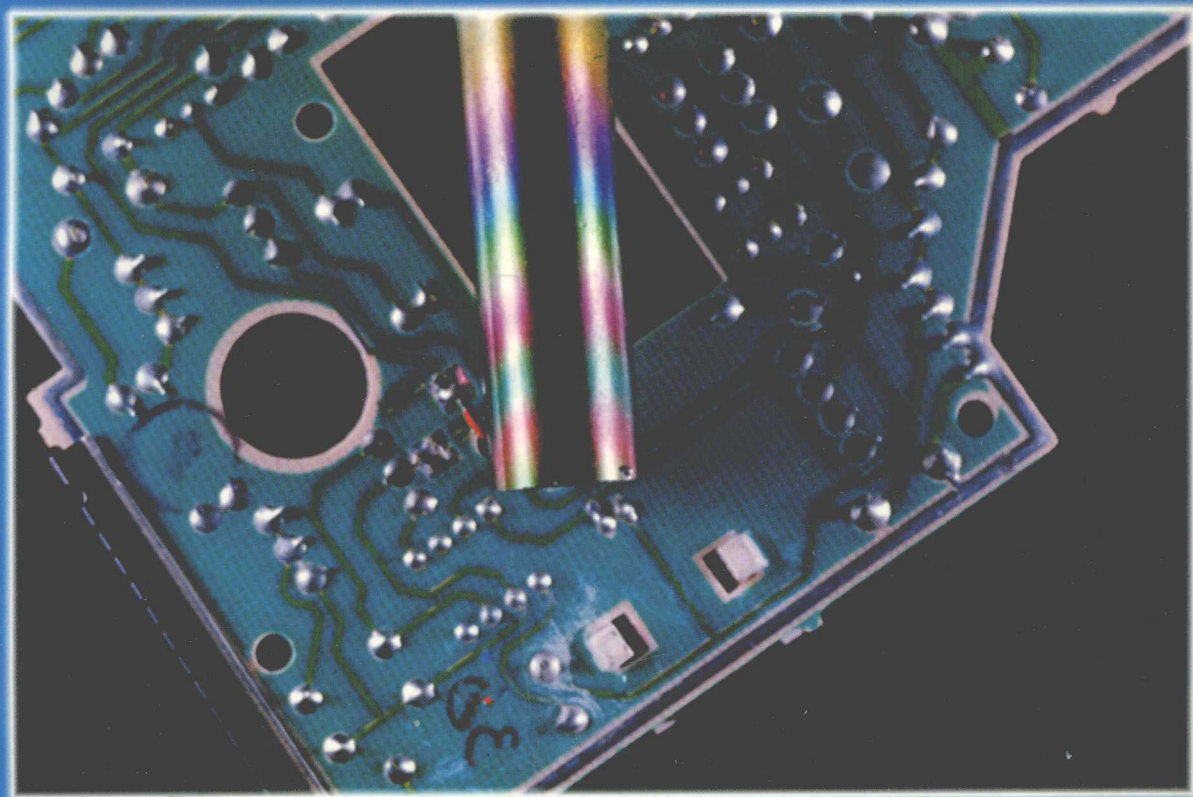


# 电子线路

吕哲明 主编

DIANZI XIANLU



中国铁道出版社

# 电 子 线 路

吕哲明 主编

中 国 铁 道 出 版 社

1997年·北京

(京)新登字 063 号

### 内 容 简 介

本书是根据铁道部中等专业学校电子线路课程教学大纲编写的。主要包括:绪论、晶体二极管与三极管、放大电路基础、场效应管及其放大电路、多级放大电路与集成运算放大器、负反馈放大电路、集成运算放大器的基本应用、低频功率放大电路、正弦波振荡电路及直流稳压电源等内容。为配合教学,每章附有习题。

本书可作为中等专业电工类电子技术基础教材,也可供从事电子技术基础的有关人员参考学习。

### 图书在版编目(CIP)数据

电子线路/吕哲明主编. —北京:中国铁道出版社,1997

ISBN 7-113-02703-2

I. 电… II. 吕… III. 电子电路 IV. TN7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 11567 号

## 电 子 线 路

吕哲明 主编

\*

中国铁道出版社出版发行

(北京市宣武区右安门西街 8 号)

责任编辑 倪嘉寒 封面设计 马 利

中国铁道出版社印刷厂印

---

开本:787×1092 1/16 印张:14 字数:340 千

1997 年 10 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:1—7000 册

---

ISBN7-113-02703-2/TN·105 定价:17.20 元

# 前 言

为了适应电子技术的飞速发展和教学改革的需要,铁路系统各中专学校(电子类专业)都感到应该有一本能与目前形势相适应的电子线路(模拟部分)教材。为此在铁道部中专通信专业教学指导委员会和电子线路(电子技术基础)课程组的领导、组织下,综合了铁路系统各中专学校电子类专业在电子线路课程的教学改革和各校教学经验的基础上,1994年首先编写了电子线路讲义。通过各铁路中专电子类专业试用两届后,1996年对讲义再次进行了审定和修改,然后重新编写了本教材。

本教材以国家教委1987年颁发的中专学校工科电工类(多学时)专业通用“电子技术基础教学大纲(模拟部分)”和铁道部中等专业学校电子线路(电子技术基础)课程组1991年颁发的铁路中专“电子线路课程教学大纲(试用稿)”为依据。

编写本教材的指导思想有以下几个方面:

1. 为了加强集成电路的主干作用,使其贯穿于整个教材的体系之中;同时考虑到中专学生的学习仍应符合循序渐进的认识规律。本教材在体系安排上以先介绍基本器件、基本放大原理、多级放大电路(包括直流放大)和集成运算放大器的工作原理,在掌握了基本器件、基本概念、基本放大电路原理和分析方法之后,集成电路的应用贯穿于反馈、振荡、功放和电源等专题性的各章之中,使集成运放的应用得到拓宽。

