

晶 体 管 电 子 学

罗 无 念 成 众 志 等 著

成 众 志 李 昌 猷 汤 国 权 译

何 羽 班 冀 超

人 民 邮 电 出 版 社

TRANSISTOR ELECTRONICS

ARTHUR W. LO (罗无金)

RICHARD O. ENDRES

JAKOB ZAWELS

FRED D. WALDHAUER

CHUNG-CHIH CHENG (成众志)

PRENTICE-HALL, INC.

1955.

內 容 提 要

本书系5位晶体管电子学专家的集体创作，比较详细地介绍晶体管与晶体管电路的理论及实用知识，由晶体管的基本工作原理及电路分析起一直讲到实际电路设计技术。书中首先介绍晶体管的重要物理概念，其次用有源四端网络、参数及等效电路，来表示晶体管的运用。

书中叙述了晶体管放大器并介绍运用点的稳定方法，还有低频小功率及功率放大器的设计知识。关于高频放大器的实用设计步骤、晶体管的非线性大信号运用、晶体管振荡器、调制器、检波器及计算机式开关电路也有比较详细的分析。

本书可作为大学无线电系高年级及研究生的参考读物或课本，也可作为对晶体管有兴趣者或电子工程师的参考书。

晶 体 管 电 子 学

著 者：罗 无 金 成 众 志 等

译 者：成 众 志 李 昌 猷 汤 国 权

何 羽 班 冀 超

审校者：成 众 志

出版者：人 民 邮 电 出 版 社

北京东四6条13号

北京市书刊出版业营业许可证书出字第〇四八号

印刷者：北 京 市 印 刷 一 厂

发行者：新 华 书 店

开本 850×1168 1/32 1958年2月南京第一版

印张 16 24/32 页数 536 1962年6月北京第六次印刷

印刷字数 421 000 字 印数 12,536 16 205 册

统一书号：K15045·总691—无164

定价：(11) 3.90 元

目 录

第 一 章 物理概念(李昌猷译)

1.1 引言	(1)
1.2 锗晶体	(1)
1.3 完美锗晶体中的电子性态	(3)
1.4 晶体的缺陷	(5)
1.5 辐射能缺陷	(5)
1.6 化学杂质缺陷	(7)
1.7 原子无序排列所造成的缺陷	(10)
1.8 能带	(11)
1.9 结	(14)
1.10 二极管作用	(15)
1.11 费密能级	(17)
1.12 晶体管作用	(19)
1.13 点接触型二极管	(24)
1.14 点接触型晶体管	(26)
1.15 光电晶体管	(27)
1.16 锗的制备	(28)
1.17 面接合型晶体管构造	(30)
1.18 点接触型晶体管构造	(31)

第 二 章 特性曲线、参数、等效电路(李昌猷译)

2.1 引言	(33)
2.2 晶体管作为电路元件	(34)
2.3 面接合型晶体管的特性曲线; 一般考虑	(36)
2.4 共基极特性曲线	(37)

2.5 共发射极特性; z 参数	(40)
2.6 共发射极特性; y 参数	(44)
2.7 共发射极特性; h 参数	(45)
2.8 低频等效电路	(48)
2.9 低频等效电路分析的近似方法	(49)
2.10 线性四端网络	(50)
2.11 无源线性四端网络的等效电路	(54)
2.12 有源线性四端网络的双发生器等效电路	(55)
2.13 有源线性四端网络的单发生器等效电路	(55)
2.14 将晶体管当为线性有源四端网络	(60)
2.15 面接合型晶体管参数的测量	(63)
2.16 辅助对称	(65)
2.17 对称晶体管	(67)
2.18 电流增幅晶体管	(69)
2.19 点接触型晶体管	(70)
2.20 点接触型晶体管的特性曲线和等效电路	(71)

第三章 基本放大器组态 (湯國叔譯)

