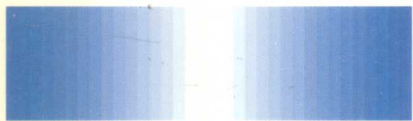


高等学校教材



模拟 集成电路基础

(第二版)

北方交通大学 冯民昌 主编

中国铁道出版社

高 等 学 校 教 材

模拟集成电路基础

(第二版)

北方交通大学 冯民昌 主编
范希鲁 主审

中 国 铁 道 出 版 社

2 0 0 2 年 · 北 京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书是在第一版基础上,根据国家教委批准的《电子电路(I)、(II)课程教学基本要求》,考虑到电子技术的发展和人才培养的需求进行修订。主要包括:晶体二极管及其应用;双极型晶体管及基本放大电路;场效应管及其基本放大电路;负反馈放大器;放大器的频率响应;双极型模拟集成电路;集成运放分析及应用;MOS 模拟集成电路;电子电路计算机辅助设计等。

本书可作为高等学校通信、控制、信息和计算机等专业的本科生教材,也可供从事电路设计、通信工程、控制工程、信息工程以及计算机等专业的广大科技工作者自学参考。

图书在版编目(CIP)数据

模拟集成电路基础/冯民昌主编.—2版.—北京:
中国铁道出版社,2002.8
ISBN 7-113-02878-0

I. 模… II. 冯… III. 模拟集成电路—高等学校
—教材 IV. TN431.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 052267 号

书 名:模拟集成电路基础(第二版)

作 者:冯民昌

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

责任编辑:倪嘉寒

封面设计:陈东山

印 刷:北京市彩桥印刷厂

开 本:787×1092 1/16 印张:18.75 字数:480 千

版 本:1991年3月第1版 1998年2月第2版 2002年8月第4次印刷

印 数:13 001~16 000 册

书 号:ISBN 7-113-02878-0/TN·108

定 价:22.30 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

第一版 前言

本书是根据国家教委工科电子课程指导委员会制订的《高等工业学校电子线路 I》教学基本要求编写的。内容包括常用半导体器件及各类放大电路,它是针对高等院校通信、电子及控制专业的需要,着重基本概念、基本原理和基本分析方法。它是一本电子技术基础课的通用教材。

本书在电路结构上,以集成电路为主兼顾了分立元件电路,以便适应目前集成电路大量推广使用的客观形势。

本书在内容安排上以电路的基本原理与分析为主,器件部分比较精简,为了教与学的方便,本书没有将器件集中到一章而是采取管与路结合的方式把晶体管、集成电路、场效应管、光电器件分散在第一、八、九和十二等章中。这样做有助于初学者较快地从电路的要求理解器件特性和参数的实际意义。

为了让读者对模拟集成电路有较为全面的了解,书中引入了 14 种单片集成电路,考虑本教材的重点放在集成电路的应用方面,因而对这些集成芯片的内部电路突出了定性分析,以便达到正确使用目的。

本教材适合于 80~90 学时课程。在章节安排上注意了适应不同层次学生的要求,如教材前九章为基础内容,后三章的内容可以选学。各章中也有一些选学内容,可以根据学时多少适当的选择。

电子电路是一门实践性很强的技术学科,有关实验内容另有实验课安排,按国家教委教学大纲的要求,有关稳压电源的理论学习内容均放在实验课中进行。

本书的先修课为《电路分析》及《信号与系统》。本书是第一门电子电路教材,与本书配套的还有《模拟集成电路系统》和《数字电路》两本教材。

本书由北方交通大学冯民昌主编。参加本书编写的有:兰州铁道学院董保生(第十二章);北方交通大学徐启明(第九、十、十一章)、冯民昌(第一、二、三、四、五、六、七、八章)。书中有一部分内容取材于北方交通大学卢淦主编的《低频电子电路》(中国铁道出版社 1986 年 3 月出版),并经过适当精选和加工。

本书承上海铁道学院聂美声老师主审,纠正了书中的差错。兰州铁道学院、上海铁道学院、西南交通大学、北京工业大学、北京邮电学院、北京理工大学、北京联大电子工程学院及北方交通大学微电子学科组的许多老师参加了审稿会议,他们对初稿提出了宝贵意见,特此一并致谢。

作者

1989 年 8 月

于北方交通大学

第二版 前言

本书第一版书稿写于1989年,于1991年出版,1996年获铁道部优秀教材二等奖。自1989年以来电子技术有了很大发展,面向21世纪对人材培养也提出了新的要求。本书第二版是在第一版基础上,根据国家教委批准的《电子电路(I)、(II)课程教学基本要求》,考虑到电子技术的发展和人材培养的要求进行修订。

本书内容包括常用半导体器件及各类放大电路。它是针对高等院校通信、自动控制,电子信息等专业的要求,着重基本概念、基本原理和基本分析方法,是一本电子技术基础课程的通用教材。

传统电子电路和电子系统的分析和设计都是依靠人工估算和实验室硬件调试来实现,为了使掌握采用计算机分析电子电路的方法,以便适应加强工程设计和分析能力的要求,第二版增加了电子电路计算机辅助设计(CAD)一章,并且本书各章都配备了机辅分析习题。从全书内容的系统性考虑,在书中电子电路CAD一章放在最后一章,实际讲课时可在讲完前三章后先介绍电子电路CAD以便可安排学生做各章的机辅分析题时上机(PC微机)练习。在没有PC微机条件的单位,可将电子电路CAD一章放在最后作一般介绍。

