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;