

学院肖福运教授和湖南师范大学王学维副教授参加了该书的审订过程，并主审了全书。

在本书的编写过程中，得到了东北师范大学、陕西师范大学、江西赣南师范学院、湖南吉首大学、衡阳师专、广西玉林师专、湖北宜昌师专等兄弟院校的大力支持和帮助。广东教育学院黄志英同志、长沙水利电力师范学院黄仁乐同志提出了宝贵意见，余汉香同志描绘了全部插图，田原和谢长发同志做了许多具体工作，在此一并致以衷心感谢。

限于编者水平，书中难免有谬误之处，恳请读者批评指正。

编 者

1984年11月

内 容 提 要

本书是根据教育部颁发的高师物理专业《电子线路基础》教学大纲精神，结合三校多年来教学实践，并广泛吸取兄弟院校教学经验编写的。分上下两册出版。上册的内容包括：晶体二极管和三极管、放大器基础、场效应管放大器、负反馈放大器、直流放大器、集成运算放大器、低频功率放大器、直流稳压电源等八章。下册内容包括：调谐放大器、正弦波振荡器、无线电广播与收音机、数字与脉冲电路、黑白电视接收机等五章及附录。书中每章均附有适量的思考题和习题。

本书可作为高等学校物理系（科）及其它院校有关专业《电子线路基础》课教材；也可作为电大、函授等各类业余大学的教材；还可供从事电子技术的工程技术人员和无线电爱好者学习和参考。

前 言

本书系由华中师范学院、湖南师范大学、广西师范大学三校物理系电子线路教研室，根据教育部颁发的高师物理专业《电子线路基础》教学大纲精神，结合三校多年来教学实践，并广泛吸取兄弟院校教学经验编写的。

在编写过程中，我们力图把内容的重点放在培养分析问题和解决问题的能力上。以讲清基本概念，阐述基本单元电路工作原理和基本分析方法为主，既着重于定性分析，又有必要的定量分析。另外，从教学需要出发，每章附有适量的思考题和习题。

为适应八十年代电子技术发展的需要，相应地加强了线性集成电路和数字集成电路部分。为帮助读者从事教学工作和从事电子技术方面的科技活动打下必要的基础，我们编入了晶体管调频、调幅收音机和黑白电视接收机电路部分。另外，还专门编入了附录部分，对一些实用电路进行了分析和介绍，供学习参考。书中有*号的内容，可供选用。

本书在内容安排上，从实际出发，在保证基本理论的同时，注意了理论联系实际，并力求重点突出，文字简练。

另外，《电子线路基础题解》和《电子线路基础实验》是与本书相适应的两本教材，将陆续出版。

参加本书编写工作的有冯昌昆（第一、二、四章）、全先科（第三、八章）、石英（第五章）、王振伟（第六章）、曹国初（第七、十一章）、田科英（第九、十三章）、宋庆华（第十、十二章及附录），华中师范学院田科英、宋庆华两同志负责组织本书的编写工作并校审了全部书稿。华中师范

目 录

第一章 晶体二极管和三极管..... (1)

§ 1.1 半导体基础知识..... (1)

1.1.1 本征半导体..... (2)

1.1.2 杂质半导体..... (7)

§ 1.2 PN结的特性..... (12)

1.2.1 PN结的形成..... (13)

1.2.2 PN结的单向导电性..... (15)

1.2.3 PN结的击穿特性..... (17)

1.2.4 PN结的电容效应..... (19)

§ 1.3 晶体二极管..... (22)

1.3.1 晶体二极管的构造..... (22)

1.3.2 晶体二极管的伏安特性..... (23)

1.3.3 晶体二极管的主要参数..... (26)

1.3.4 稳压管..... (28)

§ 1.4 晶体三极管的构造和工作原理..... (31)

1.4.1 晶体三极管的构造..... (31)

1.4.2 晶体三极管内部电流分配关系..... (34)

1.4.3 晶体三极管的放大作用..... (38)

§ 1.5 晶体三极管的特性曲线..... (40)

1.5.1 共发射极连接的特性曲线..... (41)

1.5.2 晶体三极管的主要参数..... (46)

