

## 第3章 半导体中载流子的统计分布

### 3.1 名词解释

状态密度 状态密度有效质量 费米能级 电子的费米分布函数 导带的有效状态密度 价带的有效状态密度 本征半导体 非简并半导体 简并半导体 低温载流子冻析效应 禁带变窄效应

### 3.2 填空题

1. 对各向同性和各向异性两种不同的有效质量,其导带(电子)的状态密度  $g_c(E)$  表达式在形式上是\_\_\_\_\_的,以硅、锗为例,  $g_c(E)$  表达式中的  $m_n$  需要用\_\_\_\_\_加以替代,并称其为\_\_\_\_\_,随着能量  $E$  的提高,状态密度  $g_c(E)$  是\_\_\_\_\_。

2. 在  $g_c(E)$  表达式中,若  $m_n^*$  是\_\_\_\_\_的,则  $m_n^* = s^{2/3} (m_l m_t^2)^{1/3}$ ,  $m_l$  称为\_\_\_\_\_,  $m_t$  称为\_\_\_\_\_,  $m_l$  和  $m_t$  由\_\_\_\_\_测得,对于锗,  $s =$ \_\_\_\_\_,而对于硅,  $s =$ \_\_\_\_\_。

3. 公式  $\omega_c = qB/m_n^*$  和  $N_c = 2 \left( \frac{m_n^* k_0 T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2}$  中的  $m_n^*$  分别称为\_\_\_\_\_与\_\_\_\_\_ ; 对于砷化镓,这两个  $m_n^*$  \_\_\_\_\_。

4. 一个能量为  $E$  的独立量子态被一个电子占据的概率称作费米分布函数,其数学表达形式是\_\_\_\_\_。在费米分布函数中,当满足\_\_\_\_\_条件时,费米分布函数就转化为玻耳兹曼分布函数,数学表达形式是\_\_\_\_\_,它与费米分布函数的区别在于\_\_\_\_\_。通常把服从费米分布函数的半导体称为\_\_\_\_\_,而把服从玻耳兹曼分布的半导体称为\_\_\_\_\_。

5. 费米分布函数是一个量子统计理论函数,表示电子在不同能量的量子态上的统计分布概率。对于给定的半导体,随着温度的升高,电子占据能量小于费米能级的量子态的概率\_\_\_\_\_,而占据能量大于费米能级的量子态的概率\_\_\_\_\_。

6. 室温下,硅的禁带宽度  $E_g = 1.12\text{eV}$ ,估计室温下本征硅导带底的一个能态被电子占据的概率为\_\_\_\_\_。硅导带底的一个能态被电子占据的概率为  $10^{-4}$ ,此时费米能级的位置在\_\_\_\_\_,玻耳兹曼分布是否近似成立? \_\_\_\_\_。

7. 为了计算热平衡半导体的载流子浓度,将状态密度与分布函数相乘再对整个导带(价带)积分并除以晶体体积,得到导带电子浓度表达式  $n_0 =$ \_\_\_\_\_。

8. 对于一定的热平衡非简并半导体材料,其载流子浓度积  $n_0 p_0$  只取决于\_\_\_\_\_,与所含\_\_\_\_\_无关,如果\_\_\_\_\_增加,\_\_\_\_\_就减少,反之亦然。同一温度的不同半导体,因\_\_\_\_\_各不相同,载流子浓度积  $n_0 p_0$  也不相同。

9. 本征半导体是没有杂质和缺陷的半导体,其费米能级  $E_F$  基本上在禁带的

\_\_\_\_\_处。

10. 对于杂质半导体,杂质的离化程度(离化多少)与样品的\_\_\_\_\_有关。按照杂质的电离程度可以划分为 5 个区间,分别是\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_。

11. 杂质完全电离是指\_\_\_\_\_,它与\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_等因素有关。对于非简并 n 型半导体,如果杂质完全电离,那么随着杂质浓度的提高,其费米能级  $E_F$  将逐渐远离\_\_\_\_\_;而如果杂质浓度一定,则随着温度的升高,  $E_F$  将逐渐远离\_\_\_\_\_。p 型锗中掺入施主杂质,费米能级\_\_\_\_\_ (上升,下降)。

