↑→ 简并

      空穴势垒 → 耗尽 →↑→ 反型

5. M-S接触空间电荷区厚度χ_0

$$\rho(x) = e[N_d^+ - n(x)] = en_0(1 - e^{-\frac{u}{kT}})$$

耗尽层近似：认为χ_0内电子全部耗尽；

$$\rho(x) = eN_d^+ = en_0$$

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{en_0}{\varepsilon_r\varepsilon_0}$$

$$V(x) = -\frac{en_0}{2\varepsilon_r\varepsilon_0} \cdot (x_0 - x)^2 + A(x_0 - x) + B$$

$$x = x_0, V(x_0) = 0, \Rightarrow B = 0$$

$$x = x_0, E = 0 = -\frac{dV}{dx}, \Rightarrow V(x) = -\frac{en_0}{2\varepsilon_r\varepsilon_0}(x_0 - x)^2$$

$$V(0) = V_s = -\frac{en_0}{2\varepsilon_r\varepsilon_0}x_0^2$$

$$V_s = \frac{W_s - W_M}{e}$$

$$x_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0}{e^2n_0}(W_M - W_s)}$$

$$x_0 = L_d\sqrt{\frac{2(W_M - W_s)}{kT}}$$

第二十课：P-N结

Wednesday, November 27, 2019 8:22 AM

1. P-N的产生过程
   a. 设空间电荷区分别为x_p和x_n；
   b. 自建电场中：
      $\mathrm{P} \rightarrow \mathrm{N}$
      电子扩散流$S_{扩\mathrm{e}} \leftarrow$;
      电子漂移流$S_{漂\mathrm{e}} \rightarrow$;
      空穴扩散流$S_{扩\mathrm{h}} \rightarrow$;
      空穴漂移流$S_{漂h} \leftarrow$;
   c. 最终：$S_{扩} = S_{漂}$， $S_{总} = 0$
      平衡P-N结:($\varepsilon_i, Q_N, Q_P, x_N, x_P$不再变化)
   d. 能带图：P区上浮，N区下降，费米能级对齐；
2. P-N结接触电势差：$V_0 = V_N - V_P > 0$;
   $eV_0 = W_{sp} - W_{sn} = E_{FN} - E_{FP}$
   对于P-N结而言，一般认为P型半导体体电势为零；
3. 估算P-N结的接触电势差：

$$V_0 = \frac{E_{FN} - E_{FP}}{e}$$

$$n_{N0} = n_i e^{\frac{E_{FN} - E_i}{kT}}$$

$$n_{P0} = n_i e^{\frac{E_{FP} - E_i}{kT}}$$

$$\frac{n_{N0}}{n_{P0}} = e^{\frac{E_{FN} - E_{FP}}{kT}}$$

$$E_{FN} - E_{FP} = kT \cdot \ln \frac{n_{N0}}{n_{P0}} = kT \cdot \ln \frac{N_d N_A}{n_i^2}$$

$$V_0 = \frac{kT}{e} \cdot \ln \frac{N_d N_A}{n_i^2}$$

一般，当掺杂浓度不高时：$V_0(max) = \frac{E_g}{e}$

第二十二课：激子吸收和其他吸收过程

2019年12月16日 5:30

1. 上节补充：
   a. 直接带隙半导体中，涉及声子发射和吸收的间接跃迁也可能发生；
   b. 间接禁带半导体中，仍可能发生直接跃迁；
   c. 重掺杂半导体，E_f进入导带，低温时，E_f以下能级被电子占据，价带电子只能跃迁到E_f以上的状态，因而本征吸收长波限蓝移，即伯斯坦移动；
   d. 强电场作用下，能带倾斜，小于E_g的光子可通过光子诱导的隧道效应发生本征跃迁，即本征吸收长波限红移，即弗朗兹-克尔德什效应；
2. 激子吸收：
   a. 激子分类：
      i. Frenkel激子：紧束缚激子，电子-空穴形成电偶极矩，电子-空穴相互距离与晶格常数相仿。常出现在绝缘体和分子晶体中；
      ii. Wannier激子：电子和空穴弱作用，之间距离远大于晶格常数，可用类氢模型模拟，可迁移，常出现在半导体和绝缘体中；
   b. 激子的消失：
      i. 激子->自由电子和空穴；
      ii. 激子复合->光子或声子+声子；
   c. 激子能级(类氢模型)：

$$E_{ex}^1 = \frac{1^2}{\varepsilon_r^2}\left(\frac{m_r^*}{m}\right)E_H^1$$

$$m_r^* = \frac{1}{m_n^*} + \frac{1}{m_p^*}$$

3. 自由载流子吸收：
4. 杂质吸收：
   a. 中性杂质吸收：