2. 在保证基本理论、基本知识和基本技能传授的同时,精简了分立元件的部分内容,加强了集成电路的应用。近年来随着电子技术的飞速发展,本教材结合专业对一些新元件、新电路、新技术的介绍有所增加。例如VMOS、双栅MOS、开关电容、模拟乘法器、有源滤波电路、桥式(BTL)功放、VMOS功放和开关电源等都作了分析和应用介绍,扩大了学生电子技术领域的知识面、增强了对专业的适应能力。

3. 本教材在具体内容上力求深入浅出,通俗易懂,便于教学。对电子器件,除了讲明工作原理、着重介绍外特性、参数、典型电路的分析和应用,避免繁琐的教学推导,以定性分析为主。

4. 根据中专学生的培养目标,加强学生的实践与应用能力,除了本教材力求理论密切联系实践,并要求实验单独设课,为此有电子线路实践(含大型综合练习)教材与本教材配套使用。

本教材授课时数为110左右,《电子线路实践》中实验20课时,大型综合练习一至两周。

本教材由南京铁路运输学校吕哲明主编,并编写绪论及第一、二、五、六章;株洲铁路机械学校钟兴均编写第七、九章;天津铁路工程学校袁裕民编写第四、八章并参编第五、六章;西安铁路运输学校张家琪编写第三章。内江铁路机械学校陈军主审。

在编写过程中铁路各中专电子教研室的老师们为本教材提出了许多宝贵的意见和建议,在此表示衷心的感谢。但由于编者水平所限、难免有所错误和不妥之处,希望各位老师不吝指正。

编 者

1997 年 4 月

# 目 录

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 绪 论                  | 1   |
| 第一章 晶体二极管与三极管        | 4   |
| 第一节 半导体的基础知识         | 4   |
| 第二节 晶体二极管            | 9   |
| 第三节 硅稳压二极管           | 15  |
| 第四节 晶体三极管            | 16  |
| 习 题                  | 24  |
| 第二章 放大电路基础           | 26  |
| 第一节 放大电路的基本概念        | 26  |
| 第二节 图解法分析放大电路        | 33  |
| 第三节 微变等效电路法分析放大电路    | 40  |
| 第四节 静态工作点的稳定及偏置电路    | 44  |
| 第五节 共基和共集放大电路分析      | 50  |
| 第六节 共射放大电路的频率特性      | 55  |
| 习 题                  | 57  |
| 第三章 场效应管及其放大电路       | 61  |
| 第一节 结型场效应管           | 61  |
| 第二节 绝缘栅场效应管          | 65  |
| 第三节 场效应管的主要参数和应用注意事项 | 70  |
| 第四节 场效应管放大电路         | 72  |
| 第五节 其它类型场效应管简介       | 75  |
| 习 题                  | 77  |
| 第四章 多级放大电路与集成运算放大器   | 80  |
| 第一节 多级放大电路           | 80  |
| 第二节 直接耦合放大电路         | 84  |
| 第三节 集成运算放大器          | 97  |
| 习 题                  | 100 |
| 第五章 负反馈放大电路          | 102 |
| 第一节 负反馈放大电路的基本概念     | 102 |
| 第二节 负反馈对放大电路性能的影响    | 108 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 第三节 深负反馈放大电路 $A_{vf}$ 的估算 ..... | 113 |
| 第四节 寄生反馈及防止 .....               | 116 |
| 习 题 .....                       | 118 |
| <b>第六章 集成运算放大器的基本应用</b> .....   | 121 |
| 第一节 理想集成运放的性能及基本组态 .....        | 121 |
| 第二节 集成运放的线性应用 .....             | 124 |
| 第三节 集成运放的非线性应用 .....            | 134 |
| 第四节 集成运放应用注意事项 .....            | 139 |
| 第五节 开关电容简介 .....                | 141 |
| 习 题 .....                       | 143 |
| <b>第七章 低频功率放大电路</b> .....       | 147 |
| 第一节 功率放大电路基础 .....              | 147 |
| 第二节 乙类推挽功率放大电路 .....            | 148 |
| 第三节 集成功率放大器 .....               | 161 |
| 习 题 .....                       | 165 |
| <b>第八章 正弦波振荡电路</b> .....        | 167 |
| 第一节 正弦波振荡电路的基本概念 .....          | 167 |
| 第二节 $LC$ 振荡电路 .....             | 171 |
| 第三节 $RC$ 正弦振荡电路 .....           | 176 |
| 第四节 振荡电路的频率稳定 .....             | 180 |
| 第五节 石英晶体振荡电路 .....              | 182 |
| 习 题 .....                       | 186 |
| <b>第九章 直流稳压电源</b> .....         | 188 |
| 第一节 单相整流电路 .....                | 188 |
| 第二节 滤波电路 .....                  | 193 |
| 第三节 硅稳压管并联型稳压电路 .....           | 198 |
| 第四节 晶体管串联型稳压电路 .....            | 201 |
| 第五节 集成稳压器 .....                 | 205 |
| 第六节 开关型稳压电源 .....               | 209 |
| 习 题 .....                       | 212 |
| 主要参考文献 .....                    | 216 |



# 绪 论

## 一、电子技术的发展与应用概况

电子技术从本世纪初开始发展,至今只有几十年的历史。目前,它的应用之广泛,已经涉及到工农业生产、国防、科研、气象、交通、医疗、企业管理以及日常生活等国民经济的各个领域,有力地促进社会生产力迅猛发展。

回顾电子技术的发展史,可以看出,它是随着电子器件的发明,更新先后经历了五个历史阶段,或称五代。每当新一代的器件诞生,就会出现换代的电子设备。从电子计算机的发展就可以充分地说明这一点。

