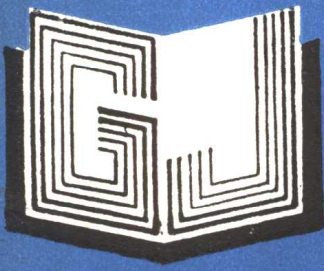


9815



高等学校教材

专科适用

模拟集成电路

沈阳电力高等专科学校 熊宝辉 主编

1.1



高等学校教材

————— 专 科 适 用 —————

模 拟 集 成 电 路

沈阳电力高等专科学校 熊宝辉

水利电力出版社

内 容 提 要

本书共分八章,内容有:模拟集成电路基础、模拟集成电路中的基本单元电路、场效应管模拟集成电路基础、集成运算放大器、集成功率放大器、正弦波振荡电路、集成直流稳压电源和可控整流电路等。本书在讲授基本电子元器件的基础上,以模拟集成电路为主要线索,侧重于模拟集成电路的基本原理和应用。在每一章的后面均有本章小结、思考题与习题和自我检测题,便于自学。书末附有常用的分立电子元器件和各种模拟集成器件的型号、参数等,便于应用。

本书可用作高等工程专科学校电气类、电子类各专业的模拟电子学教材,也可供职工大学相关专业使用,并可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

高等学校教材

专科适用

模 拟 集 成 电 路

沈阳电力高等专科学校 熊宝辉 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京市地矿局印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 17.75印张 396千字

1995年11月第一版 1995年11月北京第一次印刷

印数0001—2370册

ISBN 7-120-02402-7/TM·641

定价 13.70 元

前 言

本书是针对高等工程专科学校教育的特点，参照国家教委及原能源部制定的高等工程专科学校电子类各专业模拟电子学的教学基本要求，并考虑到电子技术的发展而编写的。在编写过程中，注意以应用性、实践性为原则，侧重于阐述基本概念、基本电路、基本分析方法和工程的实际应用。文字力求简练、通俗易懂，以便于自学。全书内容以基本电路为基础，在此基础上进而分析模拟集成电路。取材上，在满足常用电路需要的基础上，力争尽可能地满足电子技术的发展和电子新设备的需要，且典型电路力求实用。全书侧重于模拟集成电路的应用。本教材适用于电力系统通信、电厂热工过程自动化等电子类各专业，也可作为发电厂及电力系统、电力系统继电保护、远动、自动化、仪器仪表等专业以及职工大学电气类、电子类各专业的教材。

全书共分八章，其中绪论、第一章、第二章、第四章、第八章及附录由沈阳电力高等专科学校熊宝辉编写；第三章、第六章由北京电力高等专科学校任希编写；第五章、第七章由南京电力高等专科学校章忠全编写。熊宝辉担任主编，负责全书的组织和定稿工作。

本书承蒙南京电力高等专科学校胡宴如副教授审阅，并对书稿提出了详细的修改意见，编者在此表示衷心的感谢。

书中若有错误和不妥之处，欢迎广大师生和读者批评指正。

编 者

1994年9月

3601760

目 录

前言	
绪论	1
第一章 模拟集成电路基础	3
第一节 概述	3
一、集成电路的分类 二、半导体集成电路的特点 三、模拟集成电路示例及符号	
第二节 集成电路中的半导体材料	6
一、半导体 二、本征半导体 三、N型半导体 四、P型半导体	
第三节 PN结与半导体二极管	9
一、PN结 二、半导体二极管 三、硅稳压管	
第四节 半导体三极管	16
一、三极管的结构 二、三极管的放大原理 三、三极管的特性曲线 四、三极管的主要参数	
第五节 特殊半导体管	24
一、变容二极管 二、发光二极管 三、光敏二极管和光敏三极管 四、光电耦合器	
本章小结	27
思考题与习题	28
自我检测题	30
第二章 模拟集成电路中的基本单元电路	33
第一节 概述	33
一、三种基本放大单元电路 二、电流电压符号的说明 三、放大电路主要指标	
第二节 共发射极放大电路	35
一、放大电路的基本组成 二、工作原理	
第三节 等效电路法	40
一、三极管h参数等效电路 二、由特性曲线求h参数 三、利用微变等效电路分析放大电路性能	
第四节 共发射极放大电路的偏置与稳定	45
一、共发射极放大电路的偏置种类 二、不同偏置的特点	
第五节 共集电极放大电路	49
一、静态分析 二、动态分析 三、射极输出器的特点	
第六节 共基极放大电路	51
第七节 恒流源与恒压源电路	52
一、恒流源负载 二、恒流偏置 三、稳压偏置电路	
第八节 直流电位移动电路	56
一、提高第二级发射极电位的直流电位移动电路 二、利用PNP管进行直流电位移动的电路 三、利用恒流源进行直流电位移动的电路	
第九节 差动放大电路	58
一、基本差动放大电路 二、带有恒流源的差动放大电路 三、差动放大电路的其他几种输入、输出方式	
第十节 输出级	66