3.1 引言	(75)
3.2 基本放大器	(77)
3.3 共发射极放大器	(79)
3.4 共基极放大器	(82)
3.5 共集电极放大器	(85)
3.6 晶体管与电子管电路的直接类似和对偶类似	(87)
3.7 用 z 参数分析晶体管放大器	(92)
3.8 用 h 参数分析晶体管放大器	(106)
3.9 晶体管噪声	(115)
3.10 有噪声时晶体管的网络表示法	(117)

第四章 直流偏置电路 (湯國叔譯)

4.1 引言	(125)
--------------	---------

4.2	运用点的建立	(125)
4.3	自偏	(128)
4.4	影响运用点的各种因素	(131)
4.5	I_{co} 对于静止电流的影响	(133)
4.6	α_{cb} 的改变对于静止电流的影响	(136)
4.7	集电极电压的稳定性	(137)
4.8	稳定性和偏置的分别控制	(139)
4.9	电流反馈稳定法	(142)
4.10	综合自偏	(144)

第 五 章 低頻放大器(湯國权译)

5.1	低頻放大器的分类	(147)
5.2	晶体管放大器的基本电路	(148)
5.3	电阻电容耦合放大器	(150)
5.4	电阻电容耦合放大器的頻率响应	(154)
5.5	电阻电容耦合放大器的自偏	(156)
5.6	电阻电容耦合放大器的設計	(161)
5.7	稳定的电阻电容耦合放大器的实际設計	(165)
5.8	电阻电容耦合放大器的效率	(168)
5.9	变压器耦合	(170)
5.10	阻抗耦合放大器	(172)
5.11	輔助对称放大器	(173)
5.12	放大器控制	(176)
5.13	終端电路	(179)
5.14	晶体管放大器的反馈	(182)

第 六 章 功率放大器(何 羽译)

6.1	引言	(186)
6.2	面接合型功率晶体管的特性	(187)
6.3	单晶体管功率放大器	(188)
6.4	功率放大器的非线性	(192)

6.5 电流放大系数随发射极电流的变化	(193)
6.6 α_{ce} 的非线性对放大器畸变的影响	(194)
6.7 非线性输入阻抗的影响	(196)
6.8 推挽放大	(197)
6.9 倒相器	(199)
6.10 B类放大器	(200)
6.11 B类辅助对称电路	(204)
6.12 B类放大器的高温运用	(207)

第七章 高频运用(何羽译)

7.1 引言	(212)
7.2 面接合型晶体管中电荷的流动	(213)
7.3 电抗效应	(216)
7.4 通用等效电路	(217)
7.5 本征晶体管的等效电路	(220)
7.6 基区宽度调制	(224)
7.7 实用等效电路	(226)
7.8 运用频率的范围	(229)
7.9 共发射极与共集电极等效电路	(231)
7.10 面接合型晶体管的高频性能	(234)
7.11 短路电流放大系数的讨论	(243)
7.12 用 h 参数决定电路元件	(245)
7.13 π 形电路	(248)
7.14 T形电路	(251)
附录1	(253)
附录2	(254)

第八章 晶体管参数的物理意义(何羽译)

8.1 扩散问题	(259)
8.2 扩散方程	(261)
8.3 直流边界条件	(262)

8.4 直流解	(263)
8.5 直流特性	(265)
8.6 小信号电导	(263)
8.7 基区宽度调制	(270)
8.8 交流边界条件	(271)
8.9 交流解	(273)
8.10 本征晶体管的短路导纳	(274)
8.11 表面复合	(278)
8.12 短路电流放大系数及其随电流的变化	(281)
8.13 过渡层	(284)
8.14 基区扩展电阻	(288)
8.15 间接合型四极管	(290)
8.16 晶体管参数的温度依从关系	(291)
附录 1: 电导率关系	(293)

第 九 章 高频放大器(班冀超译)