12. 对于 n 型半导体,当低温弱电离时,多数载流子电子的浓度  $n_0$  在数值上等于\_\_\_\_\_,可以解出导带电子浓度为\_\_\_\_\_。

13. 在 n 型半导体中杂质电离的条件下,确定费米能级的条件是\_\_\_\_\_;在强电离时,电子的浓度  $n_0$  为\_\_\_\_\_。

14. 对杂质补偿半导体,若施主浓度是  $N_D$  而受主浓度是  $N_A$ ,其电中性条件是\_\_\_\_\_,在杂质充分电离条件下,电中性条件是\_\_\_\_\_,导带电子浓度是\_\_\_\_\_。

15. 室温下本征半导体掺入 V 族元素后,空穴浓度\_\_\_\_\_;非简并条件下,其费米能级位于\_\_\_\_\_。

16. 室温条件下,通过\_\_\_\_\_会导致半导体中载流子的简并化。以 n 型半导体为例,此时其费米能级  $E_F$  位于\_\_\_\_\_以上。对于简并半导体,其杂质电离程度\_\_\_\_\_,并且会形成\_\_\_\_\_导电,禁带宽度\_\_\_\_\_。

17. 重掺杂的简并半导体,杂质的浓度很高,杂质原子相互间很靠近,被杂质原子束缚的电子波函数显著重叠,杂质电子就可能在杂质原子之间产生\_\_\_\_\_,从而使孤立的\_\_\_\_\_扩展为能带,通常称为杂质能带。

18. 对于 n 型半导体,如果以  $E_F$  和  $E_c$  的相对位置作为衡量简并化与非简并化的标准,那么,\_\_\_\_\_为非简并条件;\_\_\_\_\_为弱简并条件;\_\_\_\_\_为简并条件。

19. 室温下纯净的硅半导体掺入第 II 族元素,已知铟的电离能为 0.039eV,半导体的费米能级  $E_F = (E_c + E_D)/2$ ,半导体的状态为\_\_\_\_\_ (简并、弱简并或非简并),理由是\_\_\_\_\_。

20. 半导体材料中杂质浓度大于  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  时,描述其载流子浓度的分布要采用\_\_\_\_\_统计分布,会出现\_\_\_\_\_的现象。

### 3.3 选择题

1. 公式  $\omega_c = qB/m_n^*$  和  $N_c = 2 \left( \frac{m_n^* k_0 T}{2\pi\hbar} \right)^{3/2}$  中的  $m_n^*$  ( )。

- A. 对硅取值相同
- B. 对磷化镓取值相同
- C. 对砷化镓取值相同
- D. 对锗取值相同

2. 如果一半导体的导带中发现电子的概率为零,那么该半导体必定( )。

- A. 不含施主杂质
- B. 不含受主杂质
- C. 不含任何杂质
- D. 处于热力学温度零度

3. 热平衡时,半导体中电子浓度与空穴浓度之积为常数,它只与( )有关,而与( )无关。

- A. 杂质浓度                      B. 杂质类型                      C. 禁带宽度                      D. 温度

4. 根据质量作用定律表达式  $n_0 p_0 = n_i^2$ , 下面正确的说法是( )。

- A. 温度一定,材料一定,非简并半导体的载流子浓度乘积  $n_0 p_0$  一定,与所含杂质无关  
B. 温度一定,材料一定,半导体的载流子浓度乘积一定,与简并与否及所含杂质无关  
C. 温度一定,材料一定,半导体的本征载流子浓度  $n_i$  一定,  $n_i$  的值取决于  $E_g$   
D. 对确定的半导体材料,其本征载流子浓度  $n_i$  取决于温度,因为  $E_g$  具有负温度系数  
E. 温度一定,不同半导体材料的本征载流子浓度  $n_i$  不同是因为  $E_g$  各不相同