一、射极输出器作输出级 二、互补推挽输出级 三、复合管	
第十一节 多级放大电路与放大电路的通频带	70
一、放大电路的耦合方式 二、多级放大电路的分析计算 三、放大电路的通频带	
本章小结	79
思考题与习题	80
自我检测题	86
第三章 场效应管模拟集成电路基础	90
第一节 MOS场效应晶体管	90
一、增强型NMOS管的结构 二、工作原理 三、其他几种MOS管的结构与工作原理	
四、MOS管的特性曲线 五、MOS管的主要参数	
第二节 结型场效应管	96
一、基本结构 二、工作原理 三、特性曲线与主要参数 四、场效应管的特点与使用注意事项	
第三节 场效应管模拟集成电路基础	99
一、MOS二极管及其应用 二、MOS管镜像电流源 三、MOS管用作等效电阻	
四、CMOS互补电路	
第四节 场效应管基本放大电路	100
一、共源放大电路 二、源极输出器（共漏放大电路） 三、场效应管差动放大电路	
本章小结	105
思考题与习题	106
自我检测题	105
第四章 集成运算放大器	112
第一节 集成运算放大器概述	112
一、CF741集成运放内部电路简介 二、CMOS集成运放简介 三、集成运放的主要参数	
四、其他几种类型的集成运放简介	
第二节 基本运算电路	118
一、理想集成运放的条件 二、反相比例运算 三、同相比例运算 四、加法运算	
五、减法运算 六、积分运算 七、微分运算 八、对数运算与指数运算 九、对数乘法器	
第三节 集成运放应用中的负反馈	125
一、反馈的基本概念 二、反馈类型的判断 三、负反馈放大电路的一般表达式 四、负反馈对放大电路性能的影响	
五、深度负反馈条件下放大倍数的计算 六、放大电路的自激及其消除	
第四节 集成运放的其他应用	141
一、电压比较器 二、有源滤波器 三、采样保持电路	
本章小结	151
思考题与习题	151
自我检测题	157
第五章 集成功率放大器	161
第一节 功率放大器的基本概念	161
一、概述 二、功率放大器的基本类型	
第二节 乙类互补对称功率放大器	162
一、乙类互补对称功率放大器的原理电路 二、甲乙类互补对称功率放大电路 三、单电源互补对称功率放大电路	
四、准互补对称功率放大电路 五、桥式互补对称功率放大器	

第三节 集成功率放大器及其应用.....	168
一、LM386集成功放简介 二、LM386的应用电路 三、FS810集成功率放大器 四、FS810集成功放典型应用电路	
第四节 功率放大管和集成功放的散热问题.....	172
一、结温、环境温度与管耗 二、热阻与散热器 三、散热器的选择	
本章小结.....	174
思考题与习题.....	175
自我检测题.....	176
第六章 正弦波振荡电路.....	178
第一节 正弦波振荡电路基础.....	178
一、振荡电路组成 二、振荡平衡条件 三、起振与稳幅	
第二节 RC正弦波振荡器.....	181
一、RC串并联网络的频率特性 二、文式电桥振荡器	
第三节 LC正弦波振荡器.....	186
一、变压器耦合正弦波振荡器 二、三点式正弦波振荡器 三、集成LC正弦波振荡器	
第四节 石英晶体振荡器.....	192
一、石英晶体的基础知识 二、石英晶体振荡器	
本章小结.....	195
思考题与习题.....	196
自我检测题.....	198
第七章 集成直流稳压电源.....	200
第一节 单相整流滤波电路.....	200
一、单相整流电路 二、滤波电路	
第二节 直流稳压电路原理.....	205
一、硅稳压管稳压电路 二、晶体管串联型稳压电路 三、直流稳压电源的主要性能指标	
第三节 三端集成稳压器.....	210
一、三端固定输出集成稳压器 二、三端可调输出集成稳压器	
第四节 集成开关稳压电源.....	215
一、脉宽调制式开关稳压电源 二、直流变换型开关稳压电源 三、集成一体化稳压电源简介	
本章小结.....	219
思考题与习题.....	220
自我检测题.....	222
第八章 可控整流电路.....	224
第一节 晶闸管.....	224
一、晶闸管的结构 二、晶闸管的导电特性 三、伏安特性曲线 四、主要参数 五、其他几种类型的晶闸管简介	
第二节 单相可控整流电路.....	230
一、单相半波可控整流电路 二、单相桥式可控整流电路	
第三节 三相桥式可控整流电路.....	236
一、电路组成 二、工作原理 三、电路参数的计算	
第四节 晶闸管的触发电路.....	241
一、单结管触发电路 二、集成晶闸管触发器 三、单片机数字触发电路	

