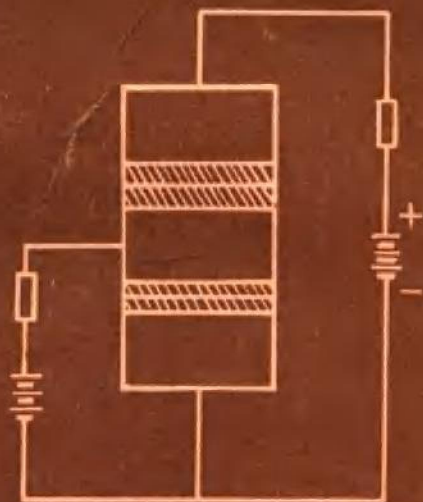




数字与模拟电子线路教学小丛书

半导体器件物理基础

李爱珍 丁幸芳 编



高等教育出版社

3

内 容 提 要

本书为数字与模拟电子线路教学小丛书之一。

全书分三篇。第一篇半导体物理基础,内容有:半导体中的电子状态,载流子漂移、复合和扩散;第二篇结型半导体器件,内容有:PN结和半导体二极管,半导体三极管,结型场效应晶体管;第三篇表面效应和表面控制器件,内容有:半导体表面, MOS 场效应晶体管,电荷耦合器件。各章后均有复习思考题。书末有附录,简介几种特种器件及半导体工艺。

本书经高等学校工科电工教材编委会电子线路编审小组委托专人审阅,同意作为高等学校无线电技术专业教学参考书出版。

本书可供高等学校无线电技术专业师生和有关专业工程技术人员参考。

数字与模拟电子线路教学小丛书

半导体器件物理基础

李素珍 丁辛芳 编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷三厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张 8.75 字数 207,000

1983年9月第1版 1984年9月第1次印刷

印数 00,001—6,700

书号 15010·0518 定价 1.10 元

前 言

近年来,半导体科学技术有着很大的发展,出现了许多新器件和中大规模集成电路,这些新器件的出现及在电子学中的应用,有力地推动着无线电技术的发展。新器件的应用,管路结合的发展,以及电子线路的计算机辅助分析和设计中的各种器件的模型都涉及到大量的半导体物理基础知识,所以半导体物理基础就成为电子科学技术领域中极为重要的基础。

为了对无线电类专业加强半导体物理基础,本书在1977年南京工学院无线电工程系“电子线路”编写组编写的《电子线路》第一、二、五章的基础上作了一些补充和拓宽,加强了能带和半导体器件物理基础,增加了半导体表面方面的内容。

为了适应非半导体专业的教学需要,本书略去了严谨的数学推导,着重在物理概念上对器件物理进行深入浅出且较为详细的叙述,叙述时力求通俗易懂,以便于自学。

在编写过程中,参考了本书末所列各参考文献,并参阅了复旦大学、南京工学院等院校的《半导体物理》讲义。

本书承高等学校工科电工学教材编委会电子线路编审小组委托北京工业学院李士同志对本书进行了极为认真负责的审阅,并提出了许多指导性意见,编者在此表示衷心感谢!

在编写中得到了南京工学院无线电工程系谢嘉奎副教授的直接指导,也得到南京航海仪器厂林卫国工程师、南京工学院无线电工程系陈健安老师等的许多帮助,在此一并感谢!

由于我们学识浅薄和缺乏经验,书中缺点和错误之处在所难

免, 恳切希望读者批评指正。

编 者

1983.3.

