

# 半导体基础

一、简答题。

1、简述能带的性质。

答：（1）由于：

$$\Psi_{k+k_n}(r) = \Psi_k(r)$$

所以波函数对应的能量谱值具有倒格子的周期性，即：

$$E_n(k + k_n) = E_n(k)$$

说明：能带在倒空间的周期性重复并不能得到新的独立状态，不能引起能级的简并化。因此，可以把  $k$  限制在第一布里渊区。

（2）由于势函数  $U(r)$  具有晶体的微观对称性，所以能量谱值  $E$  作为  $k$  的函数，具有晶体的宏观对称性。若将晶体转动  $\alpha$ ，则： $E(\alpha k) = E(k)$ 。与它们对应的能量谱值相等。 $\alpha k$  代表  $k$  经过转动反射操作后得到的一个新的波矢量。

（3）能量  $E$  是  $k$  的偶函数，即：

$$E(k) = E(-k)$$

（4）各能带之间可能相互重叠，也可能有能量间隙。各允带能量之间的能带间隙称为禁带或带隙。

2、简述玻恩-冯·卡门的周期性边界条件。

答：设想一个有限大的晶体处于无限大的晶体中。这个无限大的晶体是这一有限晶体周期性重复堆积起来的。有：

（1）由于有限晶体处于无限晶体之中，因此电子在有限晶体界面附近与内部的情况相同，电子势场的周期性不至于被破坏。

（2）又由于假想的无限晶体只是有限晶体的周期性重复，要求电子的运动情况以有限晶体为周期在空间周期性重复着，所以只需要考虑这个有限晶体就够了。

3、根据玻恩-冯·卡门的周期性边界条件，简述波矢量  $k$  的性质。

答：（1） $k$  标志晶体中电子的运动状态，每个  $k$  代表电子在晶体中的一个空间运动量子态；

- (2)  $k$  限制在第一布里渊区。
- (3) 在第一布里渊区,  $k$  取分立值。
- (4) 每个  $k$  的代表点所占的体积为  $(2\pi)^3/V$ 。
- (5)  $k$  空间状态密度为  $V/(2\pi)^3$ 。
- (6) 每个倒原胞中,  $k$  的代表点数等于晶体的总原胞数  $N$ 。

4、什么是简并半导体？什么是 n 型简并半导体？什么是 p 型简并半导体？分别画出他们的能带图。

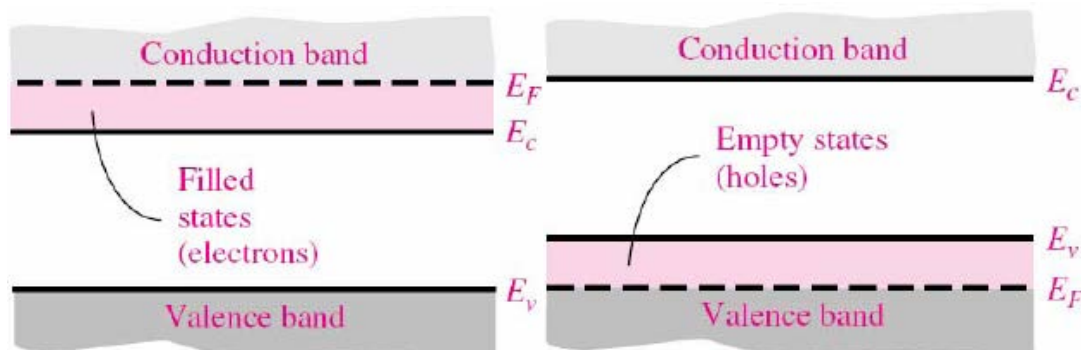
答：(1) 在重掺杂的情况下，费米能级  $E_F$  接近或进入能带，这种现象称为载流子的简并化。发生载流子简并化的半导体称为简并半导体。

(2) 当导带电子浓度超过了状态密度  $N_c$  时，费米能级  $E_F$  位于导带内部，称这种半导体为 n 型简并半导体。

(3) 当价带空穴浓度超过了状态密度  $N_v$  时，费米能级  $E_F$  位于价带内部，称这种半导体为 p 型简并半导体。

(4) n 型简并半导体

p 型简并半导体



5、电场作用下，为什么满带中的电子不能导电？为什么不满带中的电子可以导电？

答：在有电场的情况下，电场没有改变满带中电子状态在布里渊区中的对称分布，或者说外电场并不能给满带中的电子以净的动量。因此，虽然有外电场的作用，满带中的电子也不能起导电作用。