9.1 引言	(299)
9.2 晶体管放大器和电子管放大器在高频时的比较	(299)
9.3 最大功率增益的计算	(302)
9.4 设计狭带和宽带放大器的一般讨论	(305)
9.5 短路稳定晶体管狭带放大器的耦合网络	(306)
9.6 用短路不稳定晶体管的狭带放大器	(316)
9.7 自动增益控制系统	(318)
9.8 宽带放大器	(324)
9.9 用特殊高频晶体管的放大器	(331)
9.10 晶体管高频放大器的中和及单向	(333)

第 十 章 振荡器(班冀超译)

10.1 引言	(337)
10.2 持续振荡的条件	(339)
10.3 负电阻二端网络	(341)

10.4 晶体管負电阻电路	(345)
10.5 高频考慮	(348)
10.6 频率稳定	(350)
10.7 晶体控制振盪器	(353)
10.8 振盪器频率倍增器	(354)
10.9 弛張振盪器	(355)
10.10 自猝振盪器	(360)
10.11 四端振盪器	(361)
10.12 通用的四端振盪器	(362)
10.13 科耳皮茲振盪器；起振条件	(364)
10.14 科耳皮茲振盪器；频率稳定	(365)
10.15 哈脫萊振盪器；起振条件	(367)
10.16 哈脫萊振盪器；频率稳定	(367)
10.17 調集电极振盪器	(368)
10.18 晶体控制	(368)
10.19 点接触型晶体管反饋振盪器	(369)

第十一章 調制与解調(班冀超譯)

11.1 晶体管特性曲綫的非綫性	(371)
11.2 指数曲綫所产生的諧波	(379)
11.3 調制放大器	(381)
11.4 平衡調制与輔助对称	(382)
11.5 面接合型晶体管調幅振盪器	(386)
11.6 調頻及频率稳定	(393)
11.7 点接触型調制振盪器	(395)
11.8 晶体管混頻器	(397)
11.9 变頻器	(407)
11.10 二极管檢波器	(408)
11.11 集电极檢波	(409)
11.12 在集电极檢波器及B类放大器中有最小畸变时所需偏压 ..	(412)

11.13 集电极检波器及B类放大器最佳偏压点与温度的关系 (413)

11.14 用非线性元件的运用点稳定法 (414)

第十二章 脉冲电路 (部分节译)

12.1 引言 (419)

12.2 点接触型晶体管的大信号运用 (422)

12.3 触发作用及触发电路 (426)

12.4 点接触型晶体管的触发作用 (430)

12.5 基本单稳电路 (435)

12.6 传输线控制单稳电路 (444)

12.7 几种实用单稳电路 (446)

12.8 基本双稳电路 (449)

12.9 双晶体管双稳电路 (452)

12.10 闸门电路 (455)

12.11 直流运用点稳定法 (457)

12.12 点接触型晶体管的瞬变放大 (460)

12.13 点接触型晶体管的高频等效电路 (462)

12.14 触发电路的稳定性问题 (463)

12.15 发射极高频策动点特性曲线 (465)

12.16 基本双稳电路的月式要求 (466)

12.17 触发电路瞬变放大 U 的图解表示 (469)

12.18 非饱和双稳电路 (471)

12.19 面接合型晶体管脉冲电路 (472)

12.20 面接合型晶体管的大信号运用 (473)

12.21 面接合型晶体管双稳电路 (476)

12.22 面接合型晶体管单稳电路 (483)

12.23 复式面接合型晶体管元件 (484)

12.24 面接合型晶体管闸门电路 (485)

第一章 物理概念

1.1 引言

在电子电路中应用晶体管时，只須把晶体管当作电路元件即可。晶体的性能是用其运用特性来闡明的。然而要想尽可能地利用晶体管，則关于决定这种器件运用状态的基本原理的知識还是重要的。