5. 本征半导体是指( )的半导体。

- A. 不含杂质和缺陷                      B. 电阻率最高  
C. 电子浓度和空穴浓度相等                      D. 电子浓度与本征载流子浓度相等

6. 对于一定的 n 型半导体材料,温度一定时,减少杂质浓度将导致( )靠近  $E_i$ 。

- A.  $E_c$                       B.  $E_v$                       C.  $E_g$                       D.  $E_F$

7. 对于 n 型掺杂半导体,低温弱电离时,费米能级的位置( )。

- A. 高于施主能级                      B. 低于施主能级                      C. 等于施主能级

8. 当施主能级  $E_D$  与费米能级  $E_F$  相等时,电子施主浓度为施主浓度的( )倍。

- A. 1                      B. 1/2                      C. 1/3                      D. 1/4

★9. 在强电离区, n 型半导体的费米能级( )。

- A. 高于施主能级                      B. 低于施主能级                      C. 等于施主能级

10. 硅半导体器件比锗半导体器件的工作温度高,是因为( )。

- A. 硅中电子有效质量大                      B. 硅的熔点较高  
C. 硅的禁带较宽                      D. 硅的纯度高,杂质少

11. n 型半导体硅非简并时,其  $E_F$  与温度及杂质浓度的关系中,下面正确的说法是( )。

A. 温度不变时,掺杂越多,  $E_F$  距禁带中线越远;掺杂一定时,温度越高,  $E_F$  达到最大值所需的温度越高

B.  $E_F$  随温度升高,先上升再下降并越来越接近  $E_i$ ,掺杂越多,  $E_F$  达到最大值所需的温度越高

C. 掺杂一定时,  $E_F$  随温度逐渐升高而单调下降;温度一定时,掺杂越多,  $E_F$  越接近  $E_i$

D. 温度不变时,掺杂越多,  $E_F$  距导带底越远;掺杂一定时,温度越高,  $E_F$  越接近禁带中线

E. 掺杂越少,  $E_F$  达到最大值所需的温度越高

12. 在硅半导体中同时存在施主杂质和受主杂质时,设施主杂质浓度为  $N_D$ ,受主杂质浓度为  $N_A$ ,  $N_D > N_A$ ,决定导带中电子浓度的两个重要因素是( )。

- A.  $N_D$                       B.  $N_A$                       C.  $N_D/N_A$

D. 施主杂质的电离能                      E. 受主杂质的电离能

13. n 型半导体在强电离区时,以下( )是正确的。

A. 室温下施主杂质一定发生了强电离

B. 施主杂质发生强电离与温度、掺杂浓度和杂质电离能均有关系

C. n 型半导体在强电离区时电子浓度和空穴浓度都是恒定的

D. n 型半导体在强电离区时本征激发不能忽略,因为本征载流子浓度严重依赖于温度

E. n 型半导体在强电离区时因空穴浓度随温度变化使得器件(或集成电路)不能正常工作

14. 简并半导体是指( )的半导体。
- A.  $(E_c - E_F)$ 或 $(E_F - E_v) \leq 0$
- B.  $(E_c - E_F)$ 或 $(E_F - E_v) \geq 0$
- C. 能使用玻耳兹曼近似计算载流子浓度
- D. 导带底和价带顶能容纳多个状态相同的电子

### 3.4 简答题

1. 简述半导体的热平衡状态。(中国科学院大学 2013 年考研真题)
2. 写出导带状态密度  $g_c(E)$  和价带状态密度  $g_v(E)$  表达式, 式中  $m_n^*$  和  $m_p^*$  分别称为什么? 对于硅、锗和砷化镓, 分别说明  $m_n^*$  和  $m_p^*$  的含义是否相同, 为什么?(西安电子科技大学 2013 年考研真题)
3. 费米能级的物理意义是什么? 当  $E - E_F \gg k_0 T$  时, 就可以把电子从服从费米统计分布转化为服从玻耳兹曼统计分布, 为什么? 两者的区别是什么?(西安电子科技大学 2013 年、2017 年考研真题)

