

21世纪

高等院校计算机系列教材

模拟电子技术

范立南 恩莉 代红艳 李雪飞 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

TN710
135

21 世纪高等院校计算机系列教材

模拟电子技术

范立南 恩莉 代红艳 李雪飞 编著

中国水利水电出版社

内 容 提 要

本书系统而全面地介绍了模拟电子技术的基本理论、分析方法及应用, 主要包括半导体二极管及其电路分析、晶体管及其放大电路分析、场效应管及其放大电路分析、集成电路及技术指标、放大电路中的反馈、理想集成放大器的应用、有源滤波电路、波形的产生和变换以及直流稳压电源等。每章均有相应的例题、小结和习题。

由于模拟电子技术课程是电气信息领域相关专业学生在电子技术方面入门性质的技术基础课, 所以本书在编写过程中注重对基本理论、基本分析方法及设计应用的讲述, 力求清晰透彻、深入浅出、系统完整, 特别注重集成芯片的应用, 有利于提高分析和设计模拟电路的能力。

本书既可作为高等院校电工类、电子类、电气类、自动化类、计算机类、通信工程类、机电一体化等相关专业的教材和教学参考书, 也可作为相关专业工程技术人员的技术参考书。

本书电子教案可以从中国水利水电出版社网站下载, 网址为 <http://www.waterpub.com.cn/softdown/>。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术 / 范立南等编著. —北京: 中国水利水电出版社, 2006

(21 世纪高等院校计算机系列教材)

ISBN 7-5084-3490-0

I. 模… II. 范… III. 模拟电路—电子技术—高等学校—教材

IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 151486 号

书 名	模拟电子技术
作 者	范立南 恩莉 代红艳 李雪飞 编著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机) 68331835 (营销中心) 82562819 (万水)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	北京市天竺颖华印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 15.75 印张 352 千字
版 次	2006 年 3 月第 1 版 2006 年 3 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	24.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

模拟电子技术课程是电气和电子信息领域相关专业学生在电子技术方面入门性质的技术基础课,是一门理论性和实践性很强的课程,主要研究半导体元器件,包括集成器件的基本理论、分析方法及应用。

全书共分9章。第1章讲述了半导体二极管及其电路分析;第2章系统而全面地阐述了晶体管及其放大电路分析;第3章系统阐述了场效应管及其放大电路分析;第4章深入浅出地讲述了集成运算放大电路及技术指标;第5章讲述了放大电路中负反馈的分析及引入;第6章论述了理想集成运算放大器的应用;第7章阐述了由集成运放及滤波电路构成的有源滤波电路;第8章详细论述了波形的产生和变换方法;第9章阐述了直流稳压电源的电路结构、工作原理及其参数计算。为了便于教学和自学,每章都配有大量的例题和习题。

电子技术是一门迅速发展着的学科,新器件和新产品不断出现,而目前教学内容和教学学时之间的矛盾很突出,再加之学生的学习在由基础课向专业课过渡时,容易出现入门难等问题,给本课程的教学带来一定难度。经过长期的教学实践和社会调研,在本书的编写过程中,体系结构注意了保证基础,突出集成,对分立元件的内容做了一定的删减,而重点突出集成器件的应用。在章节安排上,将集成运算放大器放在前面介绍,并在后面章节中不断重复和加深。本书注重对基本理论、基本分析和应用的讲述,力求清晰透彻、系统完整、深入浅出,有利于学生的理解与进一步学习。

本书第1章至第3章由代红艳编写,第4章和第8章由李雪飞编写,第5章至第7章由恩莉编写,第9章由范立南编写。全书由范立南统稿。

本书是作者在吸收国内外本领域的新技术并结合多年教学和科研体会编写而成的。在编写过程中得到了潘峰、冯云、于鲁佳等的帮助,同时,书中参考和引用了参考文献中的有关部分,在此一并表示衷心感谢。

本书既可作为高等院校电工类、电子类、电气类、自动化类、计算机类、通信类、机电一体化等相关专业的教材和教学参考书,也可作为相关专业工程技术人员的技术参考书。

由于作者水平有限,加之时间仓促,书中疏漏与错误之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

2006年1月

目 录

前言

第1章 半导体二极管及其电路分析	1
1.1 本征半导体	1
1.2 杂质半导体	2
1.2.1 N型半导体	2
1.2.2 P型半导体	3
1.3 PN结	3
1.3.1 PN结的形成	3
1.3.2 PN结的单向导电性	4
1.3.3 PN结的伏安特性	5
1.3.4 PN结的电容效应	6
1.4 半导体二极管	6
1.4.1 二极管的伏安特性及主要参数	7
1.4.2 二极管电路的分析	8
1.5 稳压管	11
1.5.1 稳压管的伏安特性	11
1.5.2 稳压管的主要参数	12
1.5.3 稳压电路	12
本章小结	14
思考题与习题	15
第2章 晶体管及其放大电路分析	17
2.1 晶体管的基本概念	17
2.1.1 晶体管的结构及分类	17
2.1.2 晶体管的电流放大作用	18
2.1.3 晶体管的输入输出特性曲线	21
2.1.4 晶体管的主要参数	23
2.2 晶体管放大电路的分析	26
2.2.1 晶体管放大电路的性能指标	26
2.2.2 晶体管放大电路的图解分析法	30
2.2.3 晶体管放大电路的等效电路分析法	34
2.2.4 静态工作点稳定放大电路	40
2.2.5 基本共集放大电路的分析	44