电子管基本上是依靠电子在各电极間的真空中流动而工作的；两个基本有关問題力如何从固体中釋放电子及如何在真空中控制这些电子。在晶体管及其他有关固态电子器件中，其工作則依賴于电荷載流子在固体中流动；这里的主要問題是如何在固体中产生及控制这些載流子。本章以敘述的和定性的方式对决定晶体管、光电晶体管和整流器的运用情况的物理概念作一总括的介紹，而对于固态物理学則不作詳細的和严格的討論。可是在某些特殊情况下，当电路分析中需要比較透彻地領会晶体管物理学时，則在研究这些题目的几章中对于某些物理概念給以适当的定量討論。特別在第七和第八章中，將詳細討論晶体管高頻运用的物理学。

1.2 鍺晶体

鍺是大多数现代晶体管和晶体整流器所使用的材料。別的一些半导体、如硅等，目前也在使用。提純的鍺通常是多晶状，然而可

能并且常常希望制成单晶状的锗样品。在这样的单晶体中，锗原子按照所谓**晶格结构**的一定图形排列。如图1—1符号图所示，每一原子受其相邻四原子束缚，使每二相邻原子间的距离一样。每一锗原子由一个原子核和32个电子组成。原子核和28个电子形成一惯性核心，其净电荷为+4个电子电荷单位。图中，惯性核心用圆球表示，它包含着固体的基本质量，但对于元素的化学性质和电学性质却无明显贡献。其余4个电子是价电子，在原子中构成键（图1—1中用圆棍表示），它们决定元素的化学性质和电学性质。键中两个价电子分别来自两个相邻原子，由于其相对运动的关系，两个原子之间有了束缚力。这个束缚力和带正电荷的核心间的静电斥力刚好平衡，以致各原子在晶体中按照一定方式排列。这个电子对键称为**共价键**。

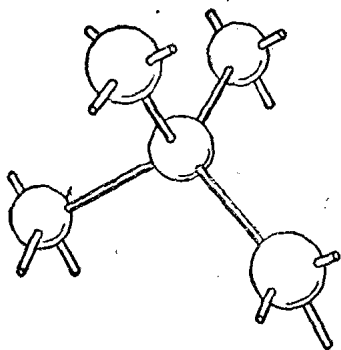


图 1—1 锗晶体构造

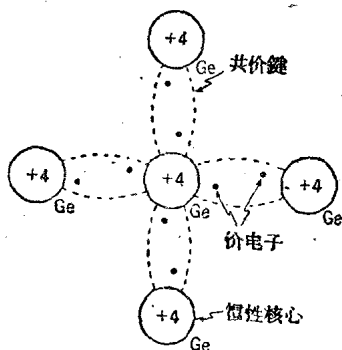


图 1—2 用符号表示的完美锗的晶体构造

为对此排列得到更加清楚的概念起见，把晶格结构用符号重画成图1—2所示的平面图。当无外部扰乱时，共价键是稳定的，价电子的运动局限于其个别键内。虽然在锗晶体中有数量极多的电子，但是这些电子或者束缚于核心或者束缚于共价键，因此即使在电场作用下也不能在晶体中从这一点自由移动到另一点。这样，锗

晶体就表现得象具有高介电常数的絕緣体一样。这样的論述只适合于晶格結構中沒有任何缺陷的完美晶体的理想情况。后面将指出，晶体管和晶体整流器的运用是依靠着晶体中被控制的缺陷而实现的。为简单計，以后在本书中除非特別說明，“电子”一詞将专指有助于晶体导电的电子而言，而不包括共价鍵中或核心中的电子。

1.3 完美鍺晶体中的电子性态

假設用某些方法在完美鍺晶体中注入一个电子。由于此**盈余电子**位于完善的周期性电势环境中，波动力学預示此电子将不受晶体内部起伏电場的影响。这就是說电子或者靜止不动，或者以等速穿过晶体。但实际情况并非如此。除非晶体处于絕对溫度零度，其中总不可避免地有热能存在。而热能存在会使晶格发生振动。这样的晶格振动激发电子使之运动。关于电子热激发的机构学可用**声子**概念來說明：晶格振动的能量可設想为由所謂**声子**的量子化能量粒子构成。这和光能設想为由一个个量子——**光子**——构成的情形很相似。我們可以設想声子为以杂乱热能而运动的不帶电荷的彈性质量。声子与电子間的連續碰撞使电子描出杂乱曲折运动，如图 1—3a 所示。杂乱的曲折运动不会使电子在任何方向創造淨位移；因而对固体导电无所貢獻。