本章小结.....	252
思考题与习题.....	253
自我检测题.....	256
附录A 模拟集成器件选录.....	258
附录B 分立电子器件选录.....	263
附录C 部分集成器件和晶体管外引线排列.....	271
参考文献.....	273

绪 论

电子技术，是当代发展最为迅速的一门学科。电子技术的应用，已经渗透到各个领域，如通信、自动控制、医疗、农业、国防以及人们日常生活中的收音机、录音机、电视机、录相机、电子玩具等家用电器。

电子技术发展到今天，经历了一个不断发展的过程。1906年，美国德福雷斯发明了真空三极管，从而使电子技术进入了实用阶段。我国第一只电子管是由南京电照厂于1949年研制成功的866A真空整流管。由于电子管组成的电子设备体积大、功耗大、寿命短，因此人们在应用电子管的同时，又开始寻求更好的电子器件。

随着科学技术的进步，1947年，美国贝尔电话公司研究所的巴丁、肖克莱、布拉坦等人成功地研制出了第一只晶体三极管，这就是电子工业第二代的开始，它动摇了统治电子技术40年之久的电子管的地位。我国第一只晶体管是于1956年11月由中国科学院应用物理研究所、南京工学院和华北光电技术研究所等单位共同研制成功的锗合金晶体管，从而开始了我国电子技术的晶体管时代。

科学技术的发展是无止境的。1958年，美国德克萨斯仪器公司的杰克·基尔比成功地将移相振荡器的晶体管、电阻、连接导线等集成为一体，形成了一种新的功能器件，这就是世界上最原始的集成电路，简称IC^①。我国研制的第一块集成电路是由河北半导体研究所于1965年研制的一块DTL门电路；与此同时，上海无线电元件五厂和中国科学院上海冶金研究所也研制出了PN结隔离的DTL门电路，从而使我国的电子技术进入了微电子技术时代。

由电阻、电容、半导体管或集成电路等组成的具有一定功能的电路叫做电子电路。电子电路从其信号的类型上看，可分为模拟电子电路和数字电子电路两大类型。目前大多数均采用模拟或数字集成电路为主体去构成，所以又可分别称为模拟集成电路和数字集成电路。

模拟集成电路是一门重要的技术基础课，学习本课程必须处理好如下几个关系：

首先是处理好基础与应用的关系。现在，完全用分立元件的电子电路虽然不多，但分立元件电子电路是一个基础，打好这个基础，对于正确使用集成电路、分析由集成电路组成的电子电路，也就不难了。所以，应该重视分立元件电子电路的分析、计算。在这个基础上，再把注意力集中到弄清集成电路的组成、特性以及如何正确应用集成电路上去，这是学好本课程的关键。

第二，要树立工程与估算的观点。电子电路都是由电阻、电容、晶体管或集成电路等组成的，而这些电子元件的参数本身有一定的离散性，即使同一型号的电子元件或集成电

^① IC是英文Integrated Circuit的缩写。

路，其特性也并非完全一致，且随着使用环境、使用时间的不同，电路中的电子元器件的参数会发生变化，这就为“精确”计算电子电路带来困难。所以在设计计算电子电路时，通常是采用工程的观点去进行估算。

第三，重视实践与调试的作用。在电子电路的设计中，在拟定总体设计方案后，往往是先进行工程估算，根据估算的结果去组装电路，然后通过实验、调试最后确定电路中的具体参数，达到设计要求。

此外，在模拟集成电路学习中，会遇到不少新名词、新概念和基本原理，对于这些新名词、新概念和基本原理，随着课程的深入，必须逐步加以深刻地理解，这一点比进行繁杂的理论计算显得更为重要。

第一章 模拟集成电路基础

集成电路种类繁多，各有特点。制作集成电路和半导体二极管、三极管等电子器件要用半导体材料，而集成电路是由许多半导体二极管、三极管等组成的。本章就集成电路的分类、集成电路的特点，制作集成电路和分立电子元器件的半导体材料的结构、导电特性以及半导体二极管、三极管的基本结构、工作原理等作一介绍。

第一节 概 述

用一个一个的电阻、电容、半导体器件等组成的电子电路称为分立元件电子电路。由于分立元件电子电路所用元件多、体积大、功耗大、故障率高，所以在集成电路出现以后，已很少有人单独使用分立元件设计组装电子电路了。目前，分立元件仅作为集成电路的外围、补充。在高频、高压、大功率等特殊情况下，也有使用分立元件设计的电子电路。

