

半导体物理习题及解答

孟宪章 编
康昌鹤

吉林大学出版社

半导体物理习题及解答

孟宪章 编
康昌鹤

吉林大学出版社

半导体物理习题及解答

孟宪章 康昌鹤 编

*

吉林大学出版社出版 吉林省新华书店发行

长春市第五印刷厂印刷

*

787×1092毫米32开本 10.375印张 233,000字

1986年8月第1版 1986年8月第1次印刷

印数：2,500册

统一书号：13323·13 定价：2.00元

内 容 提 要

本书共十三章，各章均列出了所涉及的基本原理和公式，详细解答了一些典型例题，并有选择地附有相当数量的习题，给出了简明扼要的解答。选题难易兼顾，解答清楚易懂，可供理工科大学生和研究生使用，亦可供有关的教师和工程技术人员参考。

2011/10/27

前 言

半导体物理涉及的物理概念和基本原理较多，因此，无论是学习半导体物理，还是从事这方面的教学工作，均需要一部内容丰富的半导体物理习题集，以助于加深对物理概念和基本原理的理解。

本书是作者在吉林大学从事半导体物理教学的经验的基础上编写而成的，是一部配合教材《半导体物理学》（刘文明著）的习题集。全书共十三章，每章首先列出了本章所涉及的基本原理和公式，然后详细地解答了一些典型例题，最后有选择地附以相当数量的习题，并给出了解答。因此，可供大学生和研究生学习半导体物理时使用，亦可供从事半导体物理教学的教师参考。而且，由于书中包含了相当数量的有关半导体应用的习题，所以，有关工程技术人员阅读本书，亦会有所裨益。

吉林大学高鼎三先生对本书的编写工作一直予以热情的关注和鼓励。刘文明教授审阅了全书，并提出了许多重要的修改意见。对此，作者表示衷心的感谢。

本书第一、二、三、四、五、六、七、十二、十三章以及附录由孟宪章编写；第八、九、十、十一章由康昌鹤编写。由于水平所限，错误和不妥之处在所难免，希望读者不吝批评指正。

作 者

一九八五年三月

目 录

第一章 晶体结构	1
基本原理和公式	1
例题	2
习题	11
第二章 晶格振动和晶格缺陷	30
基本原理和公式	30
例题	31
习题	36
第三章 半导体中的电子状态	44
基本原理和公式	44
例题	45
习题	50
第四章 热平衡情况下载流子的密度	60
基本原理和公式	60
例题	61
习题	70
第五章 输运现象	79
基本原理和公式	79
例题	80
习题	90
第六章 非平衡载流子	114
基本原理和公式	114

例题·····	115
习题·····	126
第七章 半导体表面 ·····	153
基本原理和公式·····	153
例题·····	154
习题·····	160
第八章 金属-半导体接触 ·····	179
基本原理和公式·····	179
例题·····	180
习题·····	185
第九章 p-n 结 ·····	194
基本原理和公式·····	194
例题·····	195
习题·····	209
第十章 光电现象 ·····	226
基本原理和公式·····	226
例题·····	227
习题·····	234
第十一章 热电现象 ·····	244
基本原理和公式·····	244
例题·····	245
习题·····	255
第十二章 能带理论 ·····	262
基本原理和公式·····	262
例题·····	263
习题·····	275
第十三章 能带的计算方法 ·····	293

基本原理和公式.....	293
例题.....	294
习题.....	300
附录 1 在室温下 (300 K) , 硅、锗和砷化镓的电阻 率与杂质密度的关系.....	318
附录 2 物理常数.....	319
附录 3 重要半导体的性质.....	320
附录 4 硅、锗和砷化镓的性质 (300K)	322

第一章 晶体结构

基本原理和公式

1. 晶体结构是指晶体中的原子排列。布拉伐格子是结构基元的代表点在空间的分布，它是描述原子排列周期性的。布拉伐格子是一种数学上的抽象，只是当基元以同样的方式安置于每个格点上，才能形成晶体结构。

2. 用晶向指数 $[u \ v \ w]$ 表示一族晶列的取向。在通过原点的晶列上，距原点最近的格点，其晶格矢量 $\underline{R} = u \underline{a} + v \underline{b} + w \underline{c}$ 给出 $[u \ v \ w]$ 。