第一代电子器件是电子管。1904年英国的弗莱明发明了电子二极管,同年意大利的马可尼就用二极管完成了跨洋无线电通信。1906年美国德赛雷斯特发明了电子三极管,为近代无线电电子工业的发展奠定了重要的基础。20年代到30年代电子管的性能不断完善,电子管电路在工业生产、通信和军事技术等方面得到广泛的应用。第二次世界大战以后,在1946年出现了世界上第一台名为“埃尼阿克(ENIAC)”的电子计算机,所用的电子管数量达一万八千多个,重达30t,耗电140kW/h,价值一千万美元,运算速度仅为5000次/s。电子管电路体积大,重量大,性能差,限制了电子设备的进一步发展和应用。

第二代电子器件是晶体管。1948年美国贝尔实验室的巴亨·肖克莱首先研制成晶体三极管,这是电子技术领域的一场革命。经过不断的改进和工艺完善,到1951年出现了各种晶体二极管和晶体三极管,1953年,世界上第一批晶体管收音机投放市场。1956年第二代电子计算机——晶体管计算机研制成功。1957年苏联发射的世界上第一颗人造地球卫星,装上晶体管自动控制设备。晶体管电路比电子管电路具有耗电省、体积小、性能好、价格低廉等优点,因此逐渐替代电子管,并广泛用于广播、通信,生产自动化等方面。

第三代电子器件是中、小规模集成电路。小规模集成电路是指单块晶片上包含几十个元件的集成电路,中规模集成电路是指单块晶片上包含100~1000个元件的集成电路。早在1952年英国科学家达·默就提出将晶体二极管、三极管集合在一个晶片上的设想。1958年美国德克萨斯州的电子仪器公司J·S基尔比制成了世界上第一个集成电路,1962年开始出现了各种数字集成电路,1964年开始出现了集成运算放大器。随之,第三代电子计算机——中、小规模集成电路计算机研制成功,它在运算速度、功能、体积、重量、成本等方面出现了质的飞跃,集成电路的出现标志着人类进入了微电子时代。

第四代电子器件是大规模集成电路。随着集成电路迅速发展,60年代末,出现了在米粒般大小的晶片上包含超过1000个元件的大规模集成电路。1972年出现了第四代电子计算机——大规模集成电路计算机,并在世界上迅速普及开来。同时也推动电子技术迅速渗透到各个领域。

第五代电子器件是超大规模集成电路。1977年美国人在 $30\text{mm}^2$ 的硅片上,集成了十五万多个晶体管。同年日本人在 $6.1\text{mm}\times 5.8\text{mm}$ 的硅片上,集成了十五万多个晶体管。它们被称



为超大规模集成电路。目前,普及到家庭的微型计算机被称为第五代电子计算机。每一次计算机的换代,体积减小原来的 1/10;价格减少为原来的 1/10;而运行速度增加 10 倍。

微电子技术的发展不仅为电子技术开拓了广阔的应用范畴,同时使集成电路制作精度上有新的突破,科学家们预言将来的电子设备体积更小,性能更好,人工智能计算机已经在局部功能上有所突破,人们过去想象中的神话般的故事将会变成现实。

## 二、本课程的研究对象和主要内容

如前所述,电子技术已经渗透到各个领域,不同领域使用的电子设备又是在不断更新,但构成电子设备的单元电路却是大同小异的。

基本单元电路可以分为两大类:模拟电子电路和数字电子电路。电信号的参量(幅度、频率和相位)随时间取值可以是无限多个,这样的信号是模拟信号。由此可知模拟信号随时间可以是连续变化,也可以不连续变化,如图 0—1(a)和(b)所示。产

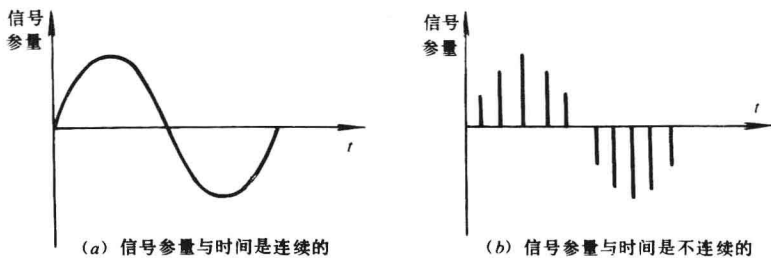


图 0—1 模拟信号

生、传输和处理模拟信号的电路称为模拟电子电路。电信号的参量随时间取值只能是有限多个,这样的信号是数字信号。由此可知数字信号随时间不可能是连续变化的,如图 0—2 所示。产生、传输和处理数字信号的电路称为数字电子电路。

本教材研究对象是模拟电子电路,全书共分十章。

第一章介绍半导体基础知识和晶体二极管、三极管器件。第二至七章是在放大电路基础上介绍各种实用放大电路的构成、原理和应用,如场效应管放大电路、多级放大电路,负反馈放大电路,集成运放和功放等。第八章介绍正弦信号的产生,第九章介绍整流、滤波和稳压电源。

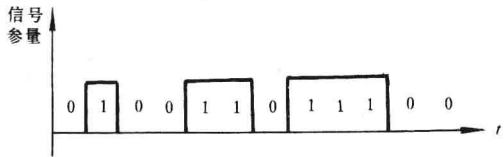


图 0—2 数字信号

## 三、模拟电路的发展方向

模拟电路也随着电子器件的发展内容不断更新,从电子管电路逐渐被晶体管电路所代替,发展到目前随着集成运算放大器的商品化,其价格低廉、性能完善、品种的增加正在逐步替代着晶体管分立元件的电路,如电压放大、功率放大、稳压电源、振荡、调制与解调等电路均可以由集成电路来构成。

