

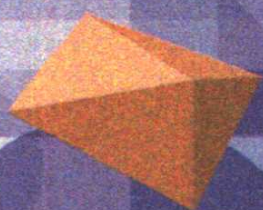


21 世纪大学新型参考教材系列

半导体工程学

〔日〕 中嶋坚志郎 编著

Inter
University



科学出版社

OHM 社

00129551



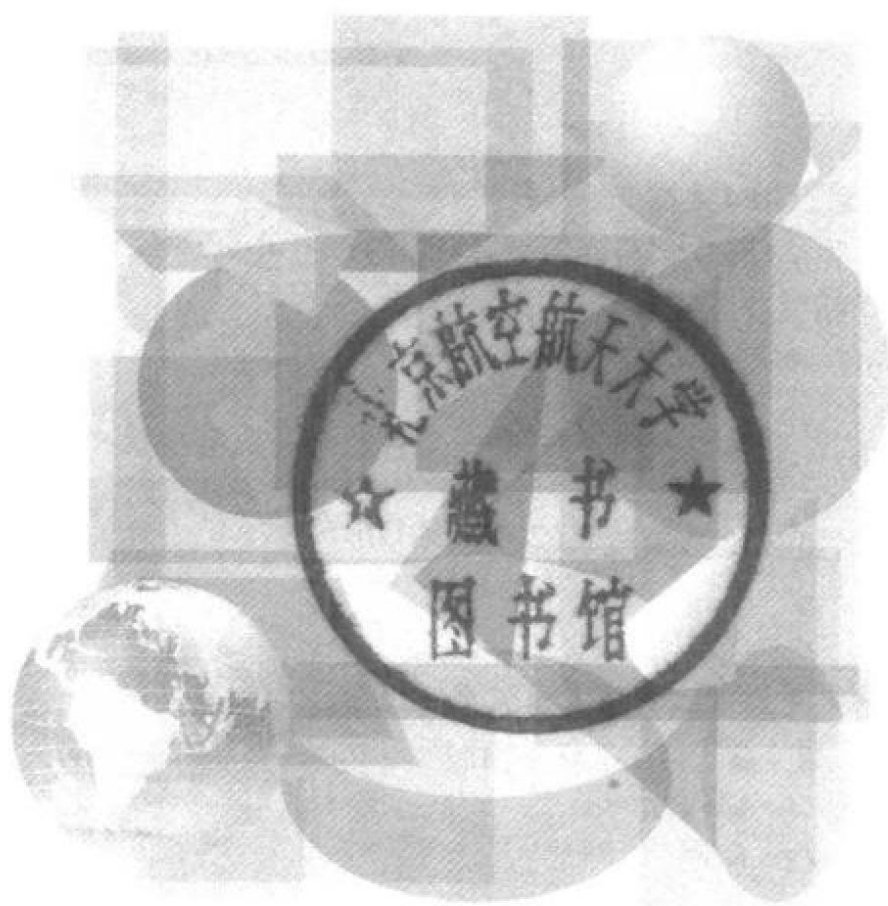
21 世纪大学新型参考教材系列

半导体工程学

〔日〕中嶋坚志郎 编著

熊 纓 译

胡夏夏 校



科学出版社

OHM 社

2001. 北京



北航 C0547939

FROE/05

图字:01 - 2001 - 0068 号

Original Japanese edition

Interuniversity Handoutai Kougaku

by Kenshirou Nakajima et al.

Copyright © 1999 by Kenshirou Nakajima

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese language edition is co-published by Ohmsha, Ltd. and Science Press

Copyright © 2001

All rights reserved

本书中文版版权为科学出版社和 OHM 社所共有

インターユニバーシティ

半導体工学

中嶋堅志郎 オーム社 1999

图书在版编目 (CIP) 数据

半导体工程学/[日]中嶋坚志郎编著;熊纓译. - 北京:科学出版社,2001

21 世纪大学新型参考教材系列

ISBN 7-03-9322-4

I. 半… II. ①中… ②熊… III. 半导体物理 - 高等学校 - 教材 IV. TN047

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 17616 号

北京东方科龙电脑图文制作有限公司 制作

科学出版社 OHM 社 出版

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2001 年 6 月第 一 版 开本: A5(890 × 1240)