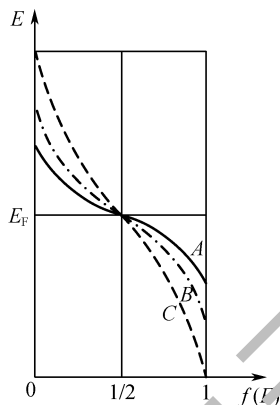


图 3-1 题 3.4.4 图

4. 一个能量为  $E$  的独立量子态被一个电子占据的概率为  $f(E)$ , 称  $f(E)$  为费米分布函数。

(1) 写出费米分布函数表达式, 指出电子占据某一能级概率与哪些因素有关, 推出空穴占据能量为  $E$  的量子态的概率表达式。

(2) 图 3-1 中曲线 A、B、C 是 3 种不同温度下的  $f(E)$  曲线, 请指出它们的温度高低顺序。(西安电子科技大学 2009 年考研真题)

5. 已知硅导带底电子状态密度有效质量  $m_n^* = 1.08m_0$ , 价带顶空穴状态密度有效质量  $m_p^* = 0.59m_0$ , 计算本征硅在室温时的费米能级位置。假定它在禁带中线处, 合理吗?(东南大学 2006 年考研真题)

6. 在半导体材料中, 费米能级的位置受哪些因素的影响? 变化趋势怎样?(北京工业大学 2010 年考研真题)

7. 对只有一种施主杂质的 n 型半导体:

- (1) 导出在低温弱电离条件下  $n$  和  $E_F$  的表达式;
- (2) 试述测定施主杂质电离能  $\Delta E_D$  实验的理论基础。

8. 在室温下, 引用表 3-1 出的相关物理参数(见表 3-1), 讨论锗、硅和砷化镓这 3 种材料本征载流子浓度不同的原因。(浙江大学 2004 年考研真题)

表 3-1 题 3.4-8 表

材料	$E_g$	$N_c$	$N_v$	$n_i$
锗	0.67eV	$1.05 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$	$3.9 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$	$2.33 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$
硅	1.12eV	$2.8 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$	$1.1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$	$1.02 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$
砷化镓	1.428eV	$4.5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$	$8.1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$	$1.1 \times 10^7 \text{cm}^{-3}$

9. 电子浓度  $n_0 = N_c \exp[-(E_c - E_F)/k_0 T]$  在什么条件下使用?  $N_c$  称作什么? 与哪些因素有关?(西安电子科技大学 2011 年考研真题)

10. 掺有相同杂质但浓度不同的两个 n 型半导体硅样品, 其电子浓度和温度的关系曲线如图 3-2 所示。请就以下问题加以说明:

- (1) 样品 1 和样品 2 哪个杂质浓度更高？
- (2) 在  $T_A$  以左区域两条曲线重合；
- (3)  $T_C$  和  $T_D$  之间两条曲线平行；
- (4)  $T_B$  在  $T_C$  左边；
- (5)  $T_E$  在  $T_D$  右边；
- (6) 在  $T_E$  以右区域曲线斜率相同，此时的斜率表示什么？（西安电子科技大学 2013 年考研真题）

11. 处于低温弱电离区的 n 型半导体：

- (1) 指出低温弱电离的含义，列出此时的电中性条件；

(2) 如果 3 块不同施主浓度的样品在低温弱电离区的  $E_F-T$  关系曲线如图 3-3 所示，请指出它们的施主浓度高低顺序。（西安电子科技大学 2009 年考研真题）