2.2.6 基本共基放大电路的分析	47
2.3 多级放大电路的分析	49
2.4 放大电路的频率特性	52
本章小结	56
思考题与习题	58
第3章 场效应管及其放大电路分析	62
3.1 场效应管的基本概念	62
3.1.1 结型场效应管	62
3.1.2 绝缘栅型场效应管	66
3.2 场效应管放大电路的分析	72
3.2.1 共源放大电路的分析	73
3.2.2 共漏放大电路的分析	76
本章小结	80
思考题与习题	80
第4章 集成运算放大电路	83
4.1 集成电路的特点	83
4.2 集成运放的基本单元电路	84
4.2.1 差动放大电路	85
4.2.2 电流源电路	93
4.2.3 复合管结构	96
4.2.4 输出级电路	97
4.3 互补功率放大电路	99
4.3.1 电路的组成	99
4.3.2 工作原理	100
4.3.3 输出功率及效率	100
4.3.4 晶体管的选择	103
4.3.5 晶体管的几种工作方式	106
4.4 其他功率放大电路	107
4.4.1 OTL 功放电路	107
4.4.2 BTL 功放电路	107
4.4.3 变压器耦合功放电路	109
4.5 实际的功率放大电路	112
4.5.1 LM386 内部电路	112
4.5.2 LM386 的外形和引脚图	113
4.5.3 LM386 的一种接线图	113
4.6 集成运放的性能指标及低频等效电路	113
4.6.1 性能指标	113

4.6.2 低频等效电路	115
4.7 集成运放的使用注意事项	116
本章小结	118
思考题与习题	118
第5章 负反馈放大电路	125
5.1 反馈的基本概念	125
5.1.1 反馈的基本概念和类型	125
5.1.2 电路中的反馈形式	125
5.1.3 反馈放大电路的4种组态	127
5.2 负反馈放大电路的表达式	129
5.2.1 负反馈放大电路的一般表达式	130
5.2.2 负反馈放大电路的计算	131
5.3 负反馈对放大电路性能的影响	135
5.3.1 引入负反馈对放大倍数的影响	135
5.3.2 引入负反馈可提高放大倍数的稳定性	135
5.3.3 对输入电阻和输出电阻的影响	136
5.3.4 减小非线性失真	137
5.3.5 扩展通频带	137
5.4 负反馈放大电路的自激振荡	138
本章小结	141
思考题与习题	141
第6章 理想集成运放的应用	147
6.1 理想运算放大器	147
6.1.1 理想运放的性能指标	147
6.1.2 理想运放的工作区域	147
6.2 基本运算电路	148
6.2.1 比例运算电路	148
6.2.2 求和运算电路	150
6.2.3 加减运算电路	151
6.3 积分运算电路和微分运算电路	153
6.3.1 积分运算电路	153
6.3.2 微分运算电路	154
6.4 对数运算和反对数运算	156
6.4.1 对数运算电路	156
6.4.2 指数运算电路	158
6.4.3 乘法运算电路和除法运算电路	159
6.5 模拟乘法器及其应用	159

6.5.1	模拟乘法器简介	159
6.5.2	模拟乘法器的应用	160
	本章小结	163
	思考题与习题	164
第7章	有源滤波电路	169
7.1	滤波电路	169
7.1.1	滤波电路的种类	169
7.1.2	无源滤波和有源滤波	170
7.2	低通滤波器	171
7.2.1	同相输入低通滤波器	171
7.2.2	反相输入低通滤波器	174
7.3	高通滤波电路 (HPF)	176
7.3.1	同相输入一阶高通滤波电路	176
7.3.2	二阶压控电压源 HPF	176
7.4	带通滤波电路 (BPF)	177
7.5	带阻滤波电路 (BEF)	179
7.6	全通滤波电路 (APF)	181
7.7	其他形式的滤波电路	181
7.7.1	开关电容有源滤波电路	182
7.7.2	状态变量型有源滤波器	182
	本章小结	184
	思考题与习题	184
第8章	波形发生电路	188
8.1	正弦波振荡电路	188
8.1.1	正弦波振荡电路的基础知识	188
8.1.2	RC 正弦波振荡电路	191
8.1.3	LC 正弦波振荡电路	195
8.1.4	石英晶体正弦波振荡电路	201
8.2	非正弦波振荡电路	203
8.2.1	非正弦波振荡电路的基础知识	203
8.2.2	矩形波发生电路	204
8.2.3	三角波发生电路	208
8.2.4	锯齿波发生电路	210
8.3	波形变换电路	214
8.3.1	三角波变锯齿波电路	214
8.3.2	三角波变正弦波电路	212
	本章小结	214