2001 年 6 月第一次印刷 印张: 4 3/8

印数: 1—3 000 字数: 1.27 000

定 价: 12.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

当今,以信息产业为中心的电子学领域的繁荣,是基于半导体及其器件的发展,这是公认的事实。众所周知,在我们周围,从玩具到计算机都使用集成电路,而以晶体管、二极管为单元的各种半导体器件是构成集成电路的基石。大部分的半导体器件是由硅(Si)单晶制作的,但在光应用领域,却是砷化镓(GaAs)之类的化合物半导体占主导地位。半导体器件的代表性特征是电流的整流作用和放大作用。这些作用为什么能在半导体上实现,而在金属这样的导体中却不能实现呢?即使同为半导体,为什么硅单晶和化合物材料所实现的功能不同呢?这就需要了解其原理,弄清半导体物质具备这些性能的原因,从而进一步开发新型器件。

进入 21 世纪,以能源为中心的电子学领域,有待于半导体器件的进一步发展。目前这一领域仍然是硅单晶独占鳌头。这就迫切需要出现一种省能源、耐高温、大功率、速度快的新型半导体器件。为此,必须获得比硅单晶更易进行有效控制的半导体材料。

半导体能够发挥其功能的最大原因,在于它本身能同时存在符号相反的两种荷电粒子(载流子),即电子和空穴。要了解半导体的性质就必须正确认识这两种粒子。而掌握原子紧密结合的晶体结构中的电子和空穴的特征恰是理解半导体的关键所在。

本书的宗旨是在上述认识的基础上,尽可能直观地介绍半导体的基本性质。努力做到叙述上正确,通俗易懂,并在必要的地方引出数学公式的推导以便于自学。就本书的特点而言,叙述上虽不十分严密,但却会使更多的人通过本书的学习对半导体产生兴趣,从而进行更高层次的研究。本书虽然某种程度上以了解量子力学为前提,但最终的目的还是阐述半导体的基本物理性质。为便于专业性计算的引用,书中加入了一些数值的分析。本书既可作为电工、电子、信息有关领域的硕士研究生,大学本科、专科的教科书、参考书,也可供一般研究人员、技术人员参考。希望更多的读者通过本书的学习能对半导体产生兴趣。

最后,我代表作者向给予编著本书机会的“21 世纪大学新型参考教材系列”书编委会及为出版本书而作出贡献的欧姆社有关人员表示衷心的感谢。

中嶋坚志郎

为了适应21世纪的要求

面向21世纪,日本各大学进行了系与学科的改编、研究生院的调整、导入两期制等。伴随着这些调整,现有的教材显得不适应现代学生的水平和兴趣要求。因此就要求有一套从版面到内容都更新颖的教科书。

本系列正是考虑到这种新的要求,经过不断深入考察和讨论,按照全新的整体编排形式制作完成的新型教材。曾荣获第七届日本工科教育协会奖「业绩奖」。

21世纪大学新型参考教材系列 编辑委员会

主任委员: 家田正之 (爱知工业大学)
编委: 稻垣康善 (名古屋大学)
白井支朗 (丰桥技术科学大学)
梅野正义 (名古屋工业大学)
大熊 繁 (名古屋大学)
绳田正人 (名城大学)

电气能源基础
等离子体电子工程学
电力系统工程学
电气电子材料
高电压/绝缘工程学
电动机
电力电子学

电气能源

逻辑电路与自动机械
计算机工程学
程序语言设计
信息传送和符号的理论
信息通信工程学
信息网络

信息通信

公共基础

电磁学A
电磁学B
电气电路A
电气电路B
电子电路A
电子电路B
电气数学
信息数学
程序设计

测量·控制

系统与控制
信号分析
传感测量
柔性信息处理
机器人控制

电子器件

电子物性
半导体工程学
电子器件
集成电路A
集成电路B
光电子学

目 录

1 半导体工程学基础

1.1 半导体的种类	2
1.2 半导体的特征	3
练 习 题	4

2 半导体中的电子和空穴

2.1 晶体结构和原子及固体的电子能量	6
2.2 固体(晶体)中的电子、空穴运动	15
2.3 本征半导体和杂质半导体	19
2.4 热平衡的载流子浓度	23
练 习 题	33

