



普通高等教育应用型规划教材·电子信息类

模拟电子技术及应用

(第二版)

李继凯 □ 编著



- 精练够用，避开复杂分析，突出工程应用背景
- 通俗易懂，内容深入浅出，轻松解决难点疑点
- 实用易学，课内好教好学，有效降低教学学时



科学出版社

普通高等教育应用型规划教材·电子信息类

模拟电子技术及应用

(第二版)

李继凯 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以教育部高等学校电工电子基础课程教学指导委员会最新修订的《模拟电子技术基础课程教学基本要求》为依据编写, 内容简明扼要、深入浅出、通俗易懂, 突出“工程应用”的特点, 特别适合培养应用技术型人才的高校使用。本书共分9章, 主要内容包括半导体二极管及应用、晶体三极管及应用、场效应管及应用、集成运算放大器、负反馈放大电路、信号运算与处理电路、信号产生与变换电路、功率放大电路和直流稳压电源等内容。

本书定位明确, 针对性强, 特色鲜明, 可作为普通本科院校或高职高专院校电子信息工程、通信工程、自动化、计算机科学与技术、仪器仪表等电气、电子信息类专业和部分非电类专业的本、专科学生的教科书(参考学时: 52~64学时), 尤其适合以培养应用型、技术技能型人才为主的地方本科高校(二本、三本)的师生选用, 也可作为其他理工科相关专业学生和广大科技工作者的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术及应用/李继凯编著. —2版. —北京: 科学出版社, 2017
ISBN 978-7-03-055167-2

I. ①模… II. ①李… III. ①模拟电路-电子技术-高等学校-教材
IV. ①TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第268517号

责任编辑: 孙露露 常晓敏/责任校对: 王万红

责任印制: 吕春珉/封面设计: 耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年5月第一版 开本: 787×1092 1/16

2017年11月第二版 印张: 16 3/4

2018年8月第五次印刷 字数: 376 000

定价: 39.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换(骏杰))

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62138978-2010

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

第二版前言

《模拟电子技术及应用》自 2013 年出版至今，受到了广大读者的欢迎和好评。该书与作者主编的《数字电子技术及应用》和《电子技术及应用学习指导》形成了“电子技术基础应用型系列精品教材”，《数字电子技术及应用》和《模拟电子技术及应用》先后被评为广东省精品教材，本系列教材的建设和实践获得 2017 年广东省教学成果二等奖。

针对地方高校向应用型转变，为提高应用型人才培养质量，本书在第一版的基础上，对于各种半导体器件和集成电路，大量压缩了器件内部的工作原理分析，侧重器件的外特性、技术参数和工程应用方法介绍。通过典型的分立元件电路，重点介绍电子电路的基本分析方法，注重电子电路的组成及结构分析，减少复杂的数学推导，突出定性分析和工程估算。另外，增加了应用性和实践性强的内容，并把目前产业界对学生要求的最新内容补充到教材中。

根据广大读者提出的意见和建议，本书做了如下修订：

1. 每章前面的“基本内容”改为“本章学习目的和要求”。
2. 在二极管的应用中把全波整流电路改为半波整流电路，这样电路更简单，更有利于初学者学习，第 1 章的习题中，增加了稳压管的应用内容。
3. 为了使学生对晶体管有更多的感性认识，在 2.1.1 节增加了常用的通用/小信号晶体管、功率晶体管和 RF（射频 / 微波）晶体管的介绍，并给出了各种类型晶体管的实物图片。在 2.3 节增加了应用实例——温度自动控制系统，调整了部分习题。
4. 4.2 节采用了一种简单的分析方法求解差模电压放大倍数。只需画出半边的交流通路，利用第 2 章的结果即可得到差模电压放大倍数，简化了理论推导。
5. 第 5 章删减了分立元件负反馈放大电路的分析，主要讨论运放组成的负反馈放大电路的计算，调整了部分习题。
6. 为了使学生了解运放的实际应用，在 6.1 节和 6.4 节分别增加了多路传感器的仪器系统、仪表放大器、25W 四通道混频器/放大器、超温检测电路和液位控制系统等应用实例，更加突出了本书的应用性。
7. 为了使学生了解文氏电桥振荡器的实际应用，增加了音调发生器等应用实例。
8. 第 3、8 章在文字叙述方面做了一些改变。
9. 第 9 章删除了半波整流电路，重点介绍桥式全波整流电路。

