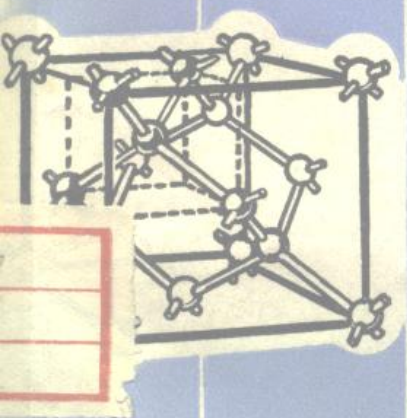


半导体手册  
第1编



# 半导体物理



科学出版社

《半导体手册》第1編

半 导 体 物 理

《半导体手册》翻译组译

科 学 出 版 社

1 9 7 0

《半导体手册》第1编  
**半 导 体 物 理**

《半导体手册》翻译组译

\*

**科 学 出 版 社 出 版**

北京西直门外三里河路2号

北京市书刊出版业营业登记证出字第061号

**中国科学院印刷厂印刷**

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1970年9月第一版 开本：787×1092 1/32

1970年9月第一次印刷 印张：3 7/8

字数：84,000

统一书号：15031·272

本社书号：3623·15—7

定价：0.30 元

## 毛主席语录

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

打破洋框框，走自己工业发展道路。

外国有的，我們要有，外国沒有的，我們也要有。

对于外国文化，排外主义的方針是錯誤的，应当尽量吸收进步的外国文化，以为发展中国新文化的借鏡；盲目搬用的方針也是錯誤的，应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化。

## 译者的话

本书是根据〔日〕半导体手册编委会编《半导体手册》1963年初版本译出。内容包括半导体物理学、半导体材料、晶体二极管和晶体三极管的工作原理、晶体二极管和晶体三极管、特种半导体器件、晶体二极管和晶体三极管特性、半导体电路理论、线性放大、振荡、调制与解调、脉冲电路、数字电路、电源、微波电路、参量放大器、数据等16编。

本书于1966年已全部译完，因工作量较大，未能及时出版。最近，我们征求读者意见，认为做为一般了解和查阅半导体电子技术的参考书，还应出版。我们遵照毛主席关于“**洋为中用**”的教导，为适应读者的要求，又继续进行审查校对，现将其单行出版。

本书主要特点是将半导体基础知识和应用技术综合汇编在一起的半导体电子技术的资料性参考书。书中在基础知识方面涉及的范围较为广泛，在应用技术方面介绍的比较全面，各编重点不一样，仅供读者参考。

原书中主要缺点表现在：有些编的内容尚有形式化的数学推导较多，物理分析较少；有些编在讲解概念和理论分析上有些模糊；有些编在文字和数字上有错误；有些编则为一些资产阶级学术权威和厂商吹嘘、捧场；有些编内容是从别的资料中传抄过来的，未经过实践验证。我们遵照伟大领袖毛主席“一切外国的东西，如同我们对于食物一样，必须经过自己的口腔咀嚼和胃肠运动，送进唾液胃液肠液，把它分解为精华和糟粕两部分，然后排泄其糟粕，吸收其精华，才能对我们的身体有益，决不能生吞活剥地毫无批判地吸收”的教导，加以删

节和校正。

本书在译校过程中,很多工厂、学校、科研单位给予了很大的支持和热情帮助,并提出不少宝贵意见,我们对这些单位表示衷心的感谢。

由于外文、专业知识的限制,在文字翻译及技术概念的表达上不免会有错误,又由于我们毛泽东思想学习的不够好,所以对原书中的其他错误观点及存在的问题,未能指出和很好的批判,恳切希望广大读者批评指正。

# 目 录

<b>第一章 半导体的电子结构和导电性</b> .....	( 1 )
1.1 周期性势场中的电子 .....	( 1 )
1.1.1 晶格和倒易晶格 .....	( 1 )
1.1.2 能带理论 .....	( 2 )
1.2 半导体的电子和空穴 .....	( 7 )
1.2.1 导体、绝缘体、半导体 .....	( 7 )
1.2.2 杂质能级 .....	( 8 )
1.2.3 电子和空穴的运动方程 .....	(11)
1.3 半导体的导电性 .....	(14)
1.3.1 载流子浓度的温度特性 .....	(14)
1.3.2 载流子的迁移率 .....	(18)
1.3.3 电子(空穴)的散射 .....	(21)
1.3.4 磁场效应 .....	(23)
1.3.5 实验分析、模型修正及其他问题 .....	(27)
<b>第二章 半导体的电磁效应</b> .....	(32)
2.1 霍尔效应及电阻率 .....	(32)
2.2 磁阻效应 .....	(36)
2.3 苏耳效应及其他 .....	(39)
<b>第三章 半导体中的载流子扩散、复合及俘获</b> .....	(41)
3.1 非平衡载流子的行为 .....	(41)
3.2 复合机构 .....	(42)
3.2.1 直接复合 .....	(43)
3.2.2 通过复合中心的复合 .....	(43)

