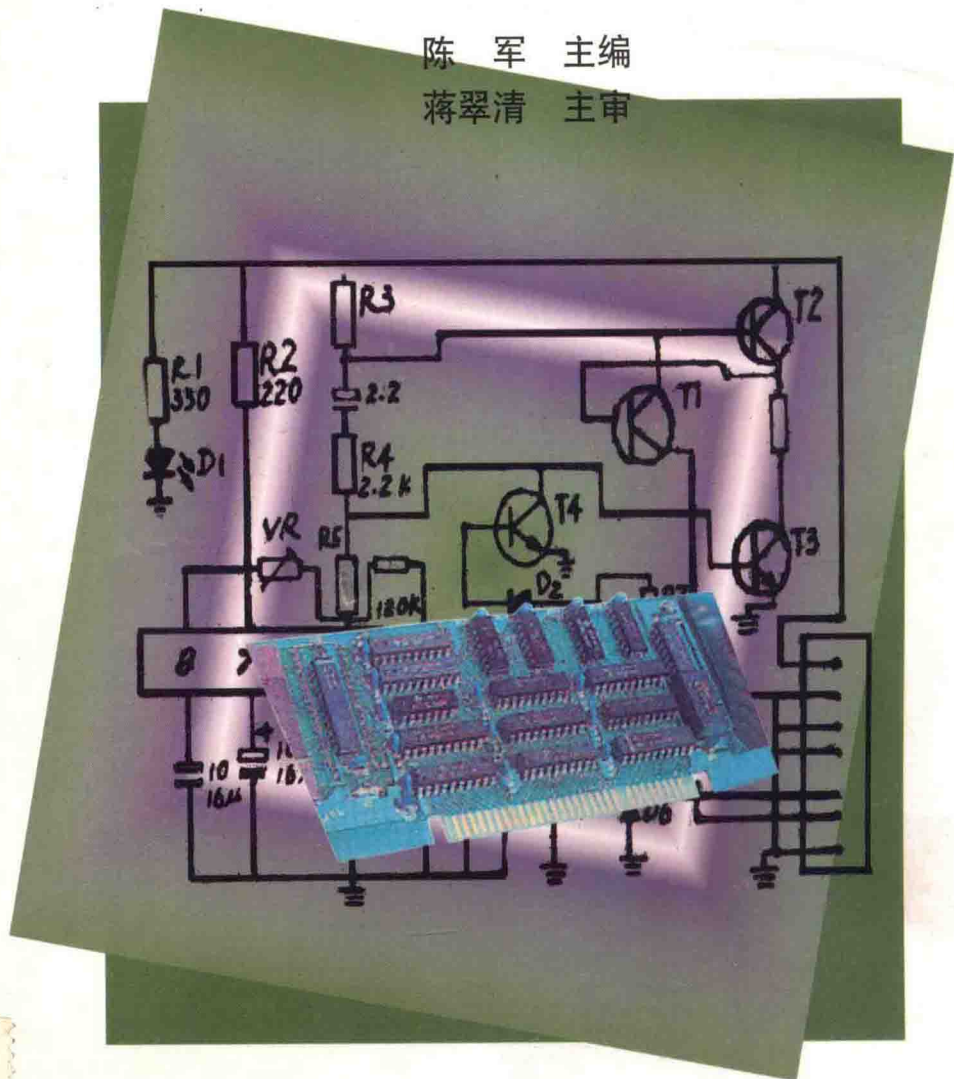


职业学校试用教材

模拟电路与 脉冲、数字电路

陈 军 主编

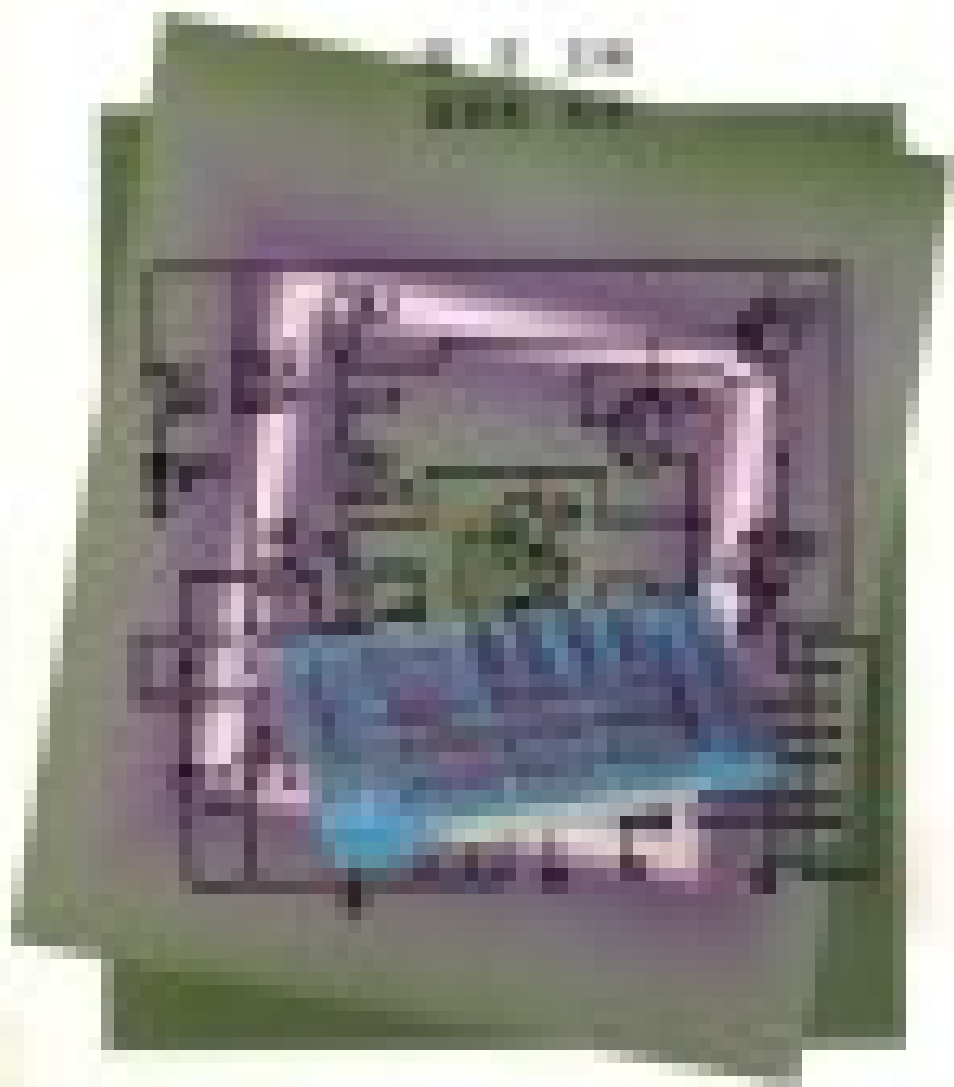
蒋翠清 主审



中国物资出版社

清华大学出版社

模拟电路与 脉冲、数字电路



清华大学出版社

模拟(PT)自组强容作图

模拟电路与脉冲、数字电路

主编 陈军

副主编 孙旭

本书在内容、结构、教材及教学大纲等方面，力求做到：①注重基础，②注重应用，③注重实践，④注重能力的培养。

本书可作为大中专院校及成人教育的教材，也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

中国物资出版社

地址：北京市西城区百万庄大街24号

电话：(010) 68514000

网址：<http://www.cwpc.com.cn>

ISBN 7-113-01111-1

定价：18.00元

印刷：2000年10月

中国物资出版社

图书在版编目(CIP)数据

模拟电路与脉冲、数字电路/陈军主编. —北京:中国
物资出版社, 1999. 7

ISBN 7-5047-1469-0

I. 模… I. ①陈… II. ①模拟电路②脉冲电路③数字电
路 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 27548 号

责任编辑:刘玉环

特约编辑:张 辉

装帧设计:郭同桢

责任校对:科发图书

工作室

(010)83894607

中国物资出版社出版发行

(北京市西城区月坛北街 25 号 邮编:100834)

全国新华书店经销

北京科发文化交流有限公司激光照排

安徽省蚌埠市方达印刷厂印刷

787×1092 毫米 1/16 印张:12.75 字数:318 千字

1999 年 7 月第 1 版 1999 年 7 月第 1 次印刷

印数:00001—20000 册

ISBN 7-5047-1469-0/G · 0311

定价:18.50 元

前 言

近年来,随着电子技术的飞速发展,模拟电路、脉冲与数字电路作为电子电路的基础电路,在自动化控制、家用电器及计算机中的应用更加广泛。与此同时,电子电路也在进行不断地改进并陆续产生新的电路。