由于集成电路体积小、功耗低、可靠性高、成本低，用它来设计电子电路时，可以大大简化电路的设计，所以集成电路在通信设备、电子计算机、仪器仪表、自动控制等各种电子设备中均得到了广泛的应用。

一、集成电路的分类

集成电路从不同的角度出发，有不同的分类方法。

(1) 按功能分，有数字集成电路和模拟集成电路。

数字集成电路是以电路中晶体管的“饱和”与“截止”两种截然不同的工作状态来产生、变换和处理数字信号的电路，如在数字集成电路中要讲的集成逻辑门电路、集成数字部件等，这类集成电路多用于电子计算机、自动控制系统、数字通信等电路中。

通常把数字集成电路以外的集成电路统称为模拟集成电路，所以模拟集成电路是一个庞大的家族。在电子技术中，随时间连续变化的电信号称为模拟信号，如通信中的声频信号，广播电视中的伴音、图象信号，检测仪器中由温度、速度、压力、转动角等转换得来的信号都是模拟信号。模拟集成电路就是用来产生、放大、传输、变换这类信号的集成电路。

(2) 按集成电路中有源器件的类型分，有双极型集成电路和单极型集成电路。

若集成电路中的晶体管采用半导体二极管、三极管，则为双极型集成电路，因为这类晶体管中有电子和空穴两种载流子参与导电。目前模拟集成电路中的大多数都是双极型的；若集成电路中的晶体管采用场效应晶体管，则为单极型集成电路，又叫做MOS集成电路，因为这种晶体管中只有电子或者只有空穴一种载流子参与导电。目前MOS集成电路多用于数字电路中。

(3) 按制造工艺分，有半导体集成电路、薄膜厚膜集成电路和混合集成电路。

半导体集成电路是用P型硅作衬底材料，通过一系列的平面工艺将晶体二极管、三极管、电阻、电容及相互间的连线制作在同一块半导体芯片上的电路。在半导体集成电路中，因为在N型外延层上要进行两次杂质扩散，可以方便地制成NPN型管，所以在模拟集成电路中，晶体管主要是NPN型的。当电路中需要PNP型管时（如电平配置、作互补推挽输出级等），常采用所谓横向PNP管，不过因结构工艺限制，此种管子的 β 值都较小，通常为0.5~5左右。由于半导体集成电路的生产效率高，成本低，工艺成熟，所以它是目前模拟集成电路的主流产品。

薄膜集成电路采用厚度为一微米以下的半导体、金属（或金属氧化物）薄膜，通过重叠来构成电路中的晶体管、电阻、电容及它们之间的连线，因此种工艺尚不成熟，故应用不多。厚膜集成电路是利用丝网漏印的办法，将电阻材料印浆印刷在基片上，烘干后即成厚膜电阻。利用多层不同材料分层印刷，便可制作电容。薄膜和厚膜集成工艺都难于制成良好的有源器件，但薄膜集成工艺用来制作高阻值电阻和电容，厚膜集成工艺用来制作大功率元件却都有一定的优势。

混合集成电路是用半导体集成工艺和薄膜或厚膜集成工艺相结合制作的一种电路。由于它吸收了多种集成工艺的长处，适合模拟集成电路不同品种的需要，所以它在集成电路中已占有相当重要的地位。

(4) 按电路中元器件的集成度分，有小规模、中规模、大规模、超大规模和极大规模集成电路。

一般将在一块半导体芯片上集成有十至几十个元器件的集成电路叫小规模集成电路；集成有一百至几百个元器件的叫中规模集成电路；集成有一千至几万个元器件的叫大规模集成电路；集成有几万至几十万个元器件的叫超大规模集成电路；集成有一百万个元器件以上的叫极大规模集成电路。将整个收音机、彩色电视机以及整个计算机都集成在一块半导体芯片上的集成电路早已问世。有人预测，到本世纪末，单片集成度将超过几十亿个元器件，制造工艺将进入原子级加工时代。

