

● 高等学校教学用书

● 徐章遂 何福友 赵圣元 古伍印 编

# 模拟电路基础

电子工业出版社

# 模拟电路基础

徐章遂 何福友 赵圣元 古伍印 编

电子工业出版社

3010345

## 内 容 简 介

为使《模拟电路基础》课程适应电子技术的发展，本书采用以模拟集成电路为主体内容，以分析方法为主线的方式来编写。通过对各种电子器件及电路的分析，阐述模拟电路的基本概念、基本原理和基本分析方法。这样既符合国家教委关于电子线路课程的基本要求，又使内容发展主线明确，理论的系统性加强，精炼和更新了内容。

本书主要内容有：电子器件（包括电子管），放大器构成原理（单级放大器、多级放大器、放大器中的反馈、大信号放大器、直流放大器、恒流源和恒压源、集成放大器等），放大器分析方法（图解分析法、网络参数分析法、负反馈分析法、零极点频率响应分析法、计算机辅助分析法等），集成运算放大器原理及应用，振荡原理，电源等。各部分内容均有电路实例及一定数量例题、思考题和习题。本书主要作为高等学校模拟电路课程教材，通过适当取舍内容，亦可作为电子技术课程教材，也可供从事电子技术人员作学习参考。

## 模 拟 电 路 基 础

徐章遂 何福友 赵圣元 古伍印 编  
责任编辑：王昌喜

•  
电子工业出版社出版（北京海淀区万寿路）  
电子工业出版社发行 各地新华书店经销  
军械工程学院印刷厂印刷

•  
开本：787×1092毫米1/16 印张：30 字数：730千字  
1989年6月第一版 1989年6月第一次印刷  
印数：1-6000册 定价：10.80元  
ISBN7-5053-0554-9/TN·202

# 前 言

《模拟电路基础》课程在电子类专业的教学计划中占有十分重要的地位,这是人所周知的。正因为如此,对于它的教学内容与方式等应如何改革,就成为多年来从事电子科学技术教育工作者关注的焦点。在全国与地方性的学术会议上经常对这一问题展开热烈的讨论,同行们各抒己见,畅所欲言,大家的目的只有一个:如何在有限的学时内,精选内容,改进教学方式,培养更合格的电子类专业人材。在“打好基础,精选内容,逐步更新,利于教学”的方针指导下,经过全国广大教师和有关出版社的共同努力,我国已出版了风格特色各异,适合培养各种类型人材的电子线路教材多种,这是十分可喜的成果。中国人民解放军军械工程学院徐章遂等同志编写的《模拟电路基础》一书就是这百花园中的又一新葩。

本书作者从当前我国实际情况出发,立足现实,注重发展,便于教学,提出“以分析方法为主线,以集成电路为主体内容”的编写指导思想。采用的方法是:(1)将模拟集成电路的主要内容集中在一章中介绍,这就包括了常用的放大器基本电路内容;(2)分章介绍放大器的各种分析方法,避免重复;(3)最后将各种类电路都落脚到集成电路上。这样的编写方式可谓不落窠臼,有可能在有限的学时内,使学生学到最基本、最重要的内容。

本书作者们均为从事电子线路教学工作多年的教师,积累有丰富的教学经验,因而全书编排次序合理,内容深入浅出,便于自学。可以预期,本书的出版,将会受到广大读者的欢迎。

张肃文 1988.7.17.

于武汉大学无线电信息工程系

# 编者的话

本书是根据国家教委关于电子线路课程的基本要求,在多年教学实践基础上编成的。第一、二章介绍了半导体器件工作原理和特性,由器件组成电路的原理和由基本模拟电路构成的集成放大电路;第三至九章分别结合各类模拟电路介绍了各种分析方法(如图解分析法、网络参数分析法、反馈电路分析法、零极点频率特性分析法、计算机辅助分析法等),便于理论结合实际,又便于扩充新技术成果;第十一、十二章介绍了电源,其中以较多篇幅介绍了目前所实用的集成稳压电源;考虑到目前使用现状,在第十章介绍了电子管电路,学习中也可放在第一章后面,这样可便于使用第三至九章的分析方法分析电子管电路。

教材中的符号基本采用机械电子工业部所规定的符号。通常以英文大写字母加大写字母下标表示直流(如 $V_{CE}$ 表示晶体管C-E间直流电压),最大值(如 $I_{CM}$ ),总平均值(如 $I_{AV}$ );大写字母加小写字母下标表示交变分量最大值(如 $I_m$ ),平均值(如 $I_{av}$ ),有效值(如 $I_e$ )。在频率不高的情况下,分析用有效值(如 $I$ 、 $V$ )进行;在频率较高时,采用复数(如 $\dot{I}$ 、 $\dot{V}$ )进行分析。以小写字母加大写字母下标表示总的瞬时值(如 $v_{CE}$ );以小写字母加小写字母下标表示交变分量瞬时值( $v_{ce}$ )。

