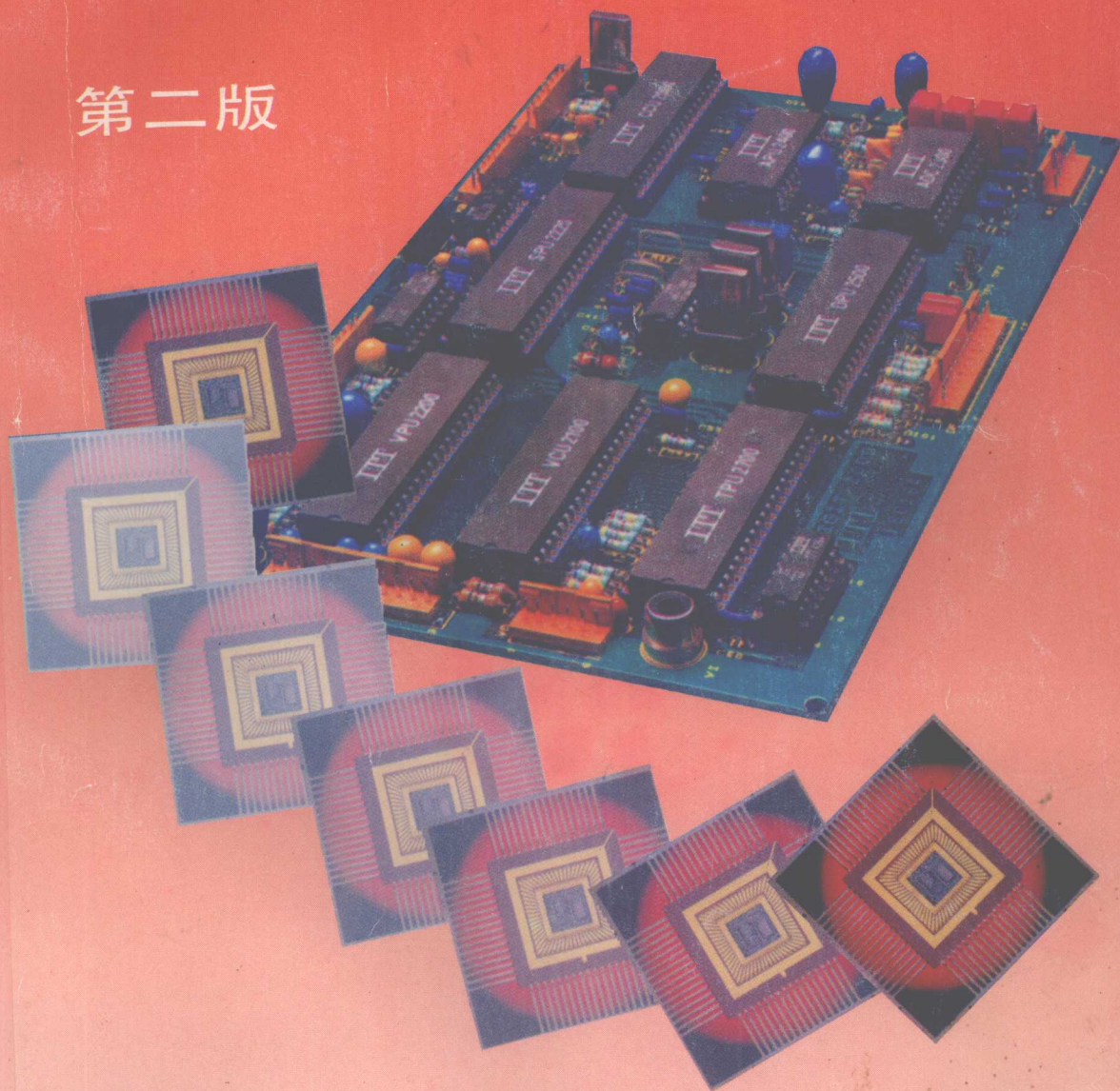


全国技工学校电子类通用教材

电子电路基础

第二版



中国劳动出版社

全国技工学校电子类通用教材

电子电路基础

(第二版)

技工学校电子类专业教材编审委员会组织编写

中国劳动出版社

《电子电路基础》(第二版)是根据劳动部职业技能开发司、电子工业部人事教育司审定颁发的《电子电路基础教学大纲》修订,供技工学校电子类各专业使用的通用教材。

本书内容包括:半导体二极管和三极管、低频电压放大器、负反馈放大器、直流放大器及集成运算放大器、集成运算放大器的应用、正弦波振荡器、低频功率放大器、场效应管及其放大器、直流稳压电路、晶闸管及其应用。书末附有本课程十个实验的内容。

本书也可作为职业高中或工人培训教材。

本书第一版由戎有为、张爱中编写,戎有为主编,郑仲渔审稿;第二版由郑仲渔编写,葛婧审稿。

图书在版编目(CIP)数据

电子电路基础/郑仲渔主编.-2版.-北京:中国劳动出版社,1995

ISBN 7-5045-1614-7

I. 电… II. 郑… III. 电子电路-技工学校-教材 IV. TN70

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 05945 号

电子电路基础

(第二版)

技工学校电子类专业教材编审委员会组织编写

责任编辑 金 龄

中国劳动出版社出版

(100029 北京市惠新东街1号)

北京市朝阳区北苑印刷厂印刷 新华书店总店北京发行所发行

1988年2月第1版 1995年5月第2版

1998年3月北京第6次印刷

开本:787×1092毫米 1/16 印张:17

字数:419千字 印数:31000册

定价:15.10元

技工学校电子类教材目录

数 学

物 理

英 语

机械制图与电气制图 (第二版)