对于不满带，电场的作用使电子的状态在布里渊区中的分布不再是对称的；另外，晶格振动和杂质等对电子的散射作用又使电子有恢复热平衡分布的趋势。

这两种作用使电子的状态在布里渊区中达到一种稳定的分布。这时，占据与电场方向相反的状态的电子多，占据与电场方向相同的状态的电子少，所以各电子产生的电流不能全部抵消，总电流不为零。因此，在电场作用下，不满带中的电子有导电作用。

6、根据电子填充能带的情况，说明导体、半导体、绝缘体的导电机理。并画出相应的能带结构。

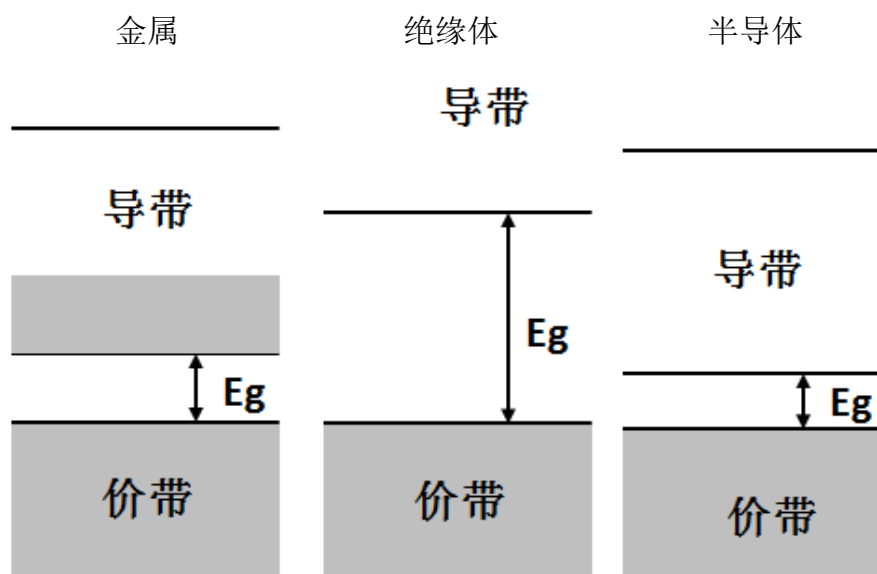
答：（1）在金属中，被电子填充的最高能带是不满的，而且能带中的电子密度很高，和原子密度具有相同的数量级（ $\approx 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ ），所以金属有良好的导电性。

（2）对于绝缘体和半导体，在绝对零度时，被电子占据的最高能带是满的，常称为满带。该满带上面的邻近能带则是空的，常称为空带。满带和空带之间被禁带分开。由于没有不满的能带存在，所以它们不能导电。

绝缘体的禁带很宽，即使在温度升高时，电子也难以从满带激发到空带中去，所以仍然是不导电的。

（3）半导体和绝缘体的差别仅在于半导体禁带宽度比较窄，在一定温度下，电子容易以热激发的形式从满带激发到空带中去。这样以来，原来空着的能带有了少量电子，变成了不满带，从而能够导电。原来被电子充满的能带因失去一些电子也就变成了不满带，也能够导电。于是半导体就有了导电性。在半导体中，随着温度的升高，热激发使从满带进入到空带中的电子数急剧增加。这就是半导体的电导率随着温度升高而增大的根本原因。