考虑到采用计算机分析的优越性,本书修订时删除了第一版中复杂电路(如集成宽放)的人工分析和噪声分析。

在内容安排上仍然以电路的基本原理及分析为主,器件部分比较精简。为了教与学的方便,本书没有将器件集中在一章介绍,而是采取管与路结合的方式,将器件分散在各章中进行介绍,这样做有助于初学者比较快地从器件特性理解电路原理,同时又从电路原理要求理解器件特性。电子电路的发展都首先由器件更新而促进电路发展。

本书先修课程为《电路分析》及《信号与线性系统》,本书是第一门电子电路教材,与本书配套的还有《模拟集成电路系统》和《数字电路与系统》两本教材。

本书由北方交通大学冯民昌教授主编并编写了第一、二、四、五、六、七、九章;北方交通大学徐启明副教授编写了第三、八章。

北方交通大学范希鲁教授主审了第二版全稿,提出了许多重要而又宝贵的意见。清华大学董在望教授、北京邮电大学谢沅清教授、北京理工大学罗伟雄教授、北京工业大学谭慕端教授为本书编写提出了许多改进意见。天津大学赵雅兴教授为本书电子电路CAD一章提供了素材和举例。他们对本书编写做出了宝贵贡献,特此一并致谢。

作者

1997年6月

于北方交通大学

目 录

第一章 晶体二极管及其应用	1
第一节 半导体基础知识.....	1
第二节 PN 结与晶体二极管	5
第三节 光电二极管和发光二极管	14
第四节 二极管应用	18
第二章 双极型晶体管及基本放大电路	25
第一节 双极型晶体二极管	25
第二节 放大器的工作原理	31
第三节 放大电路的分析方法	35
第四节 共集放大电路	46
第五节 共基放大电路	48
第六节 级间耦合方式	51
第三章 场效应管及其基本放大电路	58
第一节 MOS 场效应管.....	58
第二节 结型场效应管	64
第三节 场效应管的主要参数和微变等效电路	68
第四节 场效应管基本放大电路	72
第四章 负反馈放大器	80
第一节 反馈的基本概念	80
第二节 负反馈放大器的分类	82
第三节 负反馈对放大器性能的影响	87
第四节 负反馈放大器的方框图分析法	95
第五章 放大器的频率响应	107
第一节 频率响应的分析方法.....	107
第二节 晶体三极管的高频运用.....	115
第三节 放大器频响分析.....	120
第四节 放大器展宽带宽的方法.....	126
第五节 多级放大器的闭环稳定性.....	130

第六章 双极型模拟集成电路	139
第一节 集成化元、器件及其特点	139
第二节 集成差分放大电路	143
第三节 电流模电路	154
第四节 功率输出级电路	161
第五节 集成运算放大器	168
第七章 集成运放分析及应用	186
第一节 理想运放模型及闭环分析	186
第二节 基本运算电路	189
第三节 电压比较器	196
第四节 波形发生器	200
第五节 集成运放的其他应用电路	203
第八章 MOS 模拟集成电路	218
第一节 MOS 集成工艺简介	218
第二节 MOS 模拟集成单元电路	220
第三节 MOS 集成运算放大器	230
第四节 MOS 模拟开关及开关电容电路	234
第九章 电子电路计算机辅助设计	246
第一节 SPICE 通用电路模拟程序	246
第二节 半导体器件模型	268
第三节 集成运放宏模型	279
第四节 SPICE 程序应用举例	286
附 录 本书常用符号	292
主要参考文献	294

第一章 晶体二极管及其应用

自从1904年发明了最简单的真空二极管(亦称电子管)以来,电子器件已经经历了几代发展。1948年创制出第一只晶体三极管,它是用半导体材料制成的,又称为半导体器件,相继又研制出许多类型的半导体器件(如场效应晶体管等),它们是第二代电子器件。

由各种晶体管和常用电阻、电容等元件组成的电子电路称分立电路,目前的分立式电子电路是把许多电子器件和元件焊接在一块印刷电路板上。这种由分立元、器件与印刷电路板作为基本单元的电子仪器和设备,由于焊接问题、安装问题、器件参数分散性问题和调试问题等因素,使电子设备在运用过程中造成一些故障,影响了产品和设备的可靠性。

50年代末研制出集成电路,称为第三代电子器件。它是把许多晶体管和电阻等元件制造在一块硅晶片上,集成电路不仅体积小、重量轻、功耗小,而且工作可靠性高,因而引起人们极大的重视。近二十年来集成电路得到飞速发展,例如集成电路的集成度(指单位芯片面积上包含有元、器件的数目)由小规模(SSI)、中规模(MSI)发展到大规模集成电路(LSI)。近十几年超大规模集成电路(VLSI)出现,称为第四代电子器件,它可以在几十平方毫米芯片面积上集成上百万个元、器件,从而将器件、电路与系统融合于一体,成为一个集成电子系统。例如彩色电视机集成组件和通信系统集成组件等。