机械制图与电气制图(第二版)习题集

电子电路基础 (第二版)

电子电路基础 (第二版) 习题册

电工基础

电工基础习题册

脉冲与数字电路

微型计算机入门

单片微型计算机原理与应用

无线电基础 (第二版)

电子测量与仪器 (第二版)

无线电整机装配工艺基础

电视机原理调试与维修

收录机原理调试与维修

录像机原理调试与维修

数字逻辑电路 (第二版)

BASIC 语言 (第二版)

PASCAL 语言

程序设计基础

操作系统

微型计算机软件及应用

微型计算机原理 (第二版)

微型计算机外围设备

半导体物理与器件

半导体器件制造工艺

基本操作技能

电视机装配调试与维修

微型计算机操作实习(第二版)

说 明

在电子工业主管部门和劳动部的领导及组织下，经过编审、出版工作人员的共同努力，在“六五”、“七五”期间，有 37 种技工学校电子类无线电整机、电子计算机、电子元器件专业的教材出版，基本上满足了教学的需要。

为适应电子工业发展的新形势，贯彻中央有关教学改革的精神，在总结技工学校电子类教材编审、出版工作经验的基础上，按照各专业新的教学计划和教学大纲，我们对电子类教材分期、分批进行修订、补充和配套。今后还将适时开拓其它有关专业的教材。在修订和新编教材的工作中，贯彻改革的精神，注意提高教材质量；以培养中级电子技术工人为目标，使内容符合电子工业工人技术等级标准的要求；强调阐明电子专业的基础理论、基本知识，培养学生的基本操作技能，努力做到理论与实际密切结合；在教材中适当反映电子工业生产中采用的新技术、新工艺、新设备和新材料，并贯彻国家和行业的现行技术标准。

在教材的编审工作中，得到北京、天津、上海、四川、陕西、广东、江苏等省、市电子、劳动厅（局）和有关技工学校的大力支持；参加编审工作的专家、技校教师、工程技术人员付出了辛勤的劳动，在此特致以诚挚的谢意。为了进一步提高教材质量，欢迎使用的同志对内容提出宝贵的意见。

技工学校电子类专业教材编审委员会

1994 年

前 言

电子工业部与我部密切配合,从1979年开始,共同组织编审出版了技工学校电子类专业教材。这是件具有现实意义和深远意义的工作。

职业技术教育是国家工业化和现代化的重要支柱。现代电子技术,特别是计算机技术的发明和发展,使人类社会发生了一场真正的革命。因此,一个国家的国力是否强大,一定程度上可以用科学技术尤其是电子技术在经济和社会各个领域应用的广度、深度和由此形成的实力来衡量。在今日中国的教育、科研、国防和经济领域里,电子技术的应用日益广泛,已有数以百万计的计算机在运转,而且数量还在不断增长。企业的生产管理和制造技术因此正在发生巨大变革。但是,从传统的制造和管理方法向电子化、采用计算机控制技术过渡并非易事,主要是在安装和操作新设备上,实质上是在人员素质方面,遇到了不少困难。所以,编写新的教材,努力培养大批懂得现代电子技术的人才,已成为尽快提高劳动生产率、产品质量和管理水平的当务之急。实践证明,推动电子技术进步和提高劳动者素质,是密切结合、互相促进的,两者缺一不可。

我国已把提高劳动者素质,即培养提高技术工人和后备劳动者的技术业务素质,摆到非常重要的位置。因此,组织编审出版技工学校电子类专业教材是十分必要的。已经出版使用的电子类教材,从最初解决教材有无问题,到逐步提高质量、增编实习教材、重视加强基本技能训练,对培养中级电子技术工人起到了积极的作用。

我相信,在广大编审、出版工作者的共同努力下,在实践中,技工学校电子类专业教材将更加完善,成为有权威的、质量一流的教材。在此,我谨向电子工业部和全体编审人员,以及为教材的出版发行做出贡献的人们表示真诚的感谢。

中华人民共和国劳动部副部长 令狐安

目 录

第一章 半导体二极管和三极管	(1)
§ 1—1 半导体的基本知识	(1)
§ 1—2 PN 结及其单向导电性	(5)
§ 1—3 半导体二极管及稳压二极管	(8)
§ 1—4 半导体三极管	(15)
小结	(27)
习题	(28)
第二章 低频电压放大器	(30)
§ 2—1 放大器的基本概念	(30)
§ 2—2 共射极基本放大器	(31)
§ 2—3 放大器的图解分析法	(36)
§ 2—4 放大器的等效电路分析法	(44)
§ 2—5 稳定静态工作点的偏置电路	(51)
§ 2—6 共集电极放大器和共基极放大器	(57)
§ 2—7 多级放大器	(62)
小结	(69)
习题	(69)
第三章 负反馈放大器	(71)
§ 3—1 反馈的基本概念	(71)
§ 3—2 负反馈放大器的框图和基本关系式	(75)
§ 3—3 负反馈对放大器性能的影响	(76)
§ 3—4 负反馈放大器的分析和计算举例	(82)
§ 3—5 负反馈放大器的自激振荡及消除方法	(85)
小结	(87)
习题	(87)
第四章 直流放大器及集成运算放大器	(89)
§ 4—1 直流放大器概述	(89)
§ 4—2 差动放大器	(93)
§ 4—3 集成运算放大器	(102)