思考题与习题.....	215
第9章 直流稳压电源	223
9.1 直流稳压电源的组成	223
9.2 整流电路	223
9.2.1 单相半波整流电路	223
9.2.2 单相桥式整流电路	225
9.3 滤波电路	228
9.3.1 电容滤波电路	229
9.3.2 电感滤波电路	231
9.3.3 复式滤波电路	231
9.3.4 倍压整流电路	233
9.4 稳压电路	233
9.4.1 并联型稳压电路	233
9.4.2 串联型稳压电路	234
9.4.3 三端集成稳压器	235
本章小结.....	238
思考题与习题.....	238
参考文献	241

第 1 章 半导体二极管及其电路分析

半导体二极管在电子技术中的应用非常广泛，如应用在整流电路、限幅电路、开关电路和稳压电路等方面。半导体二极管是由 PN 结的 P 区和 N 区分别引出两根电极引线，并加上管壳封装而成的，其核心是 PN 结。所以为了更好地分析和利用二极管电路，首先要理解 PN 结的形成、PN 结的伏安特性及 PN 结的电容效应，在此基础上掌握半导体二极管的结构、伏安特性、参数及其应用。

1.1 本征半导体

导体的导电能力最强，如金、银、铜等金属均为导体；绝缘体的导电能力最弱，如塑料、橡胶等均为绝缘体；半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间，常用的半导体材料为硅（Si）、锗（Ge），化合物半导体为砷化镓（GaAs）。半导体具有光敏、热敏和掺杂特性，即半导体在受到光照、加热或掺入微量杂质时，其导电性能会大大提高。

纯净的具有晶体结构的半导体称为本征半导体。常用的半导体材料硅（Si）和锗（Ge）均为 +4 价元素，其最外层有 4 个价电子。现以硅原子为例，每个硅原子最外层的 4 个价电子分别和周围 4 个硅原子的价电子形成共用电子对，构成共价键结构，本征半导体的共价键结构如图 1-1 所示。

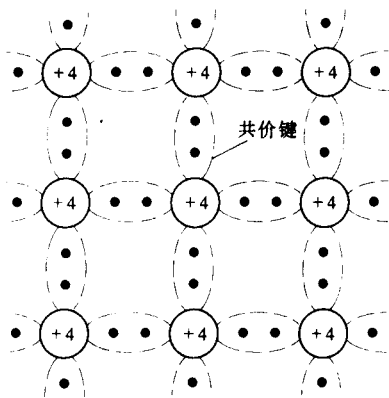


图 1-1 本征半导体的共价键结构

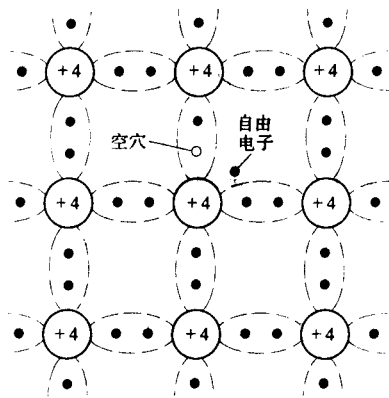


图 1-2 本征半导体的两种载流子

本征半导体中有两种载流子：自由电子载流子和空穴载流子。本征半导体中的共价键具有很强的结合力，常温时仅有极少数价电子由于热运动获得足够的能量而挣脱共价键的束缚成为自由电子；同时在共价键相应位置处留下一个空位，称为空穴。原子因为失去一个价电子而带正电，即空穴带正电，如图 1-2 所示。

半导体由于热激发产生自由电子空穴对的现象称为本征激发。本征激发产生的自由电子和空穴总是成对出现的，二者数量相等。自由电子带负电，空穴带正电，二者所带电量相等、极性相反。在外加电场的作用下，自由电子定向运动形成电子电流；由于空穴的出现，在外电场的作用下，空穴会吸引邻近原子的价电子作定向填补空穴的运动，这样，在邻近原子的共价键上又留下一个空位，这种价电子定向填补空穴的运动可以看作是空穴在与价电子定向填补空穴的运动方向相反的运动，形成空穴电流。由于自由电子与空穴带电极性相反，运动方向相反，所以在外电场作用下所形成的自由电子电流和空穴电流方向相同，本征半导体中的电流等于自由电子电流和空穴电流之和。