目 录

第一篇 半导体物理基础

第一章 半导体中的电子状态	1
§ 1-1 原子中电子状态的描述	2
§ 1-2 半导体的晶体结构	6
§ 1-3 半导体能带的形成	8
1-3-1 半导体中电子的运动及其能量状态	8
1-3-2 金属、半导体和绝缘体	11
§ 1-4 本征半导体和杂质半导体	14
1-4-1 本征半导体的导电机构	14
1-4-2 杂质半导体	17
1-4-3 杂质补偿	20
§ 1-5 载流子的统计分布	22
1-5-1 半导体中电子按能量的分布	23
1-5-2 本征半导体中的费米能级和载流子浓度	26
1-5-3 杂质半导体中的费米能级和载流子浓度	29
1-5-4 关于费米能级的小结	32
复习思考题	34
第二章 载流子的漂移、复合和扩散	36
§ 2-1 半导体中载流子的迁移率	36
2-1-1 载流子的迁移率	36
2-1-2 载流子的漂移速度和载流子的散射	39
§ 2-2 电导的分析	42
2-2-1 欧姆定律的微分形式	42

2-2-2	半导体的电阻率	44
2-2-3	半导体的电导率与温度的关系	45
2-2-4	强电场下的电导现象	47
§ 2-3	非平衡载流子及其复合	49
2-3-1	非平衡载流子的注入和准费米能级	49
2-3-2	非平衡载流子的复合	51
§ 2-4	非平衡载流子的扩散	56
2-4-1	非平衡载流子的扩散	57
2-4-2	非平衡状态时半导体的电中性问题	60
2-4-3	载流子扩散方程	61
	复习思考题	65

第二篇 结型半导体器件

第三章	PN 结和半导体二极管	66
§ 3-1	平衡 PN 结	66
3-1-1	PN 结空间电荷区的形成	66
3-1-2	能带图	68
3-1-3	内建电势差 V_D	70
§ 3-2	势垒区内电荷、电场和电势的分布	71
§ 3-3	PN 结电流-电压特性	75
3-3-1	外加正向电压	76
3-3-2	外加反向电压	80
3-3-3	PN 结伏安特性	83
3-3-4	正向 PN 结电流成分的分析	90
§ 3-4	PN 结电容	92
3-4-1	PN 结电容的物理本质	92
3-4-2	势垒电容和扩散电容	93
§ 3-5	PN 结的击穿	96
3-5-1	雪崩击穿	97
3-5-2	齐纳击穿	98

§ 3-6	PN 结的温度特性	99
§ 3-7	半导体二极管	101
3-7-1	半导体二极管的小信号等效电路	101
3-7-2	半导体二极管的电路符号、分类	105
	复习思考题	106
第四章	半导体三极管	107
§ 4-1	概述	107
§ 4-2	三极管的放大作用	108
4-2-1	基区宽度 W 很薄是三极管具有放大作用的内部条件	110
4-2-2	共基极直流电流放大系数 $\bar{\alpha}$	111
4-2-3	共发射极直流电流放大系数 $\bar{\beta}$	115
§ 4-3	半导体三极管的工作状态及其 $\bar{\alpha}$ 的定量分析	116
4-3-1	三极管的工作状态	116
4-3-2	能带图和载流子浓度分布图	117
4-3-3	定量分析共基极直流电流放大系数 $\bar{\alpha}$	119
4-3-4	用基区少子浓度分布曲线统观三个端电流、两个结电压	123
§ 4-4	三极管端电流数学模型——Ebers-Moll 模型	126
§ 4-5	三极管伏安特性曲线及其物理解释	130
4-5-1	共基极伏安特性曲线	131
4-5-2	共发射极伏安特性曲线	135
§ 4-6	三极管的参数	143
4-6-1	反向电流	143
4-6-2	极限参数	146
4-6-3	三极管的温度特性	149
§ 4-7	小信号等效电路	150
4-7-1	共发射极混合 II 型等效电路	150
4-7-2	小信号等效电路中的各参数	152
4-7-3	三极管的频率响应	157
§ 4-8	三极管的电流放大系数和特征频率与集电极电流的关系	161
4-8-1	$\bar{\beta}$ 随 I_c 的变化	161
4-8-2	f_T 随 I_c 的变化	170

复习思考题	171
第五章 结型场效应晶体管	173
§ 5-1 结型场效应晶体管的结构和工作原理	173
§ 5-2 结型场效应晶体管的特性曲线	176
§ 5-3 导致场效应晶体管电流饱和的机理	181
§ 5-4 结型场效应晶体管的电参数	184
复习思考题	187