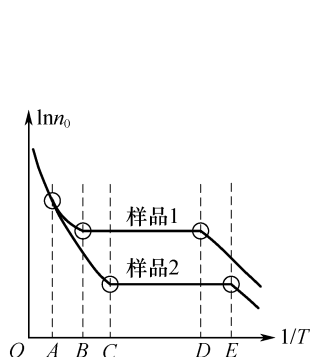


图 3-2 题 3.4-10 图

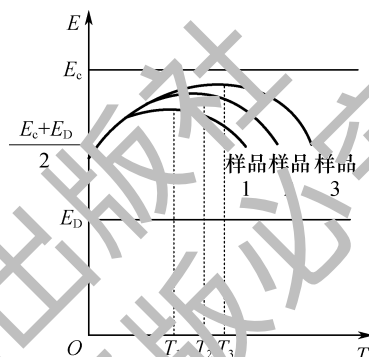


图 3-3 题 3.4-11 图

12. n 型半导体硅在强电离区的电子浓度等于施主杂质浓度，在强电离区少数浓度是否随温度变化？如果少数浓度是变化的，在器件或集成电路中是否有危害？为什么？（西安电子科技大学 2013 年考研真题）

13. 相比锗，为什么硅半导体器件具有更高的工作温度？为什么半导体器件会有一个极限工作温度？对于一个 n 型硅器件，若其杂质浓度为  $N_D$ ，如何大致判定其最高工作温度？

14. 以硅为例，解释导带的有效状态密度  $N_c$  的意义。（东南大学 2006 年考研真题）

15. 二维晶体电子  $E(\mathbf{k})-\mathbf{k}$  关系为

$$E(\mathbf{k}) - E_c = \hbar^2 (k_1^2 / m_{n1}^* + k_2^2 / m_{n2}^*) / 2$$

- (1) 电子有效质量是否各向同性？为什么？

(2) 若  $\mathbf{k}$  平面量子态密度为  $2S$  ( $S$  为晶体面积，考虑自旋)，求其状态密度。

(3) 计算能量  $E$  从  $E_c$  到  $E_c + 1000\hbar^2 / \sqrt{m_{n1}^* m_{n2}^*}$  之间单位面积内的量子态数。（西安电子科技大学 2014 年考研真题）

16. 图 3-4 给出了锗、硅和砷化镓的本征载流子浓度与温度的关系。

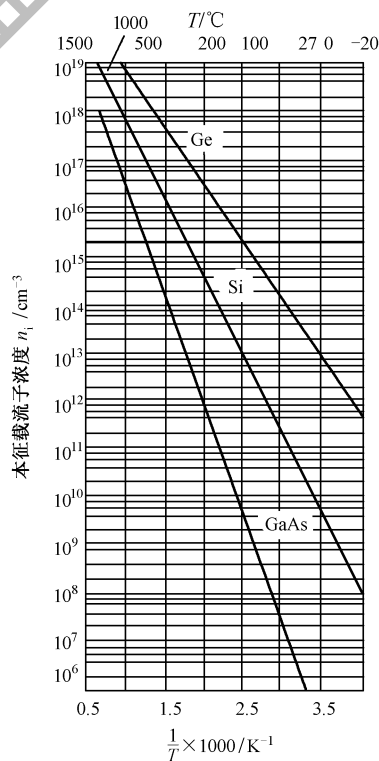


图 3-4 题 3.4-16 图

(1) 由图 3-4 写出这 3 种材料在室温下的本征载流子浓度(近似值)。

(2) 由图 3-4 可知,哪种材料的禁带宽度最大? 并由图估算出硅的禁带宽度(不考虑禁带宽度随温度变化的关系,且忽略导带、价带有效状态密度随温度的变化,需写出计算步骤)。

(3) 一个硅器件,其原材料的杂质浓度为  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,由图 3-4 估算此器件的极限工作温度。同样杂质浓度的锗器件,则其极限工作温度又为多少(需写出估算过程)? (中国科学院大学 2006 年、北京工业大学 2019 年考研真题)

17. 图 3-5 是不同温度下,非杂质补偿半导体中平衡少数浓度与杂质浓度的关系曲线,说明曲线为什么呈如此趋势。(西安电子科技大学 2006 年考研真题)