3·2·3 表面复合 .....	(46)
3·3 寿命测定法 .....	(47)
3·4 实验结果 .....	(47)
3·5 俘获现象 .....	(49)
<b>第四章 不均匀半导体和载流子注入及空间电荷</b> .....	(51)
4·1 扩散电位 .....	(51)
4·2 pn 结和空间电荷 .....	(54)
4·3 载流子注入及空间电荷 .....	(59)
<b>第五章 强电场下的现象</b> .....	(70)
5·1 欧姆定律和电场强度 .....	(70)
5·2 电子温度和迁移率 .....	(70)
5·3 电场引起的电子浓度的变化 .....	(72)
5·4 隧道电流 .....	(74)
<b>第六章 压电电阻效应</b> .....	(76)
6·1 压电电阻系数 .....	(76)
6·2 压电电阻产生的原因、应力引起的能带 结构的变化 .....	(78)
<b>第七章 半导体中的电流、电压放大现象</b> .....	(81)
7·1 pn 结结构 .....	(81)
7·2 陷阱的电流放大 .....	(84)
7·3 负电阻 .....	(85)
7·3·1 隧道二极管 .....	(85)
7·3·2 负质量放大器 .....	(86)
<b>第八章 光电效应</b> .....	(88)
8·1 光引起的载流子浓度变化和电子发射 .....	(88)
8·1·1 固体的光吸收和光电导 .....	(88)
8·1·2 光电导 .....	(93)
8·1·3 光电子发射 .....	(96)



8.2	光致电压的产生 .....	(97)
8.2.1	内部吸收光的情形 .....	(98)
8.2.2	pn 结光生伏特 .....	(98)
8.2.3	光电磁效应 .....	(99)
8.3	半导体的发光 .....	(99)
8.3.1	发光机构 .....	(99)
8.3.2	场致发光 .....	(101)
8.4	增补(跃迁几率) .....	(101)
8.4.1	跃迁几率的形式 .....	(102)
8.4.2	跃迁定律 .....	(102)
<b>第九章</b>	<b>温差电效应</b> .....	<b>(104)</b>
9.1	塞贝克效应、珀耳帖效应、汤姆孙效应 .....	(104)
9.2	绝对温差电动势(绝对塞贝克效应) .....	(107)
9.3	半导体的温差电动势 .....	(108)
9.4	电阻率的温度系数 .....	(110)
9.5	热离子放射 .....	(111)
<b>参考资料</b>	<b>.....</b>	<b>(112)</b>

# 第一章 半导体的电子结构和导电性

## 1.1 周期性势场中的电子

由 X 射线和电子射线等实验结果知道, 大部分固体是由周期排列的原子构成的, 这是固体的最大特点。但是, 在实际晶体中, 原子排列的完整周期性常常由于杂质、晶格缺陷和热振动等或多或少地受到扰乱, 不过在大多数情况下, 仍然可以认为晶体中的原子排列基本上具有完整的周期性, 而把受到“扰乱”的部分当作微扰看待。从这种观点出发, 固体量子论成功地阐明了金属、半导体和绝缘体等物质的许多电子特性。因此, 本节首先叙述理想晶体中原子排列的周期性, 然后再讨论这种晶体中的电子状态。

**1.1.1 晶格和倒易晶格** 周期性完整的晶体具有三个独立的基本平移矢量  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{c}$ , 并且具有下述性质, 即无论从晶体内任何一点  $\mathbf{x}$  观察, 还是从点  $\mathbf{x}'$

$$\mathbf{x}' = \mathbf{x} + l\mathbf{a} + m\mathbf{b} + n\mathbf{c} (l, m, n \text{ 为整数}) \quad (1.1)$$

观察, 原子排列都是相同的。反过来说, 在晶体中选择两点  $\mathbf{x}, \mathbf{x}'$ , 由这两点来看如果原子排列相同两点无论怎样选择, 式 (1.1) 都能成立, 则矢量  $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$  称为**基本平移矢量**。把晶体内的一点只移动距离

$$\mathbf{r}_{lmn} = l\mathbf{a} + m\mathbf{b} + n\mathbf{c} \quad (l, m, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (1.2)$$