附录 国产半导体器件命名方法..... (53)

思考题和习题..... (55)

第二章 放大器基础..... (58)

§ 2.1 基本放大电路的工作原理..... (58)

2.1.1	基本放大电路的组成及工作原理	(58)
2.1.2	放大器的静态工作点	(65)
2.1.3	放大器的主要指标	(68)
§ 2.2	放大器的图解分析法	(72)
2.2.1	图解分析法的步骤	(73)
2.2.2	电路参数对工作点的影响	(79)
2.2.3	放大器的非线性失真与动态范围	(81)
§ 2.3	工作点的稳定与偏置电路	(86)
2.3.1	温度变化对工作点的影响	(86)
2.3.2	分压式电流负反馈偏置电路	(89)
2.3.3	其他偏置电路	(102)
§ 2.4	放大器的等效电路分析法	(104)
2.4.1	晶体管的低频 h 参数等效电路	(106)
2.4.2	用 h 参数等效电路分析放大器	(114)
§ 2.5	放大器的频率特性	(124)
2.5.1	概述	(124)
2.5.2	放大器的低频特性	(128)
2.5.3	放大器的高频特性	(141)
§ 2.6	多级放大器	(147)
2.6.1	多级放大器的级间耦合方式	(148)
2.6.2	多级阻容耦合放大器的分析方法	(151)
• 2.6.3	阻容耦合放大器的设计方法	(157)
2.6.4	放大器的噪声	(163)
思考题和习题		(166)

第三章 场效应管放大器 (172)

§ 3.1	场效应管	(172)
3.1.1	结型场效应管	(172)
3.1.2	绝缘栅场效应管	(179)
3.1.3	场效应管的主要参数	(187)
3.1.4	场效应管的特点和使用注意事项	(189)

§ 3.2 场效应管放大器	(190)
3.2.1 偏置电路和静态工作点	(190)
3.2.2 场效应管的微变等效电路	(194)
3.2.3 场效应管放大器的分析	(196)
思考题和习题	(198)
第四章 负反馈放大器	(200)
§ 4.1 反馈的基本概念	(200)
4.1.1 什么是反馈	(200)
4.1.2 负反馈放大器的分类	(201)
4.1.3 负反馈放大器的基本关系	(207)
§ 4.2 负反馈对放大器性能的影响	(211)
4.2.1 提高增益的稳定性	(211)
4.2.2 减小非线性失真	(213)
4.2.3 扩展通频带	(215)
4.2.4 改变放大器的输入电阻和输出电阻	(218)
§ 4.3 负反馈放大器的分析方法	(224)
4.3.1 方框图法的基本步骤	(225)
4.3.2 电压串联负反馈放大器的分析	(228)
4.3.3 电流并联负反馈放大器的分析	(234)
4.3.4 深负反馈放大器增益的估算	(239)
§ 4.4 射极输出器	(243)
4.4.1 基本电路分析	(243)
4.4.2 射极输出器的应用及改进	(249)
4.4.3 射极输出器的电压跟随范围	(254)
§ 4.5 负反馈放大器的稳定性	(255)
4.5.1 负反馈放大器的自激	(255)
4.5.2 负反馈放大器的稳定判据	(258)
4.5.3 寄生反馈	(261)
思考题和习题	(265)

第五章 直流放大器.....(271)

§ 5.1 直流放大器中的特殊问题.....(271)

5.1.1 直流放大器的特点.....(271)

5.1.2 多级直流放大器级间的耦合方式.....(272)

5.1.3 直流放大器中的零点漂移现象.....(275)

§ 5.2 差分放大器.....(278)

5.2.1 差分放大器的工作原理.....(279)

5.2.2 差分放大器对零点漂移的抑制作用.....(280)

5.2.3 差分放大器的分析.....(281)

§ 5.3 差分放大器的改进.....(292)

5.3.1 具有恒流源的差分放大电路.....(392)

5.3.2 具有共模负反馈的差分放大电路.....(296)

5.3.3 高输入阻抗差分放大电路.....(297)

§ 5.4 差分放大器的几种接法.....(298)