第三篇 表面效应和表面控制器件

第六章 半导体表面	188
§ 6-1 表面空间电荷区的特性	188
§ 6-2 MIS 结构的电容-电压特性	198
6-2-1 MIS 电容	198
6-2-2 MIS 电容与栅压和频率的依赖关系	200
6-2-3 绝缘层中电荷和金属-半导体功函数差对平带电压的影响	204
复习思考题	207
第七章 MOS 场效应晶体管	208
§ 7-1 MOS 场效应晶体管结构和工作原理	208
7-1-1 MOS 场效应晶体管的结构	208
7-1-2 MOS 场效应晶体管的工作原理	209
7-1-3 实际 MOS 场效应晶体管的四种类型	210
§ 7-2 MOS 场效应晶体管的特性曲线	212
7-2-1 输出特性曲线和转移特性曲线	213
7-2-2 四种类型 MOS 场效应晶体管的特性曲线	218
§ 7-3 MOS 场效应晶体管的参数	221
7-3-1 MOS 场效应晶体管的直流参数	221
7-3-2 MOS 场效应晶体管的低频小信号参数及等效电路	223
7-3-3 MOS 场效应晶体管的高频特性	225
复习思考题	227

第八章 电荷耦合器件	229
§ 8-1 CCD 的工作原理	229
8-1-1 单个 MOS 场效应晶体管的深耗尽状态和少子贮存作用	229
8-1-2 三相 CCD 的传输原理	232
§ 8-2 CCD 的基本参数	235
§ 8-3 CCD 的应用	237

附 录

附录 1 几种特种器件的简介	239
附录 1-1 变容二极管	239
附 1-1-1 变容二极管及其基本特性	239
附 1-1-2 变容二极管的主要参数	241
附录 1-2 肖特基势垒二极管	243
附 1-2-1 肖特基势垒	243
附 1-2-2 伏安特性	244
附 1-2-3 等效电路	249
附录 1-3 隧道二极管	249
附 1-3-1 隧道二极管	249
附 1-3-2 P ⁺ N ⁺ 结的隧道效应	251
附 1-3-3 隧道二极管的工作原理	253
附录 2 半导体工艺	257
附录 2-1 几种重要的工艺	257
附录 2-2 两种典型半导体器件的工艺流程	258
附录 2-3 集成电路中的隔离	263
主要参考文献	267

第一篇 半导体物理基础

第一章 半导体中的电子状态

自然界中的物体按导电性能可以分成导体、半导体和绝缘体。铜、铝、金、银等金属的导电性能很好,其电阻率 ρ 在 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 以下,它们是导体;云母、橡胶和石蜡等物体的导电性能很差,其电阻率 ρ 在 $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上,它们都是绝缘体;硅(Si)、锗(Ge)、砷化镓(GaAs)和碳化硅(SiC)等物体的导电性能介于导体和绝缘体之间,所以我们称它们为半导体。

半导体所以能广泛地用来制造各种器件,并不仅仅因为它的导电性能介于导体和绝缘体之间,而是由于半导体的许多特性都与温度、光照、电场、磁场及掺杂等密切相关。利用半导体的电阻率随温度或光照的变化而变化这一特点可制造热敏电阻和光敏电阻;利用半导体特殊的表面性质可制造各种表面器件;若在半导体中掺入一些杂质,就能改变半导体的导电能力和导电类型,这是今天我们可以用来制造各种半导体管和集成电路的基本依据。半导体的上述特性都无不和半导体中的电子能量状态有关。为了更好地了解半导体的基本特性及器件的工作原理,我们必须首先讨论半导体中的电子状态。

本章首先从原子中电子的能级出发,描述半导体的晶体结构,讨论晶体中电子能级组成能带的概念。在此基础上再讨论本征半导体和掺杂半导体的导电机理。最后介绍描述电子体系的费米-狄拉克统计分布函数以及讨论费米能级的物理意义。