(5) 按集成电路的封装形式分，有圆形、方形、扁平形、单列直插形、双列直插形和简易的软封装形等，其外形如图1-1所示。

随着科学技术的进步和工艺的发展，为满足多功能化、高集成化的要求，已经出现数

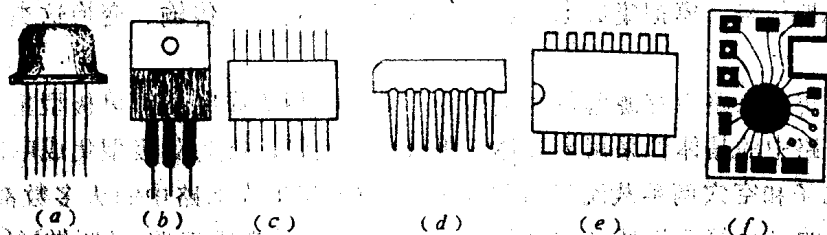


图 1-1 集成电路的外形

(a) 圆形；(b) 方形；(c) 扁平形；(d) 单列直插形；(e) 双列直插形；
(f) 软封装形

字电路与模拟电路互相渗透集成于一体的集成电路。

二、半导体集成电路的特点

目前的集成电路，绝大多数是半导体集成电路，因为要将电阻、电容、晶体管及连接导线等都集成在一块芯片上，所以形成了它自己固有的特点。

(1) 电路中尽量使用三极管单元结构。集成电路中很少用电阻、电容，而尽量用三极管结构，这一点和分立元件电子电路截然不同。集成电路中的二极管多用短接一个电极的三极管代替，这样做可使二极管的PN结特性与三极管的PN结特性一致，便于温度补偿。不同接法的二极管具有不同的特点，如利用反向击穿电压比较低的**b-e**间的PN结作稳压值小于7V的稳压管使用，这种情况在集成电路中经常出现。

(2) 电路中电阻值范围比较窄。在半导体集成电路中，扩散电阻是常用的电阻，其阻值由扩散窗口的尺寸来控制，电阻的阻值范围一般为 $30\ \Omega \sim 30\text{k}\ \Omega$ 。高阻值的电阻一般用三极管恒流源代替，因为高阻值的扩散掺杂电阻所占硅片面积十分可观。此外，也有用沟道电阻作高阻值电阻的。由于小阻值的电阻制作时阻值难于控制，故有时利用二次扩散获得较小阻值的电阻。

(3) 电路中尽量不用电容器。在半导体电路中，电容器主要采用反向偏置的PN结电容，通过改变结面积及其加反偏电压的大小，便可获得所需电容值。此外，也有利用MOS电容的。由于它们的电容量都较小，所以在集成电路中尽量不用电容器。级间耦合都采用直接耦合方式，必要时可外接大电容。

(4) 电路中不用电感。目前还未解决制作电感的理想集成工艺，电路必需电感时可外接。

(5) 电路中常用复合管和差动放大电路。

三、模拟集成电路示例及符号

模拟集成电路是在一块半导体芯片上，将电阻、二极管、三极管等电子元件和由它们组成的各种单元电子电路集成在一起，从而构成的一个具有一定功能的电子功能块。图1-2所示的集成运算放大器5G28就是模拟集成电路中的一例。在该电路中，共集成有9只电阻，没有电感和电容（电容 C_d 是外接的消振电容）。它含有单极型晶体管（ $V_1 \sim V_4$ ）和双极型晶体管（ $V_5 \sim V_{12}$ ）等两种半导体三极管和二极管（ $V_{13} \sim V_{16}$ ），并包含有差动放大电路（ $V_1 \sim V_2$ ）、电流源（ V_3, V_4 、

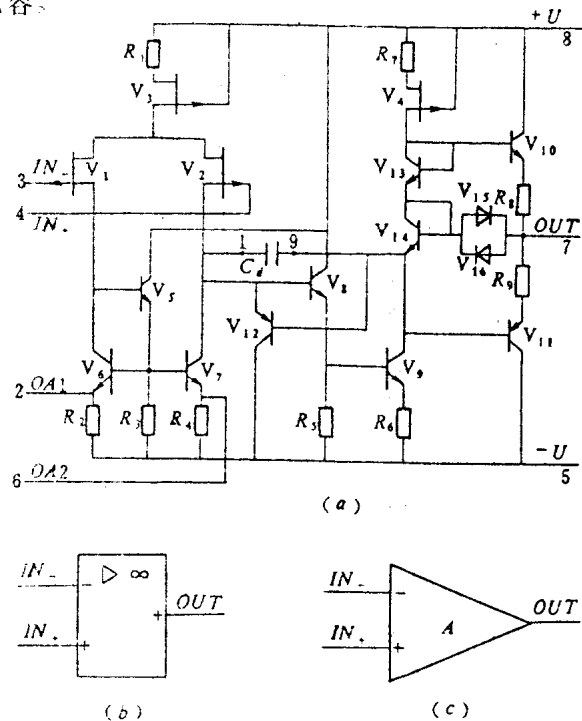


图 1-2 5G28内部电路与模拟集成放大器的符号

(a) 5G28的内部电路；(b) 模拟集成放大器的符号；(c) 常用符号

$V_5 \sim V_7$)、共集电极放大电路 (V_8)、共发射极放大电路 (V_9)、互补推挽输出电路 (V_{10} 、 V_{11}) 等。也就是说,它基本上包含了模拟集成电路中所应具备的基本单元电路,当然也基本上反映了分立元件电子电路的基本单元电路。