全书突出“工程应用”的特点，在内容设计和教学方法上做了科学有益的探索。全书知识体系完整、系统，内容安排合理，注意理论与实践的结合，内容由浅入深、循序渐进，符合学生的认知规律。一些重点、难点概念的叙述简明扼要、深入浅出、通俗易懂。

为方便教师授课和学生学习，本书配有与各章节教学内容完全对应的、高质量的多媒体教学课件（包括习题课的课件），各章均提供了习题，课件及习题答案可发邮件至邮箱 360603935@qq.com 索取。另外，《电子技术及应用学习指导》（李继凯主编，科学出版社

出版)可与本书配套使用。

本书适合学时数为52~64学时。书中标注有“*”的内容,教师和学生可以选讲、选学。

全书由广东石油化工学院李继凯执笔并统稿。参加编写的还有广东石油化工学院刘晓燕、李新超,浙江大学宁波理工学院李林功、王一刚,惠州学院林伟民,北京理工大学珠海学院张苑农,河南师范大学王长清,茂名职业技术学院林静等。广东石油化工学院张颖做了大量的资料收集和整理工作。

在编写本书过程中,我们参阅了大量文献资料,在此向相关作者表示诚挚的感谢。限于作者水平,不当之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

李继凯

2017年4月

第一版前言

“模拟电子技术”是高等学校电子、电气、通信、计算机等电类专业在电子技术方面入门性质的专业基础课，它主要讲述常用半导体器件及其应用电路的工作原理和分析、设计方法。通过本课程的学习，可使学生获得电子技术方面的基础知识、基本理论和基本技能，培养学生分析问题和解决问题的能力，为以后深入学习专业课程以及电子技术专业中的应用打好基础。

当前，我国高等教育已由精英教育过渡到大众化教育，各类院校生源质量差异更加明显，不同学校的定位和人才培养目标也不尽相同。本书是根据作者从事“模拟电子技术”教学近30年的工作经验积累编写而成，主要针对二本、三本及高等职业院校学生的特点编写，是《数字电子技术及应用》（科学出版社，2012，李继凯等编著）的姊妹篇。与现有教材相比，本书具有如下特点。

1. 本书按照教育部高等学校电子信息与电气学科基础课程教学指导分委员会最新修订的《模拟电子技术基础课程教学基本要求》编写而成。在保证基本教学内容的前提下，针对二本、三本及高等职业院校学生的特点，体现因材施教的需要。

2. 本书在结构上充分考虑了教学内容中各个知识点的特点及其内在联系，章节前后次序编排合理，内容由浅入深、循序渐进，符合学生的认知规律。

3. 在目前教学时数普遍较少的情况下，本书突出基本概念和基本原理，对一些重点、难点概念的叙述力求简明扼要、深入浅出、通俗易懂，并采用比较有效和精练的叙述方式把问题交代清楚，特别适合初学者学习，同时更有利于培养学生在教师指导下的自学能力。

4. 本书突出“工程应用”的特点。对于各种半导体器件和集成电路，压缩了器件内部的工作原理分析，侧重器件的外特性、技术参数和工程应用方法介绍；通过典型的分立元件电路，重点介绍电子电路的基本分析方法，注重电子电路的组成及结构分析，减少复杂的数学推导，突出定性分析和工程估算；既满足教学要求，又使教师好教、学生好学。

5. 制作了与本书内容配套、真正适合教师教学使用的高质量教学课件（包括习题课课件），为教师教学提供方便。

本书系统地介绍了模拟电子技术的基本知识、基本理论和常用半导体器件及其应用电路，主要包括半导体二极管及其应用电路、晶体三极管及其基本放大电路、场效应管及其放大电路、集成运算放大器、负反馈放大电路、基于集成运放的信号运算与处理电路、基于集成运放的信号产生与变换电路、功率放大电路和直流稳压电源等内容。书中打“*”号的章节为选讲内容，教师可根据各学校的教学安排、总学时数及学生的实际情况灵活处理。