小结.....	(107)
习题.....	(107)
第五章 集成运算放大器的应用	(109)
§ 5—1 概述.....	(109)
§ 5—2 基本运算电路.....	(110)
§ 5—3 集成运放的非线性应用.....	(122)
小结.....	(127)
习题.....	(127)
第六章 正弦波振荡器	(130)
§ 6—1 正弦波振荡器的振荡条件及基本组成.....	(130)
§ 6—2 RC 正弦波振荡器	(132)
§ 6—3 LC 正弦波振荡器	(139)
§ 6—4 石英晶体振荡器.....	(147)
小结.....	(151)
习题.....	(152)
第七章 低频功率放大器	(154)
§ 7—1 概述.....	(154)
§ 7—2 互补对称功率放大器.....	(156)
§ 7—3 单电源互补对称功率放大器.....	(163)
§ 7—4 集成功率放大器介绍.....	(165)
§ 7—5 变压器耦合推挽功率放大器.....	(166)
§ 7—6 功放管的散热和安全使用.....	(168)
小结.....	(169)
习题.....	(169)
第八章 场效应管及其放大 器	(170)
§ 8—1 结型场效应管.....	(170)
§ 8—2 绝缘栅场效应管.....	(177)
§ 8—3 场效应管放大器.....	(185)
小结.....	(189)
习题.....	(190)
第九章 直流稳压电源	(191)
§ 9—1 概述.....	(191)
§ 9—2 单相整流电路.....	(192)
§ 9—3 滤波电路.....	(196)

§ 9—4	直流稳压电源的基本概念	(202)
§ 9—5	并联型硅稳压管稳压电路	(204)
§ 9—6	半导体管串联型稳压电路	(205)
§ 9—7	集成稳压器	(209)
§ 9—8	开关型稳压电路介绍	(214)
小结		(216)
习题		(216)

第十章 晶闸管及其应用 (218)

§ 10—1	晶闸管的结构和工作原理	(218)
§ 10—2	晶闸管的伏安特性及主要参数	(221)
§ 10—3	单相桥式可控整流电路	(223)
§ 10—4	单结晶体管触发电路	(226)
§ 10—5	晶闸管的保护	(231)
§ 10—6	晶闸管在直流电动机调速方面的应用	(233)
§ 10—7	双向晶闸管及其应用介绍	(235)
小结		(238)
习题		(238)

实验一	常用电子仪器的使用	(239)
实验二	二极管和三极管	(241)
实验三	半导体三极管低频电压放大器	(242)
实验四	负反馈放大器	(244)
实验五	差动放大器	(245)
实验六	集成运放的应用	(247)
实验七	RC 桥式正弦波振荡器	(248)
实验八	低频功放 (OTL 电路)	(249)
实验九	直流稳压电源	(251)
实验十	可控整流及单结晶体管触发电路	(252)
附录		(254)

第一章 半导体二极管和三极管

以电子器件为核心构成的电路称为电子电路。在电子器件中，由于半导体器件具有体积小、重量轻、使用寿命长、输入功率小、功率转换效率高等优点，而得到广泛应用。由半导体器件发展而成的集成电路，特别是大规模、超大规模集成电路，使电子设备在微型化、可靠性、灵活性等方面向前推进了一大步。要想了解半导体器件和集成电路，应先了解半导体的基本知识。

§ 1—1 半导体的基本知识

一、导体、半导体和绝缘体

自然界有着许许多多不同的物质，按其导电性能的不同，大致可分为三类。一类是导电性能良好的物质，称导体（其电阻率低于 $10^{-3}\Omega \cdot \text{cm}$ ）。金属一般都是导体，如金、银、铜、铝、铁等。一类是在一般条件下不能导电的物质，称绝缘体（其电阻率高于 $10^{10}\Omega \cdot \text{cm}$ ），如陶瓷、玻璃、橡胶、塑料等。还有一类物质，其导电性介于导体和绝缘体之间，称半导体（其电阻率在 $10^{-3} \sim 10^{10}\Omega \cdot \text{cm}$ ），如硅、锗、砷化镓及某些氧化物、硫化物等。

半导体除了在导电性能方面与导体和绝缘体不同外，还具有一些其它的特性。例如，当半导体受到外界光和热的刺激时，其导电能力会显著地变化。在纯净的半导体中掺入某些微量的其它元素时，它的导电性会明显地增强。这些特性都与半导体本身的结构有关。

由物质结构理论可知，原子由一个带正电的原子核和若干带负电的电子所组成。原子核所带正电与核外电子所带负电的总和是相等的。所以原子对外不显电性。在原子中，电子受原子核的吸引并按一定规律分层排布，围绕原子核不停地运转。原子核对电子吸引力的大小，取决于原子核本身所带正电量的大小和电子距原子核的距离。在金属导体中，原子的最外层电子受原子核的吸引力小，它们容易挣脱原子核的束缚成为自由电子。在外电场的作用下，这些自由电子能作定向移动形成电流。所以导体具有良好的导电性。对于绝缘体来说，原子的最外层电子受原子核的吸引力大，一般情况下，它们不能挣脱原子核的束缚成为自由电子，所以这类物质几乎不能导电。对于半导体来说，最外层电子所受到的原子核的束缚力，既不像导体那样小，也不像绝缘体那样大，这就决定了它的导电性能介于两者之间。

制作半导体器件时，用得最多的半导体材料是硅和锗。图 1—1a 是它们的原子结构模型：硅和锗的原子核外分别有 14 个和 32 个电子，而最外层电子均为 4 个。物质的许多化学性质和物理性质都取决于原子的最外层电子数，最外层电子数也决定了元素的最高化合价，所以称它们为价电子。硅和锗都有 4 个价电子，因此它们都属 4 价元素。因为内层电子与原子核之间结合得很紧密，可以看成一个整体，称其为惯性核，这样可将图 1—1a 改画成图 1—1b 所示的简化模型。