的操作, 称为**平移操作**。如果把  $\mathbf{r}_{lmn}$  看做一个位矢, 则由此

位矢所表示的所有点可以构成一个立体网。

这种立体网称为**空间晶格**或简称为**晶格**。上述的点称为**格点**。晶格是表示晶体的平移对称的图形。由矢量  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{c}$  构成的六面体是晶格的基本要素，因而称为**原胞**。由基本矢量  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{c}$  可构成下列矢量：

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\mathbf{a}} &= \frac{\mathbf{b} \times \mathbf{c}}{\mathbf{a} \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{c})}, & \tilde{\mathbf{b}} &= \frac{\mathbf{c} \times \mathbf{a}}{\mathbf{a} \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{c})} \\ \tilde{\mathbf{c}} &= \frac{\mathbf{a} \times \mathbf{b}}{\mathbf{a} \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{c})} \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

(式中  $\cdot$  代表标量积,  $\times$  代表矢量积)

它们满足关系式:  $\tilde{\mathbf{a}} \cdot \mathbf{a} = \tilde{\mathbf{b}} \cdot \mathbf{b} = \tilde{\mathbf{c}} \cdot \mathbf{c} = 1$  和  $\tilde{\mathbf{a}} \cdot \mathbf{b} = \tilde{\mathbf{b}} \cdot \mathbf{c} = \tilde{\mathbf{c}} \cdot \mathbf{a} = 0$  的关系。用新矢量  $\tilde{\mathbf{a}}$ ,  $\tilde{\mathbf{b}}$ ,  $\tilde{\mathbf{c}}$  作基本矢量, 又可以绘出新的空间晶格。这种点阵称为**倒易晶格**。在一般情况下, 在周期性介质中传播的波, 可以用此倒易晶格空间的矢量来表示。

**1.1.2 能带理论**<sup>[1,2,4,6,8]</sup> 对于许多金属和半导体, 都可以假设晶体中的电子(主要是价电子)是处在以晶格为周期的势场

$$U(\mathbf{x} + \mathbf{r}_{lmn}) = U(\mathbf{x}) \quad (1.4)$$

而且可以认为, 势场  $U$  既包括晶体的离子核所引起的部分, 也在一定程度上包括价电子之间的相互作用 [例如在哈特里-福克近似中]。如果作这样的单电子近似的假定, 则晶体中的电子状态可以作为薛定谔方程

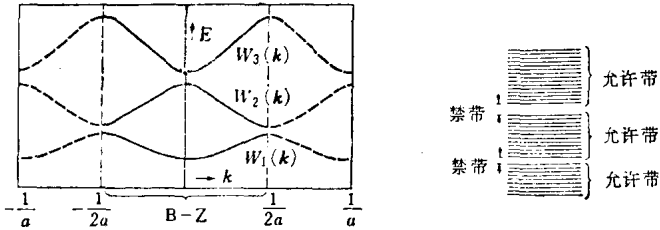
$$-\frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \psi + U(\mathbf{x})\psi = E\psi \quad (1.5)$$

的解求出, 式中  $\hbar = h/2\pi$ ,  $h$  是普朗克常数。

如果电子出现的几率  $|\psi|^2$  在各处都是有限的, 也就是说在物理上是被容许的, 式 (1.4) 和 (1.5) 的解具有下述性质:

(1) 能带、布洛赫函数 能量  $E$  可以作为某一实数矢量  $\mathbf{k}$  的平滑函数, 如图 1·1 表示成下列形式.

$$E = W_s(\mathbf{k}) (s = 1, 2, 3 \cdots \cdots)$$



$W_1, W_2, W_3$ : 三个能带

$a$ : 晶格间距

$B-Z$ : 第一布里渊区

图 1·1 一维晶格的能带图形

对于各个  $s$ , 从  $W_s(\mathbf{k})$  的最小值到最大值的能量范围称为一个能带. 波函数  $\psi$  也是  $s$  和  $\mathbf{k}$  的函数, 这个函数可用以晶格为周期的复函数  $u_s$  表示成下式:

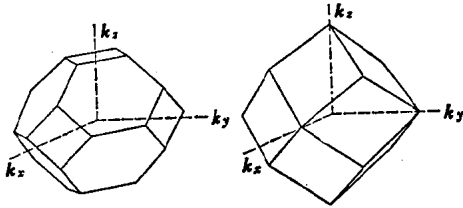
$$\left. \begin{aligned} \psi_s(\mathbf{x}, \mathbf{k}) &= e^{2\pi i \mathbf{k} \cdot \mathbf{x}} u_s(\mathbf{x}, \mathbf{k}) \\ u_s(\mathbf{x} + \mathbf{r}_{lmn}, \mathbf{k}) &= u_s(\mathbf{x}, \mathbf{k}) \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

式(1.6)称为布洛赫定理, 满足布洛赫定理的波函数称为布洛赫函数,  $\mathbf{k}$  称为波矢量.