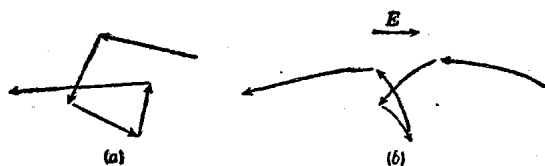


圖 1—3 电子在晶体中的运动：(a) 无电場作用时的雜乱运动；
(b) 有电場作用时的运动。

电子在固体中的淨位移可因漂移或扩散而发生。当有一电場加至固体上时，盈余电子的杂乱运动被改变而在电場方向上产生淨位

移(图1—3b)。电子漂移构成电子电流,或换句话说,使晶体导电。合成运动是由于电场造成的运动和杂乱曲折运动二者相迭合而成的。在电子漂移速度小于声子热激发速度的范围内,漂移速度与电位梯度(换言之即电场)成正比,其关系为

$$v = \mu E$$

式中 v 为漂移速度, E 为所加电场, μ 为迁移常数,不同固体具有不同的 μ 值。设有一固体,其截面均匀,长度为 l ,跨接于其两端的电位差为 V 。如果此固体每单位长度中有 N 个电子,则固体中的电流为

$$i = Nqv = Nq\mu E = Nq\mu(V/l)$$

式中 q 为电子电荷。这意味着在结晶性固体中,电压与电流的关系服从欧姆定律。但当所加电场过强时,这个关系不再维持。

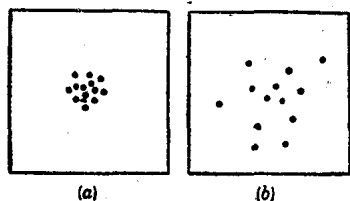


图 1—4 在晶体中电子因扩散而散开:
(a)扩散之前;(b)扩散以后。

当许多电子注入晶体某一点时,在没有外加电场的情况下,这些电子因杂乱运动的结果向各个方向散开(图1—4)。电子这样散开的情形称为扩散。这是由于固体中的热激发所致。设有一样品,其截面为单位面积,沿样品有一均匀线性密度梯度。扩散电流为

$$i = qD(dp/dx)$$

式中 q 为电子电荷; dp/dx 为密度梯度, D 为固体的扩散常数。

电子在晶体中的扩散和迁移率是以所谓爱因斯坦关系表示式

$$D/\mu = kT/q \quad (1-1)$$

相联系的,式中 k 为玻耳兹曼常数, T 为绝对温度, q 为电子电荷。在室温下,电子在锗中的扩散常数和迁移率大约为: $\mu = 3600$ 厘米/秒伏/厘米, $D = 93$ 平方厘米/秒。

1.4 晶体的缺陷

在此以前我們研究的是完美晶体的性能。完美晶体在构造上是沒有缺陷的。在晶体中注入少量电子不会扰乱晶体构造，也不会明显地影响到晶体中的电场分佈。但是，就所涉及的晶体管电子学而言，完美晶体只是一个理想模型而已。晶体管和晶体整流器的运用实际上有賴于晶体中的被控制的缺陷。晶体中的缺陷在固体中供給电荷载流子，并为控制这些载流子的流动作出貢獻。造成缺陷的三个主要原因为：輻射能、化学杂质和原子无序排列。（此处所用缺陷一詞是取其广泛意义，不仅包括原子无序排列和杂质原子等原子缺陷，而且包括由于晶体正常能态被扰乱而引起的能量缺陷。）