当今数字电子技术也随着数字集成电路的发展,许多设备日趋数字化,模拟电路的作用也更为重要,它需要实现模拟和数字电路的接口,因此有一些集成电路具有模拟和数字混合的电路,模拟电路的研究和开发是提高电子系统性能的关键。

当今模拟电路的研究集中在如下几个方面:

1. 开发更通用的模拟集成电路；
2. 开发降低噪声、提高线性程度、扩大动态范围的电路；
3. 开发高频、高速器件及电路；
4. 开发降低功耗、提高精度的电路。

目前模拟电子技术正在进一步研究开拓的技术有开关电容电路、开关电流电路、单片的各种有源滤波器、增量调制解调器及用数字电路进行自动调谐、校正和补偿的模拟电路

最后要说明学习本课程的几个注意问题！

1. 目前电子设备的构成是分立元件和集成电路并存。分立元件电路和集成电路没有本质上的区别，分立元件中的一些单元电路仍是集成电路的基本组成部分，是集成电路的细胞。要了解和掌握集成电路的各种应用，是十分重要的，但是了解和掌握分立元件电路同样是十分重要的。

2. 电子线路中的二、三极管、场效应管、运算放大器等电子器件是有源器件，也是非线性器件。用这些器件构成的电子线路在分析方法上不同于由普通电阻、电容和电感构成的线性电路。在不输入交流信号（称为静态）和输入交流信号（称为动态）时，电路有不同的分析内容和分析方法，即使是输入小信号和输入大信号时其分析方法也不相同。学习中着重掌握电路的工作原理、分析方法和基本计算。

3. 电子线路是一门实践性很强的课程，有与之相配合的实验内容，通过实验进一步验证理论，通过理论进一步指导实践。要掌握好电子器件的性能和测试方法，以及电路的调整、测试和故障的排除。动手能力和解决实际问题的能力，是衡量学好本课程的主要依据。

# 第一章 晶体二极管与三极管

## 第一节 半导体的基础知识

所有的半导体器件,如晶体二极管(简称二极管)、晶体三极管(简称三极管)、特种管、场效应管以及集成电路的芯片等都是由半导体材料(如锗、硅和化合物半导体)制成的。为了研究它们的工作特性,首先应了解有关半导体一些基础知识。

### 一、半导体的导电性能

自然界的物质按其导电性能可分为导体、半导体和绝缘体三类。导电性能决定材料的电阻率 $\rho$ 。导体的电阻率很小,绝缘体的电阻率很高,而半导体的电阻率介于导体和绝缘体之间,同时半导体的导电性能受外界条件和杂质的影响很大。当温度升高时,其电阻率下降;当光照增强时,电阻率下降;当掺入微量其它元素(称为杂质)时,电阻率显著下降。半导体这些特点,由它的原子结构所决定。

我们知道物质是由分子组成,分子由原子组成,而原子则是由带正电的原子核和带负电的电子构成,电子分层围绕原子核运动,正电荷与负电荷相等,正常的原子是中性的。分层运动的电子具有不同的能量,每一层轨道对应一个特定的能量值,称为“能级”。内层的电子受原子核束缚力较大,能级低,外层的电子受原子核束缚力较小,能级高。低能级的电子获得能量后可以跃迁到高能级上,高能级的电子放出能量后也可以回到低能级上。最外层的电子称价电子,获得足够能量后容易挣脱原子核的束缚,成为自由电子,称为“激发”。

导体的原子结构特点是电子层数多,最外层价电子数为1~2个,在常温下容易脱离原子核的束缚成为自由电子,在电场作用下作定向运动形成电流。绝缘体的原子结构特点是电子层数少,最外层的电子数在7~8个稳定状态,受原子核束缚力大,在常温下几乎不能成为自由电子,导电性能差。而半导体的原子结构特点是电子层数为3~4层,最外层价电子数是4个,均介于导体和绝缘体之间,因此半导体的导电性能也介于导体和绝缘体

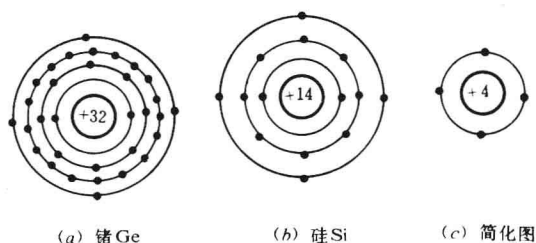


图 1—1—1 锗和硅的原子结构和简化图

之间。常见的锗和硅的原子结构图如图1—1—1所示。锗原子有4层电子,硅原子有3层电子,最外层价电子数都是4个。最外层的价电子受原子核束缚力小,容易挣脱出来成为自由电子,内层电子受原子核束缚力大,不能脱离出来,它和原子核一起组成稳定的惯性核,并且带有4个电子电量的正电,可简化原子结构图,如图1—1—1(c)所示。

## 二、本征半导体

### (一)本征半导体的结构

纯净的半导体称为本征半导体,常用的硅和锗经过“拉单晶”工艺以后,成为单晶体,其原子在空间排列整齐,原子之间距离相等,每个原子所属的四个价电子,不仅围绕着自身的原子核运动,而且还受到相邻原子核的吸引。这样,每个原子的四个价电子就为相邻的四个原子所共有。因此看起来每个原子的最外层有八个电子(四个是本身的价电子,其余四个是相邻原子的价电子),这种结构称为共价键结构,如图 1—1—2 所示。共价键结构是很稳定的。在热力学零度( $-273^{\circ}\text{C}$ )时,价电子没有能力跳出共价键成为自由电子,但是在室温( $25^{\circ}\text{C}$ 左右)下,少数价电子就能获得足够的能量,脱离共价键的束缚成为自由电子,同时在该键留下一个空位称为“空穴”,如图 1—1—3 所示。这个过程称为本征激发。