本征半导体由于热激发能够产生自由电子空穴对。自由电子在运动过程中，如果与空穴相遇，就会填补空穴，使自由电子和空穴成对消失，这种现象称为复合。自由电子、空穴的产生与复合同时存在，在一定温度下，本征激发产生的自由电子、空穴的数目与复合的自由电子、空穴的数目相等时，达到动态平衡，此时，本征半导体中载流子浓度不再改变。当环境温度升高时，热运动加剧，本征激发产生的自由电子、空穴的数目增加，自由电子、空穴的产生与复合达到新的动态平衡，载流子浓度增加，导电性能增强；反之，当环境温度降低时，热运动减慢，本征激发产生的自由电子、空穴的数目降低，自由电子、空穴的产生与复合达到新的动态平衡，载流子浓度降低，导电能力减弱。可见，半导体具有热敏特性，本征半导体中的载流子浓度是环境温度的函数。

1.2 杂质半导体

本征半导体是纯净的半导体，若在本征半导体中掺入微量的杂质元素，其导电性能会得到改善，此时得到的半导体称为杂质半导体。按照掺入元素的不同，杂质半导体可分为N型半导体和P型半导体。在本征半导体中掺入+5价元素，如磷（P）等所得到的杂质半导体为N型半导体；在本征半导体中掺入+3价元素，如硼（B）等所得到的杂质半导体为P型半导体。

1.2.1 N型半导体

在本征半导体中掺入+5价元素，如磷（P）等所得到的杂质半导体为N型半导体。掺入的+5价元素会取代本征半导体中硅原子的位置，由于+5价元素的最外层有5个价电子，其中4个价电子分别和周围4个硅原子的价电子形成共用电子对，构成共价键结构，还多出一个价电子，该价电子不受共价键的束缚，在常温下就能够获得足够的能量成为自由电子，如图1-3所示。

由图1-3可以看出，在本征半导体中每掺入一个+5价元素，就可以提供一个自由电子，由于+5价

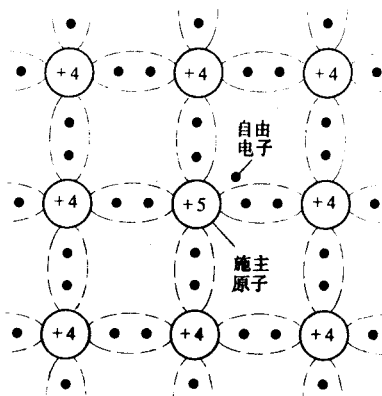


图 1-3 N 型半导体

元素能够提供自由电子,称为施主原子。施主原子提供一个价电子后,由于本身失去电子而带正电,成为不能移动的正离子,称为施主离子。N型半导体仍然有两种载流子:自由电子和空穴。其中空穴载流子是本征激发产生的,而自由电子载流子除了本征激发产生之外,还有一部分是由杂质提供的,所以对于N型半导体来说,自由电子浓度高于空穴浓度。自由电子为N型半导体的多数载流子,简称多子;空穴为N型半导体的少数载流子,简称少子,N型半导体主要靠多子自由电子导电。

1.2.2 P型半导体

在本征半导体中掺入+3价元素,如硼(B)等所得到的杂质半导体为P型半导体。掺入的+3价元素会取代本征半导体中硅原子的位置,由于+3价元素的最外层有3个价电子,其中3个价电子分别和周围4个硅原子的价电子形成共用电子对,构成共价键结构时,多出一个空位,此空位会吸引邻近硅原子的价电子定向填补,邻近硅原子的共价键位置处产生一个空穴,杂质原子由于得到电子而带负电,本身成为不能移动的负离子,如图1-4所示。

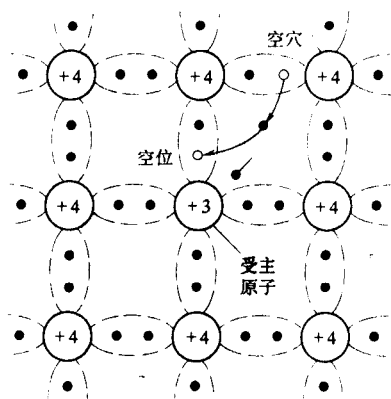


图1-4 P型半导体

由图1-4可以看出,在本征半导体中每掺入一个+3价元素,就可以提供一个空穴,该空穴能够吸引邻近硅原子的价电子定向填补,称为受主原子。受主原子接收一个价电子后,由于本身得到电子而带负

电,成为不能移动的负离子,称为受主离子。P型半导体仍然有两种载流子:自由电子和空穴。其中自由电子载流子是本征激发产生的,而空穴载流子除了本征激发产生之外,还有一部分是由杂质提供的,所以对于P型半导体来说,空穴浓度高于自由电子浓度,空穴为P型半导体的多子,自由电子为P型半导体的少子。