本书每章后面都精选了练习题，供学生课外练习、巩固所学内容，书后附有参考答案。书中某些章节的习题量较大，考虑到不同学校的生源质量、教学要求有比较大的差异，教师可根据本校学生实际情况选做。书中注有“*”的习题难度稍大，供学习程度较好的学生选做。

全书由广东石油化工学院李继凯执笔并进行统稿。参加编写工作的还有：广东石油化工学院刘晓燕，浙江大学宁波理工学院李林功、于在河，惠州学院林伟民，湖北文理学院陈铭，茂名职业技术学院王开、林静等。刘晓燕、李林功对全书进行了修改、校对。限于作者水平，不当之处在所难免，恳请读者批评指正，有关意见可发至作者电子邮箱：13727840821@qq.com。本书配套的PPT教学课件可向科学出版社编辑（cxp666@yeah.net）或作者索取，也可从科学出版社网站（www.abook.cn）下载。

在本书出版过程中，作者参阅了大量文献资料，在此对相关作者的贡献和辛勤劳动表示衷心的感谢。

李继凯

2012年12月

目 录

第 1 章 半导体二极管及应用	1
1.1 半导体基础知识	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 杂质半导体	2
1.1.3 PN 结	3
1.2 半导体二极管	5
1.2.1 二极管的结构和类型	5
1.2.2 二极管的伏安特性	6
1.2.3 二极管的主要参数	7
1.2.4 二极管的等效模型	8
1.2.5 其他类型二极管	9
1.2.6 二极管的应用	11
小结	14
习题	14
第 2 章 晶体三极管及应用	18
2.1 晶体三极管	18
2.1.1 晶体三极管的结构与类型	18
2.1.2 晶体管的电流放大作用	21
2.1.3 晶体管的特性曲线	23
2.1.4 晶体管的主要参数	24
2.1.5 温度对晶体管参数及特性的影响	25
2.2 单管共射极放大电路	26
2.2.1 放大的概念及放大电路的性能指标	26
2.2.2 单管共射极放大电路的组成及工作原理	28
2.2.3 放大电路的静态分析	29
2.2.4 放大电路的动态分析	31
2.3 放大电路静态工作点的稳定	38
2.3.1 温度对静态工作点的影响	38
2.3.2 分压式偏置静态工作点稳定电路	38
2.3.3 应用实例——温度自动控制系统	42
2.4 单管共集电极放大电路和共基极放大电路	43
2.4.1 单管共集电极放大电路	43
2.4.2 单管共基极放大电路	46

2.4.3	三种基本组态放大电路的性能比较	49
2.5	多级放大电路	50
2.5.1	多级放大电路的耦合方式	50
2.5.2	多级放大电路的动态分析	53
2.6	放大电路的频率响应	55
2.6.1	频率响应的一般概念	55
2.6.2	晶体管的高频等效模型	59
2.6.3	单管共射极放大电路的频率响应	62
2.6.4	多级放大电路的频率响应	66
	小结	67
	习题	68
第3章	场效应管及应用	75
3.1	场效应管	75
3.1.1	结型场效应管	75
3.1.2	绝缘栅场效应管	78
3.1.3	场效应管的主要参数	83
3.1.4	场效应管与晶体三极管的比较	84
3.2	场效应管放大电路	85
3.2.1	场效应管放大电路的直流偏置和静态分析	85
3.2.2	场效应管放大电路的动态分析	86
	小结	90
	习题	91
第4章	集成运算放大器	94
4.1	集成运放的组成及特点	94
4.2	差分放大电路	95
4.2.1	双端输入、双端输出差分放大电路	95
4.2.2	双端输入、单端输出差分放大电路	98
4.2.3	单端输入差分放大电路	100
4.2.4	具有恒流源的差分放大电路	101
4.3	集成运放中的电流源电路	103
4.3.1	电流源电路	103
4.3.2	有源负载电路	105
4.4	复合管	106
4.5	典型集成运放简介及主要技术指标	107
4.5.1	典型集成运放简介	107
4.5.2	集成运放的主要技术指标	108
4.6	集成运放的电路模型	110
4.6.1	集成运放的开环电压传输特性	110
4.6.2	集成运放的理想化模型	111
4.6.3	理想运算放大器的特点	111