本征激发的结果产生了电子空穴对,温度升高,本征激发加剧,电子空穴对也随之增加,导电能力也提高。另一方面,自由电子在运动中又很容易与空穴重新结合而消失,这种相反的过程称为“复合”。在一定温度下,本征激发和复合不断进行,但电子—空穴对却始终保持一定的数目,即处于动态平衡的状态。

### (二)半导体中的载流子及电流

半导体导电的特点表现为有两种载流子:电子和空穴。半导体中的自由电子带负电荷,在外电场作用下逆电场定向移动形成电子电流。半导体中的空穴很容易由相邻原子的价电子来填补,使该价电子原来所在的共价键中又出现一个空穴,这个空穴又可被相邻原子的价电子填补,再出现空穴。这样,在半导体中出现了价电子填补空穴的运动,在电场作用下,填补空穴的运动无论在形式上还是在效果上都相当于带正电荷的空穴顺着电场定向移动,形成空穴电流。所以半导体中有两种参与导电的载流子,即带负电荷的自由电子和带正电荷的空穴。在电场作用下,电子形成电子电流,空穴形成空穴电流,虽然两种载流子运动方向相反,如图 1—1—4 所示,但所带电荷也相反,所以两种载流子产生电流的实际方向相同。

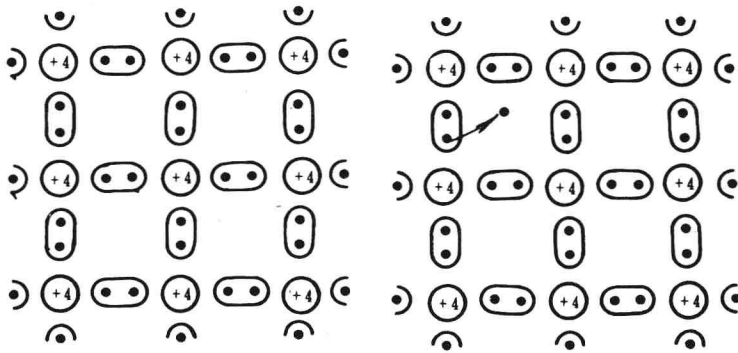


图 1—1—2 硅或锗共价键结构示意图

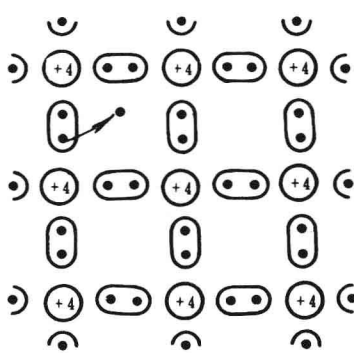


图 1—1—3 本征激发

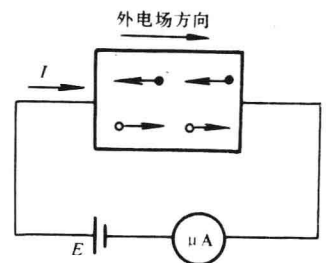


图 1—1—4. 载流子在外电场作用下的运动

半导体中有两种电流:一种是在外电场作用下形成的漂移电流,另一种是由于浓度差形成的扩散电流。

在半导体两端施加一定电压。那么,在这个外电场作用下,半导体中电子和空穴作相反方向运动而形成的电流称为漂移电流。由于它们产生电流的实际方向相同,所以漂移电流是这两

种载流子形成电流的总和。在本征半导体中,尽管电子和空穴的浓度一样,由于空穴导电实质上是共价键上束缚电子的移动,而自由电子的运动比束缚在共价键上的电子移动要容易,所以电子电流比空穴电流大些。

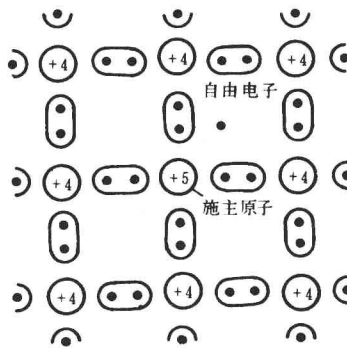
扩散运动是一种普遍的物理现象。如果半导体中某一部分出现了某种载流子浓度较大的情况,这种载流子就会由浓度高的地方向浓度低的地方作扩散运动,这种扩散运动形成的电流称为扩散电流。扩散电流的大小与载流子的浓度无关,与载流子的浓度差成正比。

### 三、杂质半导体

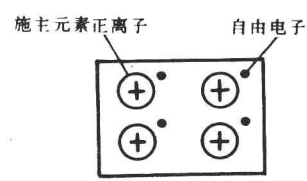
本征半导体载流子的浓度与温度有关,随温度的升高,载流子浓度近似地按指数律增大。在室温附近,温度每上升  $10^{\circ}\text{C}$ ,载流子浓度约增加一倍。在室温下,载流子浓度仅占价电子浓度的  $1/10^{12}$ ,所以其导电能力是很弱的。如果在本征半导体中掺入微量的其它元素,半导体的导电性能将发生显著的变化。这些微量元素称为杂质,掺杂后的半导体称为杂质半导体。按掺入杂质的不同,杂质半导体分为 N 型半导体和 P 型半导体。

#### (一) N 型半导体

在本征半导体中,掺入微量的五价元素,例如磷(P)、砷(As)等,由于五价元素有五个价电子,与相邻的四个硅原子结合成共价键,还多余一个不受共价键束缚的电子,成为自由电子。在室温下,自由电子浓度大为增加,导电能力也大为加强。这种半导体主要靠自由电子导电,所以称为电子型半导体或 N 型半导体。在 N 型半导体中,自由电子浓度增加了,