1.5 輻射能缺陷

当锗元素曝露在光照之下时，其性质会有很大的改变。投射光系由光子組成，每一光子是一量子，具有能量 $E = h\nu$ ，此处 h 为普朗克常数， ν 为投射光的频率。当光线照射在晶体上时，量子可被晶体吸收而傳送到一个共价鍵上。倘若能量足够大（亦即投射光的频率足够高），便可从共价鍵中逐出一个电子。从共价鍵中逐出的电子与以前所討論的注入盈余电子一样，在晶体中自由漂移，并同样地产生导电。电子逐出以后，共价鍵中余留下来的空位置称为**空穴**（图1—5）。相邻共价鍵中的电子很容易移动到此空穴中，因此在其原位置留下一个新空穴。这样好像是空穴在晶体中

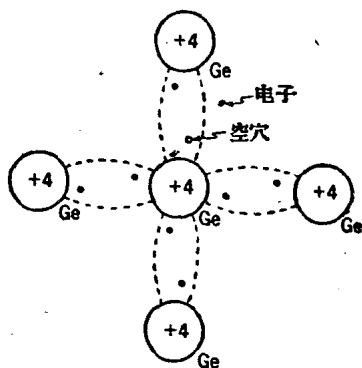


圖 1—5 用符号表示的本征型锗的晶体構造

移动。当没有电场时，空穴的运动是杂乱的，和盈余电子的运动一样。但在电场作用下，空穴的行动却象一个具有正电荷的盈余电子。事实上，在晶体管电子学的研究中，我们可以把空穴当作正性盈余电子。可是空穴的扩散常数和迁移常数只相当于电子的一半。在室温下，空穴在锗中的扩散常数和迁移常数约为 $D = 43$ 平方厘米/秒， $\mu = 1700 \frac{\text{厘米/秒}}{\text{伏/厘米}}$ 。

电子和空穴分别称为负性和正性 **载流子**，它们负责晶体的导电。由于光照而产生电子-空穴对是光电晶体管和光电二极管运用的基本原理。在普通晶体管和晶体整流器运用中，晶体被屏蔽起来以消除光的作用。

热能是造成晶体缺陷的另一种原因。我们讨论过热能对于注入晶体中或在晶体中产生的盈余电子的运动所起的作用。热能对产生电子-空穴对也起着重要作用。在室温下，声子的平均热能很小，不能使晶体产生缺陷。但热能是按照麦克斯韦-玻耳兹曼分配函数在各声子之间分佈的，有一小部分声子，所具能量足以击破共价键。这些高能声子，当被晶体吸收并传送到共价键时，便和投射的光能一样使晶体产生电子-空穴对。应该指出：由于电子和空穴是以电子-空穴对形式产生的，因而热能和光能一样，其所产生的电子数与空穴数相等。这些电子-空穴对所造成的导电现象称为**本征型导电**，而此晶体则称为本征型样品。载流子一旦产生后，在与电荷相反的另一载流子重新复合成共价键之前，将以有限**寿命**留在晶体中。在室温下，锗元素中的电子-空穴对的平均寿命约为 10^{-4} 秒。电子-空穴对的产生和复合是一个连续过程。当锗样品达到任何恒定温度时，电子-空穴对的产生和复合总是处于一个动平衡状态，以致样品中的载流子有一定浓度。其浓度按照关系式

$$n_i^2 = K e^{-E_g / kT}$$

以指数关系随温度而变，式中 n_i 表示本征型样品中导电电子的

濃度, E_g 为击破共价键所需能量。由于空穴和导电电子的数目相等, 全部载流子的浓度为 n_i 的两倍。图 1—8² 表示本征型锗的电导率为温度的函数的图形。电导率可用来测量载流子浓度。須注意: 当温度比正常室温高很多时, 电导率增加很快。在大多数固态电子器件中, 如欲该器件有实用价值, 必须使其受周围温度影响的本征型电导小于被控制的电导。