(2) 布里渊区 (B-Z) 如图 1·1 所示, 在一维晶格中,  $W_s(\mathbf{k})$  是  $\mathbf{k}$  的以  $1/a$  为周期的周期函数, 函数  $\psi$  也具有同样性质. 因此, 为了只取独立的解, 也可以把  $\mathbf{k}$  限制在  $-\frac{1}{2a} < \mathbf{k} \leq \frac{1}{2a}$  的区域内. 这个区域称为**第一布里渊区**. 三维晶格的布里渊区如图 1·2 所示, 布里渊区的边界是由满足布拉格反射条件

$$(\mathbf{k} + \tilde{\mathbf{r}}_{pqr})^2 = k^2, \quad \tilde{\mathbf{r}}_{pqr} = p\tilde{\mathbf{a}} + q\tilde{\mathbf{b}} + r\tilde{\mathbf{c}}$$

( $p, q, r$  是整数)



(a) 面心立方晶格的布里渊区      (b) 体心立方晶格的布里渊区

图 1.2 三维晶格的布里渊区

的  $\mathbf{k}$  所构成的几个平面。如果不把晶体设想为无限大，而加上玻恩-卡曼条件，或称之为周期性边界条件的条件

$$\begin{aligned} \psi_s(\mathbf{x}, \mathbf{k}) &= \psi_s(\mathbf{x} + N_1\mathbf{a}, \mathbf{k}) \\ &= \psi_s(\mathbf{x} + N_2\mathbf{b}, \mathbf{k}) \\ &= \psi_s(\mathbf{x} + N_3\mathbf{c}, \mathbf{k}), \end{aligned}$$

式中  $N_1, N_2, N_3$  是大的整数。

我们就可以把晶体限制在由  $N_1\mathbf{a}, N_2\mathbf{b}, N_3\mathbf{c}$  所构成的体积(玻恩-卡曼体积)内。这样,我们就可以考虑一个有限体积的晶体,而且能够避开晶体表面反射的问题。在这种情况下,  $\mathbf{k}$  的值被限制为

$$\mathbf{k} = \frac{n_1}{N_1} \tilde{\mathbf{a}} + \frac{n_2}{N_2} \tilde{\mathbf{b}} + \frac{n_3}{N_3} \tilde{\mathbf{c}} \quad (1.7)$$

$$(n_1, n_2, n_3 = 0, \pm 1, \pm 2 \cdots \cdots).$$

在布里渊区中,由式(1.7)确定的  $\mathbf{k}$  有  $N_1N_2N_3$  个,而且各个状态是独立的,所以布里渊区中各个能带里的状态数就等于玻恩-卡曼体积中的晶格结点数。

(3) 禁带 在一维晶体中,  $W_1(\mathbf{k}), W_2(\mathbf{k}), \dots$  互不重叠, 它们之间出现  $\Delta E$  的能量间隙, 这些能量间隙被称为第一允许带、第二允许带和禁带(参阅图 1·1)。在三维晶体中, 由于晶体的几何对称性, 两个以上的能带的能量在布里渊区中的某一点或某一线上成为相等的, 也就是有时在  $\mathbf{k}$  的某一区域内有能量的简并。而且有时两个以上的能带会发生重叠 ( $\Delta E < 0$ )。如果不改变晶体形状而扩大晶格间距, 那么在极限情况下, 各个能带便变成孤立原子的电子状态(参阅图 1·3)。

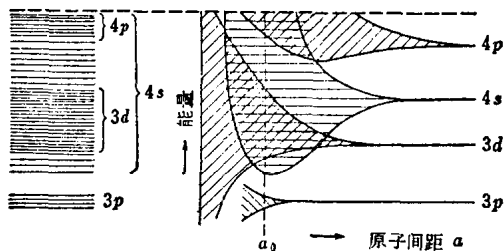


图 1·3 是把 Cu 金属的能带作为原子间距的函数来表示的图形。图中表示: 当  $a$  变小时, Cu 原子的  $3p, 3d, 4s, 4p$  能级变成  $3p, 3d, 4s, 4p$  能带。左图表示与 Cu 金属的原子间距  $a_0$  (实测值) 相对应的各个能带宽度。