本书在编写过程中,始终注重加强基础理论的阐述,重点介绍电路的各种分析方法,使读者学习后能够独立地分析电路并进行电路的设计,同时,尽量多介绍新器件、新电路。全书共分两部分十五章内容。第一章到第六章为第一部分“模拟电路”。该部分主要介绍了半导体二极管、三极管及场效应管的工作原理、特性、主要参数及测试方法,重点讨论了基本放大电路、负反馈放大电路、正弦波振荡电路,以及集成运算放大电路和直流稳压电源的组成、作用和不同电路的各种分析方法;第二部分是“脉冲与数字电路”,包括第七章到第十五章的全部内容,该部分阐述了脉冲信号的产生、变换、放大等电路的工作原理和基本分析方法,介绍了数字逻辑电路的基础知识,重点讨论了组合逻辑电路的分析与设计方法、时序逻辑电路的分析与设计方法。

为使读者对基本概念、基础知识及各种分析与设计方法能够做到理论联系实际,我们在每章后都编配大量习题,供学生加深理解,巩固知识。

本书在内容组织上深入浅出,在方法介绍中尽可能做到举一反三。因此本书既可作为大中专技校计算机专业及应用、家用电器等电子类专业教材,亦可作为电子工程技术人员学习用书。

由于编者水平有限,书中难免出现缺点和不妥之处,恳请广大读者不吝批评指正,以便不断修订完善。

编者
1999年7月

目 录

第一章 半导体器件及其特性	(1)
第一节 半导体基本知识.....	(1)
第二节 半导体二极管.....	(5)
第三节 半导体三极管.....	(7)
第四节 场效应管.....	(12)
第二章 低频电压放大器	(16)
第一节 基本放大电路.....	(16)
第二节 放大电路的基本分析方法.....	(17)
第三节 放大电路静态工作点的稳定.....	(22)
第四节 多级放大电路.....	(23)
第五节 放大电路的频率特性.....	(24)
第三章 负反馈放大电路	(30)
第一节 反馈的基本概念.....	(30)
第二节 负反馈对放大电路性能的影响.....	(31)
第三节 负反馈放大电路分析.....	(35)
第四章 正弦波振荡电路	(42)
第一节 正弦振荡原理.....	(42)
第二节 LC 振荡电路.....	(44)
第三节 晶体振荡器.....	(48)
第五章 直流放大器与集成运算放大器	(54)
第一节 直流放大器.....	(54)
第二节 差动放大电路.....	(56)
第三节 集成运算放大器.....	(59)
第六章 晶体管直流稳压电源	(65)
第一节 整流电路.....	(65)
第二节 滤波电路.....	(68)
第三节 硅稳压管稳压电路.....	(70)
第四节 串联型晶体管稳压电路.....	(72)
第五节 开关稳压电路.....	(75)
第七章 RC 电路	(78)
第一节 概述.....	(78)
第二节 RC 电路的过渡过程.....	(79)
第三节 RC 电路的应用.....	(81)
第八章 晶体管开关特性	(85)
第一节 二极管开关特性.....	(85)
第二节 二极管开关特性的应用.....	(87)
第三节 三极管开关特性.....	(92)