用密勒指数 $(h \ l \ k)$ 表示一族晶面的取向。设晶面族中任意一个晶面在三个坐标轴上的截距分别为 r, s, t (分别用 a, b, c 来度量)，则密勒指数就是三个互质的整数 h, l, k ,

$$h : l : k = \frac{1}{r} : \frac{1}{s} : \frac{1}{t}$$

3. 对于周期性一定的晶体，同它相对应的布拉伐格子是一定的。设晶格的基矢量为 $\underline{a}_1, \underline{a}_2, \underline{a}_3$ ，则倒格子基矢量的定义是

$$\left. \begin{aligned} \underline{b}_1 &= 2\pi \frac{\underline{a}_2 \times \underline{a}_3}{\Omega} \\ \underline{b}_2 &= 2\pi \frac{\underline{a}_3 \times \underline{a}_1}{\Omega} \\ \underline{b}_3 &= 2\pi \frac{\underline{a}_1 \times \underline{a}_2}{\Omega} \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

式中 Ω 是晶格原胞的体积，即 $\Omega = \vec{a}_1 \cdot (\vec{a}_2 \times \vec{a}_3)$ 。

4. 晶体的许多宏观物理性质，常常用一个张量来表示。当坐标系变换时，张量的分量也随之改变。但是，如果坐标系的变换是通过晶体的点群对称操作引起的，则张量在两种坐标系中应该具有相同的形式。