4.7 集成运放的种类和使用注意事项	112
4.7.1 集成运放的种类	112
4.7.2 典型集成运放芯片介绍	114
4.7.3 集成运放的使用注意事项	115
小结	117
习题	118
第5章 负反馈放大电路	122
5.1 反馈的基本概念及分类	122
5.1.1 反馈的基本概念	122
5.1.2 反馈的类型及判断	123
5.2 负反馈放大电路放大倍数的一般表达式	127
5.3 深度负反馈放大电路放大倍数的近似估算	127
5.3.1 深度负反馈的实质	127
5.3.2 深度负反馈条件下电压放大倍数的近似估算	128
5.4 负反馈对放大电路性能的影响	130
5.4.1 提高闭环放大倍数的稳定性	130
5.4.2 减小非线性失真	131
5.4.3 展宽通频带	131
5.4.4 改变输入、输出电阻	132
5.4.5 引入负反馈的一般原则	132
5.5 负反馈放大电路的自激振荡及消除方法	133
5.5.1 产生自激振荡的原因及条件	133
5.5.2 负反馈放大电路稳定性的判定	134
5.5.3 消除自激振荡的方法	135
小结	136
习题	137
第6章 信号运算与处理电路	140
6.1 运算电路	140
6.1.1 比例运算电路	140
6.1.2 加减运算电路	142
6.1.3 积分和微分运算电路	147
6.1.4 对数和指数运算电路	149
6.1.5 乘法和除法运算电路	150
6.1.6 应用实例——25瓦四通道混频器/放大器	151
6.2 模拟乘法器及应用	152
6.2.1 模拟乘法器简介	152
6.2.2 模拟乘法器的应用	152
6.3 有源滤波器	155
6.3.1 滤波器的功能和分类	155
6.3.2 低通滤波器	156

6.3.3	其他滤波器	158
6.4	电压比较器	165
6.4.1	单门限电压比较器	165
6.4.2	滞回电压比较器	168
6.4.3	窗口电压比较器	170
6.4.4	应用实例——超温检测电路和液位控制系统	170
小结		173
习题		173
第7章	信号产生与变换电路	180
7.1	正弦波振荡电路	180
7.1.1	概述	180
7.1.2	RC 正弦波振荡电路	182
7.1.3	LC 正弦波振荡电路	183
7.1.4	石英晶体正弦波振荡电路	187
7.1.5	应用实例——音调发生器	189
7.2	非正弦波产生电路	190
7.2.1	矩形波产生电路	190
7.2.2	三角波和锯齿波产生电路	193
*7.2.3	压控振荡器	195
7.3	波形变换电路	196
7.3.1	三角波变锯齿波电路	197
7.3.2	三角波变正弦波电路	197
*7.4	信号转换电路	198
7.4.1	电压-电流转换电路	199
7.4.2	电流-电压转换电路	199
7.4.3	精密整流电路	200
小结		201
习题		202
第8章	功率放大电路	207
8.1	概述	207
8.2	互补对称功率放大电路	209
8.2.1	双电源互补对称功率放大电路	209
8.2.2	带前置放大级的互补对称功率放大电路	213
8.2.3	单电源互补对称功率放大电路	214
*8.3	集成功率放大器及应用	214
8.3.1	集成功率放大器 LM386 简介	214
8.3.2	集成功率放大器 LM386 的应用	216
小结		217
习题		217

第9章 直流稳压电源	220
9.1 直流稳压电源的组成	220
9.2 整流电路	220
9.3 滤波电路	223
9.3.1 电容滤波电路	223
9.3.2 其他形式的滤波电路	225
9.4 稳压电路	226
9.4.1 稳压管稳压电路	226
9.4.2 串联型稳压电路	228
9.5 三端集成稳压器及应用	231
9.5.1 输出电压固定的三端集成稳压器及应用	231
9.5.2 输出电压可调的三端集成稳压器及应用	233
9.5.3 三端集成稳压器使用注意事项	235
*9.6 开关型稳压电源	236
9.6.1 开关型稳压电路的特点和分类	236
9.6.2 开关型稳压电路的组成和工作原理	237
小结	239
习题	240
习题参考答案	244
参考文献	255