第四节	三极管反相器	(94)
第九章	基本脉冲电路	(98)
第一节	集-基耦合双稳态触发器	(98)
(1) 第二节	射极耦合双稳态触发电路	(101)
(1) 第三节	集-基耦合单稳态触发器	(103)
(3) 第四节	多谐振荡器	(106)
第十章	简单门及集成门电路	(110)
(31) 第一节	三种基本逻辑运算	(110)
(31) 第二节	分立元件门电路	(111)
(31) 第三节	TTL“与非”门	(114)
(31) 第四节	TTL门电路的其他类型	(117)
(35) 第五节	MOS集成逻辑门	(121)
第十一章	逻辑代数	(126)
(3) 第一节	数制与BCD编码	(126)
(3) 第二节	逻辑代数的基本公式及规则	(129)
(10) 第三节	逻辑函数的代数化简法	(132)
(11) 第四节	逻辑函数的卡诺图化简	(135)
第十二章	组合逻辑电路	(140)
(34) 第一节	组合逻辑电路的分析	(140)
(33) 第二节	组合逻辑电路的设计	(142)
(14) 第三节	常见组合逻辑电路及应用	(144)
(32) 第四节	基本运算电路	(150)
(16) 第五节	组合逻辑电路的竞争——冒险现象	(152)
第十三章	集成触发器	(156)
(32) 第一节	基本R-S触发器	(156)
(30) 第二节	时钟R-S触发器	(158)
(30) 第三节	主从触发器	(160)
(26) 第四节	边沿触发器	(164)
第十四章	时序逻辑电路	(168)
(107) 第一节	概述	(168)
(57) 第二节	时序逻辑电路的分析方法	(169)
(29) 第三节	时序电路的设计	(172)
(37) 第四节	常见时序电路及应用举例	(177)
(37) 第五节	半导体存储器	(179)
第十五章	数/模转换及模/数转换	(185)
(18) 第一节	基本概念	(185)
(28) 第二节	数/模转换器	(188)
(28) 第三节	模/数转换电路	(192)

第1章

半导体器件及其特性

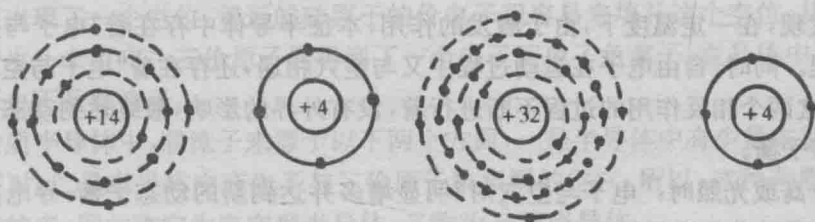
本章首先扼要地介绍半导体的基本知识,然后再讨论半导体二极管、晶体三极管及场效应管的工作原理、特性曲线、主要参数及测试方法。

§1.1 半导体基本知识

在自然界中,存在着各种物质。电子学理论中,按物质导电能力的强弱不同,可分为导体、绝缘体和半导体三类。金属一般都是导体,如铜、铁、铝、银等;绝缘体,如橡皮、陶瓷、塑料和石英等;还有一类物质,它的导电能力介于导体和绝缘体之间,通常被称为半导体,如硅、锗、砷化镓,一些硫化物和氧化物等。目前制作半导体器件的材料主要是硅(Si)和锗(Ge)。这些半导体的导电能力虽然在正常条件下介于导体和绝缘体之间,但是当半导体受到外界光和热的刺激时在纯净的半导体中加入微量的杂质元素时,其导电能力将会发生显著的变化。人们就是利用半导体的热敏性、光敏性和掺杂特性制造了种类繁多的、具有不同用途的半导体器件,如热敏元件、光敏元件、二极管稳压器、晶体三极管和场效应管等。所以为了更好地使用这些器件,我们首先应了解半导体的原子结构。

1.1.1 本征半导体

下面将对半导体的内部结构、导电机理进行简单介绍。现在半导体材料用的是最多的硅(Si)和锗(Ge)。其原子结构如图1-1所示。



(a) 硅原子

(b) 锗原子

图1-1 锗、硅原子结构示意图

锗和硅的外层电子都是4个,所以都是四价元素。外层电子受原子核的束缚力最小,被称为价电子。价电子直接影响半导体的导电性能。原子呈中性,原子核和内层电子(两者紧密结合)看成一个整体,即称为惯性核,将外层电子单独画出,因此惯性核的正电荷量与价电子的负

电荷量相等。

半导体器件是通过天然锗和硅材料加工提炼成单晶体后制成的。在单晶半导体中，所有原子排列非常整齐，每个原子间距离相等，每一个原子与相邻的四个原子结合，每一个原子的价电子与另一个原子的价电子组成一个电子对，这样的电子对把两个原子连接在一起，这种组合形式，称为共价键结构。如图 1-2 所示，共价键像纽带一样将排列整齐的原子联结在一起。本征半导体就是完全纯净的、具有晶体结构的半导体。