§ 1-1 原子中电子状态的描述

首先来回顾一下孤立原子中的电子状态。

原子中的电子由于受到原子核势场的作用，只能处于某些特定的分立的能量状态 E_1 、 E_2 、 E_3 …，电子可能具有的这一系列分立的能值，称为原子中电子的能级。也就是说原子的电子只能在特定的轨道上运动。通常，要完全描述原子中一个电子的状态，必须指出此状态下电子的能量、角动量、轨道平面在外磁场中的取向以及电子自旋的方向。而表征电子状态的这些物理量又都是量子化的，它们分别满足一定的量子化条件，并相应引出了四个量子数 n 、 l 、 m_l 、 m_s 。

主量子数 n 是决定电子能量的主要因素，同时自然也就确定了电子的量子化轨道是属于第 n 层的。相同主量子数 n 的电子可以看作是分布在同一壳层上的。随着主量子数的不同，我们可以把轨道电子分为许多壳层，并用 K 、 L 、 M 、 N 、 O 、 P …等符号来表示 $n=1$ 、 2 、 3 、 4 、 5 、 6 …等壳层。

用**角量子数** l 确定电子运动轨道角动量的大小，并决定其轨道的形状。因为对于同一主量子数 n ，由于角量子数 l 数值的不同，电子具有的能值会发生分裂，且轨道形状又各不相同，因此我们常将壳层再分成若干个**支壳层**，并用符号 s 、 p 、 d 、 f 、 g 、 h 等分别表示 $l=0$ 、 1 、 2 、 3 、 4 、 5 各个支壳层。对于同一个主量子数 n ， l 的取值范围为 $l=0$ 、 1 、 2 、 3 、…、 $(n-1)$ 。所以当 $n=1$ 时， l 只能为 0 ，因而只有一个 $1s$ 支壳层(一个圆轨道)； $n=2$ 时， l 可为 0 和 1 ，故只能有 $2s$ 和 $2p$ 两个支壳层(一个圆轨道，一个椭圆轨道)； $n=3$ 时，有 $3s$ 、 $3p$ 和 $3d$ 三个支壳层(一个圆轨道，两个扁度不同的椭圆轨道)；依此类推。

磁量子数 m_l 确定电子运动轨道角动量矢量即轨道平面法线

在空间的方位。对于同一个角量子数 l , m_l 的可能值为 $0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$, 共有 $(2l+1)$ 个不同的状态。例如, 当 $l=0$ 时, 则具有的状态数为 $2l+1=1$, 表示 s 电子只有一个状态对应于 $m_l=0$; 而 p 电子(其 $l=1$) 则有 $2l+1=3$ 个不同的状态, 对应于 $m_l=0, \pm 1$ 。

自旋量子数 m_s 则决定电子自旋角动量在空间的方位。因为自旋只可能有两个状态, 所以 m_s 只能有两个值 $\pm 1/2$ 。计入自旋之后, 每一种可能的状态数应乘以 2, 即 $2(2l+1)$ 个状态。

只要 n, l, m_l, m_s 这四个量子数确定了, 那么表征电子状态的这些物理量就完全确定了, 也就是电子的状态完全确定了。同时, 四个量子数中只要有一个量子数不同, 那么它们所描述的电子状态就不同。所以我们可以用一组 n, l, m_l, m_s 来表示原子中一个可能的电子状态。在量子理论中, 将由四个量子数所确定的电子运动状态称为量子态。

不难看出, 不同的壳层中, 量子态的数目是不相同的。现在我们来计算一下, 每一个壳层中量子态的数目 Z_n 究竟是多少。如前所述, 对于给定的角量子数 l 的轨道共有 $2(2l+1)$ 个量子态, 对于给定的主量子数 n 值, l 可取 $0, 1, 2, \dots, (n-1)$ 各值, 故 n 壳层上最多可能的量子态数(即为最多可容纳的电子数)

$$\begin{aligned} Z_n &= \sum_{l=0}^{n-1} 2(2l+1) = \frac{2+2(2n-1)}{2} n \\ &= 2n^2 \end{aligned} \quad (1-1-1)$$