参加编写的人员有:徐章遂编写绪论、第一、三、四、五、七章,并对全书内容进行选择、组织及定稿;赵圣元编写第二章;何福友编写第六、八、九章;古伍印编写第十、十一、十二章。范继业和绘图室绘制了全部电路图。

在此教材编写过程中受到了张肃文教授的指导。他对编写大纲提出了宝贵意见,最后对全书进行了审阅。

本书的出版,还得到了宫占贵等同志的大力支持,在此一并表示感谢。

由于编者对模拟电路发展的认识甚浅,难免有错误,请批评指正。

编者

一九八八年七月

于军械工程学院

# 目 录

绪 论 .....	( 1 )
<b>第一章 半导体器件工作原理</b> .....	( 3 )
第一节 半导体的基本知识 .....	( 3 )
第二节 杂质半导体 .....	( 5 )
第三节 PN 结 .....	( 7 )
第四节 半导体二极管 .....	( 16 )
第五节 半导体三极管 .....	( 19 )
第六节 场效应管 .....	( 31 )
习题 .....	( 42 )
<b>第二章 放大器构成原理</b> .....	( 45 )
第一节 单级小信号放大器 .....	( 45 )
第二节 多级放大器 .....	( 56 )
第三节 放大器中的反馈 .....	( 60 )
第四节 恒流源和恒压源 .....	( 68 )
第五节 差动放大器 .....	( 72 )
第六节 大信号放大器 .....	( 83 )
第七节 集成放大器 .....	( 91 )
习题 .....	( 107 )
<b>第三章 图解分析法</b> .....	( 114 )
第一节 小信号放大器的图解分析法 .....	( 114 )
第二节 大信号放大器的图解分析法 .....	( 120 )
习题 .....	( 123 )
<b>第四章 网络参数分析法</b> .....	( 127 )
第一节 电子器件的网络参数等效电路 .....	( 127 )
第二节 网络参数与物理参数的关系 .....	( 130 )
第三节 用网络参数分析单级放大器 .....	( 133 )
第四节 用网络参数分析多级放大器 .....	( 139 )
习题 .....	( 152 )
<b>第五章 负反馈放大器分析法</b> .....	( 159 )
第一节 概述 .....	( 159 )
第二节 方框图分析法 .....	( 161 )
第三节 其它几种类型的负反馈电路的分析 .....	( 167 )
第四节 负反馈放大器分析小结 .....	( 172 )
习题 .....	( 181 )

<b>第六章 集成运算放大器及其应用</b> .....	( 186 )
第一节 运算放大器的基本概念.....	( 186 )
第二节 集成运算放大器的二种基本电路.....	( 187 )
第三节 集成运算放大器的误差分析.....	( 191 )
第四节 集成运算放大器的线性运用.....	( 194 )
第五节 集成运算放大器在信号检测和处理方面的应用.....	( 210 )
习题.....	( 217 )
<b>第七章 放大器的频率响应分析法</b> .....	( 224 )
第一节 概述.....	( 224 )
第二节 频率响应极、零点分析法.....	( 226 )
第三节 上、下限频率计算.....	( 237 )
第四节 利用零、极点分析法分析放大器的频率响应.....	( 238 )
第五节 负反馈放大器的频率响应.....	( 259 )
习题.....	( 275 )
<b>第八章 振荡的原理</b> .....	( 281 )
第一节 正弦振荡原理.....	( 281 )
第二节 $LC$ 正弦波振荡器.....	( 287 )
第三节 $LC$ 振荡器的频率稳定度.....	( 296 )
第四节 晶体正弦波振荡器.....	( 303 )
第五节 $RC$ 振荡器.....	( 306 )
第六节 负阻振荡器.....	( 313 )
第七节 寄生振荡、间歇振荡和频率占据.....	( 315 )
第八节 非正弦振荡.....	( 318 )
第九节 集成振荡器.....	( 327 )
习题.....	( 329 )
<b>第九章 模拟电路计算机辅助分析</b> .....	( 337 )
第一节 网络拓扑基本原理.....	( 338 )
第二节 线性电路频域分析.....	( 347 )
第三节 非线性电路分析.....	( 370 )
第四节 程序举例.....	( 382 )
习题.....	( 394 )
<b>第十章 电子管及其电路</b> .....	( 396 )
第一节 概述.....	( 396 )
第二节 电子管工作原理.....	( 396 )
第三节 电子管电路.....	( 415 )
习题.....	( 424 )
<b>第十一章 整流电路与直流稳压电源</b> .....	( 427 )
第一节 概述.....	( 427 )
第二节 单相半波整流电路.....	( 427 )
第三节 单相全波整流电路.....	( 429 )
第四节 单相桥式整流电路.....	( 431 )