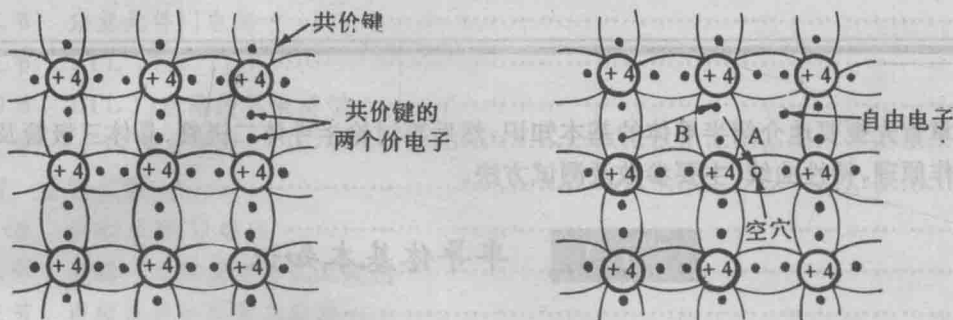


图 1-2 共价键结构及电子空穴对形成

半导体共价键中的价电子，虽被束缚在共价键中，但并不像绝缘体中的电子被束缚的那样紧。当受到热或光的激发，会使一些价电子获得一定能量后，挣脱共价键的束缚成为自由电子。同时在共价键中留下一个空位，这个空位叫做空穴。空穴的出现是半导体区别于导体的一个重要特点。由此可见，在本征半导体中，电子和空穴是成对出现的。具有空穴的原子少了一个电子而带正电，所以可认为空穴所带的是正电荷，它所带的电量与电子相等，符号相反。在外电场的作用下，邻近的价电子极容易挣脱原子核的束缚来填补这个空穴，而在这同时又出现了新的空穴，如此下去，由于价电子的运动，在半导体中就形成了与价电子的运动方向相反的空穴移动，而空穴的运动则看作是正电荷的运动。

所以，当半导体受外施电压作用后，半导体中形成两种电流：一种是自由电子作定向移动形成的电流；另一种是被原子核束缚的价电子填补空穴而形成的空穴电流。这两种电流的运动方向是相反的。自由电子和空穴在半导体中都是导电粒子，均称为载流子。这两种载流子是半导体导电的一个重要特征。

实验中发现，在一定温度下，由于激发的作用，本征半导体中存在着“电子与空穴对”载流子的产生过程。同时，自由电子在运动过程中又与空穴相遇，还存在着“电子与空穴对”载流子的复合过程。这两个相反作用的过程不断进行着，没有外界的影响，最终达到动态平衡，即两类载流子数保持平衡。

当温度升高或光照时，“电子与空穴对”明显增多并达到新的动态平衡，导电能力增强，半导体的这种性质被称为光敏性和热敏性。

在室温下，本征半导体中的载流子数极少，这对半导体技术来说是没有实用价值的。

1.1.2 N 型半导体和 P 型半导体

在本征半导体中掺入微量有用的化学元素杂质，将使半导体的导电性能产生极大的变化，这就是半导体的另一特性，即掺杂特性。掺杂后的半导体称为杂质半导体。正是由于这一重要

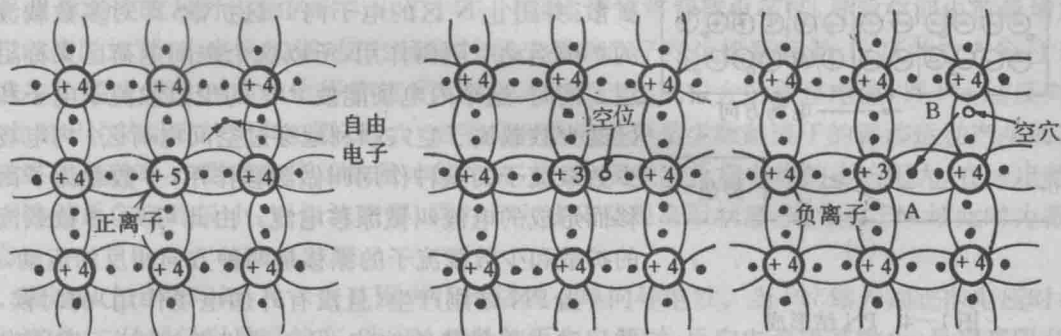
特性,使半导体获得了重要的用途。因掺入的杂质不同,杂质半导体可分为N型半导体和P型半导体两类。

1. N型半导体

在锗(硅)的本征半导体中,掺入微量五价元素,如磷、锑或砷等。这样并不会改变锗(硅)的晶体结构,只是某些锗(硅)原子被磷原子所取代。磷原子同周围的四个硅原子组成四个共价键,因磷原子有5个价电子,必定还多余一个价电子。这个价电子仅受磷原子核正电荷的吸引,在杂质原子核周围运动,所以受到的束缚力非常微弱。在较小的能量作用下,就很容易成为自由电子,可见五价元素的掺入,使晶体中自由电子的浓度大大增加。五价磷原子因失去电子而成为不能移动的正离子,所以它不是载流子。

掺杂后的半导体中,载流子来源于两个方面:一方面是半导体本身由于受本征激发所产生的“电子与空穴对”;另一方面是由于杂质元素所释放出来的自由电子,因而这种杂质半导体中的电子数比空穴数多的多,称之为电子型半导体,又称为N型半导体。

在N型半导体中,由于自由电子浓度大,自由电子被称为多数载流子,空穴被称为少数载流子。这类半导体主要靠自由电子导电。



(a)N型(五价元素)

(b)P型(三价元素)

图1-3 晶体中掺杂平面示意图

2. P型半导体

在本征半导体硅(锗)中,掺入微量三价元素硼(B),同样不会改变晶体结构,晶体中的某些硅原子被三价原子所取代,三价原子与周围四个硅原子组成共价键时,缺少一个价电子,在一个共价键上出现了一个空位,邻近的硅原子的价电子很容易来填补这个空位,从而在该价电子的原位上产生一个空穴。三价原子因得到了一个电子而成了负离子,在晶体中不能移动,所以这类负离子也不是载流子。

在这种杂质半导体中,载流子来源于以下两个方面:一是半导体中有少量本征激发产生的“电子与空穴”对;二是半导体中产生了与三价原子数相同的空穴,所以,这种杂质半导体空穴数比电子数大的多,因此称它为空穴型半导体,又称为P型半导体。