(a) N 型半导体结构示意图



(b) N 型半导体简化示意图

图 1—1—5 N 型半导体

空穴与电子复合的机会增多,空穴浓度反而比本征半导体空穴浓度低,因此,电子是多数载流子,简称多子;空穴是少数载流子,简称少子。五价元素称施主杂质,由于构成共价键时失去一个电子而变成带正电的离子,如图 1—1—5 所示。

N 型半导体中,每掺入一个五价元素就形成一个自由电子和一个杂质元素正离子,在图 1—1—5(b)中,⊕为杂质元素正离子,“·”为自由电子。必须注意,在导电过程中,施主元素的正离子是不能移动的,只有载流子:即电子(多子)和空穴(少子)才能移动。整个 N 型半导体呈中性。

#### (二) P 型半导体

在本征半导体中,掺入微量的三价元素,例如硼(B)、铝(Al)等,由于三价元素只有三个价电子,与相邻的四个硅原子结合成共价键时,形成一个空穴,并且很容易被相邻的价电子填补,使相邻的硅原子出现一个空穴。在室温下,空穴浓度大为增加,导电能力也大为增加。这种半导体主要靠空穴导电,所以称为空穴型半导体或 P 型半导体。在 P 型半导体中,空穴浓度增加了,空穴与电子复合的机会增多,电子浓度反而比本征半导体电子浓度低,因此空穴是多数载

流子,简称多子;电子是少数载流子,简称少子。三价元素称受主杂质,由于构成共价键时增加一个电子而变成带负电的离子,如图 1—1—6 所示。

P 型半导体中,每掺入一个三价元素就形成一个空穴和一个杂质元素负离子,在图 1—1—6(b)中, $\ominus$ 为杂质元素负离子,“ $\cdot$ ”为空穴。必须注意,在导电过程中,受主元素的负离子是不能移动的,只有载流子:

即空穴(多子)和电子(少子)才能移动。整个 P 型半导体呈中性。

#### 四、PN 结

PN 结是各种半导体器件的基础,掌握 PN 结的特性,对于正确理解半导体的性能是很重要的。

##### (一)PN 结的形成

在一块硅或锗的本征半导体两边,掺入不同的杂质,使其一边形成 P 型半导体,另一边形成 N 型半导体。那么在两种半导体的交界面就形成 PN 结。如图 1—1—7 所示。

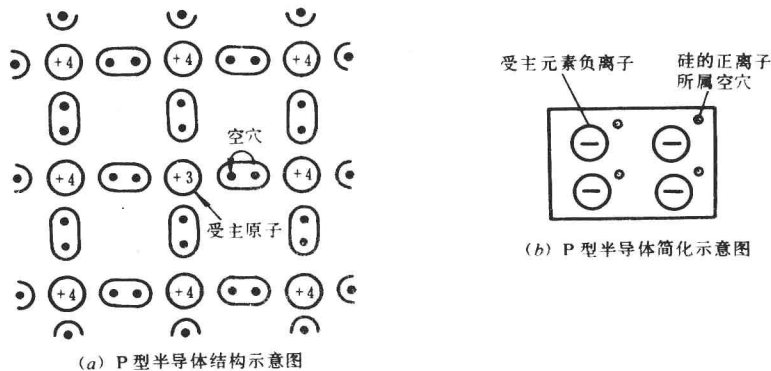


图 1—1—6 P 型半导体

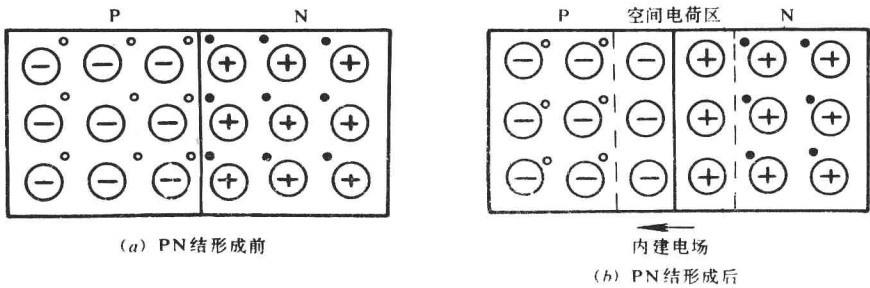


图 1—1—7 PN 结的形式

由于 P 型半导体和 N 型半导体交界面两侧,电子和空穴存在浓度差。N 区的多子——电子向 P 区扩散,并与 P 区的空穴复合,N 区留下正离子,在交界面 N 区一侧形成正电荷区;与此同时,P 区的多子——空穴向 N 区扩散,并与 N 区的电子复合,P 区留下负离子,在交界面 P 区一侧形成负电荷区。这些不能移动的正、负离子在交界面附近形成一个很薄的空间电荷区,这个空间电荷区内产生一个由 N 区指向 P 区的电场  $E_{内}$ ,称为内电场,如图 1—1—7(b)所示。随着扩散的进行,空间电荷量增多,空间电荷区增宽,内电场增强。但内电场的增强又将阻碍两边多子的扩散而都有利于两边少子的漂移运动(P 区的电子逆着内电场方向漂移到 N 区,N 区的空穴顺着内电场方向漂移到 P 区)。漂移电流的大小决定于少子的数量。所以 PN 结开始形成时,由于浓度差别大,扩散电流占优势,随着扩散的进行,内电场加强,使扩散电流减弱。当浓度差造成的扩散电流和内电场作用下的漂移电流相平衡时,N 区向 P 区扩散过去多少电

子,同时就有同样数量的电子被内电场拉到N区;空穴也一样。于是,交界面两侧处于动态平衡。此时空间电荷不再变化,这个稳定的空间电荷区就是PN结。因空间电荷区的内电场存在电势差,故又称势垒区或阻挡层。这个电势差为PN结的势垒高度,通常锗PN结的势垒高度约为0.3伏,硅PN结的势垒高度约为0.7V。值得注意的是,空间电荷区中没有载流子,载流子均被复合耗尽了,留下不能移动的正、负离子,所以PN结又称耗尽层。