第五节	倍压整流电路	( 433 )
第六节	三相桥式整流电路	( 435 )
第七节	滤波电路	( 439 )
第八节	稳压管稳压电路	( 444 )
第九节	串联式晶体管稳压电路	( 446 )
	习题	( 451 )
<b>第十二章</b>	<b>可控硅及其应用</b>	<b>( 453 )</b>
第一节	概述	( 453 )
第二节	可控硅元件的结构、性能及参数	( 457 )
第三节	单相可控整流电路	( 465 )
第四节	单晶体管触发电路	( 460 )
第五节	可控硅元件的择选和保护	( 465 )
第六节	可控硅的应用	( 468 )
	习题	( 472 )



# 绪 论

电子线路是电子学的一门应用科学,是现代先进科学的组成部分之一,也是发展迅速的学科之一。电子学最初用于无线电通讯。1904年至1906年弗列明发明真空二极管(称电子管)、L·De·Forest制成具有放大作用的真空三极管,使电子学进入实用阶段,作为一门新兴科学而崛起。不久,又出现了离子管。它是在真空管中充上气体,外加电压后,气体电离,正离子和电子复合释放能量,能够发光,可作开关、稳压、发光显示用。这使电子学的实用技术更加完善,很快用于工业自动化、检测、计量、计算等方面。而且在解决实际问题中,逐步形成了自己的理论系统和分析方法,成为应用广泛的技术学科。

电子线路的发展促进了其它科学技术的发展,反过来科学技术的发展又对电子线路提出了更新的要求。对产品小型化、可靠性、高精度、廉价等方面,要求越来越高。而当时电子管体积大、寿命短,尤其电子在管内渡越时间长,转换速率受到限制。因此经W·Shockley、J·Bardeen和W·H·Brattain等共同研究,于1948年制成了晶体管,开创了电子科学的第一次革命,成为电子工业新的里程碑,促成了计算机、通讯等方面的发展。由于他们科学上的重大贡献,获得了1956年诺贝尔奖。这种器件体积小、重量轻、寿命长、价格低、功耗低、效率高,很快在许多电子产品中代替了电子管、离子管。尤其场效应管、发光二极管等的出现,更使半导体器件种类繁多,便于实用,许多产品实现了半导体化。但这并不意味着电子管完全被淘汰。因为在许多方面如显示设备、微波设备、广播电视发射设备中电子管仍占着优势。而且电子管也在不断改进,以适应新的要求。

单个电子器件与元件组成的电路称为分立电路(discrete circuit)。复杂的分立电路由于焊点多及布线等影响了可靠性及精度的提高。因此伴随着半导体工艺的发展,五十年代末得克萨斯仪器公司的基尔白,仙童半导体公司的诺依斯等人研究实现了集成电路(Integrated Circuit简称IC)。这是在一小块硅片上做成了由半导体管、电阻、电容等组成的电路,实现了“管”“路”结合。以后集成度(单个芯片上包含的元、器件数)越来越高(现已达几十平方毫米上制有百万个元器件)。这是电子学中的又一次革命,也是近代科学技术发展的新的标志。尤其是它的小体积、多功能、高可靠性、低功耗、价格低等优点,很快被各个行业所采用,形成机-电一体化产品、机-光-电一体化产品,渗入到国民经济、人民生活的各个领域。使我们这个时代到处充满电子气息。

电子线路分模拟的和数字的二类。本书中仅研究模拟电子线路。它是论述由电子器件、元件等组成的产生和处理模拟信号的电路或系统的功能、特性及分析法。其中电子器件是核心。我们现在所采用的电子器件是电子管、离子管、半导体管和半导体模拟集成电路。目前模拟集成电路不仅有线性集成放大器、模拟乘法器、稳压器,而且有音频、中频、高频放大器,功率输出块、A/D、D/A、V-F等转换器,这就使模拟电子线路的面貌焕然一新。不仅使线路设计、安装简化,而且节约工时,降低成本。既有利于整机小型化,可靠性也大大提高。目前已有许多电子

产品实现以集成电路为主体的线路。

在模拟集成电路中,线性集成放大器应用得最多。这种电路最初主要用于模拟计算机中作运算放大用,所以又称之为运算放大器(简称运放)。实际上它的功能不仅仅作运算放大,而且用于产生、处理模拟信号等方面。一般集成放大器都由小信号放大部分(分直流和交流放大)、功率放大(或大信号放大)、恒流源、恒压源等组成(如图0-1所示),外加直流电源、无源阻容网络、振荡器等辅助电路后,就可组成各种功能的模拟电子线路。因此以下各章将分别讨论半导体器件、小信号放大器、大信号放大器、振荡器等的性能及分析方法。