1.3 PN结

利用不同的掺杂工艺,将P型半导体和N型半导体制作在同一个半导体硅片上,在P型半导体和N型半导体的交界面就形成了PN结。

1.3.1 PN结的形成

如图1-5所示,利用不同的掺杂工艺,将P型半导体和N型半导体制作在同一个半导体硅片上,由于P区多子空穴的浓度高于N区少子空穴的浓度,N区多子自由电子的浓度高于P区少子自由电子的浓度,所以必然会出现P区多子空穴向N区扩散,N区多子自由电子向P区扩散的现象。这种由于存在浓度差而引起的多子运动,称为扩散运动。由于多子的扩散运动,由P区扩散到N区的空穴会和N区的自由电子复合,同时由N区

扩散到 P 区的自由电子会和 P 区的空穴复合, 使得 P 型半导体和 N 型半导体交界面附近的多子浓度急剧减少, 形成由不能移动的正、负离子构成的空间电荷区, 称为 PN 结, 又称为耗尽层。

随着多子扩散运动的进行, 空间电荷区进一步加宽。由于空间电荷区的形成, 建立了由 N 区指向 P 区的内电场。内电场的作用是阻碍多子扩散运动, 有利于 N 区少子空穴向 P 区运动, P 区少子自由电子向 N 区运动, 这种在内电场作用下少子的定向移动, 称为漂移运动。由于少子的漂移运动使得空间电荷区变窄, 有利于多子扩散, 不利于少子漂移, 最终多子扩散运动和少子漂移运动达到动态平衡, 即由 P 区扩散到 N 区的空穴数目等于由 N 区漂移到 P 区的空穴数目, 由 N 区扩散到 P 区的自由电子数目等于由 P 区漂移到 N 区的自由电子数目, 空间电荷区的宽度不再改变, 电位差为 U_{ho} , 电流为 0。

由于空间电荷区中的正、负电荷的电量相等, 所以 PN 结呈现电中性。当形成 PN 结的 P 型半导体和 N 型半导体的杂质浓度相等时, 空间电荷区在 P 区和 N 区的宽度相等, 称为对称结。当形成 PN 结的 P 型半导体和 N 型半导体的杂质浓度不相等时, 空间电荷区在 P 区和 N 区的宽度不再相等, 杂质浓度高的一侧, 空间电荷区的宽度较窄, 杂质浓度低的一侧, 空间电荷区的宽度较宽, 称为不对称结。

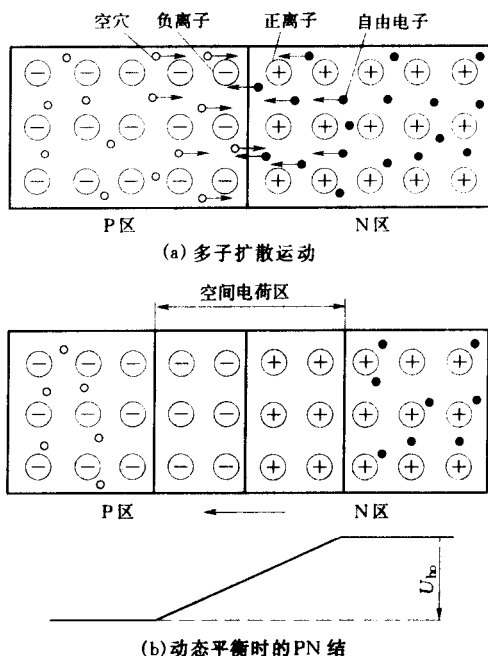


图 1-5 PN 结的形成

1.3.2 PN 结的单向导电性

PN 结的单向导电性是指当 PN 结外加正向电压时导通, 有较大的正向电流流过; 当 PN 结外加反向电压时截止, 仅有较小的反向电流流过。

所谓 PN 结外加正向电压是指 PN 结的 P 区接电源的正极, N 区接电源的负极, 通常称为 PN 结正向偏置, 如图 1-6 所示。此时, 由于 PN 结的 P 区接电源的正极, N 区接电源的负极, 形成的外电场方向从 P 区指向 N 区, 与 PN 结的内电场方向相反。该外电场的作用是有利于多子的扩散运动, 阻碍少子的漂移运动, 外电场会将多数载流子推向空间电荷区, 使空间电荷区变窄, 从而形成由多子扩散运动产生的较大的正向电流, PN 结处于导通状态。

所谓 PN 结外加反向电压是指 PN 结的 N 区接电源的正极, P 区接电源的负极, 通常称为 PN 结反向偏置, 如图 1-7 所示。此时, 由于 PN 结的 N 区接电源的正极, P 区接电源的负极, 形成的外电场方向从 N 区指向 P 区, 与 PN 结的内电场方向相同。该外电场的