二、本征半导体

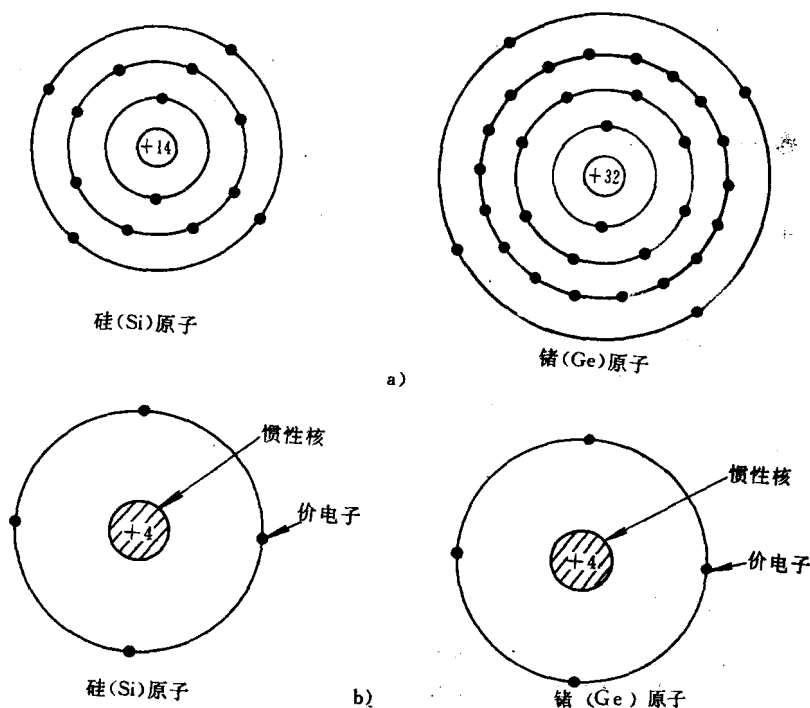


图 1—1 硅和锗原子结构模型

a) 原子结构示意图 b) 简化模型

制作半导体器件所用的硅和锗都是单晶体^①，它们的原子按一定的规则整齐地排列，形成晶格。硅和锗原子是按四角形系统排列成晶格的。每个原子处于正四面体的中心，而四个其它原子位于四面体的顶点，如图 1—2 所示。硅和锗原子构成的单晶体，原子之间靠得很紧，原来分属于每个原子的价电子就会受到相邻原子的影响而成为两个相邻原子所共有的。这样，每个价电子在围绕自身原子核运转的同时也会出现在邻近原子所属的轨道上，从而把相邻两个原子紧紧地结合在一起，这种共用电子形成的结合作用称共价键。硅和锗原子都有 4 个价电子，每个原子都和周围 4 个原子形成 4 个共价键。图 1—3 所示为硅和锗单晶体的共价键结构示意图。每个原子的周围就相当于有 8 个价电子，形成了稳定的原子结构^②。

完全纯净的、没有任何杂质的而且结构完整的半导体的单晶体称本征半导体。本征半导体在 -273.15°C （绝对温度为零度）和没有其它影响的条件下，由于共价键中的价电子被束缚着，它不能导电，相当于绝缘体。但是半导体中的价电子不像绝缘体中的电子那样被紧紧束缚着，在室温下，有些电子受到热（或光）的刺激，获得了足够的能量而挣脱共价键的束缚，成为自由电子。这种现象称本征激发。在价电子挣脱共价键束缚成为自由电子后，共价

① 晶体分为单晶体和多晶体两种。整个晶体的原子是按照一定的规律整齐排列的，称单晶体。整个晶体是由大量小单晶体组成的，称为多晶体。半导体材料必须制成单晶体才能用来制作半导体器件，所以半导体器件又称晶体器件。如半导体二极管又称晶体二极管，半导体三极管又称晶体三极管。