一个模拟集成放大电路,虽然其内部电路较为复杂,但对于使用者来说,并不能改变其内部电路,只能合理地使用它,因此,在使用中往往用图1-2(b)所示的符号来表示一个集成放大器,而且一般只标注最关键的信号输入端和信号输出端。图中,“ \triangleright ”表示信号传输方向,“ ∞ ”表示理想条件。若信号从反相输入端“-”输入,则此时输出信号与输入信号的相位相反;若信号从同相输入端“+”输入,则输出信号与输入信号相位相同。图1-2(c)是曾经使用过的集成放大器的符号,现在有的资料中仍可见到。

上面我们初步介绍了模拟集成电路的分类、特点和模拟集成电路的示例及符号。在以后的各章节中,我们将逐步较详细地分析这些已经出现的电子元器件(二极管、三极管、场效应管等)以及基本单元电子电路的构成和工作原理。

第二节 集成电路中的半导体材料

制作集成电路和半导体器件的基本材料是半导体,本节就半导体材料的结构、导电特性等作一介绍。

一、半导体

在自然界中,存在着许多不同的物质,按它们的导电能力可划分为三类,即导体、半导体和绝缘体。也就是说,半导体是一些导电能力介于导体和绝缘体之间的物质,如锗、硅、硒、砷化镓等。物质的导电能力,一般用电阻率来衡量,金属导体的电阻率在 $10^{-4}\Omega\cdot\text{cm}$ 以下,绝缘体的电阻率在 $10^{10}\Omega\cdot\text{cm}$ 以上,而半导体的电阻率通常在 $10^{-3}\sim 10^9\Omega\cdot\text{cm}$ 范围内。目前,用于制造集成电路和半导体器件的主要材料是硅和锗。半导体在现代电子技术中获得了广泛的应用,这不仅在于它的导电能力介于导体和绝缘体之间,而更重要的是由于它的导电能力在受外界因素影响下所表现出的一些特殊性质,这主要表现在以下方面。

(1) 半导体的导电能力随温度升高而迅速增加。半导体的电阻率对温度的变化很敏感,例如,纯净的锗从 20°C 升至 30°C 时,电阻率几乎减小一半。一般金属导体的电阻率是随温度升高而增大的,而且温度每升高 100°C ,其电阻率的增加也不到一半。

(2) 半导体的导电能力随光照而有显著的增加。例如,在一块绝缘基片上的硫化镉薄膜,在暗处时其电阻为几十兆欧,当受光照后,电阻可能下降到几十千欧,只有原来的几百分之一。利用这一特性可制成光敏电阻。

(3) 半导体的导电能力因掺入适量杂质而有很大增加。例如,在室温时,纯净硅电阻率为 $2.14 \times 10^4\Omega\cdot\text{cm}$,如果在硅中以一百万分之一比例掺入某种杂质原子,则其电阻率下降到 $0.2\Omega\cdot\text{cm}$,几乎是原来的一百万分之一。利用这一特性,可以制造出各种不同的半导体器件。

半导体之所以具有以上特殊的导电特性,其根本原因在于物质内部的原子结构和导电机理有其特殊之处。

二、本征半导体

一切物质都由原子构成,而每一个原子都是由带正电的原子核和带负电的电子组成的,在原子核的吸引下电子分层沿着不同的轨道围绕原子核不停地旋转[图1-3(a)、(b)示出了硅和锗的原子结构]。正常情况下原子呈现中性。由于靠近原子核的里层电子受原子核的束缚较大,很难活动,所以硅和锗的原子结构可以简化为由里层的电子和原子核组成一个“惯性核”,它的净电量是 $+4q$,最外层是4个电子,受原子核的束缚力较小,称为价电子,如图1-3(c)所示。

在实际应用中,首先必须将半导体提炼成单晶体,使它的原子排列由杂乱无章的状态变成有一定规律、整齐地排列的晶体结构。通常把纯净的、晶格完整的半导体称为本征半导体。在本征半导体中,每个原子的价电子分别与4个相邻原子的价电子结合成共有电子对,形成共价键的结构,从而使硅或锗原子的外层电子均有8个而处于稳定状态,如图1-4所示。