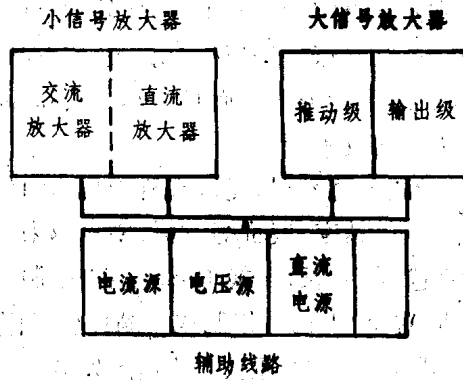


图0-1 集成放大器组成方框图

# 第一章 半导体器件工作原理

半导体器件已广泛用于电子线路中。而要了解半导体器件,又必须了解制作半导体器件的半导体材料的物理特性。本章将在介绍半导体物理的基础知识后,重点研究PN结的原理及由PN结组成的二极管、三极管和场效应管工作原理。

## 第一节 半导体的基本知识

半导体材料的导电性能介于导体和绝缘体之间。现在半导体器件所用的半导体材料都是锗和硅。它们的原子结构如图1-1-1 (a) 所示。由图可见,锗原子和硅原子的共同特点是最外层都是4个电子,故称4价元素。外层电子受原子核束缚力较小,称为价电子。常用图1-1-1 (b) 作为简化模型。其中用+4表示原子核和除价电子外的内层电子所组成惯性核的电荷。当很多原子排列成对称的周期点阵时,即形成晶体结构。

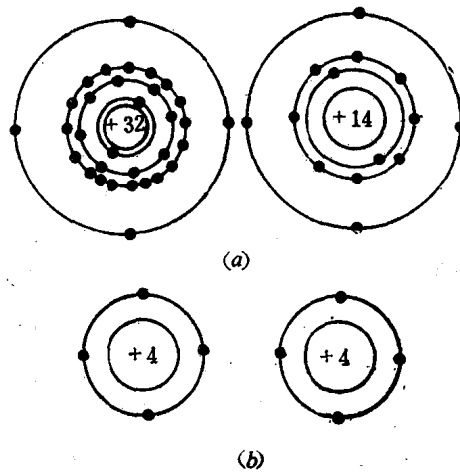


图1-1-1 锗和硅原子结构模型

如果晶体中所有质点都是对称排列的,则称为单晶。自然界里有天然的单晶。但大多数情况下需加工才能制成单晶。纯净的、结构完整的半导体称为本征半导体。

由于Ge和Si原子最外层具有4个电子,因此每个原子都希望从外面得到4个电子形成稳定状态。当硅或锗原子组成晶体后,原子间靠得很近,每个原子都可能从周围相邻原子的价电子中获得价电子。这样,原来分属每个原子的价电子就为晶体所“共有”。这种情况称为价

电子的“共有化”运动。两个相邻原子好象各有一个价电子为二者所共有,也就是每个价电子的个别运动轨道就变成两个相邻原子间两个价电子的公共轨道,形成了晶体中的“共价键”结构。如图1-1-2所示。共价键有很强的结合力。使各原子在晶体中按一定形式排列,形成点阵。而键中的电子受两个原子核引力的约束,如果没有足够的能量是不易脱离公共轨道的。因此在无外界激发(如绝对零度 $-273^{\circ}\text{C}$ )时,硅或锗晶体中没有自由电子存在,相当于不能导电的绝缘体。

当有外界激发时,共价键中的价电子获得足够能量 $E_g$ (硅为 $1.1\text{eV}$ ,锗为 $0.72\text{eV}$ )时,就挣脱共价键束缚,成为自由电子。同时,在原来共价键位置上就留下了一个空位。在外电场作用下,自由电子产生定向运动,形成电子电流 $i_n$ 。而失去电子后产生空位的原子的邻近原子的价电子就要迁入这个空位。这时,原来的原子中的空位消失,而邻近那个原子中就留下了新的空位。同样,这个新的空位又被其相邻的原子的价电子所填补。这样持续下去,其效果就好象空位在晶体中移动了。也就是说在外电场作用下,自由电子将逆电场方向移动,价电子以逆电场方向依次填补空位,产生空位移动。空位移动的效果与带正电荷的粒子运动一样,如图1-1-3所示。因此,在这种情况下我们把空位看作带正电荷的粒子,称为空穴,它相当于一个电子电荷的正电荷量。