在P型半导体中,由于空穴浓度大,被称为多数载流子,自由电子被称为少数载流子。这类半导体主要靠空穴导电。

由以上分析可见,在本征半导体中掺入杂质后,都将会出现一种载流子占多数称多数载流子,另一种为少数载流子。因而称杂质半导体为双极型半导体。

1.1.3 PN 结及其单向导电性

1. PN 结的形成

当P型和N型半导体用特殊工艺做在一块晶片上时,由于掺杂不同,一边是P型半导体,另一边是N型半导体。在P型区多子是空穴,N型区多子是电子。P型区和N型区交界处两边同类载流子的浓度差异很大,形成了P型区高浓度的多子空穴向N型区的扩散运动,和N型区高浓度的多子电子向P型区的扩散运动。在扩散过程中,分别与对方载流子发生复合现象。载流子复合后,在交界面P区一侧因失去了空穴而出现了负离子区,而N区一侧因失去了电子在交界处出现了正离子区,使交界处两侧形成带有相反电荷不能移动的杂质离子,即正、负离子空间电荷区。在空间电荷区载流子已被耗尽,所以又称为耗尽区或耗尽层。见图1-4所示。

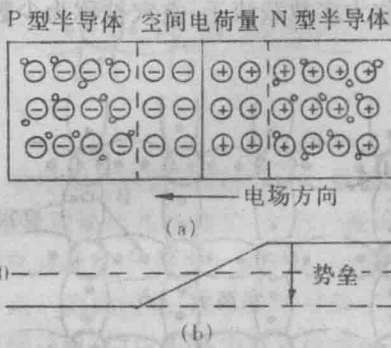


图1-4 PN 结形成

综上所述可见,这个电荷区产生了一个由PN结自身建立的电场,称为内电场(或自建电场)。内电场方向由N区指向P区,这个电场将阻止P区的空穴向N区扩散,并阻止N区的电子向P区扩散,即对多数载流子的扩散运动有阻碍作用,所以这个空间电荷区又称阻挡层。同时,这个内电场能使P区的少数载流子电子和N区的少数载流子空穴顺利地穿过空间电荷区。内电场对少数载流子的这种作用叫做漂移作用,少数载流子因漂移而形成的电流叫做漂移电流。由此可见,多数载流子的扩散和少数载流子的漂移是两种方向相反的运动。

当PN结刚产生(且没有外加电场作用)的时候,扩散运动占着优势的地位,但随着扩散的进行,空间电荷区越来越宽,内电场增强,漂移运动不断变强。当扩散和漂移的载流子数相等,空间电荷区两侧的两运动最终达到动态平衡时,空间电荷区的宽度和内电场强达到稳定状态。这个空间电荷区被称为PN结。

PN结的宽度约为数十微米。PN结电位差值:硅PN结约为0.6~0.8V;锗PN结约为0.2~0.3V。另外,因为空间电荷区内只有不能移动的正、负离子,相当于存储着电荷,所以PN结具有电容效应,称它为结电容。

2. PN 结的单向导电性

以上所述是PN结在没有外加电压时的情况,这时半导体中的扩散和漂移处于动态平衡。下面将讨论在PN结上外加电压时的情况。

若在PN结上加正向电压,P区接外电源正端,N区接外电源负端,由图1-5可以看出,外加电场与内电场的方向相反,破坏了扩散和漂移运动的动态平衡。外加电场将促使P区的多数载流子空穴和N区的多数载流子电子都要向PN结运动,P区的多子空穴进入空间电荷区后,要与原来的一部分负离子中和,使得P区的空间电荷量减少,N区的多子电子进入空间电荷区后,同样要中和原来的一部分正离子,使N区的空间电荷量减少。于是,整个空间电荷区变窄,内电场被减弱,多数载流子的扩散运动增强,形成很大的扩散电流,正向电流的大小主要由外加电压 U 和电阻 R 的大小来决定。此电流从P区到N区,即是PN结的正向电流。在

一定范围内,正向电流随着外加电场的增大而增大,PN结呈现的电阻很小。称PN结处于正向导通状态,正向导通时PN结的压降很小,硅PN结为 $0.6\sim 0.8\text{V}$,锗PN结为 $0.2\sim 0.3\text{V}$ 。

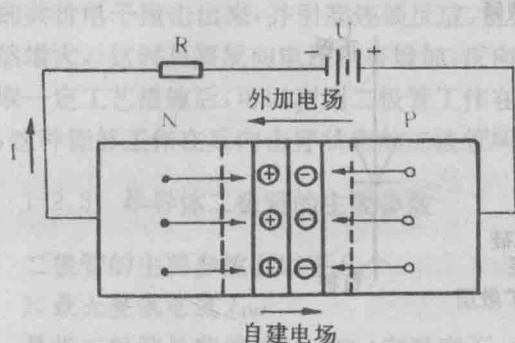


图1-5 PN结加正向电压

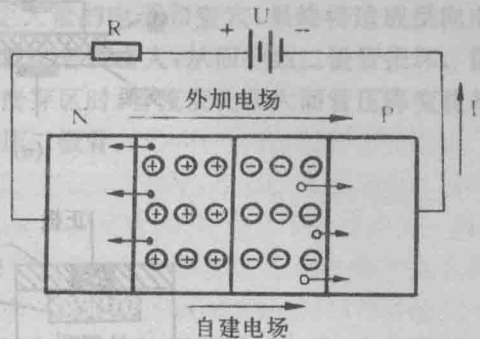


图1-6 PN结加反向电压

若在PN结上外加反向电压,P区接外加电源的负端,N区接外加电源的正端。由图1-6可以看出:外加电场与内电场方向一致,这也破坏了扩散与漂移的动态平衡。在外加电场的作用下,P区的空穴和外电源的自由电子中和,N区电子也将背离电荷区,导致空间电荷量增加,空间电荷区加宽,内电场加强,使P区和N区少数载流子产生漂移运动,N区的空穴穿过PN结进入P区,P区中的自由电子穿过PN结进入N区,形成很大的漂移电流,即PN结反向电流,此时PN结呈现的反向电阻很大。由于反向电流主要是少数载流子的漂移运动产生的,当环境温度升高时,少数载流子的数量才能增加,因此,温度对反向电流的影响很大。在一定范围内,PN结反向电流极小,近似认为零,同时PN结又呈现高阻状态,通常称PN结此时为截止状态。