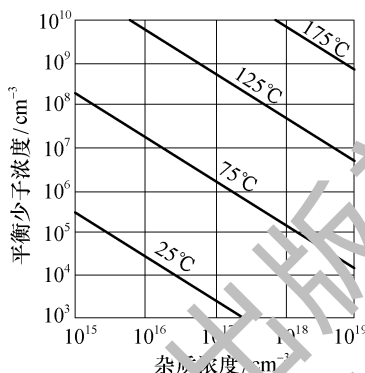


图 3-5 题 3.4 17 图

18. 在什么情况下要用简并化载流子统计分布来描述掺杂半导体材料?

★19. 重掺杂半导体的能带结构有什么特点? 试解释重掺杂半导体使禁带变窄的原因。

### 3.5 计算题

1. 电子能量  $E(k) = \hbar^2 k^2 / 2m_n^*$  并且自旋有两种不同取向,分别求出:

(1) 一维情况下单位长度晶体中的状态密度;

(2) 二维情况下单位面积晶体中的状态密度;

(3) 三维情况下单位体积晶体中的状态密度;

(4) 三维情况下若玻耳兹曼分布函数有效,推导平衡状态下导带电子浓度  $n_0$  的表达式

(已知  $\int_0^\infty x^{\frac{1}{2}} e^{-x} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$ ), 西安电子科技大学 2012 年考研真题)

2. 已知  $E(k) = E_0 + \frac{\hbar^2}{2} \left( \frac{k_x^2 + k_y^2}{m_t} + \frac{k_z^2}{m_l} \right)$ 。

(1) 求导带底状态密度  $g_c(E)$ ;

(2) 假设为非简并状态,推出电子浓度表达式。(中国科学院大学 2017 年考研真题)

3. 对多能谷半导体材料硅,横向有效质量  $m_t = 0.19m_0$ ,纵向有效质量  $m_l = 0.98m_0$ ,电子惯性质量为  $m_0$ ,计算其导带底电子状态密度有效质量  $m_{dn}$ 。(西安电子科技大学 2010 年考研真题)

4. 某半导体材料的禁带宽度  $E_g$  与温度  $T$  的关系呈线性变化,即  $E_g = E_g(0) + \beta T$ ,其中  $E_g(0)$  为  $T=0\text{K}$  时的禁带宽度,  $\beta = dE_g/dT$ 。以本征半导体为样品通过实验方法可以测出  $E_g(0)$ ,请推导实验所依据的公式并说明测量原理。(西安电子科技大学 2007 年考研真题)

5. 在一块特定半导体材料中,其能带有效状态密度  $N_c = N_{c0}(T)^{3/2}$ ,  $N_v = N_{v0}(T)^{3/2}$ , 其中  $N_{c0}$  和  $N_{v0}$  是与温度无关的常数,表 3-2 给出了该半导体材料经实验测定的本征载流子浓度在不同温度下的值。请根据实验值计算出  $N_{c0}$  和  $N_{v0}$  的乘积以及禁带宽度  $E_g$  的值,计算中假定  $E_g$  与温度无关。(西安电子科技大学 2008 年考研真题)

表 3-2 题 3.5-5 表

温度 $T/K$	200	300	400	500
本征载流子浓度 $n_i/\text{cm}^{-3}$	$1.82 \times 10^2$	$5.83 \times 10^7$	$3.74 \times 10^{10}$	$1.95 \times 10^{12}$

6. 砷化镓导带上、下能谷电子有效质量各向同性,上能谷电子有效质量  $m_{n+}^* = 1.2m_0$ , 下能谷电子有效质量  $m_{n-}^* = 0.068m_0$ , 求上能谷和下能谷电子有效状态密度的比值;如果样品非简并,求室温下上、下能谷中电子浓度之比。(西安电子科技大学 2009 年考研真题)

7. 在室温下,锗的有效状态密度  $N_c = 1.05 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_v = 3.9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,  $E_g = 0.67 \text{ eV}$ . 77K 时,  $E_g = 0.76 \text{ eV}$ .