例 题

例 1 指出下述各种结构是不是布拉伐格子。如果是，请给出三个原基矢量；如果不是，请找出相应的布拉伐格子 and 尽可能小的基元。

(1) 底心立方（在立方单胞水平表面的中心有附加点的简立方）；

(2) 侧面心立方（在立方单胞垂直表面的中心有附加点的简立方）；

(3) 边心立方（在最近邻连线中点有附加点的简立方）。

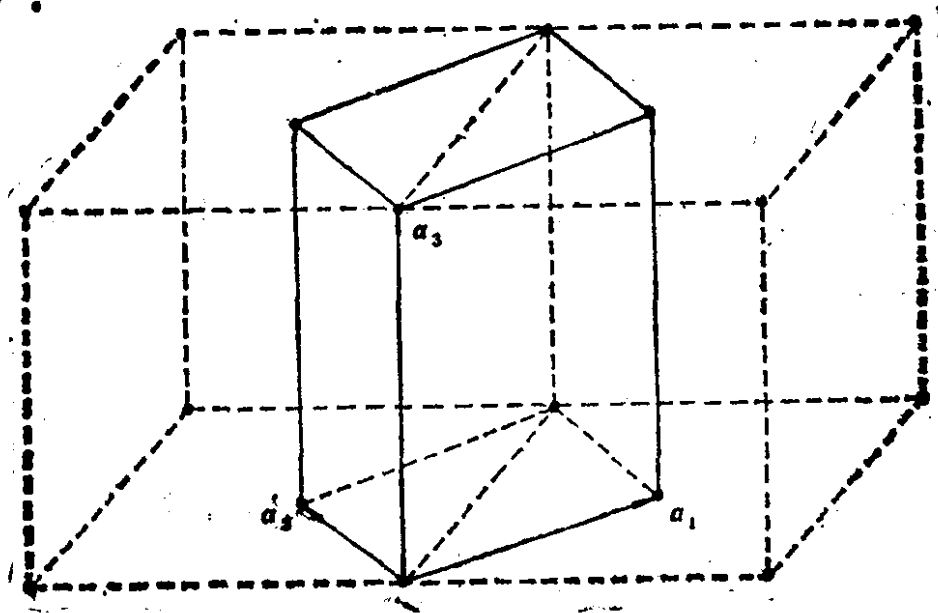


图 1-1

〈解〉

(1) 底心立方

如图 1-1 所示, 这种结构是布拉伐格子, 其形式是简单正方。设立方单胞的边长为 a , 则

$$|\vec{a}_1| = |\vec{a}_2| = \sqrt{\frac{2}{2}}a, \quad |\vec{a}_3| = a$$

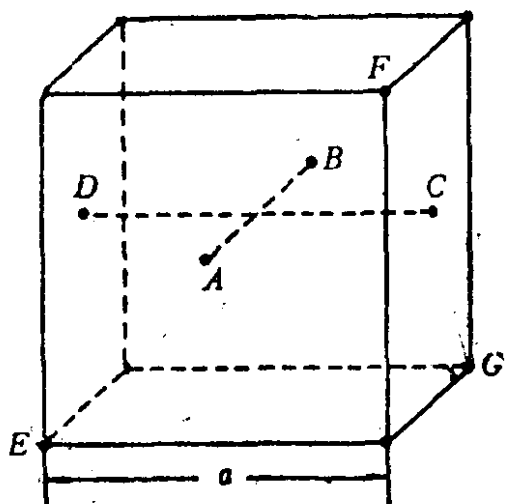


图 1-2

(2) 侧面心立方

在这种结构的一个立方单胞中, 点的分布如图 1-2 所示, 它不是布拉伐格子。我们来考察 A 和 B , C 和 D 以及八个顶点等三组点子。容易看出, 每一组内各点所处的环境是相同的。但是, 在面对角线 EF 以及与其平行的方向上, A 的最

近邻点与它的距离是 $\frac{\sqrt{2}}{2}a$, 而 D 的最近邻点与它的距离是

$\sqrt{2}a$, 所以 A 与 D 点所处的环境是不同的。在面对角线 EG 以及与其平行的方向上, 顶点 E 与最近邻点的距离是

$\sqrt{2}a$, 而 A 和 D 两点与最近邻点的距离都是 $\frac{\sqrt{2}}{2}a$, 故 E 点与

A , D 两点所处的环境也是不同的。综上所述, E , A , D 是三种不同的点, 它们构成侧面心立方结构的最小基元, 每一种点组成简立方形式的布拉伐格子。这种结构可以看作是由完全相同的三个简立方格子套在一起构成的, 或者表述为一个简立方格子, 在每个格点上附加 E , A , D 三种点组成的基元。

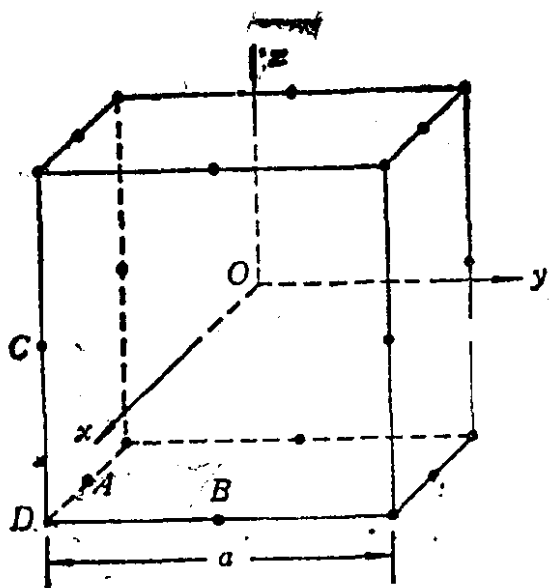


图 1-3

(3) 边心立方

在这种结构的一个立方单胞中，点的分布如图 1-3 所示，它不是布拉伐格子。与上面类似的分析表明，在每一个坐标面 ($x-y$, $y-z$, $z-x$) 上的四个点所处的环境是相同的，在顶角上的八个点所处的环境也是相同的，但是，

D , A , B , C 的处境却是各不相同的，它们构成边心立方结构的最小基元。这种结构可以表述为一个简立方格子，在每个格点上附加 D , A , B , C 四种点组成的基元。

例 2 对于面心立方、体心立方和金刚石三种晶体结构：

(1) 画出这些结构的原子排列在立方体的一个平面上的投影图，并用数字标出原子位置高出该平面的距离；

(2) 如果用等体积的硬球堆成上述结构，试证明球可能占据的最大体积和总体积之比 η 分别是 $\frac{\sqrt{2}}{6}\pi$, $\frac{\sqrt{3}}{8}\pi$ 和 $\frac{\sqrt{3}}{16}\pi$ 。