通过以上分析可知,在一定范围内,PN结具有单向导电性。当PN结外加正向电压时,正向电流较大,呈现低阻导通状态;当PN结外加反向电压时,反向电流极其微小,呈现高阻截止状态。

§1.2 半导体二极管

1.2.1 半导体二极管的结构及类型

半导体二极管的结构就是在形成PN结的P型区和N型区的半导体上,分别引出电极引线,并用管壳加以封闭。常用符号如图1-7所示。

由P区引出的电极称为阳极,N区引出的电极称为阴极,二极管导通时的电流方向是由阳极流向阴极,即图中箭头所示方向。

二极管按结构不同,可分为点接触型和面接触型两类。

点接触型二极管是由一根很细的金属触丝和一块半导体的表面接触,通过特殊工艺做成PN结,拉出电极引线并密封而成。由于这种PN结面积很小,所以极间电容很小,适用于高频和小功率的工作,也用作计算机里的开关元件,但它允许流过的电流很小。

面接触型二极管的PN结是用合金法(或扩散法)做成的。这种二极管PN结面积大,故可通过较大电流,适用于作整流器件。

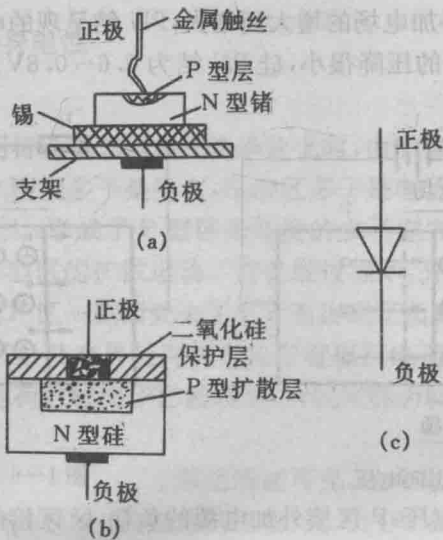


图 1-7 二极管结构及符号

1.2.2 半导体二极管的伏安特性

在二极管的阳极和阴极加上不同极性和不同数值的电压,然后测量流过二极管的电流值,即可得到二极管的伏安特性,并在坐标中描绘出曲线,就是二极管的伏安特性曲线,如图 1-8 所示曲线为非线性。二极管是一种非线性元件。

下面将对该曲线进行分段分析。

1. 正向特性

当外加正向电压很低时,还不能克服 PN 结内电场对扩散电流所产生的阻力,故此时电流很小,几乎为零,二极管呈现高阻,基本上还处于截止状态。当正向电压超过内电场电势差后,外加电场作用开始显著起来,于是正向电流将随着正向电压的增大而急剧上升。通常二极管就是工作在曲线的这一部分。电流开始迅速增长的那一拐点电压称为阈值电压,硅管为 0.5V,锗管为 0.1V。若正向电压足够大,将会引起过大的电流,使二极管烧坏。

二极管在正常使用时,电阻较小,电流较大,并且电流在较大范围内变化,二极管两端电压基本不变,近似恒压特性,所以硅二极管管压降为 0.6~0.8V,锗二极管管压降为 0.2~0.3V。

2. 反向特性

当二极管接入反向电压时,起初随着反向电压的逐渐增大,反向电流变化不大,二极管上只有微小电流流过,近似截止。在反向电场作用下,少数载流子产生漂移运动,由于少数载流子数量有限,所以反向电流几乎不随反向电压增加而增大,故它被称为反向饱和电流。

但当反向电压增到一定数值时,二极管反向电流急剧上升,这种现象称为击穿。这是由于

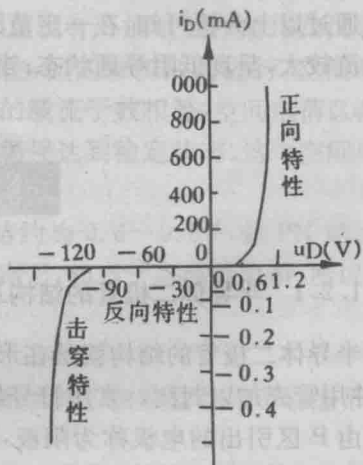


图 1-8 二极管伏安特性曲线

外加电场已增强到能够把结内被束缚的共价电子从共价键上强行拉出来,从而产生大量的电子和空穴;同时,由于通过PN结少数载流子被外加电场急剧加速,产生很大的动能,把共价键上的共价电子撞击出来,并引起连锁反应,也能产生大量的电子和空穴,最终将造成反向电流突然增大。这时只要反向电压稍有增加,反向电流就会急剧增大,从而导致二极管损坏。但可采取一定工艺措施后,可以利用二极管工作在反向击穿区时,管流变化很大而管压降变化却很小,这种能够工作在反向击穿状态的二极管叫做稳压二极管。

1.2.3 半导体二极管的主要参数

二极管的主要参数有以下几个:

1. 最大整流电流 I_{DM}

是指二极管长期使用,在一定温度下,允许流过二极管的正向平均电流。当电流超过允许值时,将由于PN结过热而使管子损坏。

2. 最高反向工作电压 U_{RM}

是指二极管所能承受的最高反向电压。若超过此值,二极管易被击穿。

3. 反向饱和电流 I_{RM}

是指二极管加上最高反向工作电压时的反向电流值。反向饱和电流愈小,二极管的单向导电性愈好。

4. 最高工作频率 f_{max}

二极管正常工作频率的上限值。

5. 结电容

是指PN结电容。此参数越小,二极管高频单向。

1.2.4 半导体二极管的测试

二极管的测试,主要是测量出二极管的极性和判断二极管的好坏。

1. 极性测试

用万用表的电阻挡在测量二极管的正、反向阻值时,若测得阻值较小,则与红表笔相接的那个电极是二极管的阴极,与黑表笔相接的那个电极为二极管的阳极;反之,若测得阻值较大时,与红表笔相接的那个电极为二极管的阳极,与黑表笔相接的那个电极为二极管的阴极。