5.4.1 差分放大器两种输入方式的特点.....(299)

5.4.2 差分放大器两种输出方式的特点.....(302)

思考题和习题.....(310)

第六章 集成运算放大器.....(315)

§ 6.1 概述.....(315)

§ 6.2 集成运放的内部电路.....(317)

6.2.1 F741集成运放内部电路分析.....(318)

6.2.2 MC1556集成运放内部电路分析.....(330)

§ 6.3 集成运放的主要参数.....(333)

6.3.1 集成运放的代表符号.....(333)

6.3.2 集成运放的主要参数.....(334)

6.3.3 集成运放的选择.....(339)

§ 6.4 集成运放的应用.....(342)

6.4.1 理想运算放大器.....(342)

6.4.2 虚地的概念.....(342)

6.4.3	反相比例放大器	(344)
6.4.4	同相比例放大器	(347)
6.4.5	电压跟随器	(349)
6.4.6	加法器和减法器	(351)
6.4.7	积分器和微分器	(353)
6.4.8	比较器	(356)
6.4.9	波形发生器	(359)
6.4.10	应用中的一些实际问题	(361)
	思考题和习题	(366)

第七章 低频功率放大器 (371)

§ 7.1	概述	(371)
§ 7.2	单管甲类功率放大器	(375)
7.2.1	变压器的阻抗变换作用	(375)
7.2.2	工作情况分析	(377)
7.2.3	单管甲类功率放大器的非线性失真	(381)
§ 7.3	推挽功率放大器	(384)
7.3.1	推挽电路的组成和工作原理	(384)
7.3.2	乙类推挽功率放大器的图解分析	(386)
7.3.3	乙类推挽功率放大器主要参数的计算	(388)
7.3.4	乙类推挽功率放大器的失真	(395)
§ 7.4	无输出变压器功率放大器	(399)
7.4.1	输入变压器倒相式OTL功率放大器	(400)
7.4.2	互补对称式OTL电路	(402)
7.4.3	无输出变压器功放电路设计举例	(408)
7.4.4	OCL电路	(415)
§ 7.5	集成音频功率放大器	(418)
§ 7.6	晶体管扩音机整机电路分析	(421)
	思考题和习题	(423)

第八章 直流稳压电源.....(427)

§ 8.1 整流电路.....(427)

8.1.1 全波整流和桥式整流电路.....(427)

8.1.2 倍压整流电路.....(432)

§ 8.2 滤波电路.....(434)

8.2.1 电容滤波电路.....(434)

8.2.2 电感滤波电路.....(439)

8.2.3 复式滤波电路.....(440)

8.2.4 整流滤波电路参数选择举例.....(442)

§ 8.3 电子稳压器.....(444)

8.3.1 串联型晶体管稳压电路.....(445)

8.3.2 串联型稳压电源设计举例.....(457)

8.3.3 集成稳压电源.....(460)

思考题和习题..... (464)

第一章 晶体二极管和三极管

§ 1.1 半导体基础知识

自然界中的物质，按其导电性能可分为导体、绝缘体和半导体三大类。导体的电阻率在 $10^{-9} \sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 之间，如金、银、铜、铝等；绝缘体的电阻率在 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上，如橡胶、有机玻璃、陶瓷等；半导体的电阻率处于二者之间，为 $10^{-8} \sim 10^0 \Omega \cdot \text{cm}$ ，如硅、锗、砷化镓等都是最常用的半导体材料。因绝大多数半导体都是晶体，所以用半导体材料制造的半导体二极管、三极管常称为晶体二极管、三极管。

半导体之所以能制成用途很广泛的各种半导体器件（如晶体二极管、三极管等），并不是由于它的导电性能介于导体和绝缘体之间这一性质，而是由于它们具有以下一些重要的特性，使之在不同的情况下，其导电能力有非常大的差别。

1. 半导体的导电能力随外界温度升高而显著地增加，利用这种特性可制成各种热敏元件（如热敏电阻等）。

2. 半导体的导电能力随光照强度而显著变化，利用这一特性，可以制成各种各样的光敏元件（如光敏电阻、光电管等）。

3. 半导体的导电性能对杂质非常敏感。在纯净的半导体中适当掺入微量的杂质，半导体的导电能力将成百万倍地增加，这是半导体最独特的性质。正是由于这一点，我们利用掺杂的办法，便能制造出各种各样不同性质、不同用途的半