晶体二极管是最简单的半导体器件,它是由PN结组成,PN结是半导体器件也是集成电路最基本的机构。本章首先复习半导体的基本知识,然后介绍PN结、晶体二极管、光电二极管和它们的应用。

第一节 半导体基础知识

一、半导体的特性

晶体二极管、三极管、场效应管和集成电路等器件均由半导体材料制成,因此什么是半导体以及半导体具有什么性能,这是首先要了解的。

物体按导电能力可以分为导体、半导体和绝缘体三类。日常生活中接触到的金、银、铜、铝等金属都是良好的导体,它们的电导率有 $10^5\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 量级。而另一些物质如橡皮、塑料、云母、陶瓷等很不容易导电,因此称为绝缘体,它们的电导率在 $10^{-22}\sim 10^{-14}\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 量级。半导体的命名是因为它的导电能力介于导体和绝缘体之间,它的电导率在 $10^{-9}\sim 10^2\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 量级。常用的半导体有锗、硅和砷化镓等。

半导体在现代之所以得到广泛的应用,不在于它的导电能力处于导体和绝缘体之间,而是因为它具有一系列特殊的性能:

1. 半导体的电导率可以随加入的杂质作明显的改变。例如在室温 30°C 时,纯锗中掺入一亿分之一的杂质(称掺杂),其电导率将增加几百倍。正因为掺杂可以改变和控制半导体的电导

率,才能利用它制造出各种不同的半导体器件。

2. 温度可以明显地改变半导体的电导率,利用这种热敏效应可以制成热敏元件,但另一方面,热敏效应使半导体器件的热稳定性下降,因而在半导体器件组成的电路中,采用了温度补偿及稳定参数的各种措施。

3. 光照不仅可以改变半导体的电导率,还可以产生电动势,这就是半导体的光电效应。利用光电效应可以制成光敏电阻、光电晶体管、光电耦合器和光电池等。光电池已在空间技术中得到广泛的应用,为人类利用太阳能提供了广阔的前景。

二、本征半导体

纯净的结构完整的半导体称为本征半导体。毫无杂质的锗或硅单晶属于本征半导体。

(一) 硅和锗晶体的共价键结构

在晶体中,原子之间的距离靠得很近,它的外层电子不仅受到本原子的作用,还要受到相邻原子的作用,产生了轨道的交叠。由原子理论知道,当原子的外层电子有 8 个时才处于稳定状态,硅和锗的原子只有 4 个外层电子,因此在组成单晶时,每个原子都要从四周相邻原子取得 4 个价电子,以组成稳定状态。这样,每 2 个原子都共用 1 对价电子,形成共价电子对,这种结构称为共价键结构。如图 1-1 所示。

(二) 两种载流子——电子和空穴

上述共价键内的 2 个电子称为“束缚电子”。在绝对温度 $T=0\text{ K}$ 和无外界其他因素激发时,价电子(最外层电子称价电子)全部束缚在价带,导带是空的。在室温时($T=300\text{ K}$),少数价电子受热得到能量,当价电子获得的动能等于或大于禁带宽度 E_G 时,价电子受激发而跃迁到导带成为可以参与导电的自由电子,价带中缺少了电子,留下的空位称为“空穴”,如图 1-2 (a)表示。电子和空穴有以下特点:

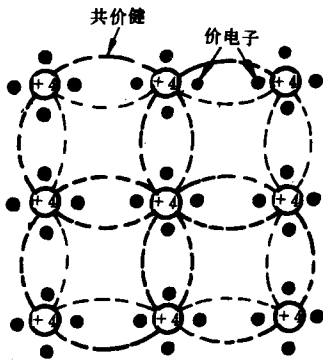


图 1-1 共价键结构

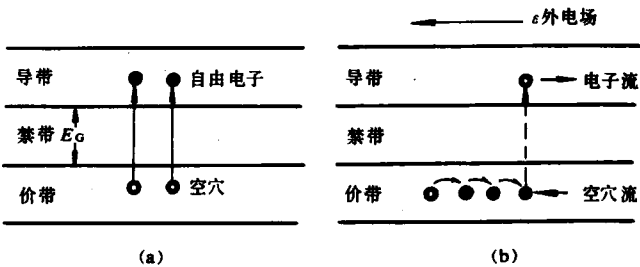


图 1-2 两种载流子

1. 自由电子是一种载运电流的粒子,称为载流子,它在外电场 ϵ 作用下,产生定向运动称“电子流”,电子流的方向与外电场的方向相反。

2. “空穴”带正电,它也是一种载流子,这是半导体所特有的一种载流子。在外加电场 ϵ 作用下,价带中邻近原子的价电子,可挣脱共价键的束缚,跃入原有的空位,从而产生空位定向转移。这种依靠束缚电子由一处依次填补到另一处的定向移动称空穴流。空穴流的方向与外加电场的方向相同,如图 1-2(b)所示。

3. 在外电场作用下,空穴始终在价带内运动,而自由电子始终在导带内运动。电子流与空穴流的方向相反但其电流方向却是一致的。我们把载流子在电场作用下产生的定向运动称为漂移运动。