3 载流子输运现象

3.1 导电现象	36
3.2 霍尔效应	42
3.3 非平衡状态下的载流子输运现象	44
3.4 扩散方程式	47
练 习 题	53

4 pn 结和金属-半导体接触

4.1 热平衡状态下的 pn 结	56
4.2 pn 结的电势和电容	58
4.3 金属-半导体接触	64
练 习 题	70

5 二极管和双极晶体管

5.1 流经 pn 结的电流	74
5.2 双极晶体管的电流传输和放大作用	81
练 习 题	94

6 金属-绝缘体-半导体 (MIS) 结构基础

6.1 理想 MIS 结构	96
6.2 实际的 MIS 结构	105
6.3 MIS 的过渡响应	108
练 习 题	113

附录 间接复合过程	115
-----------------	-----

练习题解答	119
-------------	-----

参考文献	125
------------	-----

篇外话

广阔的半导体器件世界	3
密勒指数的求法	8
电子的光吸收和释放	11
电导率的测定(4 探针法)	38
磁阻效应	43
真空能级	58
带有界面能级的金属-半导体接触	67
结击穿	81
界面能评价法	99
具有 MIS 结构的器件	108

半导体工程学基础

半导体器件(器件,某种意义上是指小的组件,通常在集成组件装置中使用这一名称)、集成电路(Integrated Circuit, IC)已成为电冰箱、便携电话、电子计算机、人造卫星等不可缺少的零部件。一提到半导体人们就会联想到硅,的确,今天使用的绝大多数半导体都是由硅(Si)材料制作的。

本章简要说明了现在使用的半导体的种类,半导体的特殊性质及优点。目的在于更好地理解本书所介绍的半导体及其器件的基本机理。

1.1 半导体的种类

我们先来简单看看目前使用的半导体材料(晶体)。表 1.1 列出了元素周期表中一部分可作为半导体的元素。

当前使用的半导体几乎都是由表 1.1 所示的元素构成的。最常用的半导体是由Ⅳ族的 Si(硅)原子构成的单晶。90% 的半导体 IC 都是由 Si 半导体(以下简称 Si)制作的。Ge(锗)、C(碳)也是以单晶的形式构成半导体。因此,又把由Ⅳ族元素构成的半导体称为元素半导体。

表 1.1 周期表中用作半导体的元素

	Ⅱ族	Ⅲ族	Ⅳ族	Ⅴ族	Ⅵ族
第 2 周期		B	C	N	
第 3 周期		Al	Si	P	S
第 4 周期	Zn	Ga	Ge	As	Se
第 5 周期	Cd	In		Sb	Te

其次,经常使用的半导体是以 GaAs 为代表的化合物半导体。微波发射机用的二极管、激光二极管等都使用这种半导体材料。其它像 GaP、InP 等半导体也都用于制作发光二极管。

这些半导体是Ⅲ族和Ⅴ族元素的化合物,称为Ⅲ-Ⅴ化合物半导体。另外,还使用Ⅱ-Ⅵ化合物半导体,例如用做光电探测器的 CdS,作为蓝色发光二极管的 ZnSe。表 1.2 示出了这些半导体的主要用途及其固有性质。

表 1.2 中的[未来型]、[近未来型]半导体是指不作为常规器件使用的半导体,但作为可以打破 Si 器件的界限的一种新型半导体材料,近年来一直在深入地研究,期望应用在不能使用 Si 器件的领域。

表 1.2 半导体的种类

种类	符号	室温下逸出功(eV)	晶体结构	能带结构	熔点(℃)	主要用途 ¹⁾
元素	C	5.47	金刚石	间接	无(升华)	耐环境器件[未来型]
	Si	1.11	金刚石	间接	1420	IC、Tr、D、高频 Tr
	Ge	0.69	金刚石	间接	937	红外线检测器、D
IV-IV	β-SiC	2.23(3C)	闪锌矿	间接	无(升华)	高频 FET、Tr[近未来型]
	α-SiC	2.93(6H)	纤锌矿	间接	无(升华)	大功率、高温用 FET[近未来型]
III-V	GaAs	1.43	闪锌矿	直接	1237	激光 D、高频 Tr、太阳能电池
	GaP	2.26	闪锌矿	间接	1465	发光 D(红)
	GaN	3.39	纤锌矿	直接	无(升华)	发光 D、激光 D(蓝)、高温 FET
	InP	1.35	闪锌矿	直接	1062	发光 D(红外)
II-VI	CdS	2.42	纤锌矿 ²⁾	直接	1365	光电探测器
	ZnS	3.66	纤锌矿 ²⁾	直接	1830	发光 D