导体材料和器件，使半导体成为电子技术中的一个极为重要的领域。

1.1.1 本征半导体

一、半导体的原子结构

纯净的半导体称为本征半导体。“本征”二字的意义是半导体的特性来自半导体本身的特征，而没有杂质的影响。而半导体之所以具有许多独特的性能，主要取决于其内部的原子结构。

图1-1-1是硅和锗的原子结构示意图，因两者最外层轨道上的价电子都是4个，所以都是四价元素。半导体的化

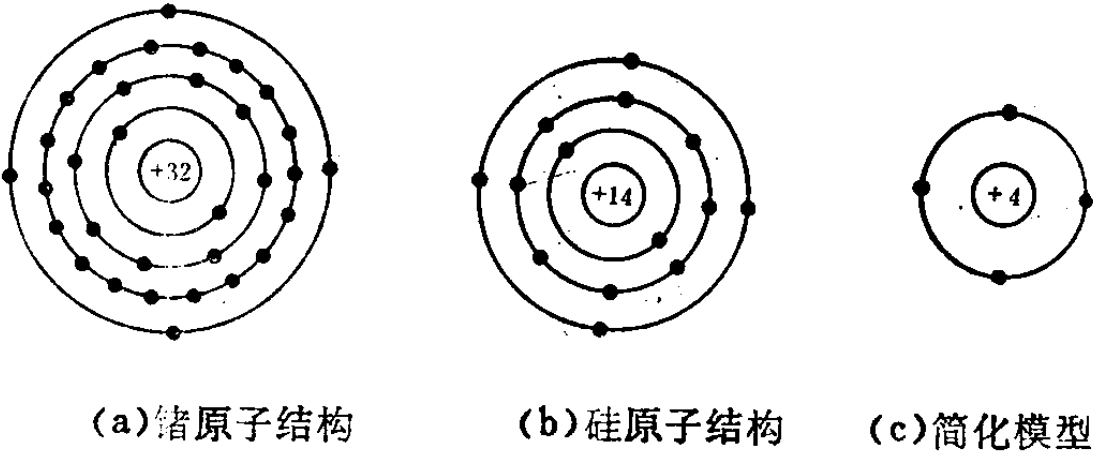


图1-1-1 硅和锗的原子结构示意图

学性能与导电性能都取决于这四个电子的运动状态。

硅和锗都是晶体，其原子按一定的规律排列，组成晶格点阵。硅和锗的晶体结构与金刚石结构相同，即每个原子位于正四面体的中心，以对称的形式与相邻的四个原子用共价键紧密相联系，这四个原子则正好处在该四面体的顶角上，如图1-1-2。许多原子按一定的晶格点阵排列起来，形成晶粒。每一晶粒内，原子的排列方向是一致的，而整块晶体是由许多晶粒聚合而组成的。如果一块晶体内的各个晶粒排

列不规则,则在整块晶体内,原子的排列仍是杂乱无章的,这样的晶体叫多晶体。多晶体内部结构不严密,缺陷多,一般不能用来制造晶体管。为了制造性能好的晶体管,必须把多晶体提炼成单晶体。在单晶体内,各个晶粒的排列是规则的,整个晶体内部原子都按一定规律整齐地排列着。