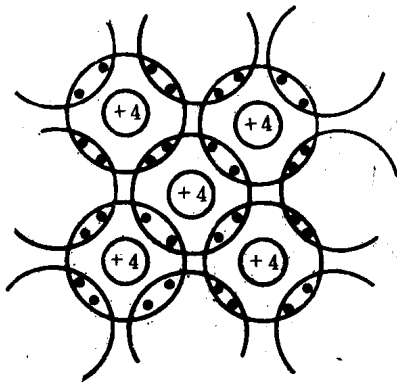


图1-1-2 锗和硅晶体共价键结构

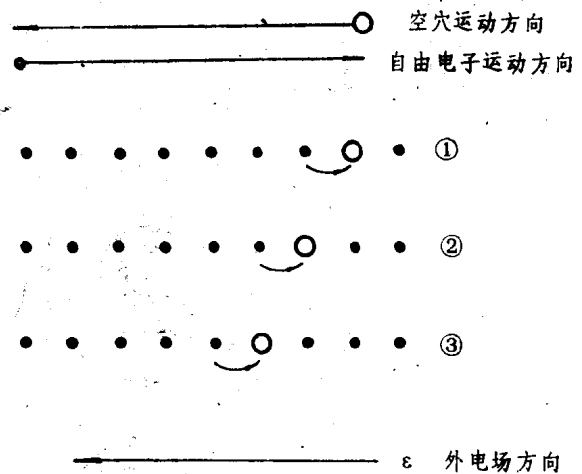


图1-1-3 空穴导电示意图

在电场作用下,自由电子和空穴都能导电,所以把它们统称为载流子(意为运载电流的粒子)。半导体中载流子的多少是衡量其导电能力的标志。

由上述可见,本征半导体中每产生一个自由电子,必有一个空穴,它们是成对出现的,故其数量也是相等的。

在本征半导体内,一方面本征激发不断产生自由电子-空穴对,这个过程称为产生;另一方面自由电子与空穴在运动过程中又会相遇,自由电子释放能量,填入空穴恢复共价键,自由电子-空穴对又消失,这个过程称为复合。在一定温度下,如果没有其它外界因素的影响,产生和复合会达到动态平衡,使晶体中单位体积的载流子数目(称载流子浓度) $n_i$ (电子浓度)或 $p_i$ (空穴浓度)保持一定的热平衡值,即:

$$n_n = p_i \quad \text{或} \quad n_i p_i = n_i^2$$

当温度升高,产生的载流子数目增多。因此在常温下,半导体有一定导电能力。但导电能力是很微弱的。如在 $T = 300\text{K}$ 时,Ge的本征载流子浓度为 $2.4 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ , $\text{Si}$ 的本征载流子浓度为 $1.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ ,原子密度为 $4.96 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$ 。可见它们的载流子浓度与原子密度相比是极其微小的。因此本征半导体的导电能力是极差的。但本征半导体的载流子数目随温度上升而增大,因而导电能力也增大。在室温附近,对硅来说,温度每升高 $8^\circ\text{C}$ 左右, $n_i$ 增加一倍;对锗来说,温度每升高 $12^\circ\text{C}$ 左右, $n_i$ 增加一倍。利用这种温度特性可做成热敏元件。同时,光的照射、磁场的作用,都可以改变 $n_i$ 的值。因而利用这种特性可作成光敏元件、磁敏元件等。

由上述可见:

- (1) 本征半导体中,在外界激发时,自由电子和空穴是成对出现的,它们的数量也相等。
- (2) 电子-空穴对的数量随温度上升增多。室温时其数量不多,半导体呈现的电阻率大。
- (3) 自由电子和空穴都是载流子,在电场力作用下,它们运动的方向相反,形成的电流方向一致,总电流为二者之和。

## 第二节 杂质半导体

本征半导体在常温下的导电能力是很微弱的。但在其中掺入少量其它元素后,导电能力大大增加。掺入其它元素后的半导体称为杂质半导体。根据所掺入元素不同,可分为N型半导体(电子型半导体)和P型半导体(空穴型)。

### 一、N型半导体

在本征半导体中如( $\text{Si}$ ,  $\text{Ge}$ )掺入五价元素的杂质(如砷、锑、磷等)后,这种五价元素的原子顶替四价元素的位置,将其中四个价电子与周围四价元素的价电子形成共价键,多余的一