（4）能带结构：



7、什么是直接复合？分别从载流子运动和能带的角度解释直接复合。

答：（1）直接复合：电子由导带直接跃迁到价带的空状态，使电子和空穴成对消失。

（2）从载流子运动的角度：半导体中的自由电子和空穴在运动中总会有一定的几率直接相遇而复合。

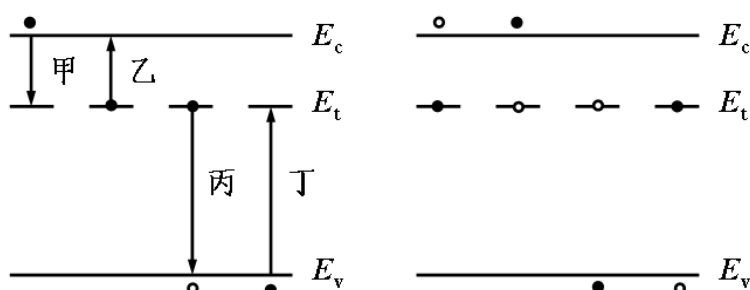
（3）从能带的角度：由电子在导带与价带间直接跃迁而引起非平衡载流子的复合过程就是直接复合。

8、什么是间接复合？描述间接复合的四个过程。

答：（1）间接复合：通过复合中心的复合。

（2）间接复合的四个过程：

通过复合中心的复合和产生有四种过程。过程 a 表示的是电子被复合中心俘获的过程。过程 b 是过程 a 的逆过程，是电子的产生过程，它表示复合中心上的电子激发到导带的空状态。过程 c 是空穴被复合中心俘获的过程。过程 d 是过程 c 的逆过程，即空穴的产生过程，它表示复合中心上的空穴跃迁到价带或者说价带电子跃迁到复合中心的空状态。



(a) 过程前

(b) 过程后

间接复合的四个过程

甲：俘获电子；乙：发射电子；丙：俘获空穴；丁：发射空穴

二、计算题。

1、一块硅片掺磷浓度为  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。求室温下 (300 K) 的载流子浓度和费米能级。(硅的  $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ,  $V_T = 0.026 \text{ V}$ )。

解：室温下杂质饱和电离，有：

$$n = N_d = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{10^{15}} = 2.25 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

$$E_F - E_i = kT \ln\left(\frac{n}{n_i}\right) = 0.026 \times \ln\left(\frac{10^{15}}{1.5 \times 10^{10}}\right) = 0.289 \text{ eV}$$

2、一半导体  $N_a = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\tau_n = 10 \mu\text{s}$ ,  $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ,  $G_L = 10^{18} \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ , 计算室温 (300 K) 时的准费米能级。(  $V_T = 0.026 \text{ V}$  )。

解:

$$p = N_a = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$$\Delta n = G_L \tau_n = 10^{18} \times 10 \times 10^{-6} = 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

$$n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{(10^{10})^2}{10^{16}} = 10^4 \text{ cm}^{-3}$$

$$E_{Fn} - E_i = kT \ln\left(\frac{n}{n_i}\right) = 0.026 \times \ln\left(\frac{10^{13}}{10^{10}}\right) = 0.18 \text{ eV}$$

$$E_i - E_{Fp} = kT \ln\left(\frac{p}{n_i}\right) = 0.026 \times \ln\left(\frac{10^{16}}{10^{10}}\right) = 0.36 \text{ eV}$$

3、施主浓度  $N_d = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  的 n 型硅, 由于光的照射产生了非平衡载流子  $\Delta n = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , 试计算这种情况下准费米能级的位置, 并和原来的费米能级进行比较。(硅的  $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ,  $V_T = 0.026 \text{ V}$ )。

解:

$$n_0 = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$p_0 = \frac{n_i^2}{n_0} = \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{10^{15}} = 2.25 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

$$E_F - E_i = kT \ln\left(\frac{n_0}{n_i}\right) = 0.026 \times \ln\left(\frac{10^{15}}{1.5 \times 10^{10}}\right) = 0.289 \text{ eV}$$

$$E_{Fn} - E_i = kT \ln\left(\frac{n_0 + \Delta n}{n_i}\right) = 0.026 \times \ln\left(\frac{10^{15} + 10^{14}}{1.5 \times 10^{10}}\right) = 0.291 \text{ eV}$$

$$E_i - E_{Fp} = kT \ln\left(\frac{p_0 + \Delta p}{n_i}\right) = 0.026 \times \ln\left(\frac{2.25 \times 10^5 + 10^{14}}{1.5 \times 10^{10}}\right) = 0.229 \text{ eV}$$

光注入后, 空穴费米能级变化较大, 电子费米能级变化较小。