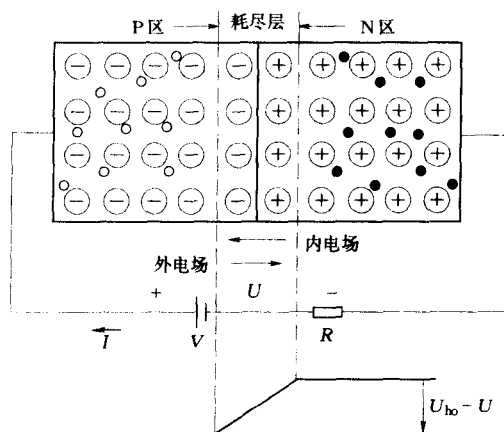


图 1-6 PN 结外加正向电压的情况

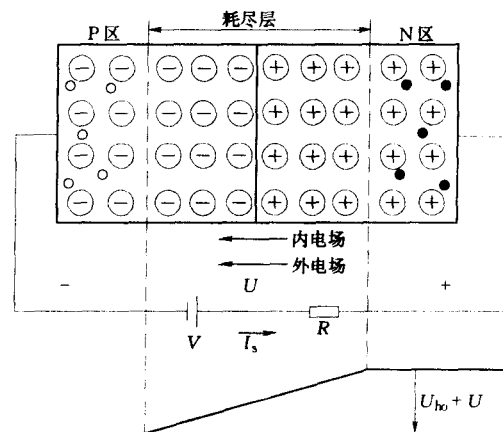


图 1-7 PN 结外加反向电压的情况

作用是阻碍多子的扩散运动, 有利于少子的漂移运动, 使空间电荷区变宽, 从而形成由少子漂移运动产生的较小的反向电流, PN 结处于截止状态。

1.3.3 PN 结的伏安特性

PN 结两端所加电压 u 与流过该 PN 结的电流 i 之间的关系为:

$$i = I_s (e^{\frac{u}{U_T}} - 1) \quad (1-1)$$

其中, I_s 为反向饱和电流; U_T 为温度的电压当量, 即:

$$U_T = \frac{kT}{q} \quad (1-2)$$

其中, k 为玻耳兹曼常数; T 为热力学温度; q 为电子电量。常温即 $T = 300\text{K}$ 时, $U_T \approx 26\text{mV}$ 。

由式 (1-1) 可以画出 PN 结的伏安特性曲线, 如图 1-8 所示。

图 1-8 中 PN 结的伏安特性曲线分为 3 部分:

(1) $u > 0$ 部分的曲线为 PN 结的正向特性, 且当 $u \gg U_T$ 时, 由式 (1-1) 可得 $i \approx I_s e^{\frac{u}{U_T}}$, 流过 PN 结的电流 i 与加在 PN 结两端的电压之间按指数规律变化。

(2) $U_{(BR)} < u < 0$ 部分的曲线为 PN 结的反向截止特性, 其中 $U_{(BR)}$ 为 PN 结的反向击穿电压, 且当 $|u| \gg U_T$ 时, 由式 (1-1) 可得 $i \approx -I_s$, 流过 PN 结的电流为反向饱和电流, 由于反向饱和电流很小, 故 PN 结处于反向截止状态。

(3) $u < U_{(BR)}$ 部分的曲线为 PN 结的反向击穿特性, 当 PN 结两端外加的反向电压增加至一

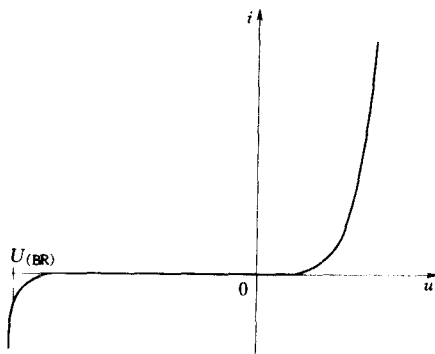


图 1-8 PN 结的伏安特性曲线

定值 $U_{(BR)}$ 后, 流过 PN 结的反向电流急剧增加, 此现象称为 PN 结的反向击穿。PN 结的反向击穿按照其击穿机理的不同, 可分为雪崩击穿和齐纳击穿两种。

当形成 PN 结的两种杂质半导体的掺杂浓度较低时, 空间电荷区宽度较宽, 在较低的反向电压下不会发生击穿现象, 但当外加反向电压增加到一定数值时, 外电场的强度足够大, 且与内电场方向相同, 与内电场共同作用下, 使得少子能够获得足够的漂移速度, 在漂移过程中与共价键中的价电子相碰撞时, 将共价键中的价电子撞出共价键, 产生自由电子-空穴对。新产生的自由电子和空穴又会被电场加速, 碰撞出共价键中其他的价电子, 产生自由电子-空穴对, 这样, 载流子数目会雪崩似的倍增, 使得由少子漂移运动形成的反向电流急剧增加, 此现象为雪崩击穿。发生雪崩击穿时所需的反向击穿电压一般大于 6V。