2. 管子好坏的测试

用万用表测二极管的正、反向电阻值时,两者相差越大越好。一般常见的普通二极管正向电阻约为几百欧左右,反向电阻约为几十千欧到几百千欧左右。若万用表指针不动,表示管子内部已经断线;若测得管子的正、反向阻值相接近,表示管子已坏;若测得阻值为零,则表示电极之间已经短路了。

§ 1.3

半导体三极管

半导体三极管又称晶体三极管,简称晶体管或三极管,它是由两个PN结构成的。由于两个PN结的相互影响,使半导体三极管表现出单个PN结不具有的性能,即电流放大功能。因此,三极管被广泛地应用在电子线路中,成为电子电路用的最多也是最基本的元件之一。

1.3.1 半导体三极管的结构和类型

三极管种类很多,按半导体材料的不同,可分为硅管和锗管;按功率大小不同,可分为大功率管和小功率管;按电路中的工作频率不同,可分为高频管和低频管。无论哪种三极管都有三个电极。

根据三极管的结构不同,又有 PNP 和 NPN 两种类型。

在一块半导体基片上,用特殊工艺制成两个 PN 结,分成三个区域,即发射区、基区和集电区。每一区引出一个电极,分别为发射极(e)、基极(b)和集电极(c)。发射区和基区交界处的 PN 结称为发射结;集电区和基区交界处的 PN 结称为集电结。

三极管的结构示意图和相应的图形符号如图 1-9 所示。

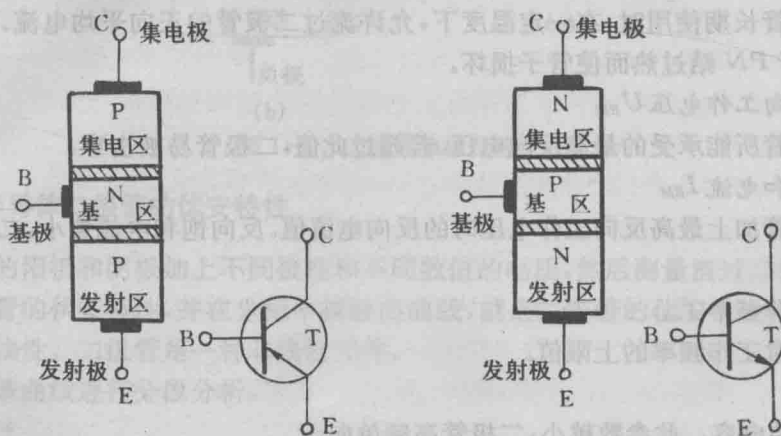


图 1-9 三极管结构及符号

1.3.2 半导体三极管的电流放大作用

按图 1-10 连接一实验电路,我们先看一下这个实验的结果。由图 1-10 可以看出,发射极和基极组成回路;发射极和集电极组成回路。可见发射极是公共端。通常称这种接法为共发射极接法。另外,需要满足晶体管的发射结加上正向电压,集电结加上反向电压。

实验方法是:改变电阻 R_B 的大小,使得基极电流 I_B 、发射极电流 I_E 和集电极电流 I_C 随之变化,同时测量出 I_B 、 I_E 、 I_C 的值。其测量结果见下表 1-1。

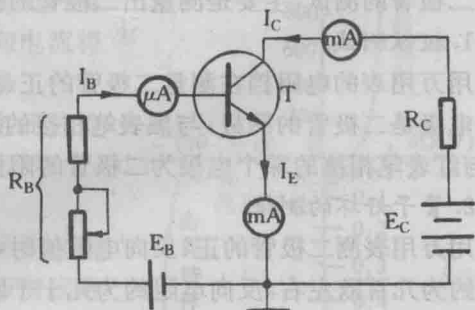


图 1-10 共发射极放大电路

表 1-1 晶体管电流测量数据

$I_B(\mu A)$	0	20	40	60	80	100
$I_C(mA)$	0.004	0.98	2.07	3.20	4.23	5.45
$I_E(mA)$	0.005	1.01	2.14	3.24	4.31	5.52

由以上实验测量数据,可以得出如下结论:

(1) 上表中每一列的测试数据都满足有 $I_E = I_C + I_B$ 。这一关系也符合基尔霍夫电流定律。

(2) I_C 和 I_E 比 I_B 大得多。 I_C 和 I_E 近似相等。取两列数据, 进行如下计算:

$$\frac{I_C}{I_B} = \frac{0.98}{0.02} = 49 \quad \frac{I_C}{I_B} = \frac{4.23}{0.08} = 52.8$$

另外, 取两列数据的变化量, 即 ΔI_C 和 ΔI_B 进行计算:

$$\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{I_{C3} - I_{C2}}{I_{B3} - I_{B2}} = \frac{2.07 - 0.98}{0.04 - 0.02} = 54.5$$

通过以上计算可以看出, 有很小的基极电流能得到很大的集电极电流; 基极电流发生微小变化就能引起集电极电流较大的变化, 这就是晶体管的电流放大作用。

下面以 NPN 管共发射极电路为例, 来简要解释晶体三极管的电流放大作用。

由于发射结加上正向电压, 使发射区的多子(自由电子) 不断扩散到基区, 不断从电源补充电子, 形成发射极电流 I_E , 其方向与自由电子运动的方向相反。基区的空穴也扩散到发射区, 但基区的空穴浓度比发射区的自由电子的浓度小得多, 所以空穴电流很小, 可忽略不计。

由于基区很薄, 掺杂浓度又低, 因此扩散到基区的绝大多数电子将向集电结方向继续扩散。但在扩散过程中, 有少量电子与基区的空穴复合, 基极接电源正极不断地吸引价电子, 当复合的电子数与基区被电源正极吸引的电子数相等时, 这就形成了基极电流 I_B 。实际上, 扩散到基区的电子与空穴复合的很少, 大部分都扩散到了集电结。

