

## 《大学物理 AII》作业 No.9 原子结构 固体能带理论

班级 \_\_\_\_\_ 学号 \_\_\_\_\_ 姓名 \_\_\_\_\_ 成绩 \_\_\_\_\_

## \*\*\*\*\*本章教学要求\*\*\*\*\*

- 1、理解决定电子量子态的 4 个量子数的物理意义及其取值范围。
- 2、理解由薛定谔方程得到的氢原子能级公式、轨道角动量公式、轨道角动量沿特定方向分量的公式；
- 3、理解描述电子自旋内禀特征的自旋概念及自旋角动量公式，了解施特恩—格拉赫实验结果的物理意义。
- 4、理解多电子原子中电子的壳层排布结构以及它们和能量最低原理、泡利不相容原理的关系。
- 5、理解晶体中电子共有化特征、能带形成的原因；掌握价带、空带、满带、导带等概念。掌握导体、绝缘体、本征半导体、P 型半导体、N 型半导体各自的能带结构特征。

## 一、选择题：

1. 氢原子中处于 3d 量子态的电子，描述其量子态的四个量子数( $n, l, m_l, m_s$ )可能取的值为

- [ D ] (A)  $(3, 0, 1, -\frac{1}{2})$  (B)  $(1, 1, 1, -\frac{1}{2})$   
 (C)  $(2, 1, 2, \frac{1}{2})$  (D)  $(3, 2, 0, \frac{1}{2})$

解：3d 状态的电子： $n=3, l=2, m_l=0, \pm 1, \pm 2, m_s=\pm 1/2$ ，根据泡利不相容原理知：(D) 是正确的。

2. 有下列四组量子数：

- (1)  $n=3, l=3, m_l=2, m_s=\frac{1}{2}$  (2)  $n=3, l=2, m_l=2, m_s=\frac{1}{2}$   
 (3)  $n=2, l=2, m_l=1, m_s=-\frac{1}{2}$  (4)  $n=2, l=1, m_l=1, m_s=-\frac{1}{2}$

其中可以描述原子中电子状态的

- [ C ] (A) 只有(1)和(3) (B) 只有(1)和(2)  
 (C) 只有(2)和(4) (D) 只有(1)和(4)

解：根据泡利不相容原理知：(2)和(4)是正确的。

3. 如果(1) 锗用铟(三价元素)掺杂，(2) 硅用锑(五价元素)掺杂，则分别获得的半导体属于下述类型：

- [ C ] (A) (1)为 n 型半导体，(2)为 p 型半导体 (B) (1)，(2)均为 n 型半导体  
 (C) (1)为 p 型半导体，(2)为 n 型半导体 (D) (1)，(2)均为 p 型半导体

**解：**三价掺杂，少个电子，是空穴，正粒子载流子导体，是 p 型 (positive)；  
五价掺杂，多个电子，负粒子载流子导体，是 n 型 (negative)。

4. 纯硅在  $T = 0 \text{ K}$  时能吸收的辐射最长的波长是  $1.09 \mu\text{m}$ ，故硅的禁带宽度为

[ **D** ] (普朗克常量  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ,  $1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$ )

(A) 0.65 eV

(B) 1.83 eV

(C) 1.60 eV

(D) 1.14 eV

**解：**由  $h\nu = \frac{hc}{\lambda_m} = E$ ,

$$\text{得 } E = \frac{hc}{\lambda_m} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3.0 \times 10^8}{1.09 \times 10^{-6}} = 1.825 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$= 1.825 \times 10^{-19} \times \frac{1}{1.60 \times 10^{-19}} \text{ eV} = 1.14 \text{ eV}$$

5. 下述说法中，正确的有：

[ **B** ] (A) 本征半导体是电子与空穴两种载流子同时参与导电，而杂质半导体(n 或 p 型)只有一种载流子(电子或空穴)参与导电，所以，本征半导体导电性能比杂质半导体好。

(B) n 型半导体中杂质原子所形成的局部能级靠近导带的底部，使局部能级中多余的电子容易被激发跃迁到导带中去，大大提高了半导体导电性能。

(C) n 型半导体的导电性能优于 p 型半导体，因为 n 型半导体是负电子导电，p 型半导体是正离子导电。

(D) p 型半导体的导电机制完全决定于满带中空穴的运动。

**解：**答案 B。

6. 按照原子的量子理论，原子可以通过自发辐射和受激辐射的方式发光，它们所产生的光的特点是：

[ **B** ]