〈解〉

(1) 在面心立方、体心立方和金刚石三种晶体结构中，原子排列在立方体的一个平面上的投影，如图 1-4 所示，图中的数字表示原子位置高出该平面的距离（以立方体

的边长 a 为单位)。

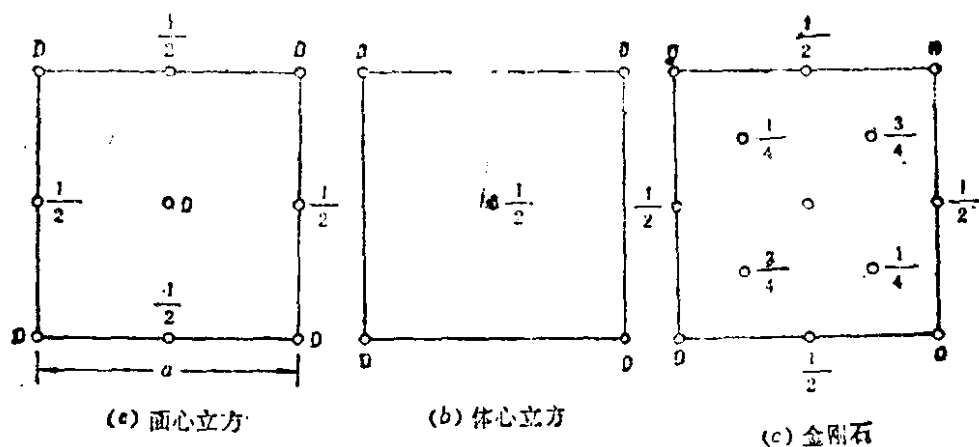


图 1-4

(2) 设硬球的半径为 r 。

(a) 面心立方:

图1-5 (a) 中画出了一个立方单胞中原子的排列情况, 图1-5 (b) 画出了立方体阴影区中原子的紧密排列, 由此可以得出, 球半径 r 和立方体边长 a 的关系为 $4r = \sqrt{2}a$ 。

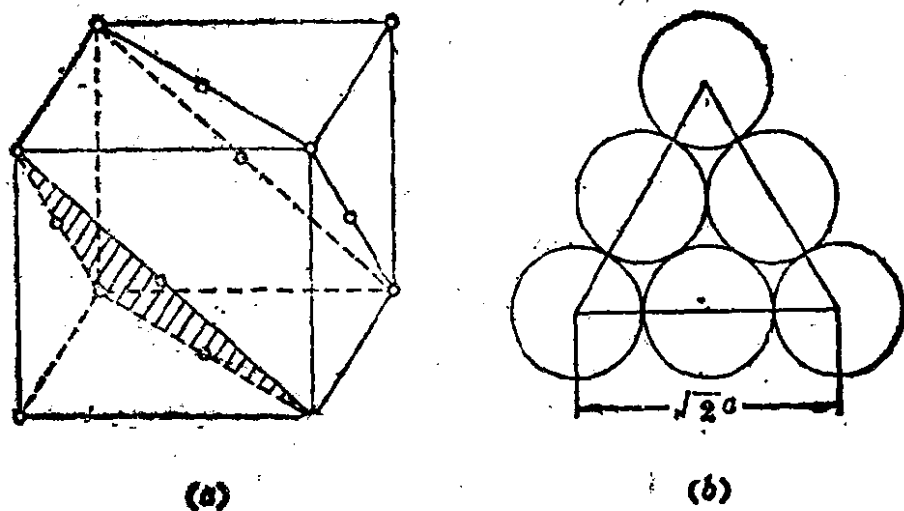


图 1-5

一个边长为 a 的立方体中有四个硬球, 故所求的体积比为

$$\eta = 4 \times \frac{4}{3} \pi r^3 / a^3 = \frac{\sqrt{2}}{6} \pi$$

(b) 体心立方:

最紧密排列是在体对角线上一个硬球与两个相邻的硬球相切, 即 $4r = \sqrt{3}a$. 在立方单胞中包含两个硬球, 所以

$$\eta = 2 \times \frac{4}{3} \pi r^3 / a^3 = \frac{\sqrt{3}}{8} \pi$$

(c) 金刚石:

最紧密的排列是近邻原子的间距等于球的直径, 即 $\frac{\sqrt{3}}{4}a = 2r$. 边长为 a 的立方体中有 8 个硬球, 所以

$$\eta = 8 \times \frac{4}{3} \pi r^3 / a^3 = \frac{\sqrt{3}}{16} \pi$$

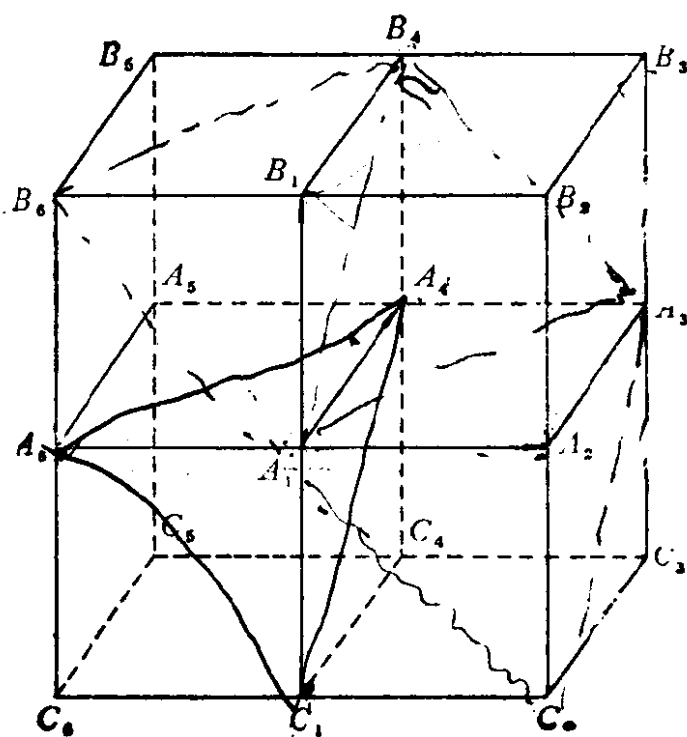


图 1-6

例3 在图1-6所示的四个立方单胞中，取 A_1 为坐标原点， A_1A_2 ， A_1A_4 和 A_1B_1 为坐标轴。

(1) 写出下列晶向的指数：

B_4B_5 ， C_2C_3 ， B_1B_3 ， A_1A_5 ， A_1B_3 ， A_1C_3 ；

(2) 写出下列晶面的密勒指数：

$A_4B_4B_3A_3$ ， $C_5A_5A_6C_6$ ， $A_1A_2A_3A_4$ ， $A_1B_1B_5A_5$ ，
 $A_4B_4B_6A_6$ ， $C_1A_4A_6$ ， $A_1B_4B_6$ 。

〈解〉

(1) B_4B_5 $[\bar{1} 0 0]$ ， C_2C_3 $[0 1 0]$ ，

B_1B_3 $[1 1 0]$ ， A_1A_5 $[\bar{1} 1 0]$ ，

A_1B_3 $[1 1 1]$ ， A_1C_3 $[1 1 \bar{1}]$ ；

(2) $A_4B_4B_3A_3$ $(0 1 0)$ ， $C_5A_5A_6C_6$ $(\bar{1} 0 0)$ ，

$A_1A_2A_3A_4$ $(0 0 1)$ ， $A_1B_1B_5A_5$ $(1 1 0)$ ，

$A_4B_4B_6A_6$ $(\bar{1} 1 0)$ ， $C_1A_4A_6$ $(\bar{1} 1 \bar{1})$ ，

$A_1B_4B_6$ $(\bar{1} 1 \bar{1})$ 。

例4 证明体心立方格子和面心立方格子互为正、倒格子。

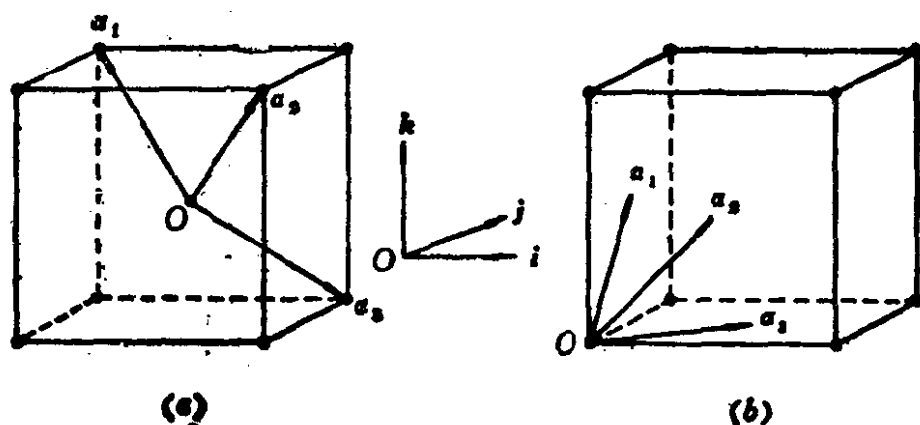


图 1-7

〈解〉

设晶格常数为 a ，选择， $\vec{i}$ ， $\vec{j}$ ， $\vec{k}$ 为沿立方单胞三边方向上的单位矢量，则体心立方格子的原基矢量 $\vec{a}_1$ ， $\vec{a}_2$ ， $\vec{a}_3$ 可表示成（图1-7（a）），

$$\left. \begin{aligned} \vec{a}_1 &= \frac{a}{2} (-\vec{i} + \vec{j} + \vec{k}) \\ \vec{a}_2 &= \frac{a}{2} (\vec{i} - \vec{j} + \vec{k}) \\ \vec{a}_3 &= \frac{a}{2} (\vec{i} + \vec{j} - \vec{k}) \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

面心立方格子的原基矢量 $\vec{a}_1$ ， $\vec{a}_2$ ， $\vec{a}_3$ 可表示成（图1-7（b）），