4. 在本征半导体中,电子和空穴是成对产生,因为价带中的电子跃迁到导带,产生一个自由电子就必然出现一个空穴,形成了电子—空穴对。

下面我们来计算本征半导体中产生电子—空穴对的数目。

(三)载流子的浓度

若用 n 表示单位体积的自由电子数目, n 称为电子浓度。用 p 表示单位体积的空穴数目, p 称空穴浓度。在本征半导体中电子和空穴的浓度分别用 n_i 和 p_i 表示。其数值可由下式计算:

$$n_i = A_0 T^{3/2} e^{-E_{G_0}/2kT} \quad (1-1)$$

式中 A_0 ——与半导体材料有关的常数,硅 $A_0 = 3.87 \times 10^{16}$, 锗 $A_0 = 1.76 \times 10^{16}$;

E_{G_0} ——0 K 时的禁带宽度(以 eV 电子伏表示),硅的 $E_{G_0} = 1.21 \text{ eV}$, 锗的 $E_{G_0} = 0.785 \text{ eV}$;

T ——绝对温度(以 K 表示, $0 \text{ K} = -273 \text{ }^\circ\text{C}$);

k ——玻兹曼常数($k = 8.6 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$)。

由上式可见,本征半导体的自由电子浓度 n_i 与温度和禁带宽度有关,温度升高和禁带宽度较小都有利于电子跃迁,使自由电子浓度增加。由于本征激发产生的电子与空穴数目相同,因此,本征半导体的空穴浓度 $p_i = n_i$ 。

温度对本征半导体的载流子浓度有很大影响,对于晶体管半导体器件,温度变化引起 n_i 和 p_i 的变化,会使器件参数变化,这在晶体管电路中是要特别引起注意。

(四)载流子的产生和复合

上述电子浓度 n_i 是动态平衡时的数值。实际上,半导体中载流子的产生就伴随着它们的消失。这是两个相反的过程。价带中的电子跃迁到导带,产生了电子—空穴对。导带中的电子受原子核的吸引还会回到价带,并与空穴“复合”,使自由电子和空穴同时消失。

若用 g 表示载流子的产生率,它是每秒成对产生的电子或空穴浓度;用 R 表示载流子的复合率,它是每秒复合的载流子浓度。起初,产生率大于复合率,载流子浓度相对在不断增加,随着载流子数目的增加,复合的机会也随之增加,一直发展到载流子的产生率与复合率相等,这时载流子浓度保持在一定的数目,并处于一种动态平衡状态。

动态平衡时 $g = R$, 载流子浓度 n_i 固定不变,而复合率 R 与电子浓度 n_i 和空穴浓度 p_i 的乘积成正比,可以证明

$$R = r n_i p_i \quad (1-2)$$

式中 r ——称复合率系数,是和半导体材料有关的系数。

三、杂质半导体

在本征半导体中,人为地掺入少量其他元素(称杂质),可以使半导体的导电性能发生显著的改变。利用这一特性,制成了人们所期望的各种性能的半导体器件。

掺入杂质的半导体称杂质半导体,根据掺入杂质的性质不同,可分为两种:电子型半导体即 N 型半导体和空穴型半导体即 P 型半导体。

(一)N 型半导体

在本征半导体中掺入少量的五价元素,可以构成 N 型半导体,常用的五价元素有磷、砷和锑。若在锗晶体中掺入少量的砷原子,如图 1-3(a)所示,掺入的砷原子取代了某些锗原子的

位置。砷原子有 5 个价电子，其中 4 个与相邻锗原子结合成共价键，余下的 1 个不在共价键之内，砷原子对它的束缚力较弱，因此只需得到极小的外界能量，这个电子就可激发成为自由电子。由于砷原子很容易贡献出 1 个自由电子故称为“施主杂质”。

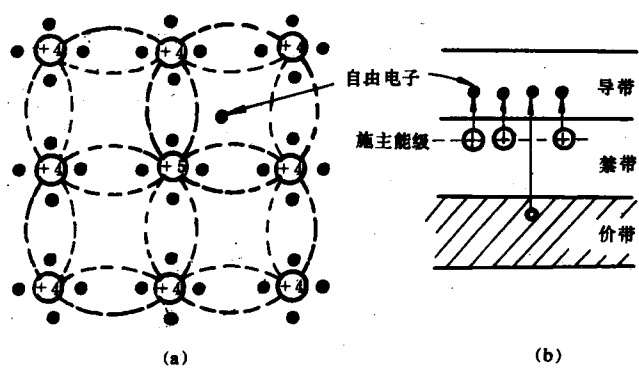


图 1-3 N 型半导体

砷原子贡献出 1 个电子后，砷原子本身因失去电子而成为正离子，但并不产生新的空穴，这与本征半导体成对产生载流子有截然不同之处。

在 N 型半导体中，除了由本征激发产生的电子—空穴对，又增加了大量的由砷原子贡献的自由电子。这种杂质半导体将以自由电子导电为主^①，所以 N 型半导体中自由电子称为“多数载流子”(简称多子)，而空穴称为“少数载流子”(简称少子)。