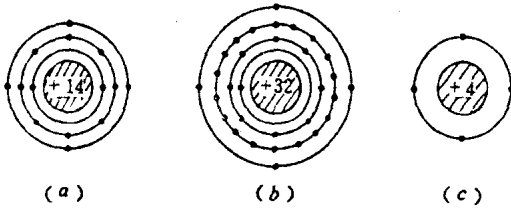


图 1-3 硅和锗的原子结构

(a) 硅的原子结构; (b) 锗的原子结构; (c) 简化图

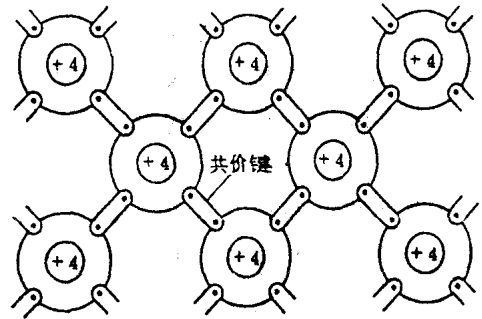


图 1-4 本征硅和锗的共价结构示意图

在绝对零度 (-273°C) 时,本征半导体中的价电子没有能力脱离共价键,不能成为自由电子,所以它们对外加电场力不能自由响应,呈现绝缘体的特性。但在室温时,共价键中有些电子从热运动中获得足够的能量后,便能脱离共价键的束缚而成为自由电子。因为电子脱离的区域本来是呈电中性的,电子脱离后在共价键位置上就留有一个空位,带有正的电量,这个空位叫做空穴。因此在本征半导体中,有一个自由电子就有一个空穴,电子和空穴是成对地产生的,叫做电子空穴对,如图1-5所示。由图可知,在本征半导体A处产生一个空穴后,邻近共价键B处的价电子就有可能在热激发或外加电场力的作用下跑到A处来填补空位,这样A处的空穴消失了,而B处出现了空穴,这相当于空穴从A处移到B处,如此依次地递补便形成空穴的相对运动。以上分析表明,空穴运动的实质是价电子从一处到另一处填补空穴位置的运动。一般把空穴视为带正电荷的载流子,所以空穴的移动就相当于正电荷的移动。因而,在半导体中,除了有带负电荷的电子载流子外,还有一种带正电荷的空穴载流子,这样,在外加电场力作用下,半导体中将出现两部分电流,一个是电子电流 I_n ,另一个是空穴电流 I_p ,在电路中流过的电流是这两部分电流之和,即 $I = I_n + I_p$,如图1-6所示。同时有两种载流子参与导电是半导体和金属导体在导电机理上的根本区别。

在本征半导体中,由于热能的作用而产生电子、空穴对的现象称为热激发,或叫本征

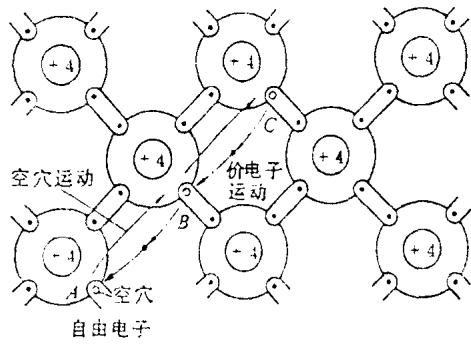


图 1-5 本征激发和空穴运动

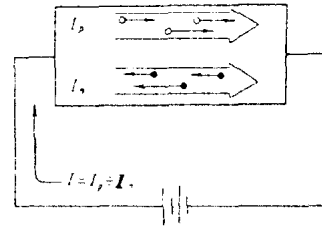


图 1-6 本征半导体中的电流

激发。电子和空穴在热激发中成对产生，又可能在运动过程中电子失去部分动能后与空穴相遇结合而消失，这种现象称为复合。热激发和复合同时存在，在一定温度下，电子-空穴对为某一数目时，则达到动平衡，这时每秒钟由热激发产生的电子空穴对恰好等于每秒钟内复合而消失的电子空穴对。通常把 1cm^3 体积中的载流子数目叫做载流子浓度 n_i （单位为：个数/ cm^3 ）。在热平衡时，电子浓度 n 等于空穴浓度 p ，即

$$n_i = n = p \quad (1-1)$$

本征半导体的导电能力与温度有关，温度发生变化时，原有的热平衡被破坏，此时热激发与复合在新的温度下进入新的动平衡，得到另一个本征半导体载流子浓度值。 n_i 随温度的升高大致是按指数规律上升，因此它的导电能力随温度升高而急剧增大。实验测得在室温(300K)下硅本征载流子浓度为 $n_i = 1.5 \times 10^{10}\text{cm}^{-3}$ ；而锗本征载流子浓度 $n_i = 2.5 \times 10^{13}\text{cm}^{-3}$ 。锗本征载流子浓度约为硅本征载流子浓度的一千倍，这是由于锗的价电子更易挣脱共价键，所以锗材料受温度影响比较大。