第 1 章 半导体二极管及应用

本章学习目的和要求:

1. 了解本征半导体、杂质半导体和PN结的形成。
2. 理解普通二极管、稳压二极管的工作原理,掌握它们的特性和主要参数。
3. 掌握二极管的应用方法。

1.1 半导体基础知识

1.1.1 本征半导体

导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体,如硅、锗、硒、砷化镓等。半导体的导电能力在不同条件下有很大的差别。例如,有些半导体(如钴、锰、镍等的氧化物)对温度非常灵敏,当环境温度升高时,它们的导电能力会增强很多,利用这种特性就做成了各种热敏器件(如热敏电阻)。又有些半导体(如镉、铅等的硫化物与硒化物)受到光照时,它们的导电能力变得很强,当无光照时,又变得像绝缘体一样不导电,利用这种特性就可做成各种光敏器件(如光敏电阻)。更重要的是,如果在纯净的半导体中掺入某种微量的杂质后,它的导电能力就可增加几十万乃至几百万倍,利用这种特性就可做成各种不同用途的半导体器件,如半导体二极管、三极管、场效应管及晶闸管等。

常用的半导体材料有硅(Si)和锗(Ge),它们都是4价元素,其原子的最外层轨道上都有4个价电子,如图1.1.1所示。

将硅或锗材料提纯(去掉无用杂质)并形成单晶体后,所有原子便基本上排列整齐。每一个硅(或锗)原子最外层的四个价电子,都与周围相邻的四个硅原子的一个价电子组成一个电子对。这对价电子是两个相邻原子共有的,它们把相邻的原子结合在一起,构成所谓的共价键结构,如图1.1.2所示。图中标有“+4”的圆圈表示除价电子外的正离子。这种纯净的具有晶体结构的半导体称为本征半导体。

在本征半导体中,由于共价键有很强的结合力,处于共价键中的价电子是不能自由移动的,因而不能导电。在常温下($T=300\text{K}$),会有极少数的价电子由于热运动(热激发)而获得足够的能量,从而挣脱共价键的束缚成为自由电子。与此同时,在共价键中留下一个空位,称为空穴,如图1.1.2所示。这种现象称为本征激发,本征激发产生的自由电子和空穴成对出现。

在外电场的作用下,有空穴的原子可以吸引相邻原子中的价电子来填补这个空穴,而在失去一个价电子的相邻原子的共价键中又产生一个新的空穴,它也可以由相邻原子中的价电子来递补,而在该原子中又出现一个空穴。这种价电子递补空穴的运动也可看成空穴在运动,而空穴运动的方向与价电子的运动方向相反,因此,空穴的运动相当于正电荷的运动。

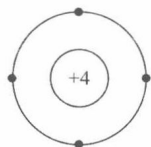


图 1.1.1 硅、锗的原子结构简化模型

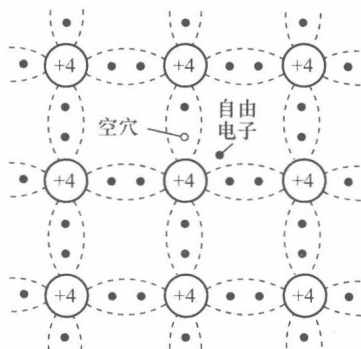


图 1.1.2 本征半导体晶体结构平面图

当半导体两端外加电压时，半导体中将出现两部分电流：一部分是自由电子作定向运动所形成的电子电流；另一部分是仍被原子核束缚的价电子（注意，不是自由电子）递补空穴所形成的空穴电流。由于自由电子和空穴所带电荷极性相反，所以它们的运动方向相反，形成的电流方向相同。因此，本征半导体中的电流是电子电流和空穴电流之和。自由电子和空穴都称为载流子。