注:1) Tr:晶体管,D:二极管,FET:场效应晶体管,IC:集成电路。
2) 也有闪锌矿型。

广阔的半导体器件世界

当前占主流的 Si 半导体器件最高只能在 130 ~ 150℃ 范围内使用。特殊的也只能在 200℃ 左右下工作,若在 500 ~ 600℃ 下使用,材料本身也不允许。但是,在汽车、飞机、发电所、油田钻机等领域需要能在 500 ~ 1000℃ 条件下使用的半导体。目前世界上正在研究开发 SiC、GaN、C(金刚石)半导体,它们可以在普通半导体不能胜任的高温环境下工作。这些半导体也可以在宇宙空间这样的严酷环境下使用。

1.2 半导体的特征

半导体器件的多样性来自于各种半导体的固有性质。其特征之一是,电阻率(单位体积的电阻值;单位为 $\Omega \cdot \text{cm}$)在导体(金属,如铜的电阻率约 $16^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$)和绝缘体(石英的电阻率约 $10^{18} \Omega \cdot \text{cm}$)之间,大约在 $10^{-3} \sim 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内。另一特征是,半导体的电阻率随温度的上升而降低。这些特征主要是由构成半导体的元素种类和它们的结合状态决定的,另外,

与各种物理现象相关的电子能量的大小也因不同的半导体而不同(这些问题将在后面介绍)。

电阻率的大小可以在很大范围内变化是半导体的又一特征。通过往半导体中添加极微量的元素(因为添加的元素与母材不同,通常称为杂质元素),可以自由地控制其电阻率的大小。这样,就能够制作各种各样的半导体器件。

为什么半导体会出现上述特征呢?器件的特性与电子的能量之间有怎样的关系呢?下面将学习有关半导体性质的基本知识。书中一些地方使用了量子力学的思维方法,详情请参考其它有关书籍。另外,本书假定读者已具备初步的微分、积分知识。与严密的物理性论述相比,本书注重给读者更直观的印象。虽然对半导体物理性质的理解需要量子力学知识,但实际引用量子力学的地方并不多。不过,我想读者逐渐就会理解。

练 习 题

1 说明半导体的主要特征。

2

半导体中的电子和空穴

本章通过与器件设计相关的电子、空穴的密度来介绍半导体的各种现象及半导体器件的动作原理。为此,有必要引入电子的能级和能带的概念,运用电子的波函数说明这些性质。若在半导体中添加某种杂质就可以自由地控制电子、空穴的密度,从而制成 n 型半导体或 p 型半导体。同时还介绍电子和空穴密度间的相互关系及如何保持平衡。本章虽然是以 IV 族元素(主要是 Si)为主说明,但其要点在其它半导体中也适用。

2.1 晶体结构和原子及固体的电子能量

2.1.1 晶体结构

半导体的性质与其包含的电子能量密切相关。流过半导体材料的电流大小、从半导体发出的光波波长都是与半导体中的电子相关的现象。包括半导体在内,固体的结晶都是原子按照一定的规则在3维空间结合而成的。按照一定规则的原子序列构成的晶体称为**单晶体**。小的单晶集合称为**多晶体**。以下就以单晶体为研究对象。晶体中原子周期性排列的空间格架叫**晶格**。晶体就是由反映晶格特征的基本单元在三维空间堆积而成的。把这个基本单元叫做**晶胞**。晶胞组成立方体,由立方体晶胞构成的晶体叫做**立方晶体**。

图 2.1 示出了三种立方晶格的晶胞。图(a)叫简单立方晶格,即原子只排列在立方体的各顶点上。把立方晶格每一边的长度 a 叫做**晶格常数**。图(b)除了在晶胞的8个角上各有一个原子外,在立方体的中心还有一个原子,称为**体心立方晶格(bcc)**。图(c)所示为**面心立方晶格(fcc)**,它是在立方体的8个角和6个面的中心各有一个原子。