在室温情况下，本征半导体载流子数极少，导电能力很差，只有在本征半导体中掺入适当杂质后，半导体导电能力才能大大增强。

三、N型半导体

在四价的硅(Si)或锗(Ge)中，掺入微量五价元素如磷(P)之后，磷原子代替了原来为硅原子的位置，如图1-7(a)所示。此时，除了四个价电子与周围的四个硅原子形成共价键外，尚多一个价电子，这个多余电子仅受磷原子核的束缚，因这种束缚力很小，

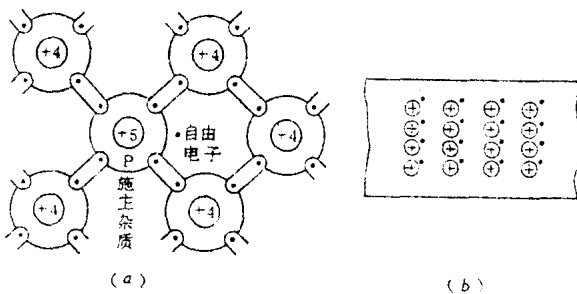


图 1-7 N型半导体
(a) N型半导体结构；(b) 简化结构

在室温下就能够摆脱束缚离开磷原子而成为自由电子。与此同时，磷原子由于失去一个电子，成为带正电的离子。由于磷元素杂质能够放出电子，故称为施主杂质。这样，掺入磷原子后，每个磷原子可产生一个自由电子。显然，掺入施主杂质的浓度愈高，产生的自由电子也愈多。

在掺入施主杂质的硅中，仍有空

穴存在，它是由其余硅原子热激发所产生的，但是热激发产生的空穴与施主杂质供给的电子相比数量极少，故自由电子占优势，称为多数载流子（简称多子）。空穴是少数载流子，简称少子。我们把这种掺杂半导体叫做电子型半导体，简称N型半导体。图1-7(b)是N型半导体简化结构图。

四、P型半导体

在四价的硅（或锗）中，掺入微量的三价元素〔如硼（B）〕后，则晶体排列如图1-8(a)所示。由于硼是三价元素，有三个价电子。硼原子代替原来硅原子的位置时，只能与相邻的三个硅原子的价电子构成共价键，另外一个硅原子的价电子则不能构成完整的共价键，出现了一个空位。在室温下，邻近的硅原子中的价电子便能填补这个空位，这样，一方面使硼原子成为带负电的离子，另一方面在硅半导体中形成一个空穴。因硼元素杂质在硅中容易接受电子而放出空穴，故称为受主杂质。

在含有受主杂质的硅中，仍有电子存在，它是由热激发产生的，但是电子与受主杂质提供的空穴相比，在数量上要少得多，空穴占优势，称为多数载流子（简称多子），而电子是少数载流子（简称少子）。通常把这种掺杂半导体称为空穴型半导体或P型半导体。图1-8(b)是P型半导体的简化结构图。

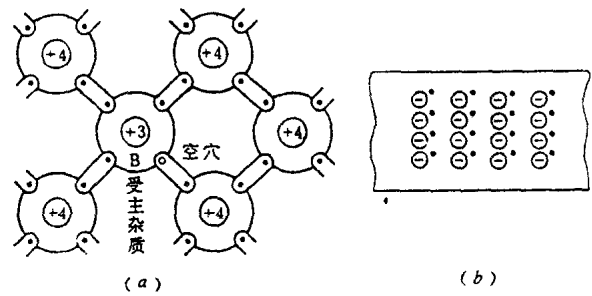


图 1-8 P型半导体
(a) P型半导体结构；(b) 简化结构

实际上在半导体中很可能同时掺上两种杂质，最终它属于哪一种类型的半导体，则取决于浓度高的杂质。假使受主杂质多于施主杂质，空穴抵消一部分电子后仍有剩余，成为多子，则得到P型半导体，反之则得到N型半导体。这种现象叫做杂质的补偿作用，它在制造集成电路和半导体管的过程中得到了广泛应用。

第三节 PN结与半导体二极管

在模拟电子电路中，最基本的电子器件就是二极管。本节就二极管的结构、类型、导电特性和二极管的主要参数等作一介绍。

一、PN结

1. PN结的形成

通过某种掺杂工艺，使一块本征半导体变成N型和P型两部分后，就会在它们的界面处形成一个特殊薄层，这个薄层就叫PN结。

前面讲过，在P型半导体中空穴是多子，自由电子是少子；而在N型半导体中电子是多子，空穴是少子，于是在P型和N型半导体相接触的界面处两边，分别存在着电子浓度和空穴浓度的差异。一开始，N区中的电子向P区扩散，P区中的空穴向N区扩散，这种因多数载流子浓度差异扩散而形成的电流叫扩散电流。N区的电子向P区扩散后，交界