② 原子最外层有 8 个电子时就成为稳定结构。

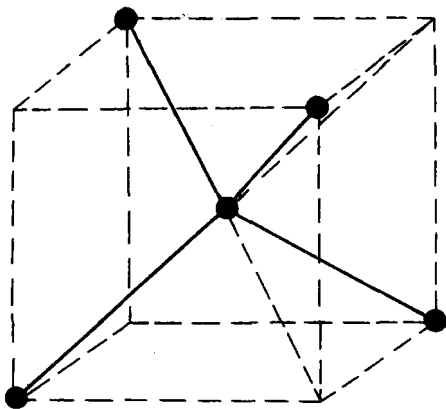


图 1—2 硅和锗的晶体结构

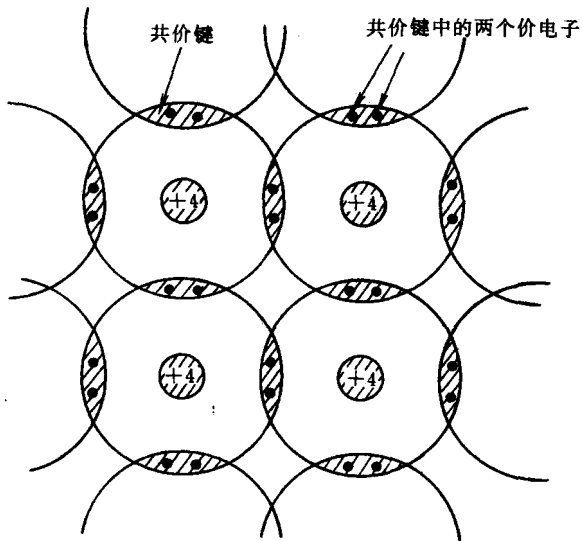


图 1—3 硅和锗单晶体的共价键结构示意图

键中就留下一个空位，称为空穴。空穴的出现是半导体区别于导体的一个重要特征。

在半导体中，由于本征激发而出现了空穴，使原来是中性的原子因失去带负电的电子而成为带正电的离子。这种正离子固定在晶格中，不能移动，它由原子和空穴构成，这就可以认为空穴带正电，其电量与电子的相等。本征激发时，电子和空穴成对产生，称电子—空穴对，也就是说，在激发出一个带负电的电子的同时，相应地产生一个带正电的空穴，如图 1—4 所示。

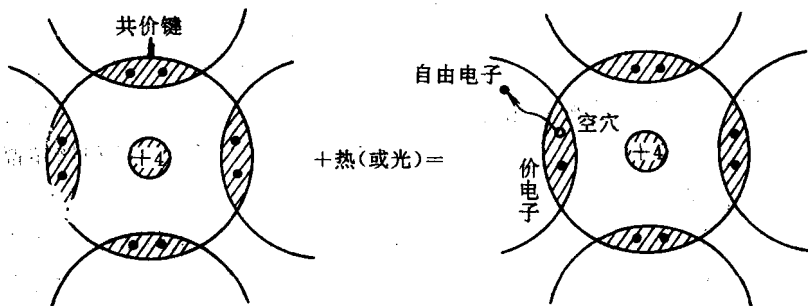


图 1—4 本征激发产生电子—空穴对

当半导体中出现空穴后，在外加电场或其它能源的作用下，邻近的价电子就能较容易地填补到这个空穴中，而这个价电子所在的位置上又留下新的空穴，其它的价电子又可转移到这个新的空穴中，这就形成了空穴的迁移，也就是正电荷的运动，如图 1—5 所示。可见，半导体中的自由电子和空穴都可以携带电荷作定向移动形成电子流和空穴流。所以我们把电子

和空穴统称载流子。半导体中的电流由电子流和空穴流两部分构成，而电子流和空穴流的运动方向是相反的。

由于物质的导电能力取决于载流子的数目，本征半导体在常温下产生的电子—空穴对很少，所以导电性相当差。然而，当环境温度升高，热激发使电子—空穴对的数目显著增多，其导电性也就明显提高了，这就是半导体的导电性随温度变化而明显变化的原因。

三、杂质半导体

本征半导体的导电能力很差，没有多大实用价值。如果在本征半导体中掺入微量的其它元素（称杂质），就会使它的导电性能发生显著的变化，这种掺杂的半导体称为杂质半导体。按掺入杂质性质的不同，它可分为电子型半导体和空穴型半导体两大类。

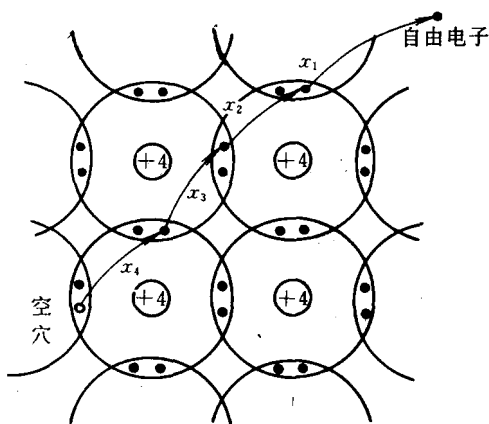


图 1—5 电子和空穴的移动

1. N 型半导体（电子型半导体）

在硅（或锗）本征半导体中掺入微量的五价元素，如磷（或锑）等，它就成为 N 型半导体。

由于掺入杂质的原子数与整个半导体的原子数相比，其数量非常少，半导体的晶体结构基本不变，只是晶格中某些硅（或锗）原子的位置被磷原子所代替。磷原子有 5 个价电子，其中 4 个价电子与相邻的 4 个硅原子的价电子形成共价键后，必定还多余 1 个价电子，如图 1—6 所示。这个多余的价电子虽不受共价键束缚，但仍受磷原子核的正电荷吸引，它只能在磷原子周围活动，不过它所受的吸引力比共价键的束缚作用要微弱得多，只要获取较小的能量就能挣脱磷原子核的吸引，成为自由电子。

由于磷原子在硅半导体中给出 1 个多余的电子，故称磷为施主杂质或 N 型杂质。当磷原子给出 1 个多余的价电子后就成为正离子。但它在产生 1 个自由电子的同时并不产生新的空穴，这是它与本征激发的不同点。在 N 型半导体中，除了杂质给出自由电子外，其本身仍存在本征激发，产生电子—空穴对。N 型半导体因掺杂而增加了许多额外的自由电子，其自由电子数比空穴数大得多。自由电子称为多数载流子（简称多子），而空穴称为少数载流子（简称少子）。N 型半导体以自由电子导电为主，故称电子型半导体。