各个壳层和支壳层量子态数目可以归结为表 1-1。

下面我们再来讨论一下电子在这些壳层中的分布问题。我们自然会提出这样一个问题: 在正常状态下, 哪些量子态是被电子所占据, 哪些量子态是空着的呢? 根据大量实验事实归纳出来, 原子中核外电子在壳层上的分布必须遵从下列两个原理。

表 1-1

壳层	n	支壳层	l	m_l	m_s	量子态数
K	1	1s	0	0	$\pm\frac{1}{2}$	2
L	2	2s	0	0	$\pm\frac{1}{2}$	2
		2p	1	-1, 0, 1	$\pm\frac{1}{2}$	6
M	3	3s	0	0	$\pm\frac{1}{2}$	2
		3p	1	-1, 0, 1	$\pm\frac{1}{2}$	6
		3d	2	-2, -1, 0, 1, 2	$\pm\frac{1}{2}$	10
N	4	4s	0	0	$\pm\frac{1}{2}$	2
		4p	1	-1, 0, 1	$\pm\frac{1}{2}$	6
		4d	2	-2, -1, 0, 1, 2	$\pm\frac{1}{2}$	10
		4f	3	-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3	$\pm\frac{1}{2}$	14
⋮		⋮		⋮	⋮	$2n^2$
⋮		⋮		⋮	⋮	⋮

一、泡利原理

Pauley 总结了大量实验结果, 得出了这样一个结论: 原子中不能有两个或两个以上的电子具有完全相同的四个量子数 (n, l, m_l, m_s)。也就是说, 原子中的每一个量子态最多只能容纳一个电子。或者说, 由一组 n, l, m_l 量子数所确定的一个能级上只能容纳自旋方向相反的两个电子。如果某一个量子态已被一个电子所占据, 那么其他电子就不能再去占据这个量子态了。这个原理又称为泡利不相容原理。根据泡利不相容原理, 我们不难知道, 各个壳层或各个支壳层中最多所能容纳的电子数就等于该壳层或支壳层的量子态数。例如, s 支壳层一共有两个量子态, 所以最多也只能容纳

两个电子； p 支壳层最多可以有六个电子；等等。从壳层来看， K 壳层最多容纳两个电子， L 壳层最多容纳八个电子， M 壳层最多容纳十八个电子，等等。

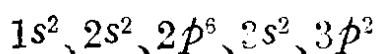
二、能量最低原理

实验表明，原子中的电子在不违背泡利原理的原则下，总是先占据能量最低的量子态。这样，原子体系的能量是最小的，其状态也是最稳定的。

一般说来，原子中电子的能量主要由主量子数 n 决定，也就是说， n 越小，能量就越低； n 越大，能量也就越高。因此，原子中的电子总是先占据 K 壳层中的量子态， K 壳层填满了，再顺序填充 L 壳层、 M 壳层…。当填充的电子数达到某壳层所能具有的最大量子态数 $2n^2$ 时，就完成了—个闭合壳层的建立，而成为稳定结构（惰性气体），下一个电子就开始填充新的壳层。

其次，电子的能量不仅决定于主量子数 n ，而且还和角量子数 l 有关，这样在同一壳层中， s 支壳层的能量又比 p 支壳层的要低， p 支壳层的能量又比 d 支壳层的低…。所以在同一壳层中又按照 s 、 p 、 d …的次序来填充量子态。

硅原子中电子的组态可写为



同理，锆原子中电子的组态可写为

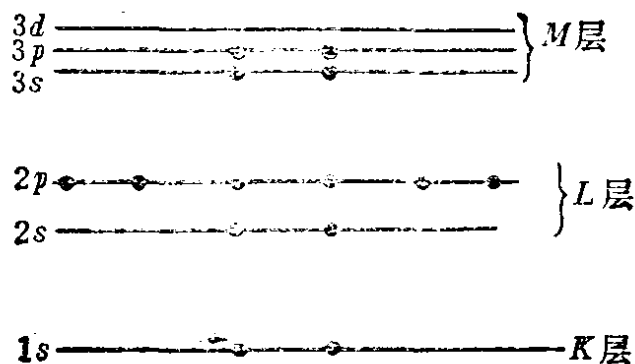


图 1-1-1 单个硅原子的电子组态



其中指数上的数字代表占据各支壳层电子数。可以看出，硅和锗最外层都有四个电子(称为价电子)，因此它们都是四价元素。图 1-1-1 表示单个硅原子的电子组态图，图中黑点代表轨道电子。