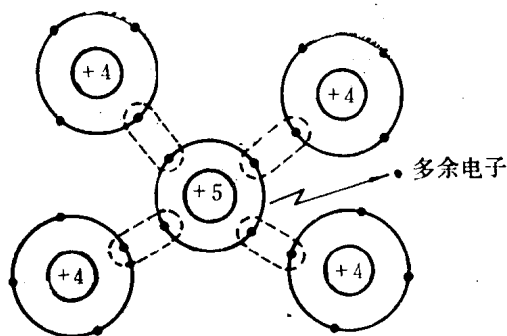


图1-2-1 N型半导体结构

个电子在共价键之外,如图1-2-1所示。这个价电子受热激发后只需获取很小能量(对 $\text{Si}$ 掺杂只有 $0.05\text{eV}$ ,对 $\text{Ge}$ 掺杂为 $0.01\text{eV}$ )就从原子中分离出来形成自由电子。我们称五价元素为施主杂质。施主杂质释放一个电子后,本身变成带一个电子电荷量的正离子,它被束缚在

晶格中,不能自由行动,不能参加导电,因而不会形成空穴。这是与本征激发不同的。

这种半导体的导电机构是杂质中的多余电子经激发后成为自由电子而形成的,故称N型半导体。其中自由电子浓度比空穴浓度大得多,称为多数载流子(简称多子)。称空穴为少数载流子(简称少子)。

掺杂后,整块半导体仍保持电中性,也就是正负电荷数量仍相等。即自由电子浓度等于施主杂质的离子浓度与空穴浓度之和。设平衡时自由电子浓度为 $n_{n0}$ ,空穴浓度为 $p_{n0}$ ,掺杂浓度为 $N_D$ ,于是:

$$n_{n0} = N_D + p_{n0} \quad \text{通常 } N_D \gg p_{n0}$$

所以

$$n_{n0} \approx N_D \quad (1-2-1)$$

掺杂后,半导体内载流子浓度增加,使导电能力提高。如硅中只掺入一亿分之一的施主杂质,在30°C时,导电率增大24100倍。

## 二、P型半导体

在本征硅中掺入少量的三价元素(如硼),它顶替晶体中一个四价元素的原子,与周围四个四价元素原子的价电子组成四个共价键时,就少一个价电子,形成一个空位。这个空位很容易被邻近的四价元素原子中的价电子所填充,如图1-2-2所示,从而形成一个空穴。由于掺杂元素在四价元素中能接受一个电子,故称受主杂质。受主杂质接收一个电子后,本身变成带一个电子电荷的负离子,这个负离子被束缚在晶格中,不能导电。

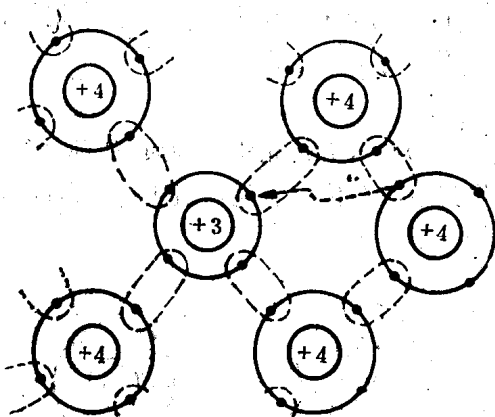


图1-2-2. P型半导体结构

这种半导体的导电机构是由受主杂质元素接受一个价电子在四价元素中形成空穴,故称P型半导体。其中空穴浓度远大于自由电子浓度,所以空穴为多数载流子,自由电子为少数载流子。

设平衡时空穴浓度为 $p_{p0}$ ,自由电子浓度为 $n_{p0}$ ,掺杂度为 $N_A$ ,并假定杂质全部电离,则根据电中性条件有:

$$p_{p0} = N_A + n_{p0} \approx N_A \quad (1-2-2)$$

由上述可见:

(1) 掺杂浓度与原子浓度相比虽然很小,却能使一种载流子浓度大大增加,导电能力也显著增强。掺杂浓度大,其导电能力提高较多。

(2) 掺杂只使一种载流子浓度增加,因此杂质半导体主要靠多数载流子导电。

(3) 杂质半导体中,热平衡的多子和少子的乘积等于常数 $n_i$ ,而与掺杂浓度无关。

### 第三节 PN结

#### 一、半导体中非平衡状态下载流子的运动

##### (一) 载流子的漂移运动

半导体受热后,载流子的热运动加剧,互相碰撞的结果,平均位移为零。也就是说不会发生迁移,当然也不会产生电流。如果半导体加上外电场,载流子在电场力作用下就会作定向运动。这种运动称为漂移运动。所形成的电流称为漂移电流。