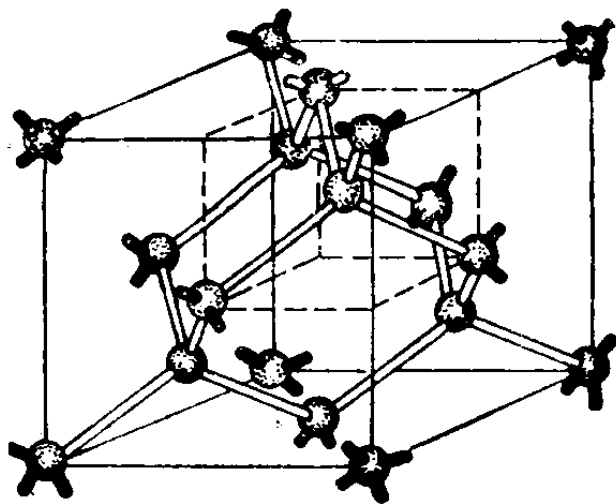


图1—1—2 硅和锗的晶体结构

图1-1-3是硅晶体结构平面示意图。由于在制成单晶时,原子排列是整齐的,各原子间靠得很紧且距离都相等,结果,各原子外层价电子的运动轨迹互相交迭起来,它们的四个价电子不仅受本身原子核的束缚,还分别受到相邻四个原子的影响,出现了每相邻两个原子共有一对价电子的现象。这一对价电子中的任一电子,既可以绕自身所属原子核

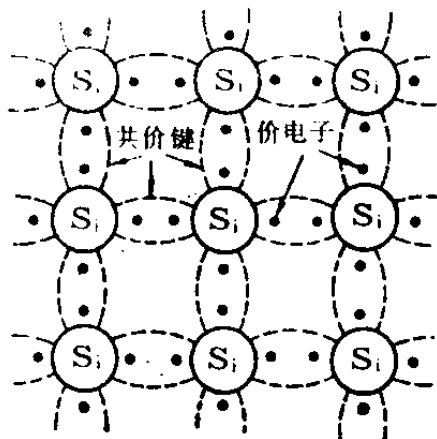


图1—1—3 硅晶体结构平面示意图

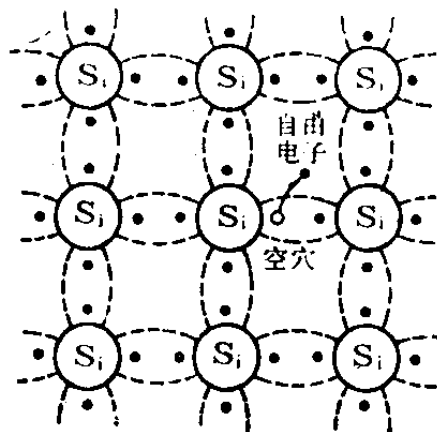


图1—1—4 本征激发产生电子—空穴对

旋转,又时常出现在另一个原子所属的电子轨道上,从而使价电子的运动轨道发生改变,于是,价电子就不再仅仅是属

于原来的原子，还可以从一个原子通过轨道交迭区转移到相邻的原子上，变成两个原子所共有。这种现象叫做价电子的共有化运动。在硅和锗晶体中，每个原子都用一个价电子与相邻原子的一个价电子以共有化运动的方式互相联系着，组成严密的晶体结构。我们把价电子的这种结合方式叫做共价键。

共价键中的两个价电子处于被束缚状态，称为束缚电子。束缚电子不能自由移动，故每个原子都处在电中性状态，整个晶体就由这些中性原子组成，所以也总是处在电中性状态。

二、本征激发

从理论上说，只有在绝对零度时，价电子才是绝对稳定地处于共价键的束缚之中。实际上，在室温条件下已有极少量束缚电子能获得足够的热能，摆脱共价键的束缚而成为自由电子。当共价键中有一个价电子变成了自由电子，其原来的位置上就缺少了一个电子，留下一个“空位”，称为“空穴”，如图1-1-4所示。必须注意，原来处于电中性的原子由于失去一个价电子而变成了正离子，这相当于“空穴”带有与电子电量相等的正电荷。

我们把由于热运动使本征半导体内价电子挣脱共价键的束缚变成自由电子的过程，叫做本征激发。显然，本征激发过程中，自由电子（带负电荷）与空穴（带正电荷）是成对产生的，因而称为电子—空穴对。

若自由电子被正离子吸引而重新落入空穴，自由电子和空穴便同时消失，这种现象叫做复合。

本征半导体中，由本征激发的自由电子可以自由运动，而失去了电子的原子（正离子）却不能自由运动，只能在原来晶格中的平衡位置上振动。可是，正离子对电子有吸引力，能把邻近原子中共价键上的价电子吸引过来填补空穴，