§ 1-2 半导体的晶体结构

固体可分为**晶体**和**非晶体**。原子(或分子、离子等)按一定的周期性排列的固体称为晶体。晶体材料可以是“**单晶**”体，也可以是“**多晶**”体。单晶体是指整块晶体原子都按同一规律周期性排列；多晶体内原子也是按周期性规律排列，但在不同的局部区域，原子排列方向(取向)不同，即多晶体可看成由若干取向不同的小单晶体组成。图 1-2-1 表示单晶体、多晶体和非晶体原子排列简图。

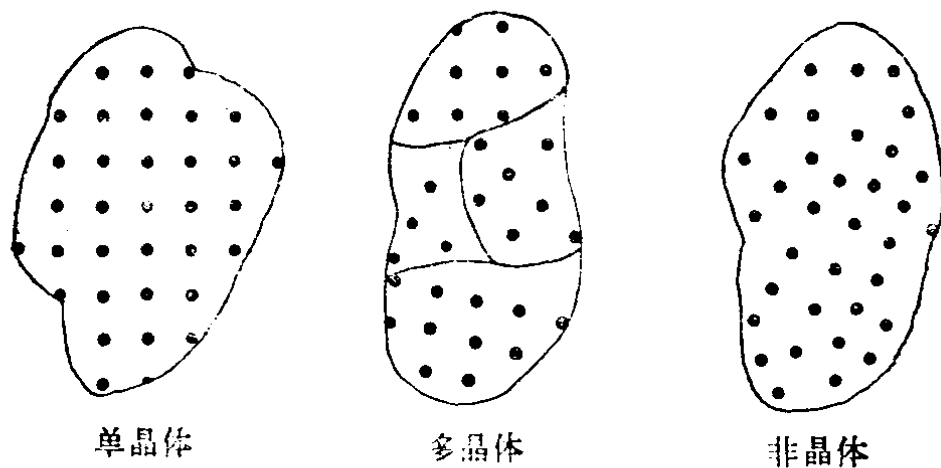


图 1-2-1 原子排列简图

抽象地看，晶体内部是由一些在空间有规则地作周期性无限分布的相同点子构成的。这些点子代表原子、离子、分子或其他集团的重心，并称之为**结点**。而这些点子总体称为**点阵**。通过点阵中的结点可以作许多平行的直线族和平行的晶面族，这样点阵就成为**网格**，称为**晶格**。网格的结点称为晶格的**格点**。

晶格的许多宏观特性如电学特性、热学特性等都与它的内部结构有关。不同的晶体材料，有不同的结构，然而，其晶格在空间排

列上却都有共同的特点——周期性和对称性。首先讨论晶格的周期性，晶体可以看成是以完全相同的平行六面体(图 1-2-2)为重复单元“堆砌”而成的。现举晶格中最简单的一种来加以说明，最简单的立方晶格由沿三个垂直方向等距离排列的格点组成，如图 1-2-3 所示。它沿 x 、 y 、 z 三个垂直方向每隔距离 a 有一个格点。在图上可以明显看到：整个晶格可以看成是由边长为 a 的小立方体(即平行六面体单元)为重复单元“堆砌”而成的。我们把晶格的这种基本特性称做周期性，而把这样的重复单元称为原胞，原胞自然是个最小的重复单元；为了同时反映对称性，结晶学中常取最小重复单元的几倍作为结晶学原胞(简称晶胞)。所以晶胞能反映出晶格的对称性和周期性。