(二)P 型半导体

在本征半导体中掺入少量三价元素，可以构成 P 型半导体。常用的三价元素有硼、铝和镓，如图 1-4 所示。若在锗晶体中掺入少量镓原子，则镓原子的 3 个价电子只能和相邻的 3 个锗原子结合成共价键，而与第四个相邻锗原子组成的共价键并不完整，产生了 1 个价电子的空穴，这个空位极易接受邻近锗原子共价键中的电子，使镓原子成为不能移动的负离子，而邻近锗原子因缺少 1 个电子，产生 1 个空穴。由于锗原子的价电子容易跳到镓原子的空位上，镓原子起着接受 1 个电子的作用，故称“受主杂质”。

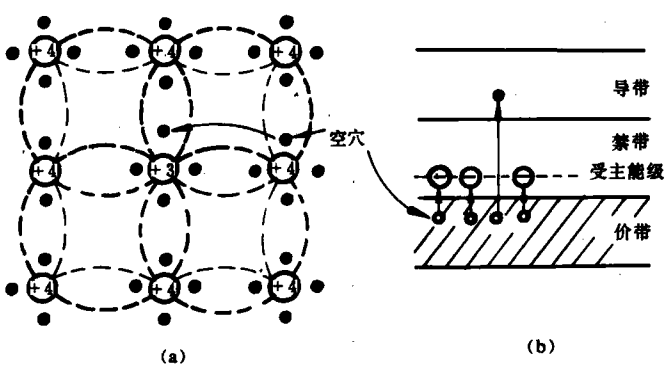


图 1-4 P 型半导体

① 由于电子带负电，N 是 Negative(负)的字头，故名为 N 型半导体。

在 P 型半导体中,除了由本征激发产生的电子—空穴对,又增加了大量的由铟原子贡献的空穴。这种杂质半导体,将以空穴导电为主^①,所以 P 型半导体中空穴称为“多数载流子”,而电子则成为“少数载流子”。

(三)杂质半导体的载流子浓度

在杂质半导体中,尽管杂质含量很少,但通常由杂质原子贡献的载流子数目远大于本征载流子浓度。例如在常温 300 K 时,锗的本征载流子浓度 $n_i = 2.5 \times 10^{13}/\text{cm}^3$,锗的原子密度为 $4.4 \times 10^{22}/\text{cm}^3$,若掺入砷原子是锗原子密度的万分之一,则施主杂质浓度 N_D 可计算得:

$$N_D = 10^{-4} \times 4.4 \times 10^{22} = 4.4 \times 10^{18}/\text{cm}^3$$

可见由杂质提供的载流子数值比 n_i 大十万倍。在这种情况下,杂质半导体的多数载流子浓度,主要由施主杂质浓度决定。即:对于 N 型半导体,电子浓度(多子) n_n 可近似为 $n_n \approx N_D$, N_D 为施主杂质浓度。对于 P 型半导体,空穴浓度(多子) p_p 可近似为 $p_p \approx N_A$,式中 N_A 为受主杂质浓度。在正常掺杂情况下,由于锗或硅的原子密度远大于杂质浓度,所以可近似认为载流子的产生率 g 和复合率系数 r 保持不变。因此,对杂质半导体来说仍然保持 $n \cdot p = n_i \cdot p_i = n_i^2$ 。可以证明:

对于 N 型半导体

$$\begin{aligned} n_n \cdot p_n &= n_i^2 \\ n_n &\approx N_D \\ p_n &= \frac{n_i^2}{n_n} \approx \frac{n_i^2}{N_D} \end{aligned}$$

对于 P 型半导体

$$\begin{aligned} n_p \cdot p_p &= n_i^2 \\ p_p &\approx N_A \\ n_p &= \frac{n_i^2}{p_p} \approx \frac{n_i^2}{N_A} \end{aligned}$$

由上述公式可见,对于杂质半导体由于多数载流子浓度比本征载流子浓度 n_i 或 p_i 大得多,而少数浓度要比本征载流子浓度小得多,但是两者之乘积保持不变,并等于 n_i^2 。

第二节 PN 结与晶体二极管

一、PN 结的基本原理

PN 结是晶体二极管、晶体三极管和其他半导体器件的基本结构,因此在半导体器件中占有非常重要的地位。

(一)PN 结的形成

PN 结是由 P 型和 N 型半导体通过一定的方式结合而成,所谓一定的结合方式是指并非简单地将两块半导体接触在一起,而是在一块完整的晶体上,利用掺杂的方法,使晶体内部形成相邻接的 P 型和 N 型半导体的结合。为了说明形成的过程,我们首先了解一下结合以前 P 型和 N 型半导体的情况。如图 1-5(a)所示。在不计本征激发时,P 型和 N 型半导体处处呈电

^① 由于空穴带正电,P 是 Positive(正)的字头,故名为 P 型半导体。

中性,即导电的载流子必然与带电离子成对地出现。对于P型半导体,空穴数等于带负电的受主离子数。对于N型半导体,电子数等于带正电的施主离子数。

结合以后,交界面两边的载流子浓度有很大的差别,载流子要从浓度大的区域向浓度小的区域扩散,称载流子的扩散运动。P区存在大量多子空穴,必然向空穴浓度很小的N区扩散;同理,N区存在大量多子电子也必然向电子浓度很小的P区扩散。扩散到对方的载流子又成为对方的少数,很快就被复合掉。因此在交界面两边很窄的区域内,将留下不能移动的正、负离子。交界面左方,留下负离子,右方留下正离子,于是在交界处形成了缺少载流子的空间电荷区称为耗尽层。这就是PN结,如图1-5(b)所示。在交界面两边的正负离子形成一个内建电场,其方向由右向左。显然,该电场要阻止双方载流子的继续扩散。在开始扩散时,内建电场较小,阻止扩散的作用较小;扩散继续进行,内建电场增加,阻止扩散也逐渐加大;达到动态平衡时,交界面两边的电荷量不再变化,内建电场也达到一定值。