导体中只有一种载流子（自由电子）参与导电，而半导体有两种载流子（自由电子和空穴）参与导电，这是半导体与导体在导电机理上的本质区别。

在本征半导体中，自由电子如果与空穴相遇就会填补空穴，使二者同时消失，这种现象称为复合。在一定温度下，本征激发所产生的自由电子与空穴对，与复合的自由电子与空穴对数目相等，二者达到动态平衡，半导体中的载流子（自由电子和空穴）维持一定的数目。但当温度升高时，由于本征激发产生的载流子数目增多，导电性能就会增强，所以，温度对半导体器件的性能影响很大。

1.1.2 杂质半导体

本征半导体中虽然有自由电子和空穴两种载流子，但由于数量极少，导电能力仍然很低。如果在其中掺入微量的杂质（某种化学元素），将使掺杂后的半导体（杂质半导体）的导电能力大大增强。根据掺入的杂质元素不同，可以形成N型半导体和P型半导体。

1. N型半导体

N型半导体是在本征半导体中掺入少量五价元素磷（或砷、锑）形成的。由于掺入的磷原子数量较少，因此，掺杂后整个晶体结构基本上不变，只是某些位置上的硅（锗）原子会被磷原子取代。每个磷原子在与周围相邻的四个硅（锗）原子形成共价键时只需要四个价电子，多余的一个价电子不在共价键中，常温下，价电子很容易挣脱磷原子核的束缚而成为自由电子。而磷原子失去一个价电子后便成为带正电荷的正离子，此正离子不能移动，因而不能参与导电，如图 1.1.3 所示。每掺入一个磷原子就可以产生一个自由电子。由此可见，掺入磷元素可以使半导体中的自由电子数目大量增加。

半导体中除了掺杂释放出的自由电子外，还有本征激发产生的电子-空穴对，但其数量比掺杂释放的自由电子数量少得多。因此，在这种半导体中，自由电子的数量远大于空穴的数量，故称自由电子为多数载流子（简称多子），空穴为少数载流子（简称少子）。这种半导体主要靠电子导电，因电子带负电（negative），所以称之为N型半导体。掺入的杂质

越多, 电子的浓度就越高, 从而导电性能就越强。因杂质原子(磷)提供自由电子, 故称为施主原子。

2. P型半导体

P型半导体是在本征半导体中掺入少量硼(或铝、镓、铟)形成的。由于掺入的硼原子最外层只有三个价电子, 当它与周围相邻的四个硅(锗)原子形成共价键时, 其中一个共价键中缺少一个电子而形成空位。在常温下, 邻近的硅(锗)原子的共价键中的价电子由于热运动很容易被吸引去填补这个空位, 从而在硅(锗)原子的共价键中产生一个空穴, 而硼原子则因吸收一个电子而成为不能移动的负离子, 如图 1.1.4 所示。每掺入一个硼原子就可以产生一个空穴, 可见掺入硼元素可以使半导体中的空穴数目大量增加。除了掺杂提供空穴外, 还有本征激发产生的电子-空穴对。因此, 在这种半导体中, 空穴的数量远大于自由电子的数量, 故称空穴为多数载流子(简称多子), 自由电子为少数载流子(简称少子)。这种半导体主要靠空穴导电, 因为空穴带正电(positive), 所以称之为P型半导体。掺入的杂质越多, 空穴的浓度就越高, 从而导电性能就越强。因杂质原子中的空位能吸收电子, 故称为受主原子。

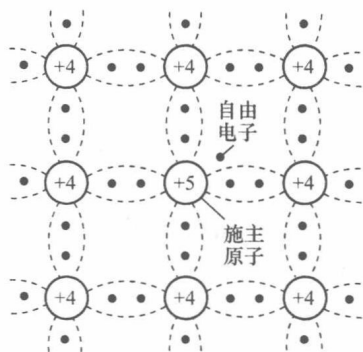


图 1.1.3 N型半导体

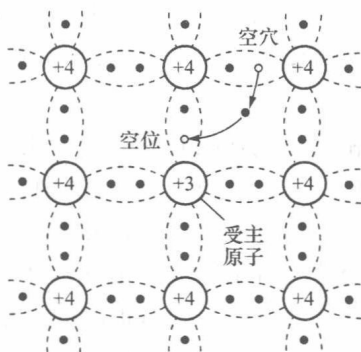


图 1.1.4 P型半导体

1.1.3 PN结

P型或N型半导体的导电能力虽然有了很大提高, 但不能直接用来制造半导体器件。若将这两种半导体以某种方式结合在一起, 构成PN结, 就可以使半导体的导电性能受到控制, 从而可以制成多种具有不同特性的半导体器件。