(A) 两个原子自发辐射的同频率的光是不相干的，原子受激辐射的光与入射光是不相干的；

(B) 两个原子自发辐射的同频率的光是不相干的，原子受激辐射的光与入射光是相干的；

(C) 两个原子自发辐射的同频率的光是相干的，原子受激辐射的光与入射光是不相干的；

(D) 两个原子自发辐射的同频率的光是相干的，原子受激辐射的光与入射光是相干的。

**解：**答案 B。

7. 激发本征半导体中传导电子的几种方法有(1)用三价元素掺杂，(2)用五价元素掺杂，(3)热激发，(4)光激发。对于纯锗和纯硅这类本征半导体，在上述方法中能激发其传导电子的只有

[ **B** ] (A) (1)和(2) (B) (3)和(4) (C) (1) (2)和(3) (D) (1) (2)和(4)

**解：**本征激发为热激发和光激发。

8. 证实电子存在自旋的相关实验是：

[ **D** ] (A) 康普顿实验； (B) 卢瑟福实验；

(C) 戴维孙—革末实验； (D) 斯特恩—革拉赫实验。

**解：**斯特恩—革拉赫实验。

二、填空题：

1. 1921 年斯特恩和革拉赫在实验中发现：一束处于  $s$  态的原子射线在非均匀磁场中分裂为两束。对于这种分裂用电子轨道运动的角动量空间取向量子化难于解释，只能用\_\_\_\_\_来解释。

**解：**电子自旋的角动量的空间取向量子化。

2. 多电子原子中，电子的排列遵循 \_\_\_\_\_ 原理和 \_\_\_\_\_ 原理，前者指的是\_\_\_\_\_，后者指的是\_\_\_\_\_。

**解：** 泡利不相容 原理和 能量最小 原理。

泡利不相容原理：同一个原子中不可能有两个或两个以上的具有完全相同的四个量子数的电子；

能量最小原理：当原子处于基态时，每个电子总是尽可能占有最低的能量状态，从而使整个原子系统的能量最低，原子系统也最稳定。

3. 根据量子力学理论，氢原子中电子的轨道角动量  $L = \sqrt{l(l+1)}\hbar$ ，当主量子数  $n = 3$  时，电子的轨道角动量可能取值为\_\_\_\_\_。若氢原子中电子的轨道角动量为  $\sqrt{12}\hbar$ ，则其在外磁场方向的投影可能取的值分别为\_\_\_\_\_。

**解：** (1) 当主量子数  $n = 3$  时，角量子数  $l$  可能取的值为 0, 1, 2，代入电子轨道角动量的可能取值为： $l=0$  时， $L = 0$ ；

$$l=1 \text{ 时, } L = \sqrt{2}\hbar ;$$

$$l=2 \text{ 时, } L = \sqrt{6}\hbar .$$

(2)  $0, \pm 1\hbar, \pm 2\hbar, \pm 3\hbar$ 。

4. 玻尔氢原子理论中，电子轨道角动量最小值为\_\_\_\_\_；而量子力学理论中，电子轨道角动量最小值为\_\_\_\_\_。

**解：**  $\frac{h}{2\pi}$ ；0；量子力学。

根据玻尔氢原子理论，角动量量子化条件为  $L = \frac{nh}{2\pi}$  ( $n = 1, 2, \cdots$ )，角动量的最小值不为零，而是  $\frac{h}{2\pi}$  或  $\hbar$ 。

而根据薛定谔方程解出的氢原子角动量量子化条件为  $L = \frac{\sqrt{l(l+1)}\hbar}{2\pi}$  ( $l = 0, 1, 2, \cdots n-1$ ) 角动量的最小值可以为零。

5. 根据泡利不相容原理，在主量子数  $n = 4$  的电子壳层上最多可能有的电子数为\_\_\_\_\_个，它有\_\_\_\_\_个支壳层，4p 支壳层上可容纳\_\_\_\_\_个电子。

**解：**  $2n^2 = 2 \times 4^2 = 32$ ，4 个支壳层，6 个电子。

6. 有一种原子，在基态时  $n = 1$  和  $n = 2$  的主壳层都填满电子，3s 支壳层也填满电子，而 3p 支壳层只填充一半，这种原子的原子序数是\_\_\_\_\_。

**解：**这种原子的原子序数是 15。

$n = 1$  壳层电子数  $2n^2 = 2$ ;  
 $n = 2$  壳层电子数  $2n^2 = 8$ ;  
 $3s$  壳层电子数  $2(2l + 1) = 2$ ;  
 $3p$  壳层填充一半的电子数  $\frac{1}{2} \times 2(2l + 1) = 3$ ;  
 总电子数为 15。

7. 锂( $Z = 3$ )原子中含有 3 个电子, 电子的量子态可用( $n, l, m_l, m_s$ )四个量子数来描述, 若已知基态锂原子中一个电子的量子态为  $(1, 0, 0, \frac{1}{2})$ , 则其余两个电子的量子态分别为( )和( )。