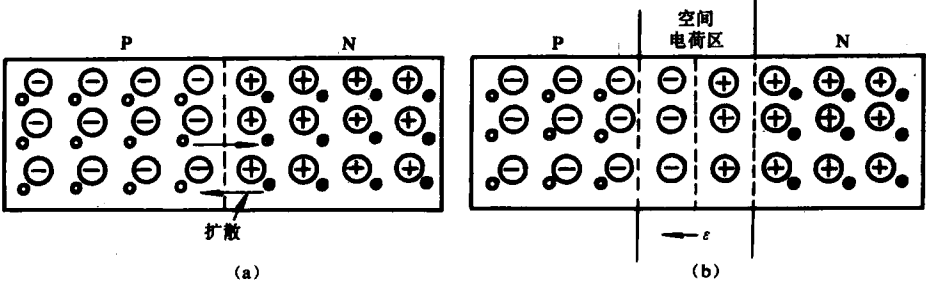


图 1-5 PN 结形成
(a)载流子扩散;(b)平衡状态下的 PN 结。

扩散只是PN结的一种现象。PN结还有另一种现象,就是少数载流子在电场作用下的漂移运动。上述内建电场阻止多子扩散运动的进行,却要引起少数载流子漂移运动,如N区少数空穴,只要接近耗尽层,就会被内电场吸引而拉到对方的P区中去,产生漂移电流。

因此,在动态平衡时,当P区空穴向N区扩散,产生空穴扩散电流的同时,就有一个数量相等的空穴漂移电流由N区流向P区,两者数量相等,方向相反。同理电子扩散电流也必然被电子漂移电流抵消。因此动态平衡时,流过PN结的总电流为零。

(二)PN 结的接触电位

内建电场在PN结中产生的电位差,称接触电位 V_p ,它主要由半导体材料和掺杂浓度决定,一般硅的 $V_p=0.7\text{ V}$ 左右;锗的 $V_p=0.2\text{ V}$ 左右。N区的电位比P区高,好象壁垒一样,它要阻止P区空穴向N区扩散,如图1-6(a)所示,所以 V_p 又称“电位壁垒”(简称位垒)。

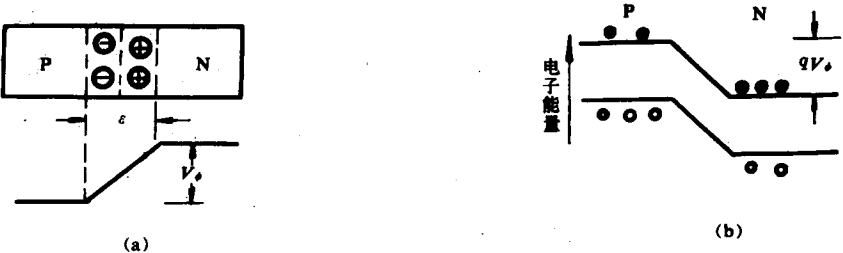


图 1-6 PN 结的电位
(a)PN 结的接触电位;(b)PN 结的能带图。

P 型与 N 型半导体结合成 PN 结后,它的能带状态也引起变化。图 1-6(b)所示为 PN 结的简化能带图,图中只画出能带图的导带底和价带顶。图中空穴能量与电子能量方向相反。形成 PN 结后,P 区的电子能量高于 N 区,高出的数值为 qV_s ,其中 q 是电子电荷量。因此 N 区电子向 P 区扩散,受到了阻力,只有克服位垒的阻力才能达到 P 区。

(三)PN 结的单向导电性

什么是 PN 结的单向导电性?我们先观察一下实验现象。如图 1-7 所示。当电池 E 与 PN 结正向连接时(P 型部分接电池正极,N 型接电池负极),电路内电流 I 很大,PN 结呈现电阻很小。反之当电池与 PN 结反向连接时(P 型区接电池负极,N 型区接正极),电路内电流 I 很小,称为反向饱和电流,PN 结呈大电阻。这一物理现象称 PN 结的单向导电性。



图 1-7 PN 结连接方式
(a)正向连结;(b)反向连接。

下面进一步讨论这一现象。

1. PN 结加正向电压

图 1-8 所示为 PN 结加正向直流电压的情况,假设 PN 结中已没有载流子,所以电阻率很高,而呈电中性的 P 区或 N 区存在大量载流子,电阻率较低,可以认为外加电压 U 全部降落在 PN 结两端。在正向电压作用下,位垒高度将由原来的 qV_s 减小为 $q(V_s - U)$ 。位垒的减少使多子更容易向对方扩散,所以扩散电流增加,PN 结产生了正向电流。加大外加电压 U ,位垒更低,扩散电流更大,故正向电流随外加电压 U 增加而增大。