关于金属和半导体的能带, 很早以前就有了具体的计算例子, 但最近的计算结果越来越精确<sup>[6,12]</sup>。尽管如此, 令人满意的计算结果却很少, 大部分都用实验结果(光吸收、电导、光电导、回旋共振吸收等)作了补充或修正。图 1·4 和图 1·5 是 Si 和 Ge 晶体的能带结构, 这是对赫尔曼的计算结果加以修正后得出的<sup>[12-25]</sup>。

在图 1·4 中, 满带(参阅本编 1·2·1 节)顶位于  $\mathbf{k} = 0$  处, 而导带底则位于 [111] 轴方向的布里渊区边界处上。导带(参

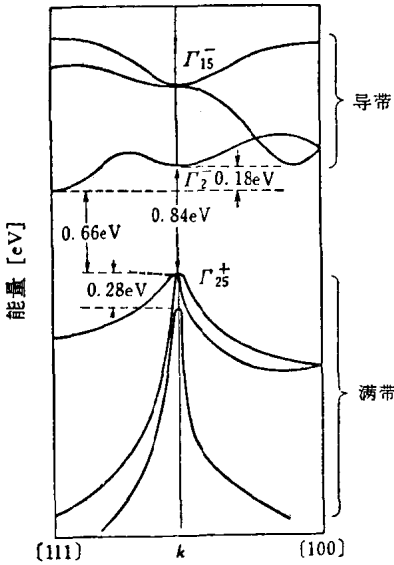


图 1-4 Ge 晶体的能带结构

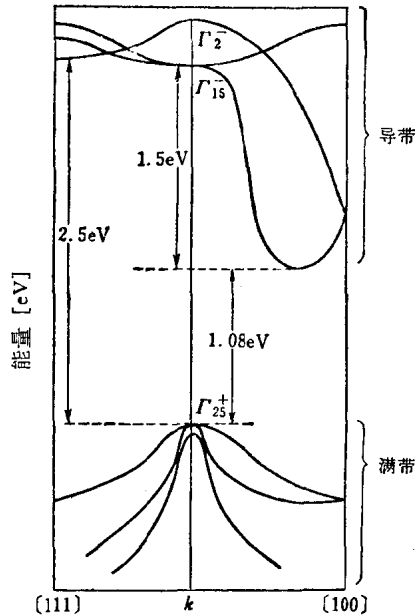


图 1-5 Si 晶体的能带结构

阅本编 1·2·1 节)底附近的等能面是沿布里渊区[111]轴方向旋转的椭圆柱体。旋转椭圆柱体长轴方向的有效质量  $m_l^*$  (参阅本编 1·2·3 节)为  $(1.58 \pm 0.04) m$ , 短轴方向的  $m_t^*$  为  $(0.082 \pm 0.001) m$ 。这种椭圆柱体在布里渊区中共有 8 个。禁带宽度为 0.66 电子伏特。满带在  $k = 0$  处有 0.28 电子伏特的能量间隙,这是自旋与轨道的相互作用所引起的,能隙的上界对应于  $j = 3/2$  的状态,下界对应于  $j = 1/2$  的状态(式中  $j$  为总角动量量子数)。满带顶的有效质量(空穴的)可以认为大致是各向同性的,可以用  $m_l^* = 0.3m$ ,  $m_t^* = 0.04m$  两个数值近似地表示。符号  $\Gamma_{15}^-$ ,  $\Gamma_2^-$ ,  $\Gamma_{25}^+$  表示  $k = 0$  时的波函数的对称性<sup>[6]</sup>。

在图 1·5 中,满带顶位于  $k = 0$  处,而导带底位于[100]

轴上。导带底附近的等能面是沿[100]轴方向旋转的6个椭圆体,其  $m_1^* = (0.97 \pm 0.02)m$ ,  $m_2^* = (0.19 \pm 0.01)m$ 。禁带宽度为1.08电子伏特,自旋与轨道相互作用所引起的在  $k = 0$  处的满带间隙比 Ge 的小,约为0.04电子伏特。满带顶的有效质量(空穴的)也可以认为大致是各向同性的,可以用  $m_1^* = 0.5m$ ,  $m_2^* = 0.16m$  的两个数值近似地表示之。