当形成 PN 结的两种杂质半导体的掺杂浓度较高时, 空间电荷区宽度很窄, 不太大的反向电压就可以在空间电荷区形成很强的电场, 其强度能够直接破坏共价键, 使价电子挣脱共价键的束缚, 产生自由电子-空穴对, 载流子数目得到急剧增加, 从而反向电流急剧增大, 此现象为齐纳击穿。齐纳击穿电压较低, 发生齐纳击穿时所需的反向击穿电压一般低于 4V。当击穿电压介于 4~6V 之间时, 这两种击穿同时发生。

1.3.4 PN 结的电容效应

PN 结的电容效应根据产生机理不同可分为势垒电容 C_b 和扩散电容 C_d 。

当 PN 结两端外加正向电压时, 随着外加正向电压的增加, 空间电荷区的宽度将随之减少, 即空间电荷区的电荷量将随之减少。当 PN 结两端外加反向电压时, 随着外加反向电压的增加, 空间电荷区的宽度将随之增大, 即空间电荷区的电荷量随之增加。这种当 PN 结两端外加电压改变时, 空间电荷区的宽度将随之改变, 即空间电荷区的电荷量将随外加电压的变化而随之增减的现象类似于电容的充、放电过程, 空间电荷区宽度变化所等效的电容称为势垒电容 C_b 。

当 PN 结两端外加正向电压时, 有利于多子扩散运动, P 区的多子空穴扩散到 N 区, 成为 N 区的非平衡少子, 同时 N 区的多子自由电子扩散到 P 区, 成为 P 区的非平衡少子。当外加正向电压一定时, 靠近空间电荷区的区域非平衡少子的浓度高, 远离空间电荷区的区域非平衡少子的浓度低, 形成一定的浓度梯度。随着外加正向电压的增加, 扩散到对方的非平衡少子浓度增大, 浓度梯度也增大; 随着外加正向电压的减少, 扩散到对方的非平衡少子的浓度减少, 浓度梯度也减少。非平衡少子电荷总量的改变类似于电容的充、放电效应, 这种电容效应称为扩散电容 C_d 。PN 结的结电容 C_j 为势垒电容 C_b 和扩散电容 C_d 之和。

1.4 半导体二极管

半导体二极管是由 PN 结的 P 区和 N 区分别引出两根电极引线, 并加上管壳封装而成的, 简称二极管。由 P 区引出的电极为阳极, 由 N 区引出的电极为阴极。二极管的外形、

结构及符号如图 1-9 所示。

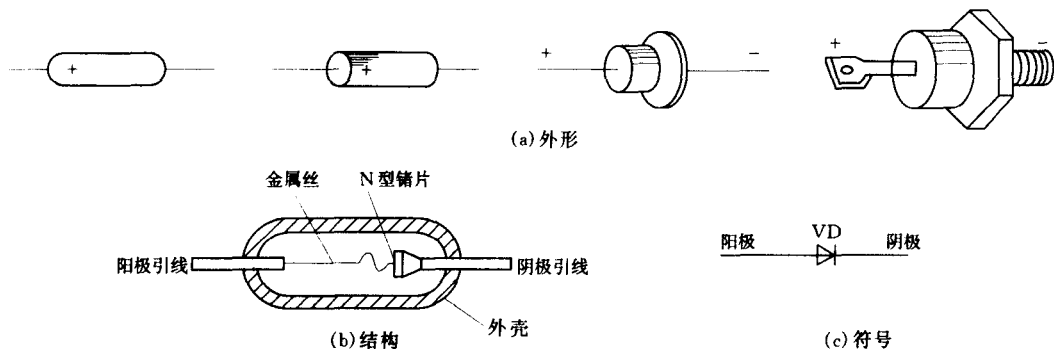


图 1-9 二极管的外形、结构及符号

按照构成二极管的半导体材料划分,有硅二极管、锗二极管和砷化镓二极管等。按照结构划分,有点接触型二极管、面接触型二极管和平面型二极管。点接触型二极管结面积小,结电容较小,适用于高频、小电流的电路,如检波电路。面接触型二极管结面积大,能够流过较大的电流,但其结电容大,只能在较低频率下工作,通常用作整流管。平面型二极管结面积较大的用于大功率整流,结面积小的可用作数字电路中的开关管。按照用途划分,有整流二极管、稳压二极管和发光二极管等。按照功率划分,有大功率二极管、中功率二极管和小功率二极管。