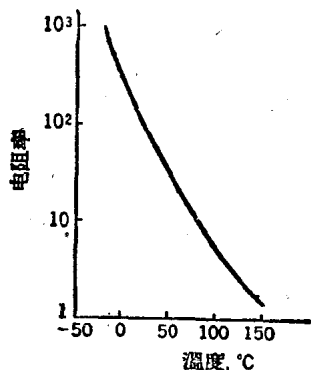


圖 1—6 本征型锗的电阻率为温度的函数的曲线

在室温下, 纯锗的电阻率约为 60 欧—厘米, 以绝缘体比较的话,

如云母, 其电阻率为 9×10^{15} 欧—厘米, 而导体例如铜, 其电阻率为 1.7×10^{-9} 欧—厘米。因此锗和一些类似的固体被适当地称为半导体。

1.6 化学杂质缺陷

在完美锗晶体中加入少量别种元素或杂质, 可以得到正或负载流子。这些杂质元素在周期表中的位置通常在第 III 列或第 V 列。不论何种情况, 总是杂质原子代替了完美晶格结构中的锗原子。由于杂质原子的价电子比锗的多一个或者少一个, 结果在结构中出现一个盈余电子或者一个空穴。载流子浓度, 因而锗的电导率, 可以用这个方法精确地控制。

首先设想把具有五个价电子的元素, 如锑或砷, 放入完美锗晶体中的情况。杂质打乱晶体的晶格结构, 得到如图 1—7 符号图所示的新结构。杂质原子的五个价电子中, 四个价电子与相邻的四个锗原子形成共价键, 而第五个价电子则松附于锑的惰性核心。第五

个价电子虽在低温也很容易脱离锑原子，其行动如同盈余电子。这种杂质供给了盈余电子，因而称为**施主杂质**。施主的存在供给盈余电子但不供给空穴。由于负性载流子的关系，加有施主杂质的锗称为**n-型锗**。

如果在完美锗晶体中放入的杂质是具有三个价电子的化学元素，例如镧或硼，其晶格结构改变成图1—8符号图所示形状。由于杂质原子，例如镧，仅仅有三个价电子，因此镧和相邻四个锗原子相连接的四个共价键中有一个是不完整的。这样，晶格结构中便有一个空穴。由于这种杂质供给空穴（这实际是缺少电子），因而称为**受主杂质**。加入受主的锗，由于有较多的正性载流子而称为**P-型锗**。

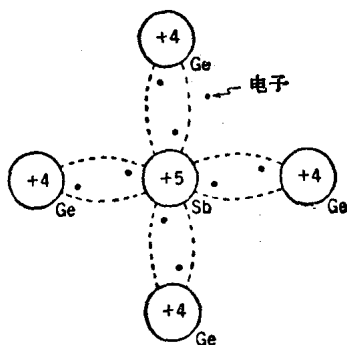


图 1—7 用符号表示的n-型锗晶体构造

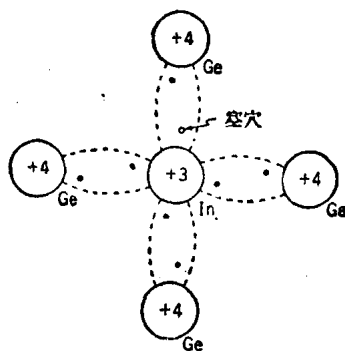


图 1—8 用符号表示的p-型锗晶体构造

用生长单晶法可以制成几乎没有杂质的锗样品。纯锗在室温下的电阻率约为60欧—厘米。如果锗中有微量杂质，虽然量少得用普通化学和光谱方法检查不出，但对电导率却有很大的影响。例如在锗中加入微量施主杂质，其量为 10^8 个锗原子中有一个杂质原子，则锗样品的电阻率将降低到4欧—厘米。若已知杂质性质，可利用锗在室温下（ 25°C ）的电阻率来测量样品的杂质含量。图 1—9³ 表示