## (二)PN结的单向导电特性

PN结的单向导电特性表现为:当PN结外加正向电压时,PN结呈现较小的电阻,有较大电流流过PN结;当PN结外加反向电压时,PN结呈现较大的电阻,流过PN结的电流极小。

### 1. 外加正向电压

PN结的P区经电阻 $R$ 接电源正极,N区接电源负极,如图1—1—8(b)所示,叫做外加正向电压或正向偏置电压,简称正偏。在外电场作用下,多子被推向耗尽层,结耗尽层变窄,内电场被削弱,有利于多子的扩散运动。因此P区的多子——空穴不断注入N区,N区的多子——电子不断注入P区,多子的扩散电流通过外电路形成较大的正向电流 $I_F$ ,外加正向偏压稍有增加,就可以产生相当大的正向电流,通常在外电路中串一个电阻以限制电流。

PN结正偏时,由少数载流子形成的漂移电流,其方向与扩散电流方向相反,且与正向电流相比,漂移电流数值很少,可忽略不计。

### 2. 外加反向电压

PN结的P区经电阻 $R$ 接电源负极,N区接电源正极,如图1—1—8(c)所示,叫做外加反向电压或反向偏置电压,简称反偏。此时外电场与内电场方向相同,在在外电场作用下,使耗尽层附近P区的空穴离开耗尽层,N区的电子离开耗尽层,使耗尽层加宽,结果阻止了多子的扩散运动,扩散电流几乎为零但有利于少子的漂移运动。因为少子的浓度很低,在温度一定时,少子的浓度不变,所以少子在外电路形成的反向电流不仅很小,而且基本上不随外加电压增大而增加,故称为反向饱和电流,用 $I_S$ 表示。

总之,PN结加正向电压时,形成较大的正向电流;PN结加反向电压时,反向饱和电流很小。因此PN结具有单向导电特性。

## (三)PN结的电容效应

PN结除了有单向导电特性外,还有电容效应,按产生的原因不同可分为势垒电容和扩散电容。

### 1. 势垒电容 $C_b$

势垒电容是由耗尽层引起的。耗尽层中有不能移动的正、负离子,形成具有一定电荷量的空间电荷区,它相当于带有正、负电荷的电容器。当外加电压变化时,空间电荷的多少也随之改变,说明势垒区具有电容效应,势垒电容用 $C_b$ 表示。由理论分析可知,势垒电容 $C_b$ 的大小与

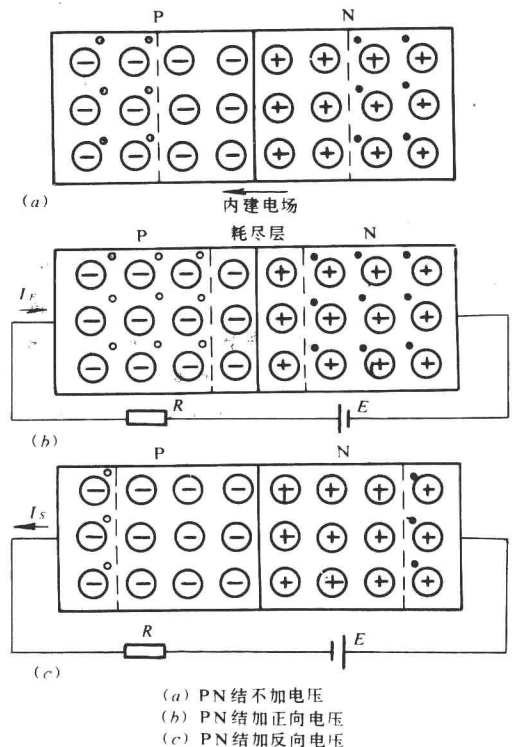


图1—1—8 PN结外加正向电压和反向电压



结面积、宽度、半导体材料的介电常数以及外加电压值有关。在正向电压下,势垒电容值较大,但因正向偏压下,PN 结呈现较小电阻与之相并,所以电容作用不明显;在反向电压下,势垒电容值较小,一般在几微微法至一、二百微微法之间,但因反向偏压下,PN 结呈现较大电阻,所以电容作用明显,利用这个特性可以制成变容二极管。势垒电容与外加电压的关系如图 1—9 所示。

## 2. 扩散电容 $C_d$

PN 结无外加电压作用时,P 区和 N 区中的少子可以认为其浓度是均匀的。当 PN 结外加正向电压时,P 区的空穴向 N 区扩散,成为 N 区中的少子。同样,N 区的电子向 P 区扩散,成为 P 区中的少子,在 N 区和 P 区的少子其浓度分布也是不均匀的,距离交界面越近,浓度越大,远离交界面处浓度减小,并逐渐全部消失。这种在扩散过程中,由少数载流子积累形成的电容效应称扩散电容  $C_d$ 。扩散电容随外加正向电压的增加呈指数律上升。

势垒电容  $C_b$  和扩散电容  $C_d$  都是非线性电容,且随外加电压而变化。在 PN 结等效电路中, $C_b$  和  $C_d$  是并联的,PN 结的结电容  $C_j$  是两者之和,即

$$C_j = C_b + C_d$$

在正向偏压下,结电容以扩散电容为主  $C_j \approx C_d$ ;在反向偏压下,结电容以势垒电容为主,  $C_j \approx C_b$ 。一般  $C_b$  和  $C_d$  都很小,当工作频率很高时,就要考虑结电容的影响。