(1) 分别求这两个温度时锗的本征载流子浓度。

(2) 77K 时,锗的电子浓度为  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , 假定受主浓度为零,而  $E_c - E_D = 0.01 \text{ eV}$ , 求锗中的施主浓度  $N_D$ 。(中国科学院大学 2003 年考研真题)

8. 一个 n 型半导体,除施主杂质浓度  $N_D$  外,还含有少量的受主,其浓度为  $N_A$ ,求弱电离情况下电子浓度的表达式。

9. 77K 时,掺磷的硅半导体中的费米能级  $E_F = (E_c + E_D)/2$ , 其中  $E_c$  为硅的导带底位置,  $E_D$  为磷在硅中的施主能级位置。试求:

(1) 77K 时的电子浓度;

(2) 需要掺入磷的浓度。(华东师范大学 2007 年考研真题)

10. 一块掺有杂质磷的硅材料,77K 时,其费米能级在导带底以下  $0.044 \text{ eV}$  处,试问该情况下掺入磷杂质的电离率是多少?

11. 若已知硅的  $m_p^*/m_n^* = 0.55$ , 锗的  $m_p^*/m_n^* = 0.52$ , 请说明在室温下本征硅和锗的费米能级所处的位置。(西北大学 2003 年考研真题)

12. 一块均匀掺杂 n 型半导体,杂质浓度为  $N_D$ , 施主杂质能级在导带底下  $0.049 \text{ eV}$  处,在温度为  $150 \text{ K}$  时,电离的施主杂质浓度为杂质浓度的  $1/7$ ,求此温度下该材料的费米能级位置。(浙江大学 2005 年考研真题)

13. 砷化镓晶体的  $m_n^* = 0.068m_0$ ,  $m_p^* = 0.47m_0$ , 计算室温下砷化镓的  $N_c$ 、 $N_v$  及本征载流子浓度。若在砷化镓晶体中掺入  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$  浓度的硅,硅在砷化镓中完全电离,其中 95% 的硅原子取代了 Ga 原子,5% 的硅原子取代了 As 原子,计算室温下该样品多子和少子浓度,并以本征费米能级  $E_i$  为参考点计算其费米能级的位置,根据计算结果在能带图中画出  $E_c$ 、 $E_v$ 、 $E_F$  和  $E_i$  的位置。(西安电子科技大学 2013 年考研真题)

14. 一块有掺杂补偿的 n 型硅单晶材料,其平衡电子浓度  $n_0 = 7.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , 已知掺入的受主浓度  $N_A = 5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , 室温下测得其费米能级  $E_F$  恰好与施主能级重合,求:

(1) 平衡少数载流子浓度;

(2) 掺入材料中的施主杂质浓度  $N_D$ 。(北京工业大学 2012 年考研真题)

15. 已知立方密堆积碳化硅(3C-SiC)为间接禁带半导体,它的导带极小值位于第一布里渊区的 X 点,氮(N)在立方密堆积碳化硅中为施主杂质,其电离能  $\Delta E_D = 0.11 \text{ eV}$ , 如果室温下杂质氮的电离度为 78%, 氮的杂质浓度  $N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , 试求此 n 型立方密堆积碳化硅的费米

能级与施主能级  $E_D$  之间的距离是多少。(中国科学院大学 2005 年考研真题)

### 16. 半金属交叠的能带为

$$E_1(\mathbf{k}) = E_1(0) - \frac{\hbar^2 k^2}{2m_1}, m_1 = 0.18m_0; E_2(\mathbf{k}) = E_2(k_0) + \frac{\hbar^2}{2m_2}(k - k_0)^2, m_2 = 0.06m_0$$

式中,  $E_1(0)$  为能带 1 的带顶,  $E_2(k_0)$  为能带 2 的带底, 交叠部分  $E_1(0) - E_2(k_0) = 0.1\text{eV}$ 。由于能带交叠, 能带 1 的部分电子转移到能带 2, 而在能带 1 中形成空穴, 计算  $T=0\text{K}$  时费米能级的位置。(中国科学院半导体研究所 2002 年考研真题)

★17. 现有一块掺有施主杂质浓度为  $5 \times 10^{12}\text{cm}^{-3}$  的 n 型硅, 已知硅的禁带宽度为  $1.12\text{eV}$ , 并且假定其不随温度变化, 室温下硅的  $N_c = 2.8 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ ,  $N_v = 1.1 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 。

(1) 当温度高于多少时该样品呈现出本征半导体的导电性?