这就使得在邻近原子中出现一个新的空穴，如图1-1-5所示，B处的价电子填补A处的空穴，同时在B处留下新的空穴，正离子B又吸引C处的价电子去填补该空穴，结果又在C处产生新的空穴，……依此发展下去，如同空穴从A运动到B再运动到C，……，因此，可以认为空穴也是能运动的。不过，空穴的运动实质上是价电子依次填补空穴形成的，所以空穴的运动方向与价电子的移动方向相反。

自由电子和空穴都带有电荷，又都能运动，所以它们是半导体内参与导电的基本微粒，统称为载流子。在没有外加电场作用时，所有载流子——电子和空穴都处于不规则的热运动中，不会形成电流。如果在一块本征半导体两端加上电源E时，在外电场作用下，自由电子将趋向电源正极，形成电子电流 I_n ，空穴则趋向电源负极，形成空穴电流 I_p ，结果，半导体中的总电流为这两种载流子电流之和，即 $I = I_n + I_p$ ，如图1-1-6所示。

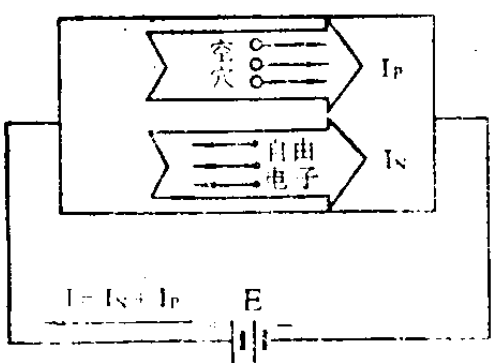
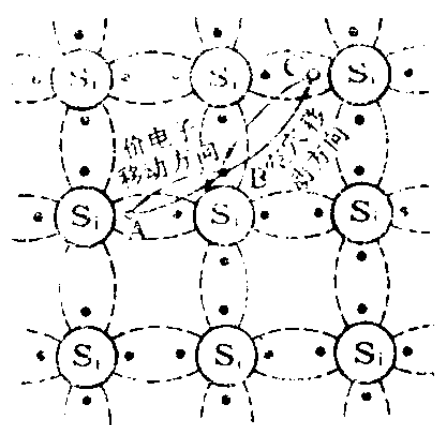


图1—1—5 空穴的移动 图1—1—6 本征半导体的导电情况

本征半导体中由本征激发产生的电子 - 空穴对数量是很少的。设自由电子浓度为 n ，空穴浓度为 p ，显然，在本征半导体中有 $n = p = n_i$ ， n_i 称为本征载流子浓度，简称本征浓度。表1-1-1列出了硅和锗的基本物理常数。室温下，硅

的本征浓度 $n_i = 1.5 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ ，锗的本征浓度 $n_i = 2.5 \times 10^{13}/\text{cm}^3$ 。和它们的原子密度相比，硅是每 3.3×10^{22} 个原子、锗是每 1.8×10^{23} 个原子中才有一个自由电子—空穴对，所以，本征半导体的导电能力是很差的。

表 1-1-1 硅和锗的基本物理常数

项 目	硅(Si)	锗(Ge)
原子序数	14	32
原子量	28.08	72.60
比 重 (g/cm ³)	2.328	5.323
原子密度(原子数/cm ³)	4.96×10^{22}	4.42×10^{22}
本征浓度(300°K, 1/cm ³)	1.5×10^{10}	2.5×10^{13}
本征电阻率(300°K, Ω·cm)	2.3×10^5	45
电子迁移率 μ_n (300°K, cm ² /v·s)	1300	3800
空穴迁移率 μ_p (300°K, cm ² /v·s)	500	1800
电子扩散系数 D_n (cm ² /s)	34	98
空穴扩散系数 D_p (cm ² /s)	13	46