2. P 型半导体（空穴型半导体）

在硅（或锗）本征半导体中掺入微量三价元素，如硼（或镓）等，它就成为 P 型半导体。

由于硼原子只有 3 个价电子，当它取代半导体硅原子在晶格中的位置时，与周围 4 个硅原子的价电子组成的共价键，因缺少 1 个价电子，其中 1 个共价键内出现 1 个空穴，那么相邻共价键中的价电子，只要受到一点热或其它的刺激，获得较小的能量，就很容易跳出来，去填补这个空穴，使硼原子成为不能移动的负离子。原来硅原子的共价键因缺少 1 个电子而产生了空穴，如图 1—7 所示。可见硅半导体中每掺入 1 个硼原子，就出现 1 个多余的空穴。

控制掺入杂质的多少就可控制 P 型半导体中空穴数的多少。此外，P 型半导体中也存在本征激发而产生少量的电子—空穴对。然而在 P 型半导体中，空穴数比电子数要大得多，即空穴是多子，电子是少子。它的导电性主要取决于空穴数，故称它为空穴型半导体。硼原子在硅半导体中能接受电子，故称受主杂质或 P 型杂质。

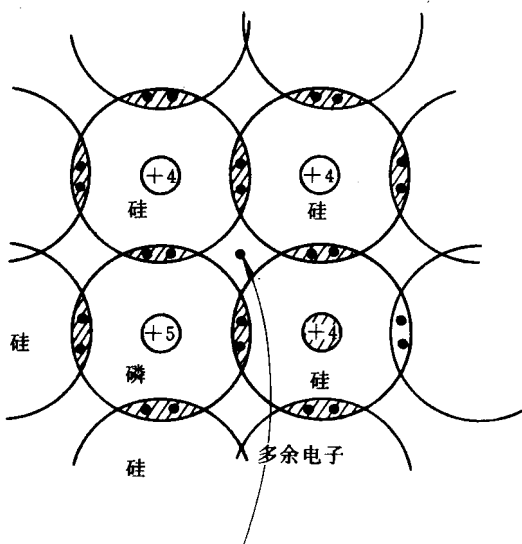


图 1—6 N 型硅半导体中的共价键结构

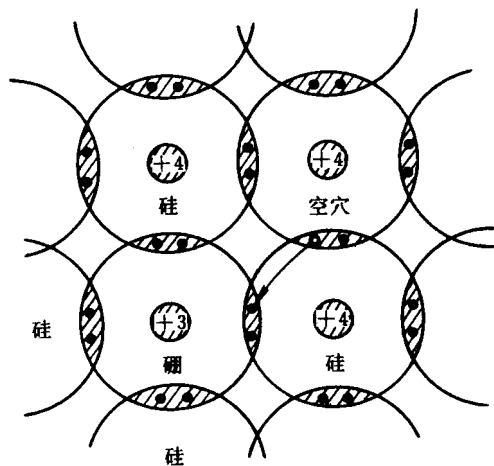


图 1—7 P 型硅半导体中的共价键结构

§ 1—2 PN 结及其单向导电性

由上面分析可知，在室温下，N 型半导体中的施主杂质电离为带负电的自由电子和带正电而不能移动的离子。P 型半导体中的受主杂质电离成为不能移动的负离子并产生带正电又可移动的空穴。然而杂质半导体中总的正、负电荷量仍相等，对外不显电性。杂质半导体中的载流子数比本征半导体中的载流子数要多得多，导电性也要好得多，但它的导电性仍不及导体，故它仍无多大实用价值。

然而，采用特殊的制作工艺，将 P 型半导体和 N 型半导体紧密地结合在一起，在两种半导体的交界处就会产生一个特殊的接触面，称为 PN 结。这种 PN 结是构成半导体器件的基础，也是半导体获得广泛应用的原因。

一、PN 结的形成

当 P 型半导体（又称 P 区）和 N 型半导体（又称 N 区）结合在一起时，在它们的交界处就出现了电子和空穴的浓度差，P 区中的空穴是多子，电子是少子；N 区中电子是多子，空穴是少子。电子和空穴都要从浓度高的地方向浓度低的地方运动，这就是扩散运动。那么 P 区中的空穴向 N 区扩散后留下不能移动的负离子；N 区中的电子向 P 区扩散，留下不能移动的正离子，如图 1—8 所示。用 $\oplus$ 、 $\ominus$ 分别表示带正电和带负电的离子。这些带电离子在 P 区和 N 区的交界面形成一个空间电荷区，这就是 PN 结。在空间电荷区内，多子已扩散到对方并复合掉（电子与空穴结合后同时消失的过程称复合），不再存在载流子，所以 PN 结又叫耗尽层（载流子在此消耗殆尽）。在出现空间电荷区以后，在正、负离子的作用下形成了电场，其方向由 N 区指向 P 区。这电场是由多子的扩散运动产生的，不是外加电压造成的，故称它为内

电场，用 $\mathcal{E}_{\text{内}}$ 表示，如图 1—9 所示。显然，内电场 $\mathcal{E}_{\text{内}}$ 对多子的扩散起着阻挡作用，所以又称 PN 结为阻挡层。