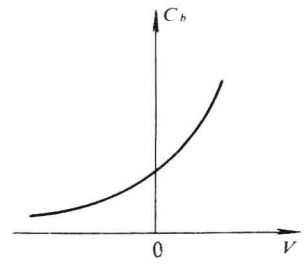


图 1—1—9 势垒电容与外加电压的关系

# 第二节 晶体二极管

## 一、二极管的结构

二极管是由 PN 结加上引出线和管壳构成的,它的电路符号如图 1—2—1(d)所示。P 区为阳极,N 区为阴极。

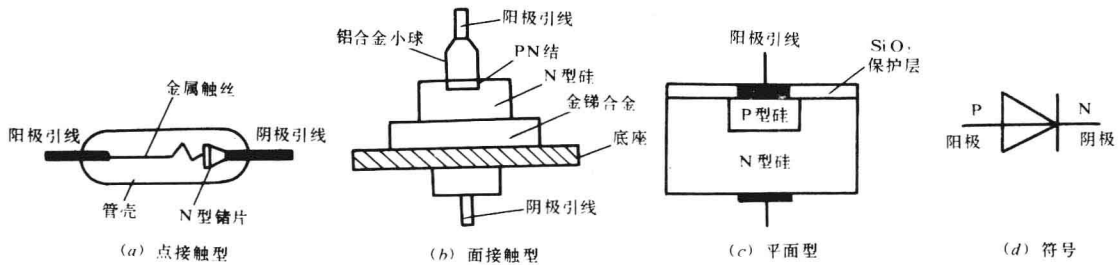


图 1—2—1 晶体二极管的结构和符号

二极管有许多类型。按材料分有锗和硅两种二极管。按结构分有点接触型。面接触型和平面型三类。

点接触型二极管结构如图 1—2—1(a)所示。它的特点是结面积小,结电容小,因此工作频率很高(几百兆赫),但不能通过大的正向电流。常用于小电流整流、高频检波和开关电路等。

面接触型二极管结构如图 1—2—1(b)所示。它的特点是结面积大,结电容也较大,能通过较大的电流,但工作频率低。一般用于电源整流电路。

硅平面型二极管结构如图 1—2—1(c)所示。采用高温扩散工艺形成 PN 结。结面积大的二极管,可通过较大的电流,适用于低频大功率整流电路;结面积小的二极管,适用于在数字电路中作开关管或高频整流电路。

## 二、二极管的特性

二极管的单向导电性可以用二极管的伏安特性来表示,也可以用伏安特性方程式来表示。

### (一)二极管的伏安特性

二极管两端的电压  $V$  和流过二极管的电流  $I$  之间的关系曲线,称为二极管的伏安特性曲线,如图 1—2—2 所示。

图 1—2—2(a)、(b)分别是面接触型硅整流管 2CP10 和点接触型锗检波管 2AP15 的伏安特性曲线,它们是由晶体管特性图示仪测得的。由图可以看出它们的特性。

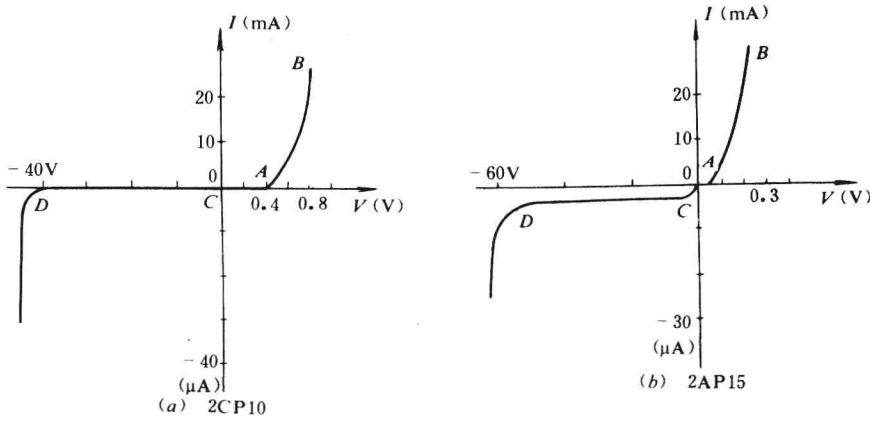


图 1—2—2 二极管伏安特性

### 1. 正向特性

当二极管两端加正向电压时,出现正向电流。当这个电压较小时,由于外电场还不足以克服内电场对载流子扩散运动所造成的阻力,因此正向电流仍然很小,二极管呈现较大的电阻,如图中的  $OA$  段,该区域通常称为“死区”。只有当正向电压超过一定数值以后,正向电流才开始明显上升,且符合指数规律。 $A$  点电压值称为死区电压(锗管约为  $0.1\text{V}$ ,硅管约为  $0.5\text{V}$ ),因此, $A$  点以后内电场被削弱,扩散电流开始增加。当正向电压增大到近于 PN 结的势垒电位差时(或称门限电压  $V_{on}$ ,锗管约  $0.3\text{V}$ 、硅管约  $0.7\text{V}$ ),如图中的  $B$  点,此时 PN 结的直流电阻比结两边半导体的体电阻以及电极接触电阻小得多,后者为线性电阻,因此随着电压增加电流呈线性上升,二极管呈现很小电阻。二极管正向电流不能过大,否则会过热而烧坏二极管。

### 2. 反向特性

当二极管加反向电压时,PN 结两边的少数载流子作漂移运动,形成反向电流。当反向电压较小时,反向电流随反向电压的增加而增大,如图中的  $OC$  段。但当反向电压增大时,为数极少的少数载流子几乎全部通过阻挡层,因此反向电流几乎与反向电压无关。这时的电流称反向饱和电流  $I_s$ ,硅管在纳安数量级,锗管在微安数量级。实际反向特性曲线不完全呈水平状,有一定的斜度,这是由 PN 结表面的漏电阻造成的。如图中  $CD$  段。

### 3. 反向击穿特性