必须注意，本征激发的原因是热运动，随环境温度升高，本征浓度 n_i 是按指数规律急剧增加的，本征电阻率则随

温度升高而急剧减小，表明半导体的电阻率具有负的温度系数。

1.1.2 杂质半导体

本征半导体的导电能力很差，且很不稳定（与温度有关），所以不能用来制造晶体管。实际用于制造晶体管的是人为地掺入了一定杂质的所谓“杂质半导体”。这里所说的杂质是指其它化学元素，如五价的磷(P)、砷(As)、锑(Sb)等，或者是三价的硼(B)、镓(Ga)、铟(In)等。根据掺入杂质的化合价不同，杂质半导体可分为N型半导体和P型半导体两种。

一、N型半导体

在本征半导体硅(或锗)中掺入少量五价元素磷(或砷、锑等)，这些磷原子就将取代硅原子，占据晶格中的某些位置而成为杂质半导体，如图1-1-7所示。

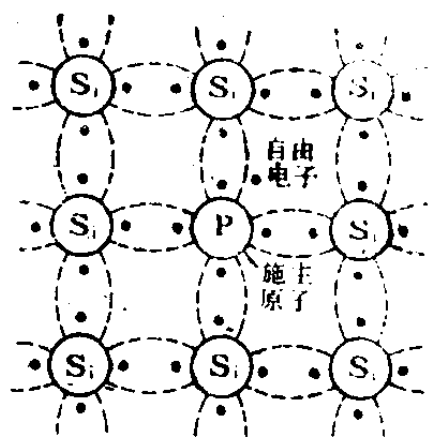


图1-1-7 N型半导体晶体结构平面示意图

由于磷是五价元素，有五个价电子，除其中四个分别与相邻的四个硅（或锗）原子紧密地组成共价键外，还剩余一个价电子。这个剩余价电子只是微弱地束缚在磷原子核周围，它只要获得很小的能量就能挣脱原子核的束缚而成为自由电子，而磷原子因失去一个电子便成为带正电的离子。在室温下，掺入的五价杂质原子剩余的价电子，几乎都能挣脱自身原子核的束缚而成为自由电子，可见，在硅（或锗）中每掺入一个磷原子，就可能提供一个自由电子，而空穴数并不增加（相反，由于自由电子的增多，复合机会增加，反而使空穴数略有减少），这就使得掺入五价杂质磷原子的半导体硅(或锗)

中，电子载流子的数目（由杂质浓度决定）远大于依靠本征激发产生的空穴载流子数。显然，在这种半导体中，参与导电的主要是自由电子，故称这种半导体为电子型半导体，简称N型半导体。

在N型半导体中，磷一类五价元素的原子能施放出一个自由电子，因此被称为施主杂质。为了进一步了解杂质对半导体导电性能的影响，下面举例说明。设在室温下，掺入本征硅的施主杂质浓度 N_d 为硅原子浓度的一亿分之一，即 $N_d = 4.96 \times 10^{14} / \text{cm}^3$ ，而本征浓度仅为 $n_i = 1.5 \times 10^{10} / \text{cm}^3$ ，可见 $N_d \gg n_i$ ，所以N型硅中自由电子主要来源于施主杂质，即 $n \approx N_d = 4.96 \times 10^{14} / \text{cm}^3$ 。

根据半导体理论，在一定温度下，杂质半导体中的电子浓度 n ，空穴浓度 p ，和本征浓度 n_i 之间的关系可用下式表示

$$n \cdot p = n_i^2 \quad (1-1-1)$$

所以，上例中N型硅的空穴浓度为

$$\begin{aligned} p &= \frac{n_i^2}{n} \approx \frac{n_i^2}{N_d} \\ &= \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{4.96 \times 10^{14}} \approx 4.5 \times 10^5 / \text{cm}^3 \end{aligned}$$

可见，在N型半导体中，自由电子浓度比空穴浓度大得多。通常把浓度大的载流子（如本例中的自由电子）称为多数载流子，简称多子；而浓度小的载流子（本例中的空穴）称为少数载流子，简称少子。

二、P型半导体

如果在本征半导体硅（或锗）中掺入少量三价元素硼，这时每个硼原子也要占据一个原来由硅（或锗）原子占据的位置，如图 1-1-8 所示。因硼原子的最外层只有三个价电子，它在同周围四个硅（或锗）原子组成共价键时，尚缺少