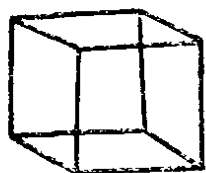


图 1-2-2 平行六面体

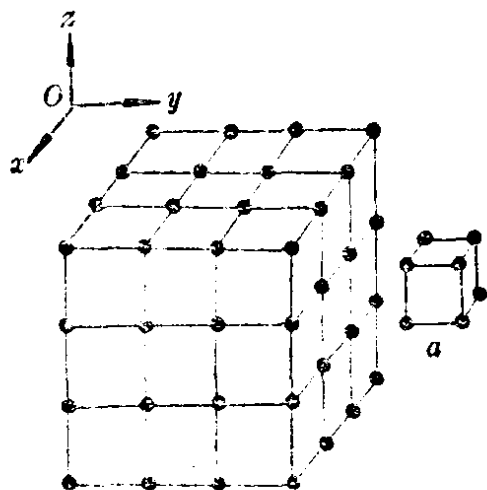


图 1-2-3 立方体

半导体材料如锗、硅等最外层都有四个价电子，它们的晶体结构和金刚石的结构相同。图 1-2-4 示出了金刚石结构的晶胞。那么金刚石晶体结构中原子与原子之间是如何结合的呢？金刚石中碳原子具有四个价电子，这些原子组成晶体时，每一个原子中有一个价电子为和它相邻的原子所共有的，因此一对价电子为两个相邻原子所共有，所以原子之间的结合是通过共有电子对构成的，我们称之为共价键。每个碳原子有四个价电子，它们分别和四个原

子组成四个共价键。图 1-2-5 形象地画出了硅、锗等原子的共价键结构的平面示意图,原子间两根平行的短线表示共价键。

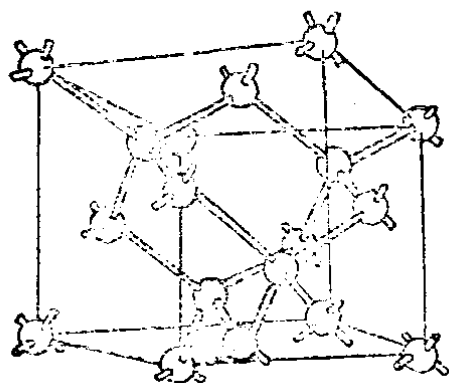


图 1-2-4 金刚石结构的晶胞

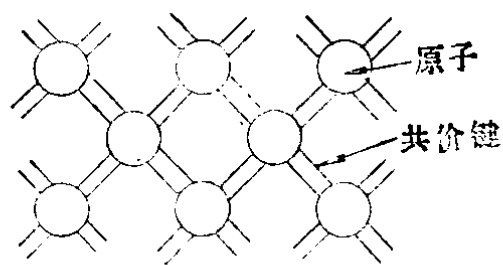


图 1-2-5 锗、硅共价键结构平面示意图

§ 1-3 半导体能带的形成

1-3-1 半导体中电子的运动及其能量状态

前面讨论了单个原子中电子运动的状态。由于原子核对电子的静电引力,使得电子只能在围绕原子核的轨道上运动。那么,当大量原子组成晶体时,晶体中电子的运动状态和能量将发生什么变化呢?下面以硅晶体为例来进行讨论。硅晶体每立方厘米中就有 5×10^{22} 个硅原子,硅原子之间最短距离为 2.35 \AA ,它与原子直径同一数量级。首先从运动情况来看,由于原子之间的距离非常近,不同原子的轨道之间就有一定的交叠。这样,一个原子轨道上的电子必然有可能转移到相邻原子的电子轨道上去,且通过相邻原子转移到更远的原子上去,所以电子实际上可以在整个晶体中运动,以致使我们无法区分某一个电子究竟是属于哪个原子的,而只能看作是**整个晶体所共有的**,这就是晶体中电子的**共有化运动**。但必须指出,这种转移不是任意的,一般来说,它只能在原子间的相似轨道之间转移,因为只有相似轨道才具有相同的能量;同时,由于内外层轨道交叠程度很不相同,因此,其共有化运动程度也极