在这种情况下,由少数载流子形成的漂移电流,其方向与扩散电流相反,但和正向电流相比较,其数值很小,一般都可忽略不计。

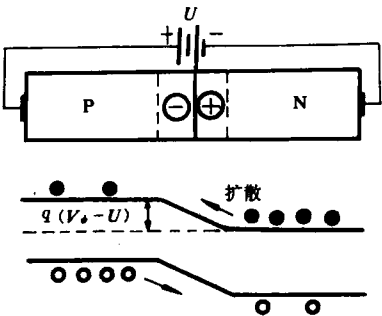


图 1-8 加正向电压时载流子的运动

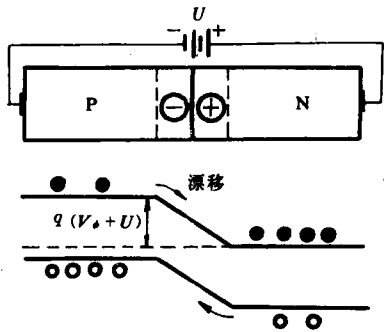


图 1-9 加反向电压时载流子的运动

2. PN 结加反向电压

图 1-9 的所示为 PN 结加反向电压的情况,在反向电压作用下,位垒高度将由原来的 qV_s 增加到 $q(V_s + U)$ 。由于位垒高度增加,于是多子向对方的扩散减少。在这种情况下,漂移电流

超过了扩散电流,PN 结产生了反向电流。反向电流是由少子的漂移引起,其数值远小于正向电流。

在一定温度时,由于热激发所产生的少子浓度数量是一定的,只要外加电压所产生的外电场足以把它们吸引过来形成电流,继续增加外加电压时,电流的数值趋于一定值,称此电流为反向饱和电流并用 I_s 表示。

二、PN 结的电流方程

上述定性讨论了 PN 结在外加电压下的电压与电流关系。由半导体物理可以推导出 PN 结两端电压与流过 PN 结电流的关系式称 PN 结的电流方程,电流 I 与外加电压 U 的关系式如下:

$$I = I_s(e^{U/U_T} - 1) \quad (1-3)$$

式中 I_s 即为反向饱和电流; $U_T = kT/q$ 称等效电压; k 是玻兹曼常数,在温度 $T = 300\text{ K}$ 时, $U_T \approx 26\text{ mV}$ 。

当外加正向电压时,一般 $U \gg U_T$,因此正向电流可近似表示为

$$I = I_s e^{U/U_T} \quad (1-4)$$

当外加反向电压时,一般 $e^{U/U_T} \ll 1$,因此反向电流近似为

$$I \approx -I_s \quad (1-5)$$

三、晶体二极管的伏安特性

晶体二极管实际就是一个 PN 结,两端加上接触电极,引出线和管壳构成。它的结构示意图如图 1-10(a)所示,它的电路符号如图 1-10(b)所示,图中箭头表示正向电流的流通方向。

(一)理想伏安特性

伏安特性就是指二极管两端的电压和流过二极管电流之间的关系曲线。

二极管的理想伏安特性,可由 PN 结电流方程式(1-3)表示,即

$$I = I_s(e^{U/U_T} - 1)$$

由上式可描绘出外加电压与流过二极管电流之间的关系曲线如图 1-11 所示。由图可见,外加正向电压时,电流 I 呈指数增长,外加反向电压时,电流 $I \approx -I_s$,其值基本不变。

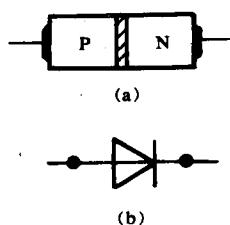


图 1-10 晶体二极管
(a)结构示意图;(b)电路符号。

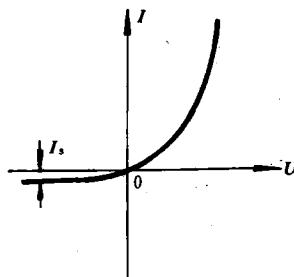


图 1-11 二极管的理想伏安特性

(二)晶体二极管的实测伏安特性

实际晶体二极管的伏安特性可用图示仪测量,也可用逐点描绘法进行测量。图 1-12 所示

是逐点测量晶体二极管伏安特性的原理电路,测量时将直流电源 E 从零开始逐点增加,同时相应测量管子两端的电压和流过管子的电流,便可以测得一组数据,根据测试数据绘成伏安特性曲线如图 1-13 所示。