**解:**  $(1, 0, 0, -\frac{1}{2})$  和  $(2, 0, 0, \frac{1}{2})$  或  $(2, 0, 0, -\frac{1}{2})$

8. 钴( $Z = 27$ )有两个电子在  $4s$  态, 没有其它  $n \geq 4$  的电子, 则在  $3d$  态的电子可有\_\_\_\_\_个。

**解:** 7

参考解析: 钴的电子组态为  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^7 4s^2$ 。

9. 与绝缘体相比较, 半导体能带结构的特点是\_\_\_\_\_。

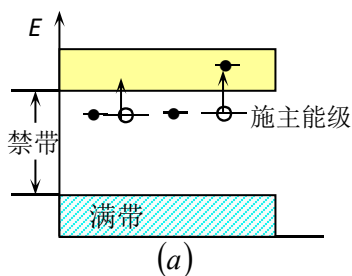
**解:** 禁带宽度较窄。

10.  $p$  型半导体中杂质原子所形成的局部能级(也称受主能级), 在能带结构中应处于\_\_\_\_\_ ;  $n$  型半导体中杂质原子所形成的局部能级(也称施主能级), 在能带结构中应处于\_\_\_\_\_。

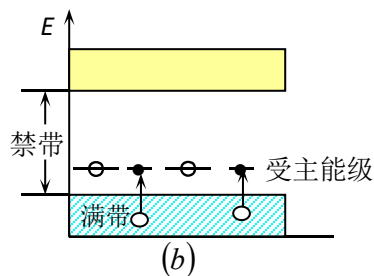
**解:** 禁带中, 但接近满带顶; 禁带中, 但接近导带底。

11. 若锗用铈(五价元素)掺杂, 则成为\_\_\_\_\_  $n$  \_\_\_\_\_型半导体, 它的多数载流子是\_\_\_\_\_ 电子 \_\_\_\_\_; 若硅用铝(三价元素)掺杂, 则成为\_\_\_\_\_  $p$  \_\_\_\_\_型半导体, 它的多数载流子是\_\_\_\_\_ 空穴 \_\_\_\_\_。

请在所附的两个能带图中分别定性画出施主能级或受主能级。



$n$  型半导体



$p$  型半导体

12. 纯净锗吸收辐射的最大波长为  $\lambda = 1.9 \mu\text{m}$ , 锗的禁带宽度为\_\_\_\_\_ eV。

**解:** 由  $h\nu = \frac{hc}{\lambda_m} = E$ ,

得  $E = \frac{hc}{\lambda_m} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3.0 \times 10^8}{1.9 \times 10^{-6}} = 1.047 \times 10^{-19} \text{ J}$

$$= 1.047 \times 10^{-19} \times \frac{1}{1.60 \times 10^{-19}} \text{ eV} = 0.65 \text{ eV}$$

### 三、计算题：

1. 根据泡利不相容原理，在主量子数  $n=2$  的电子壳层上最多可能有多少个电子？试写出每个电子所具有的四个量子数  $n, l, m_l, m_s$  之值。

**解：** 在  $n=2$  的电子壳层上最多可能有 8 个电子。

它们所具有的四个量子数( $n, l, m_l, m_s$ )分别为

$$\begin{aligned} (1) & (2, 0, 0, \frac{1}{2}); & (2) & (2, 0, 0, -\frac{1}{2}); \\ (3) & (2, 1, 0, \frac{1}{2}); & (4) & (2, 1, 0, -\frac{1}{2}); \\ (5) & (2, 1, 1, \frac{1}{2}); & (6) & (2, 1, 1, -\frac{1}{2}); \\ (7) & (2, 1, -1, \frac{1}{2}); & (8) & (2, 1, -1, -\frac{1}{2}). \end{aligned}$$

2. 已知锗的禁带宽度为 0.78 eV，则  $T=0 \text{ K}$  时锗能吸收的辐射的最长波长是多少  $\mu\text{m}$ ？  
(普朗克常量  $h=6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ,  $1 \text{ eV}=1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$ )

**解：** 根据能量和波长关系，设锗的禁带宽度为  $E$ ，能吸收的辐射最长波长为  $\lambda_{\text{max}}$ ，

$$\text{则 } \frac{hc}{\lambda_{\text{max}}} = E$$

$$\text{得 } \lambda_{\text{max}} = \frac{hc}{E_{\text{max}}} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{0.78 \times 1.60 \times 10^{-19}} = 1.59 \times 10^{-6} \text{ m} = 1.59 \mu\text{m}$$