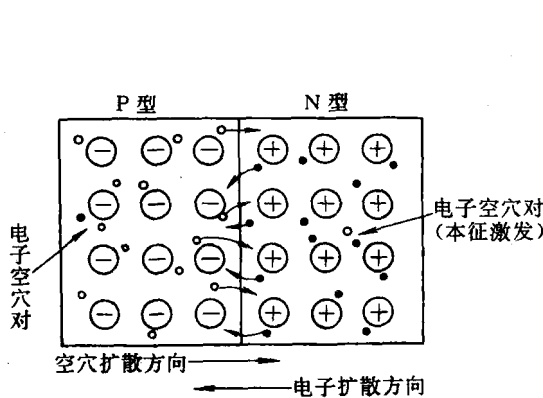


图 1—8 载流子的扩散运动

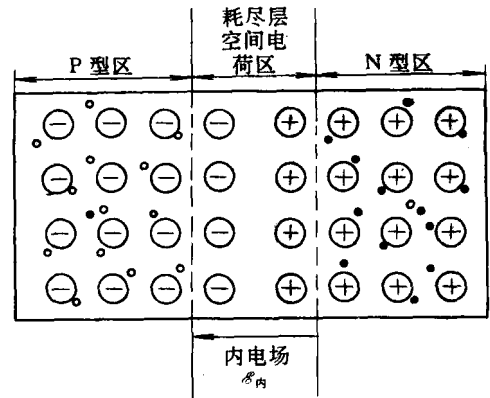


图 1—9 PN 结的形成

从 $\mathcal{E}_{\text{内}}$ 的方向和电子、空穴的带电极性可知，内电场 $\mathcal{E}_{\text{内}}$ 又起着促使 P 区中的电子（少子）向 N 区运动，也促使 N 区中的空穴（少子）向 P 区运动的作用。把半导体中的少数载流子在电场力作用下的运动称作漂移运动，以区别由浓度差造成的扩散运动。

从 P 区漂移到 N 区的电子补充了原来交界面上 N 区所失去的电子；从 N 区漂移到 P 区的空穴补充了原来交界面上 P 区由于扩散运动而失去的空穴，使空间电荷减少。因此漂移运动的结果使得空间电荷区变窄，其作用与扩散运动正相反。可见，在 PN 结形成过程中，载流子的运动同时存在着两种形式，即扩散运动和漂移运动。刚开始时，扩散运动强于漂移运动，使空间电荷区不断加宽，内电场 $\mathcal{E}_{\text{内}}$ 也随之增强，这又使漂移运动增强，空间电荷区变窄，最后扩散运动和漂移运动两者作用相等，达到了动态平衡。此时，内电场 $\mathcal{E}_{\text{内}}$ 不再变化，空间电荷区的宽度稳定了，阻挡层的厚度保持不变，便形成了 PN 结。

二、PN 结的单向导电性

PN 结的基本特性就是单向导电性。正是这种特性，使半导体得到了实际的、广泛的应用。PN 结的单向导电性只有在外加电压时才显示出来。

1. 外加正向电压时，PN 结导通

PN 结两端未加电压时，其扩散运动和漂移运动达到了动态平衡，阻挡层的厚度一定，内电场 $\mathcal{E}_{\text{内}}$ 的强度也一定。

将外电源 E 的正极与 PN 结的 P 区相连，负极与 N 区相连，也就是在 PN 结上加正向电压 U_F 。此时 U_F 在 PN 结上建立起一个电场，称外电场，用 $\mathcal{E}_{\text{外}}$ 表示。外电场 $\mathcal{E}_{\text{外}}$ 的方向与内电场 $\mathcal{E}_{\text{内}}$ 的方向相反，它削弱了 $\mathcal{E}_{\text{内}}$ 的作用，促使扩散运动增强，P 区的多子（空穴）和 N 区的多子（电子）都向 PN 结移动。N 区的电子进入 PN 结就和原来的部分正离子中和，使 N 区空间电荷量减少；同样，P 区的空穴进入 PN 结就和原来的一部分负离子中和，使 P 区空间电荷量减少。其结果使阻挡层变薄，如图 1—10 所示那样，PN 结界线由 11' 变成 22'。PN 结的导电性增大，电阻减小。所以这个方向的外加电压 U_F 称正向电压或称正向偏置电压。PN 结在正向偏置电压作用下，多子源源不断地通过 PN 结，而外接电源又对 P 区和 N 区不断地补

充多子，形成了通过 PN 结的较大电流，这电流称正向导通电流，用 I_F 表示。此时 PN 结呈低阻状态，称其为正向导通电阻，用 R_F 表示。外加电压 U_F 越大， $\mathcal{E}_{\text{外}}$ 对 $\mathcal{E}_{\text{内}}$ 的削弱作用就越强，阻挡层变得越薄， R_F 越小， I_F 越大。此时的 PN 结处于正向导通状态。

P 区和 N 区的体电阻较小， U_F 几乎都降在 PN 结上，而 PN 结又呈低阻，所以 U_F 的微小变化就会引起 I_F 的较大变化。

2. 外加反向电压时，PN 结截止

将外电源 E 的正极与 PN 结的 N 区相连，负极与 P 区相连，也就是在 PN 结上加反向电压 U_R 。此时 U_R 在 PN 结上产生的外电场 $\mathcal{E}_{\text{外}}$ 与 PN 结的内电场 $\mathcal{E}_{\text{内}}$ 同向。在 $\mathcal{E}_{\text{外}}$ 的作用下，P 区和 N 区的多子进一步离开 PN 结，使阻挡层加宽，如图 1—11 所示那样，PN 结界线由 11' 变成 33'。此时 PN 结呈高阻状态。由于外电压 U_R 使多子不能通过 PN 结，扩散运动产生的电流趋于零，所以称这个方向的外加电压 U_R 为反向电压或反向偏置电压。反向电压 U_R 越大，阻挡层就越宽。