载流子作漂移运动的平衡速度 $\bar{V}$ 是与外加电场强度 $\mathcal{E}$ 成正比的,对自由电子和空穴分别为

$$\bar{V}_n = \mu_n \mathcal{E} \quad (1-3-1)$$

$$\bar{V}_p = \mu_p \mathcal{E} \quad (1-3-2)$$

式中 $\mu_n$ 和 $\mu_p$ 分别为电子和空穴的迁移率,表示在单位场强(1V/cm)作用下,自由电子和空穴的平均速度(cm/s)。半导体的迁移率随温度上升而下降。因为原子热运动加剧后,对载流子的定向运动阻力增大。半导体中,自由电子的自由度大,它的迁移率也大。而空穴的漂移运动实质上是许多价电子依次填补空位的结果。这些运动束缚在共价键内,自由度比自由电子小得多,迁移率也小。在室温下,本征锗的 $\mu_n = 3900 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ , $\mu_p = 1900 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ;本征硅的 $\mu_n = 1400 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ , $\mu_p = 500 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 。

设空穴电流为 $i_p$ ,电子电流为 $i_n$ ,则在外电场作用下产生的总电流为:

$$i = i_p + i_n$$

$$\text{或 } j = j_p + j_n \quad (1-3-3)$$

式中 $j$ 为电流密度

根据电流密度的定义有:

$$j_p = qn_i \cdot \bar{V}_p = qp_i \mu_p \mathcal{E} \quad (1-3-4)$$

$$j_n = qn_i \bar{V}_n = qn_i \mu_n \mathcal{E} \quad (1-3-5)$$

$$\text{总电流密度 } i = q\mathcal{E}(p_i \mu_p + n_i \mu_n) \quad (1-3-6)$$

根据电阻率定义有:

$$\rho_j = \frac{\mathcal{E}}{j} = \frac{1}{q(p_i \mu_p + n_i \mu_n)} \quad (1-3-7)$$

在本征半导体内 $n_i = p_i$ ,于是:

$$\rho_j = \frac{1}{qn_i(\mu_p + \mu_n)} \quad (1-3-8)$$

在常温下,本征锗 $\rho_j$ 为 $47 \Omega \cdot \text{cm}$ ,本征硅的 $\rho_j$ 为 $2.14 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ 。一般半导体的电阻率在

$10^{-3} \sim 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 之间,导体电阻率小于 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ ,绝缘体电阻率大于 $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 。

掺杂后,N型半导体

$$\rho_n \approx \frac{1}{qn_n \mu_n} \approx \frac{1}{qN_D \mu_n} \quad (1-3-9)$$

当 $N_D = 1.5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 时, $\rho_n = 20 \Omega \cdot \text{cm}$ 。

### (二) 载流子的扩散运动

如果在半导体内部某部分出现了载流子浓度较大(如向半导体注入载流子),则高浓度区域的载流子就要向浓度低的区域扩散。这种由浓度差而产生的定向运动称扩散运动,产生的电流称扩散电流。图1-3-1所示为在P型半导体注入电子的情况。图中 $\Delta n_0 = n_0 - n_{p0}$ , $n_0$ 为 $x=0$ 处的自由电子浓度, $n_{p0}$ 为P型半导体热平衡时自由电子浓度。 $\Delta n_0$ 表示在 $x=0$ 处注入的自由电子浓度。由图可见,载流子沿 $x$ 轴方向扩散。若在 $\Delta x$ 距离上,载流子(即自由电子)浓度差为 $\Delta n$ ,则其比值 $\Delta n / \Delta x$ 称为浓度梯度。

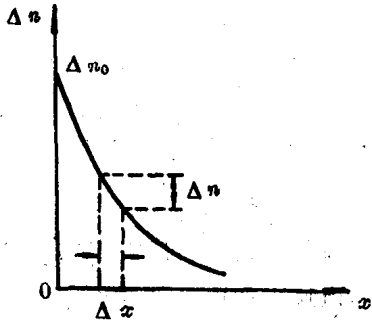


图1-3-1 载流子扩散过程

度梯度。

称单位时间内沿 $x$ 轴流过单位面积的载流子数为扩散密度 $f_n$ ,它与浓度梯度成正比,在图1-3-1所示情况下有:

$$f_n = -D_n \frac{\Delta n}{\Delta x} \approx -D_n \frac{dn}{dx} \quad (1-3-10)$$

式中负号表示自由电子浓度增量与 $x$ 轴方向相反。于是自由电子的电流密度为:

$$j_n = qD_n \frac{dn}{dx} \quad (1-3-11)$$

如果在N型半导体中注入空穴,则有:

$$j_p = -qD_p \frac{dp}{dx} \quad (1-3-12)$$

式中 $D_n$ 和 $D_p$ 分别为自由电子和空穴的扩散系数,表示载流子在晶体中作扩散运动的难易程度。

扩散系数(单位为 $\text{cm}^2/\text{s}$ )在室温下:

$D_n$ : 硅34 锗98

$D_p$ : 硅13 锗46

载流子在扩散过程中不断与多子复合,数量越来越少,到了某一距离完全消失。注入的少数浓度在某处浓度可表示为:

$$\Delta n = \Delta n_0 \exp\left(\frac{-x}{L_n}\right) \quad (1-3-13)$$

若是N型半导体中注入空穴,则有:

$$\Delta p = \Delta p_0 \exp\left(-\frac{x}{L_p}\right) \quad (1-3-14)$$



式中  $\Delta p_0 = p_0 - p_{n0}$ ,  $p_0$  为  $x=0$  处的空穴浓度,  $p_{n0}$  为 N 型半导体热平衡时空穴浓度,  $\Delta p_0$  表示  $x=0$  处注入的空穴浓度。

$L_n$  和  $L_p$  分别为自由电子和空穴的扩散长度。它表示载流子由注入到复合所走过的平均路程, 即载流子在扩散过程中浓度降低为注入时浓度的  $1/c$  时的距离。对硅和锗分别为:

$L_n$ : 硅 400~1000 $\mu\text{m}$     锗 1000~3000 $\mu\text{m}$

$L_p$ : 硅 200~600 $\mu\text{m}$     锗 700~2000 $\mu\text{m}$

## 二、PN 结形成

当 P 型半导体和 N 型半导体通过掺杂方式结合在一起时, 就形成了 PN 结。这两种半导体结合后, 在它们的交界处就出现了电子浓度和空穴浓度的差异。N 型内部电子很多而空穴很少, P 型内部空穴很多而电子很少。这样, 空穴和电子都要从浓度高的地区向浓度低的地区扩散。这种扩散的结果, 就使得 P 区和 N 区中原来的电中性条件被打破了。P 区一边失去了空穴, 留下了带负电的杂质离子; N 区一边失去电子留下带正电的杂质离子。由于在这个区域只有不能够动的空间电荷 (离子), 而无可移动的载流子, 故称空间电荷区, 或称耗尽区 (载流子耗尽了)。

正负离子交界处两边形成一个电位差  $V_D$  (称接触电位差), 从而产生内部电场。电场方向由 N 区指向 P 区, 如图 1-3-2 (a) 所示。这个电场的产生就要阻止载流子的继续扩散。从这个意义上说, 空间电荷区又可看作对多数载流子有阻挡作用的阻挡区。

另一方面, 这个内电场将使 N 区和 P 区中的少数子产生漂移运动, 补充它们原来失去的载流子。因此漂移运动的作用与扩散运动的作用相反, 它将使空间电荷区变窄, 内电场减弱, 这又使得扩散运动容易继续进行。而扩散运动进行又使得空间电荷区加宽, 内电场加强, 这又使得漂移运动得以进行。这一对互相联系而又互相矛盾的运动结果, 使 PN 结处于动态平衡状态, 即扩散运动与漂移运动相等, 空间电荷区不再变化, 形成稳定状态。

在动态平衡时, 每一种载流子扩散和漂移所形成的电流大小相等, 方向相反, 作用互相抵消, 因而这时 PN 结中没有净电荷流动, 如图 1-3-3 所示。

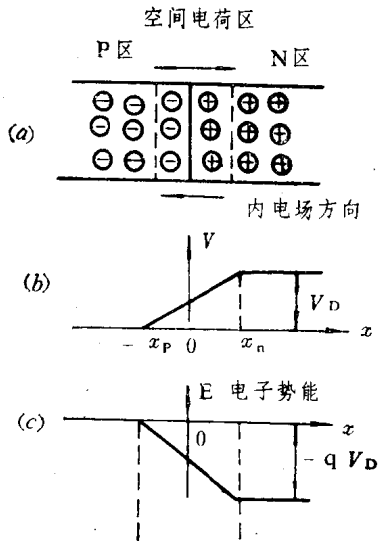


图 1-3-2 PN 结的形成

由图 1-3-2 可见, 空间电荷区存在电场, 表示区域两边的电位不相等, 即 N 区比 P 区高出  $V_D$ , 如图 1-3-2 (b) 所示。但结外要保持电中性, 即等电位。从能量观点看, 结两边电位不等, N 区一边电子势能  $E$  为  $q \times V_D$ , 即 P 区比 N 区高  $| -q \times V_D |$ , 如图 1-3-2 (c) 所示。

这表明电子要从 N 区到 P 区必须越过一个能量“高坡”。此“高坡”称为“势垒”, 故空间电荷区又称为“势垒区”。因此 N 区的电子必须具有克服电场力的动能才能爬上“高坡”。

理论分析证明: 接触电位差  $V_D$  (或内建电位差) 与掺杂浓度和本征浓度有关:

$$V_D = \frac{kT}{q} L_n \left( \frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) \quad (1-3-15)$$