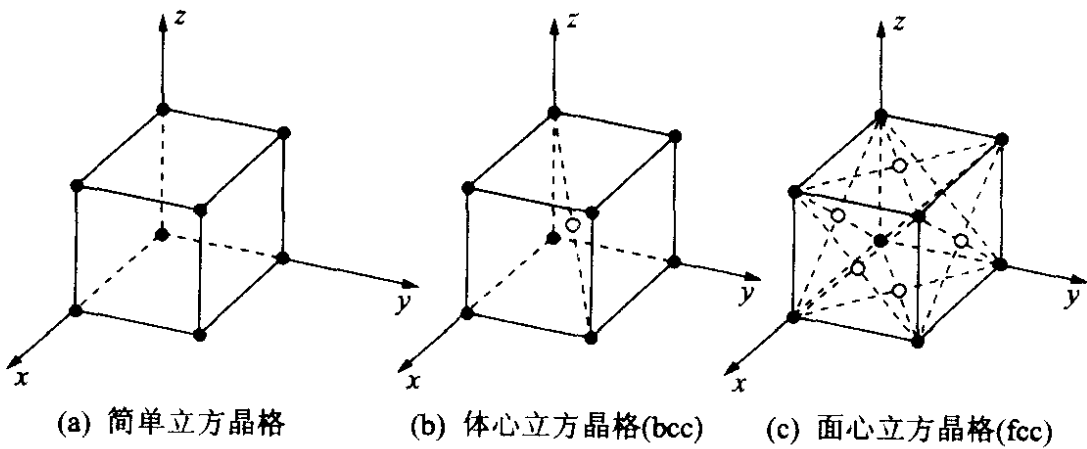


图 2.1 立方晶格

像 Si、Ge 这样的元素半导体,如图 2.2 所示,是一种称为**金刚石结构**的

2

动态系统与状态方程

在反馈控制理论中,采用动态系统的数学模型来进行控制对象和控制系统的分析与设计。本章中将要重点讲述的状态方程,正是这种数学模型。在本章中,将以机械系统和电子电路等为例,讲解状态方程是怎样推导出来的。进而讲述状态方程的解法以及怎样计算动态系统的各种动作。对状态方程的线性近似法也进行一些介绍。

$$\frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 + 4 = 8 \text{ 个}$$

例题2 若把 Si 的晶格常数设为 0.543nm ($5.43\text{\AA}$), 求出单位体积 1cm^3 内所包含的 Si 原子数及 Si 晶体的致密度。

解答 因为每个晶胞内含有 8 个原子, 所以, 单位体积的原子数:

$$\frac{8}{a^3} = \frac{8}{(5.43 \times 10^{-8})^3} = 5 \times 10^{22} \text{ 原子}/\text{cm}^3$$

$$\text{致密度} = \frac{5 \times 10^{22} \text{ 原子}/\text{cm}^3 \times 28.09 \text{ g/mol}}{6.02 \times 10^{23} \text{ 原子/mol}} = 2.23 \text{ g/cm}^3$$

2.1.2 密勒指数

晶体中通过原子排列构成的任意平面称为晶面。垂直于晶面的方向称为晶轴。以金刚石晶体为例, 在立方体的外表面各有 5 个原子, 而其它各面的原子数却不尽相同。因此, 可以设想, 沿不同晶轴方向晶体性质也不同。如果能有一种表示原子排列、晶轴方向的方法就会方便得多。确定晶体中不同晶面的常用方法称为密勒指数。

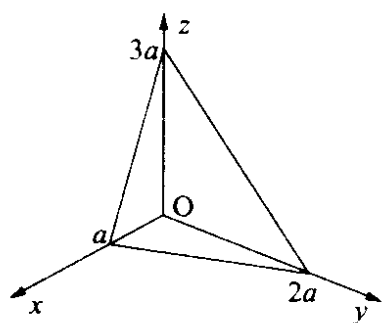


图 2.4

图 2.4 表示由在 x, y, z 轴上的 $a, 2a, 3a$ 点的原子构成的平面。相对于该面的密勒指数表示为 (632) , 又称 (632) 晶面 (其中, a 为晶格常数)。

密勒指数的求法

密勒指数按如下方法确定:

- ① 以晶格常数的整数倍表示截距 (如 $1, 2, 3$), 并求其倒数。

$$\frac{1}{1} \quad \frac{1}{2} \quad \frac{1}{3}$$

- ② 按相同比例换算成整数值。

$$6 \quad 3 \quad 2$$

- ③ 把整数值用 $()$ 括起来, 即 (632) , 图 2.4 表示了这个面的密勒指数, 称为 (632) 晶面。

- ④ 与 3 个坐标轴的交点围成 $(-1, 2, 3)$ 平面时

$$-\frac{1}{1} \quad \frac{1}{2} \quad \frac{1}{3} \rightarrow -6 \quad 3 \quad 2$$

即为 $(\bar{6}32)$, 是与 (632) 晶面等价的面。

通常把与(hkl)面等效的诸平面称为晶面族,用 $\{hkl\}$ 表示,与(hkl)面垂直的方向用 $[hkl]$ 表示,称为轴向。例如,与(100)面垂直的方向设定为x轴,该方向表示为 $[100]$ 。(100)等共6个面与(100)面等价($\{100\}$)。对应各面的垂直方向即晶轴 $[100]$ 、 $[\bar{1}00]$ 等也等效,一并用 $\langle 100 \rangle$ 表示,称为晶向族。图 2.5 表示立方晶体主要的密勒指数。

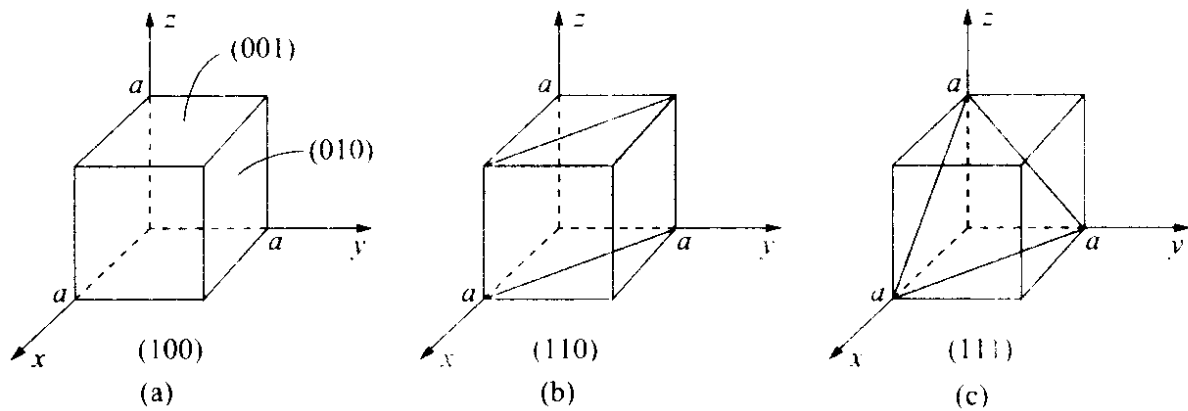


图 2.5 立方晶体主要的密勒指数

2.1.3 共价结合(价电子结合)

图 2.2 所示的金刚石晶体中,每个原子有 4 个最邻近原子(最近距离为 $\sqrt{3}a/4$),这 4 个原子构成了正四面体。同时,这 4 个原子又与四面体中心的原子形成共价结合。

这种共价结合可以通过二维简化图表示,如图 2.6。每个原子(Si、Ge 等)的最外层的 s 轨道及 p 轨道共有四个电子(IV 族元素的 s 轨道及 p 轨道各有 2 个,共计 4 个价电子),相邻的两个原子共有两个电子。而共有的两个电子常常处于两个原子中间。两个原子核(+4)与中间电子(-)相互吸引,产生了原子间的结合力。当正四面体构成时,每个原子周围都有 8 个电子沿着轨道运动(正负电荷吸引产生的结合力容易理解,但是,实际上还存在着另一种结合力,

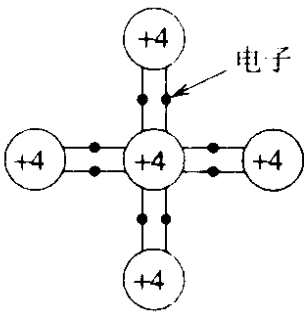


图 2.6 IV族原子的共价结合模型