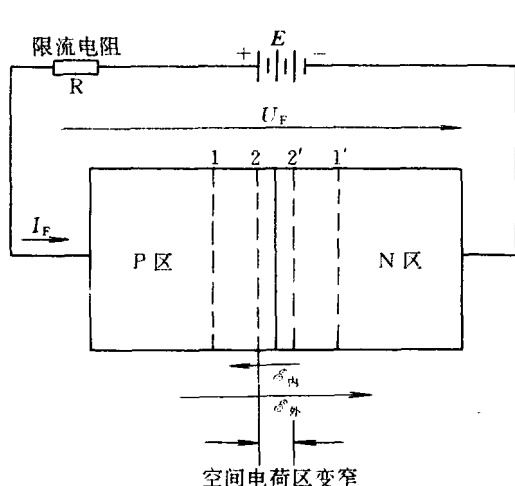


图 1—10 PN 结加正向电压而导通

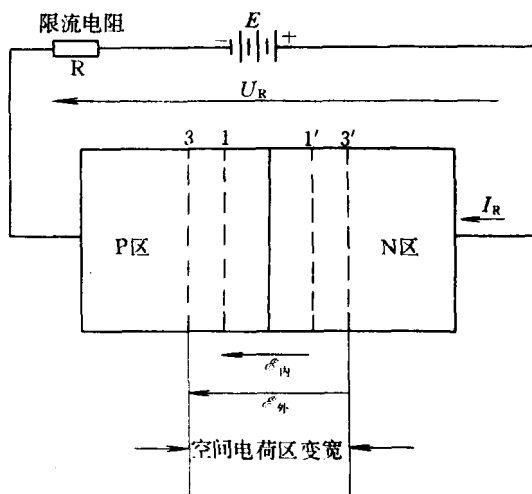


图 1—11 PN 结加反向电压而截止

反向电压虽然使多子不能通过 PN 结，它却使少子更易通过 PN 结形成漂移电流。漂移电流又称反向电流，用 I_R 表示。由于少子的数量非常少，所以 I_R 很小。当环境温度一定时，本征激发产生的电子—空穴对的数目一定， I_R 的大小也就一定且与 U_R 的大小基本无关。故 I_R 又称反向饱和电流。但是，当环境温度变化时，本征激发产生的电子—空穴对的数目随之变化， I_R 也跟着变化。这就是 I_R 受温度影响较大的原因。

PN 结加反向电压时，反向电流很小，其影响可以忽略，可认为 PN 结处于截止状态。

综上所述，PN 结加正向偏置电压就导通，加反向偏置电压就截止，这就是 PN 结的单向导电性。

3. PN 结电容

在 PN 结两侧的 P 区和 N 区，存在很多载流子，其导电性很好，相当于两块金属极板。它

们中间的阻挡层中没有载流子，不导电，相当于介质。这样，PN 结就相当于一个电容器^①，称作 PN 结的结电容，如图 1—12 所示。

当 PN 结上加反向电压时，它的阻挡层变宽，相当于介质变厚，使结电容发生变化。可见 PN 结的结电容随外加电压而变化。

PN 结电容很小，通常只有几个 pF。当 PN 结工作在低频时，结电容呈现的容抗很大，其影响可以忽略。当 PN 结工作在高频时，结电容呈现的容抗很小，其分流作用不可忽视，致使 PN 结的单向导电性遭到破坏。

根据 PN 结电容随外加电压而变化的特性，可制成电容量受外加电压控制的二极管，称变容二极管，用于频率的自动控制和自动调节等方面。

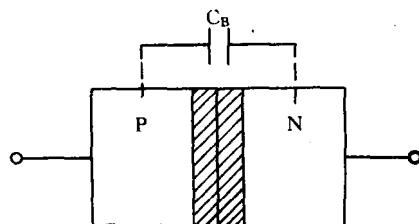


图 1—12 PN 结电容

§ 1—3 半导体二极管及稳压二极管

一、半导体二极管的结构和分类

在 PN 结的 P 区引出一个电极称正极，也叫阳极，用符号 a 表示。从 N 区引出一个电极称负极，也叫阴极，用符号 k 表示。再将这个 PN 结封装起来就成了半导体二极管，也称晶体二极管（以下简称二极管）。图形符号如图 1—13 所示，箭头方向表示二极管正向导通时电流

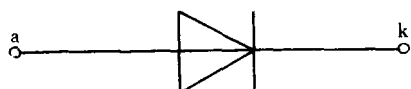


图 1—13 二极管的图形符号
的方向。二极管的外形如图 1—14 所示。

二极管的分类方法很多，一般有以下几种。

1. 按半导体材料分，有硅二极管、锗二极管、砷化镓二极管等。

2. 按 PN 结的结构分，有点接触型、面接触型、平面型等，如图 1—15 所示。点接触型二极管的 PN 结结面积小，结电容小，可工作在高频或超高频范围，但它允许通过的正向电流也小。面接触型二极管的 PN 结面积大，结电容也大，只能工作在低频范围，但它允许通过的正向电流大，可用作大功率整流电路，平面二

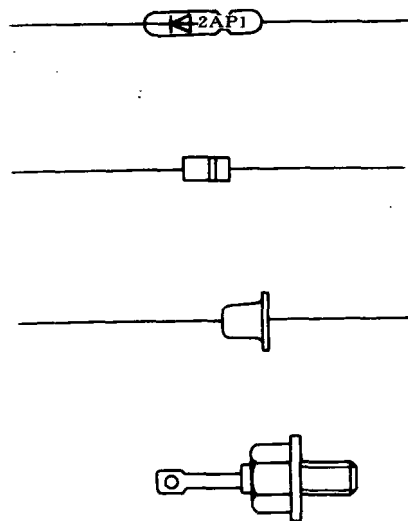


图 1—14 二极管外形举例

^① 这个电容称 PN 结的势垒电容。此外还有扩散电容，不详述。