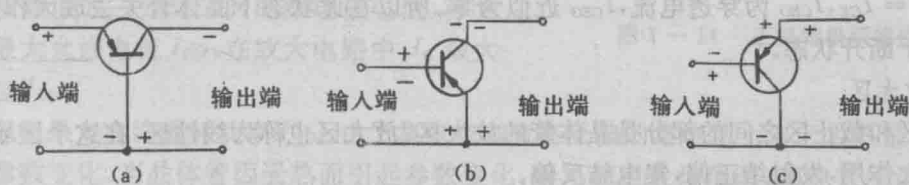
集电结加的是反向电压($U_C > U_B$), 可将从发射区扩散到基区且到达集电区边缘的电子收集到集电区, 形成集电极电流 I_C 。

综上所述, 由于电流与电子流的方向相反。NPN 管发射极电子流大部分流向集电极, 很小一部分流向基极, 即 $I_B + I_C = I_E$ 。若 I_C 与 I_B 的比值, 用 β 表示, 即 $\beta = \frac{I_C}{I_B}$, 因为电子在基区既有扩散, 也有复合, 才使晶体管具有电流放大作用, 所以称 β 为晶体管的电流放大系数。

1.3.3 三极管的连接方式

三极管的连接方式有共射、共基、共集三种。

不同连接方式的电路具有不同的特性, 用途也就不同。共射电路: 电压放大倍数小, 高频特性差, 适用于低频放大电路。共基电路: 放大倍数高, 高频特性好, 适用于高频放大电路。共集电路: 输入电阻高, 输出电阻小, 常用于阻抗变换和缓冲放大。



(a) 共基

(b) 共射

(c) 共集

图 1-11 三种联接方式

1.3.4 三极管的特性曲线

晶体管的特性曲线是指各极电压与电流之间的关系。在不同的连接方式下, 晶体管的特性

曲线是不一样的。

现以 NPN 型共射放大电路为例来进行分析。

1. 输入特性曲线

输入特性曲线是指当输出电压 U_{CE} 为常数时,输入回路中基极电流 I_B 与 U_{BE} 之间的关系曲线。即 $I_B = f(U_{BE}) \Big|_{U_{CE} = \text{常数}}$

曲线如图 1-12 所示,可以看出,此曲线与二极管的伏安特性一样,晶体管的输入特性也有一个“死区”。当 U_{BE} 大于某一值后, I_B 才随 U_{BE} 增加而明显增大。硅管的“死区”电压为 0.5V,发射结导通电压 $U_{BE} = 0.6 \sim 0.8V$ 。锗管的“死区”电压为 0.2V,发射结导通电压为 0.2~0.3V。

2. 输出特性曲线

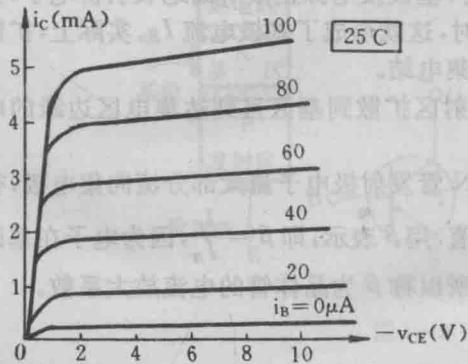


图 1-13 三极管输出特性曲线

深度饱和时,晶体管可以看作是一个闭合的开关。

(2) 截止区

当 $I_B = 0$ 时的特性曲线以下的区域称为截止区。晶体管的集电结和发射结均为反偏。由于 $I_B = 0, I_C = I_{CE}, I_{CEO}$ 为穿透电流, I_{CEO} 近似为零。所以在此状态下晶体管失去放大作用。它在电路中处于断开状态。

(3) 放大区

饱和区和截止区之间的部分是晶体管的放大区。放大区也称为线性区,在这个区域晶体管才具有放大作用,发射结正偏,集电结反偏。

1.3.5 半导体三极管的主要参数

主要参数和特性曲线一样,是表现晶体管性能的主要指标。

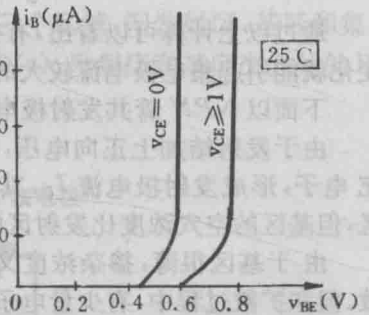


图 1-12 三极管输入特性曲线

输出特性曲线是指当输入电流 I_B 为常

数时,输入回路中集电极电流 I_C 和输出电压 U_{CE} 的关系曲线,即 $I_C = f(U_{CE}) \Big|_{I_B = \text{常数}}$ 。当 I_B 改变时,得到不同的曲线,所以输出特性曲线是一组曲线。如图 1-13 所示。

一般将输出特性分为以下三个工作区:

(1) 饱和区

当 $U_{CE} < U_{BE}$ 时,晶体管的发射结和集电结处于正向偏置,晶体管工作于饱和状态,此间 I_B 的变化对 I_C 的影响较小,晶体管失去放大作用。

深度饱和时,晶体管可以看作是一个闭合的开关。

(2) 截止区

当 $I_B = 0$ 时的特性曲线以下的区域称为截止区。晶体管的集电结和发射结均为反偏。由于 $I_B = 0, I_C = I_{CE}, I_{CEO}$ 为穿透电流, I_{CEO} 近似为零。所以在此状态下晶体管失去放大作用。它在电路中处于断开状态。

(3) 放大区

饱和区和截止区之间的部分是晶体管的放大区。放大区也称为线性区,在这个区域晶体管才具有放大作用,发射结正偏,集电结反偏。

1.3.5 半导体三极管的主要参数

主要参数和特性曲线一样,是表现晶体管性能的主要指标。