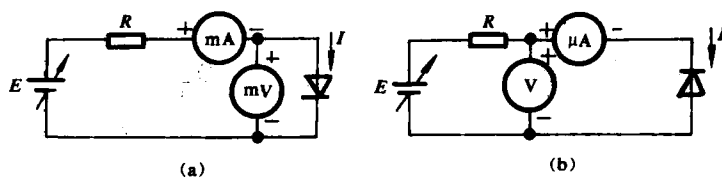


图 1-12 测量二极管伏安特性电路

(a) 正向特性; (b) 反向特性。

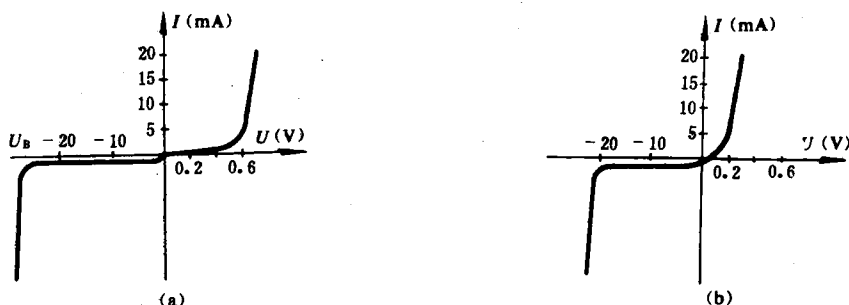


图 1-13 实测二极管伏安特性

(a) 硅二极管; (b) 锗二极管。

实际测得的晶体二极管伏安特性与上述理想伏安特性有几点差别:

1. 在正向伏安特性的起始部分,由于正向电压较小,外电场还不足以克服 PN 结内电场,这时正向电流几乎为零,二极管呈现出一个大电阻,好象有一个门坎称为“门限”电压,硅管的“门限电压” $U_T = 0.5 \sim 0.6 \text{ V}$;锗管的门限电压 $U_T = 0.1 \sim 0.2 \text{ V}$ 。当正向电压大于门限电压时,内电场被大大削弱,正向电流随正向电压迅速增加。

2. 加反向电压时,反向电流数值很小。在同样温度下,硅管的反向电流比锗管小许多。锗管的反向饱和电流在 μA 数量级;硅管的反向电流在 nA (10^{-9} A) 数量级。反向电流实际还包含了二极管的漏电流,它随电压有微量增加。

3. 当反向电压高达某一数值时,反向电流激增,称为“反向击穿”,该电压称为反向击穿电压 U_B 。反向击穿时,产生很大的反向电流,一方面破坏了二极管的单向导电性,另一方面容易烧坏管子。一般情况下(如用作整流)是不允许进入击穿范围的。关于二极管的击穿现象后面要进一步讨论。

四、晶体二极管的电阻

普通电阻元件,其阻值 R 是常数,即电阻两端电压与流过电阻的电流保持线性关系,称这类电阻为线性电阻。

对于晶体二极管,由二极管伏安特性可知,二极管是一非线性元件。即二极管两端电压与流过二极管的电流呈非线性关系,二极管的电阻随工作电流而变化称非线性电阻。

非线性电阻通常需用直流电阻 R (又称静态电阻) 和交流电阻 r (又称动态电阻或微变电阻) 来进行描述。

(一) 直流电阻

二极管两端直流电压 U_D 与电流 I_D 之比定义为直流电阻 R

$$R = \frac{U_D}{I_D} \quad (1-6)$$

由图 1-14 所示, 加正向电压 U_D , 流通电流 I_D , 由 U_D 和 I_D 决定工作点 Q 。原点 O 与 Q 点连成一条直线, 由几何关系可知

$$\tan \alpha = \frac{I_D}{U_D} = \frac{1}{R}$$

可见: (1) 原点 O 与 Q 点连线的斜率的倒数就是正向电阻 R 。

(2) 直流电阻与工作点 Q 有关, 工作点不同, 直流电阻值也不同。

(3) 加反向电压时, 电流很小, 因而反向直流电阻值很大。



图 1-14 二极管的正向直流电阻

(二) 怎样确定工作点 Q

图 1-15(a) 所示为简单二极管电路, 它由电源 E_D 、负载电阻 R_L 和二极管 D 构成, 试求回路电流 I_D 和二极管直流电阻 R 。

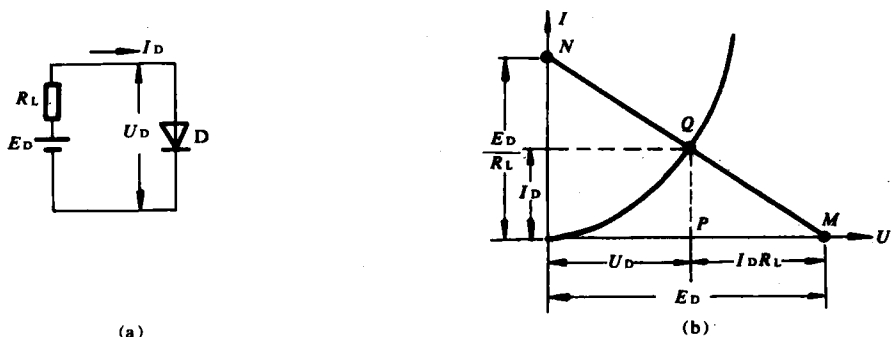


图 1-15 简单二极管电路分析

由于二极管的直流电阻与工作点 Q 有关, 所以首先要确定二极管的工作点 Q , 通常可采用图解法。由电路可列出方程

$$U_D = E_D - I_D R_L \quad (1-7)$$

式中 U_D 与 I_D 分别表示二极管两端直流电压和流过二极管的电流, 它们两者之间的函数关系可由伏安特性曲线表示

$$I_D = f(U_D) \quad (1-8)$$