1. PN结的形成

当P型半导体和N型半导体结合在一起时, 由于P区的空穴浓度远大于N区的空穴浓度, 因此, P区空穴要向N区扩散。同样, N区的电子要向P区扩散。于是, 在交界面两侧便形成了电子和空穴的扩散运动, 如图 1.1.5 (a) 中箭头所示。在交界面P区一侧的空穴与N区扩散来的电子复合而消失, 留下带负电的三价杂质(如硼)离子, 形成负空间电荷区。N区一侧的电子与P区扩散来的空穴复合而消失, 留下带正电的五价杂质(例如磷)离子, 形成正空间电荷区。这样, 在P型半导体和N型半导体的交界面两侧就形成了一个空间电荷区, 这个空间电荷区就是PN结, 如图 1.1.5 (b) 所示。

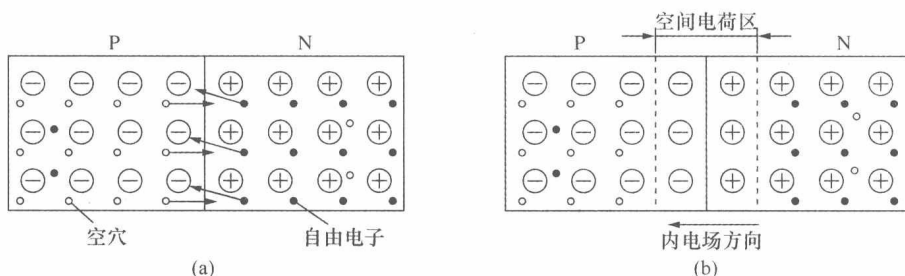


图 1.1.5 PN 结的形成

空间电荷区的正负离子虽然带电，但它们不能移动，不参与导电。而在这个区域内，载流子极少，所以空间电荷区的电阻率很高。此外，在此区域内，空穴和电子全都复合掉了，或者说载流子都消耗尽了，因此，空间电荷区又称为耗尽层。

正负空间电荷在界面两侧形成一个电场，称为内电场，其电场强度正比于空间电荷的数量，其方向由正电荷指向负电荷，即由 N 区指向 P 区。

内电场形成后，一方面，由 P 区向 N 区扩散的空穴以及由 N 区向 P 区扩散的自由电子在空间电荷区都将受到内电场的阻力，即内电场对多数载流子的扩散运动起阻挡作用，所以空间电荷区又称为阻挡层。但另一方面，内电场促使少数载流子向对方移动（P 区的电子向 N 区移动，N 区的空穴向 P 区移动）。通常把少数载流子在内电场作用下的运动称为漂移运动。

扩散和漂移既互相联系，又互相矛盾。在开始形成空间电荷区时，多数载流子的扩散运动占优势，随着扩散的进行，空间电荷区逐渐变宽，内电场逐渐增强。随着内电场的增强，它阻挡多子的扩散，于是在一定条件下（例如温度一定），多数载流子的扩散运动逐渐减弱，而少数载流子的漂移运动则逐渐增强。最后，扩散运动和漂移运动达到动态平衡。即 P 区的空穴（多子）向右扩散的数量与 N 区的空穴（少子）向左漂移的数量相等，自由电子也是同样情况。达到平衡后，空间电荷区的宽度基本上稳定下来，PN 结也就处于相对稳定的状态。

2. PN 结的单向导电性

PN 结处于动态平衡状态时，多数载流子的扩散电流与少数载流子的漂移电流大小相等而方向相反，通过 PN 结的电流为零，即 PN 结处于不导电状态。但是，如果在 PN 结两端加上不同极性的电压，原来扩散运动和漂移运动的动态平衡就会被打破，使 PN 结呈现出截然不同的导电性能，即单向导电性。单向导电性是 PN 结的基本特性。