$$\left. \begin{aligned} \vec{a}_1 &= \frac{a}{2} (\vec{j} + \vec{k}) \\ \vec{a}_2 &= \frac{a}{2} (\vec{k} + \vec{i}) \\ \vec{a}_3 &= \frac{a}{2} (\vec{i} + \vec{j}) \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

把（1.2）式和原胞体积 $\Omega = \vec{a}_1 \cdot (\vec{a}_2 \times \vec{a}_3) = \frac{1}{2}a^3$

代入（1.1）式中，可得体心立方格子的倒格子基矢为：

$$\left. \begin{aligned} \vec{b}_1 &= \frac{2\pi}{a} (\vec{j} + \vec{k}) \\ \vec{b}_2 &= \frac{2\pi}{a} (\vec{k} + \vec{i}) \\ \vec{b}_3 &= \frac{2\pi}{a} (\vec{i} + \vec{j}) \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

把 (1.3) 式和原胞体积 $\Omega = \vec{a}_1 \cdot (\vec{a}_2 \times \vec{a}_3) = a^3/4$ 代入 (1.1) 式中, 可得面心立方格子的倒格子基矢为

$$\left. \begin{aligned} \vec{b}_1 &= \frac{2\pi}{a} (-\vec{i} + \vec{j} + \vec{k}) \\ \vec{b}_2 &= \frac{2\pi}{a} (\vec{i} - \vec{j} + \vec{k}) \\ \vec{b}_3 &= \frac{2\pi}{a} (\vec{i} + \vec{j} - \vec{k}) \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

对比 (1.4) 式与 (1.3) 式, 不难看出, 体心立方格子的倒格子是面心立方格子。但是两种格子的基矢量的量纲不同, 它们的立方单胞的边长分别为 a 和 $4\pi/a$ 。

同样, 由 (1.5) 和 (1.2) 式可以看出, 面心立方格子的倒格子是体心立方形式的, 倒格子的立方单胞边长是 $4\pi/a$ 。

例 5 证明单斜晶系二级张量的一般形式是

$$\begin{pmatrix} l_{11} & l_{12} & 0 \\ l_{21} & l_{22} & 0 \\ 0 & 0 & l_{33} \end{pmatrix}$$

〈解〉

当坐标系变换时, 张量的形式要发生变化。如果坐标变换是通过晶体的点群对称操作引起的, 则新老坐标系对于晶体来说, 应该是等效的。在两种坐标系中, 表征晶体物理性质的二级张量应该有相同的形式, 即 $l'_{ij} = l_{ij}$ 。可以证明。

$$l'_{ij} = \alpha_{in} \alpha_{jo} l_{no}$$

在上式中 l'_{ij} 和 l_{no} 分别是新老坐标系中二级张量的分

* 刘文明, 半导体物理学, 453 页, 吉林人民出版社, 1982 年。