最近的研究指出,对 Si 的导带必须进行很大的修正,因为实验指出,  $\Gamma_2^-$  和  $\Gamma_{15}^-$  的能级非常接近,而且导带在[111]方向的形状是错误的<sup>[14]</sup>。

## 1.2 半导体的电子和空穴

**1.2.1 导体、绝缘体、半导体** 说明原子周期律的泡利原理,对固体内的电子也是完全适用的。电子具有自旋自由度,而且自旋只有与本征值  $+(1/2)\hbar$ ,  $-(1/2)\hbar$  对应的两个本征态。因此,可以有两个电子占据由  $s$ ,  $k$  确定的一个量子状态,这时两个电子的自旋方向是相反(+,-)的。这个定律可以完满地解释导体和绝缘体的定性差异。

下面就金刚石晶体来研究一下。C原子有4个  $2s^2 2p^2$  的价电子。金刚石晶体在面心立方型原胞中有两个原子(参阅图1.6),所以每一格点有8个电子。价电子形成的能带有4个,称为**满带**。根据本编1.1.2节之(2)的解释,4个满带应由  $8 \times (\text{格点数}) = (\text{晶体内价电子总数})$  个电子所充满。在满带顶上隔着有限能量  $\Delta E$  ( $\Delta E \approx 6$  电子伏特)有对应于价电子激发态的**导带**,但是这是一个空带。由于能带的对称性,充填于满带中的电子是不导电的。所以金刚石是绝缘体。如果物质要成为导体,必须只有一部分能带被电子所占据,或  $\Delta E \leq 0$ 。



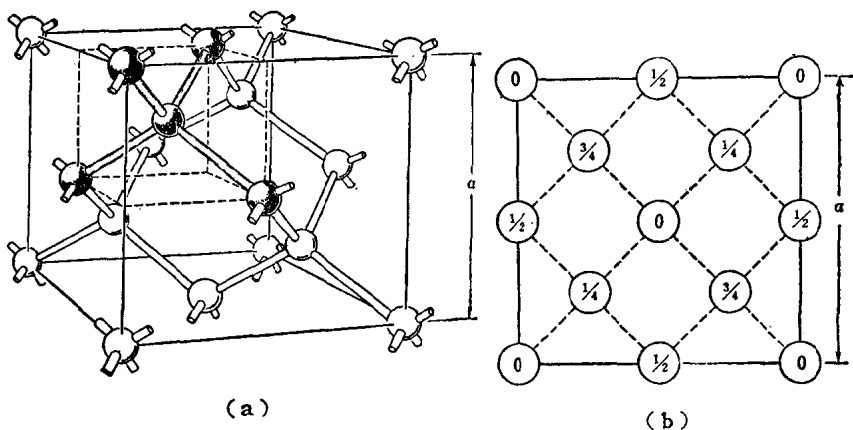


图 1-6 金刚石类型晶体的结构

图中(b)是把(a)的单位晶格投射于立方体的面上绘制的。0和1/2表示面心立方晶格上的原子；1/4和3/4表示沿着立方体对角线错开其1/4的另一个面心立方晶格上的原子； $a$ 表示单位晶格长度。

Si和Ge都是金刚石类型的晶体，Si有4个 $3s^2 3p^2$ 的价电子，Ge有4个 $4s^2 4p^2$ 的价电子，所以与金刚石的情形相同。所不同的是， $\Delta E$ 值较小，Si的 $\Delta E \approx 1.10$ 电子伏特，Ge的 $\Delta E \approx 0.68 - 0.72$ 电子伏特。因此，在温度为 $0^\circ\text{K}$ 时，电导率为0，当温度上升后，满带内的电子，由于热激发，跃进到导带，致使导带内充满有一些电子，电导率随之增加，这就是半导体。主要的半导体和绝缘体的 $\Delta E$ 值如表1-1所示<sup>[1]</sup>。当电子受到热或光的激发时，满带会形成电子“缺少状态”。这种状态就是从满带中减去一个电子后的状况下，设电子电荷为 $-q$ ，失去一个电子，而留下的空位可以看成是一个带 $+q$ 电荷的粒子，因而称之为空穴。Ge和Si就是依靠电子和空穴导电的。

**1.2.2 杂质能级**<sup>[1,2,4,10,11,16]</sup> 半导体的电导率主要取决于杂质的类型和含量。例如在Si晶体中，以对 $10^5$ 个Si原子