1) PN 结外加正向电压

当外加电源的正极接 P 区，负极接 N 区时，称为 PN 结外加“正向电压”或“正向偏置”，如图 1.1.6 所示。这时，外电场和内电场方向相反，因此扩散运动与漂移运动的平衡被打破。外电场驱使 P 区的空穴和 N 区的自由电子进入空间电荷区，分别抵消（中和）一部分负空间电荷和正空间电荷，于是整个空间电荷区变窄，内电场被削弱，多数载流子的扩散运动增强，形成较大的扩散电流（正向电流）。在一定范围内，外电场愈强，正向电流（由 P 区流向 N 区的电流）愈大，这时 PN 结呈现的电阻很小。正向电流包括空穴电流和电子电流两部分。由于空穴和电子带有不同极性的电荷，虽然运动方向相反，但所形成的电流方向一致。外电源不断地向半导体提供电荷，使电流得以维持。

2) PN 结外加反向电压

当外加电源的正极接 N 区，负极接 P 区时，称为 PN 结外加“反向电压”或“反向偏置”，如图 1.1.7 所示。这时，外电场和内电场方向一致，也破坏了扩散运动与漂移运动的平衡。外电场驱使空间电荷区两侧的空穴和自由电子移走，使得空间电荷区变宽，内电场增强，导致多数载流子的扩散运动难以进行。但另一方面，内电场的增强也加强了少数载流子的漂移运动。在外电场的作用下，N 区的空穴越过 PN 结进入 P 区，P 区的自由电子越过 PN 结进入 N 区，在电路中形成了反向电流（由 N 区流向 P 区的电流）。由于少数载流子数量很少，因此反向电流很小，即 PN 结呈现的反向电阻很大，可以认为反向偏置的 PN 结基本上是不导电的，即处于截止状态。

因为少数载流子是由于本征激发产生的，环境温度愈高，少数载流子的数量愈多，反向电流就越大。所以，温度对反向电流的影响很大。

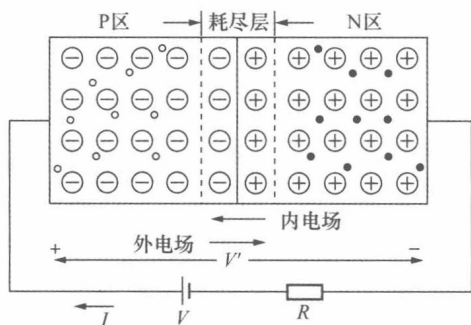


图 1.1.6 PN 结外加正向电压

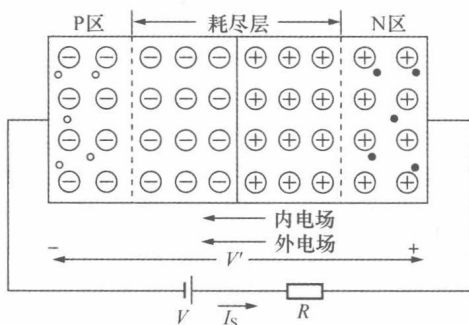


图 1.1.7 PN 结外加反向电压

由以上分析可知，当 PN 结外加正向电压时，PN 结呈现很小的电阻，PN 结中有较大的电流通过，PN 结处于导通状态；当 PN 结外加反向电压时，PN 结呈现很大的电阻，PN 结中只有很小的反向电流通过，PN 结处于截止状态。这就是 PN 结的单向导电性。

3. PN 结的电容效应

由于空间电荷区只有不能移动的正负离子，相当于存储着电荷；空间电荷区缺少可以导电的载流子，相当于介质；而两侧的 P 区和 N 区的电导率相对高一些，相当于导体；当 PN 结两端加变化的电压时，空间电荷区的电荷量将随之改变，这种现象与电容的作用相似，故 PN 结具有电容效应。与之等效的电容，称为结电容。结电容一般都很小（结面积小的其电容量约 1pF，结面积大的其电容量为几十至几百皮法），对于低频信号呈现很大的容抗，其作用可以忽略不计，因而只有在信号频率较高时才考虑结电容的影响。

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管的结构和类型

将 PN 结加上电极引线和管壳，就成为半导体二极管。由 P 区引出的电极为阳极（正极），由 N 区引出的电极为阴极（负极），其电路符号如图 1.2.1 (d) 所示。