(2) 如果将施主杂质浓度提高一个数量级, 为  $5 \times 10^{13}\text{cm}^{-3}$ , 此时样品呈现出本征导电性所需的温度如何变化? 该温度又是多少? (西安电子科技大学 2007 年考研真题)

18. 为了保证玻耳兹曼分布有效, 半导体内的费米能级在 n 型半导体中必须低于施主能级  $3k_0T$ 。如果是  $T=300\text{K}$  时的掺磷 n 型硅, 求使得硅中玻耳兹曼分布有效的掺磷浓度是多少(假定杂质完全电离)? 如果是  $T=300\text{K}$  时的掺锑 n 型硅, 其最大掺锑浓度又是多少? 说明两者浓度上限不同的原因(锑在硅中的电离能为  $0.039\text{eV}$ )。(西安电子科技大学 2008 年考研真题)

19. 对于只掺有单一施主杂质(浓度为  $N_D$ )的半导体:

(1) 证明当温度升至使导带底有效状态密度  $N_c = (N_D/2)e^{-3/4}$  时, 费米能级有最大值;

(2) 由上面结果讨论杂质含量对费米能级达到最大值时所对应的温度的影响。(西安电子科技大学 2008 年考研真题)

20. 某 n 型半导体施主杂质浓度为  $1 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ , 假设施主杂质完全电离。该半导体材料的  $N_c = N_v = 1.5 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ , 且与温度无关, 如果用这种材料制作的器件在  $T=400\text{K}$  时的电子浓度不大于  $1.01 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ , 问这些材料的禁带宽度是多少? (西安电子科技大学 2008 年考研真题)

★21. 室温下的半导体硅, 已知硅的  $N_c = 2.8 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 。

(1) 若以费米能级距离导带底的电离能恰好是  $k_0T$  作为简并化的条件, 求硅中掺砷( $\Delta E_D = 0.049\text{eV}$ )发生简并时的掺杂浓度是多少? 杂质的离化率是多少?  $F_{1/2}(S)$  值见表 3-3。

表 3-3 题 3.5-21 表

$S$	-2	-1	0	1	2
$F_{1/2}(S)$	$10^{-1}$	$2.5 \times 10^{-1}$	$6 \times 10^{-1}$	1.30	2.40

(2) 若以费米能级比施主能级  $E_D$  低  $1.5k_0T$  作为杂质强电离标准, 硅中掺砷为确保杂质强电离的掺杂浓度上限是多少? (西安电子科技大学 2019 年考研真题)

22. 对杂质浓度为  $N_D$  的 n 型半导体硅, 如果杂质完全离化:

(1) 写出该半导体的电中性条件;

(2) 如果该 n 型半导体的导带电子浓度  $n_0 = kp_0$ , 证明  $n_i = \sqrt{k}N_D/(k-1)$ ;

(3) 如果该 n 型半导体的  $p_0 = 0.1n_0$ , 此时  $n_i/N_D$  是多少?

(4) 若  $N_D = 10^{15}\text{cm}^{-3}$ , 求  $p_0 = 0.1n_0$  时样品所处的温度。计算时认为硅的禁带宽度不随温度变化。(西安电子科技大学 2009 年考研真题)

23. 室温下本征硅如果由于掺入某种施主杂质使其费米能级提高了  $0.39\text{eV}$ , 那么:

(1) 样品是否发生了载流子的简并化? 为什么?