1.4.1 二极管的伏安特性及主要参数

1. 二极管的伏安特性

由于二极管是由 PN 结的 P 区和 N 区分别引出两根电极引线,并加上管壳封装而成的,二极管的核心是 PN 结,所以可以用 PN 结的伏安特性近似二极管的伏安特性,二极管具有单向导电性。但由于二极管是在 PN 结基础上加上引线和管壳封装而成的,所以二者的伏安特性还存在着细微的差别。二者伏安特性的差别是:当 PN 结和二极管两端外加正向电压时,由于二极管存在半导体体电阻和引线电阻,所以在外加电压相同的情况下,流过二极管的电流要比流过 PN 结的电流小。在外加电流相同的情况下,二极管两端的电压要高于 PN 结两端的电压。当 PN 结和二极管两端外加反向电压时,由于二极管存在表面漏电流,使得外加反向电压时的反向电流增大。实测的二极管伏安特性曲线如图 1-10 所示。

图 1-10 中二极管的伏安特性曲线分为 3 部分:

(1) $u > 0$ 部分的曲线为二极管的正向特性。当二极管两端外加正向电压时,在外加正向电压较小时,正向电流为零,这部分区域称为死区,只有当外加正向电压增加到一定值时,正向电流才能产生,并随着外加正向电压的增加按指数规律增大。使二极管开始导通时所对应的临界电压称为阈值电压,又称开启电压,用 U_{th} 表示。对于硅二极管来说,其阈值电压 U_{th} 为 0.5V 左右;对于锗二极管来说,其阈值电压 U_{th} 为 0.2V 左右。

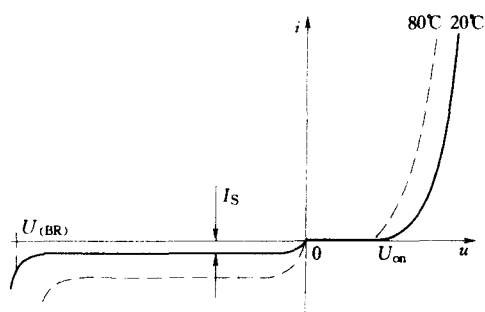


图 1-10 二极管的伏安特性曲线

当加在二极管两端的正向电压超过其阈值电压 U_{th} 时, 正向电流就会随着外加正向电压的增加而按指数规律增大, 此时二极管处于导通状态, 电阻非常小。二极管一旦导通, 对于硅二极管来说, 其正向导通压降约为 $0.6 \sim 0.8\text{V}$; 对于锗二极管来说, 其正向导通压降约为 $0.1 \sim 0.3\text{V}$ 。二极管正向导通时, 其正向电流不能过大, 否则会烧坏 PN 结。

(2) $U_{(BR)} < u < 0$ 部分的曲线为二极管的反向特性, 其中 $U_{(BR)}$ 为二极管的反向击穿电压。

当二极管外加反向电压时, 只要反向电压不超过二极管的反向击穿电压 $U_{(BR)}$, 反向电阻很大, 反向电流很小, 且不随外加反向电压的增加而变化, 此时的反向电流称为反向饱和电流, 二极管处于反向截止状态。

(3) $u < U_{(BR)}$ 部分的曲线为二极管的反向击穿特性, 当二极管两端外加的反向电压增加至一定值 $U_{(BR)}$ 后, 流过二极管的反向电流急剧增加, 此现象称为二极管的反向击穿。

由图 1-10 还可以看出, 二极管的伏安特性与环境温度有关, 随着环境温度的增加, 二极管的正向特性曲线将左移, 反向特性曲线将下移。温度升高时, 二极管的反向电流将增大, 温度每增加 10°C , 反向电流增加一倍。温度升高时, 二极管的正向压降将减小, 温度每增加 1°C , 正向压降将减小 $2 \sim 2.5\text{mV}$ 。

2. 二极管的主要参数

(1) 最大整流电流 I_F : 指二极管长期工作时允许通过的最大正向平均电流, 该值与 PN 结面积和散热条件有关。使用时正向平均电流不能超过此值, 否则会烧坏二极管。

(2) 最大反向工作电压 U_{RM} : 指二极管正常工作时所能承受的最大反向电压, 超过此值时, 二极管有可能因反向击穿而被损坏。通常规定最大反向工作电压 U_{RM} 为击穿电压的一半。

(3) 反向电流 I_R : 指二极管未发生击穿时的反向电流。其值越小, 说明二极管的单向导电性越好。

(4) 最高工作频率 f_M : 指二极管正常工作时的上限频率值, 它的大小与二极管的结电容有关, 若超过此值, 二极管的单向导电性会受到影响。

1.4.2 二极管电路的分析

由图 1-10 可以看出二极管的伏安特性曲线是非线性的, 所以分析含有二极管的电路比较麻烦。为了便于对二极管电路进行分析, 通常要对二极管的伏安特性曲线进行线性化近似, 并用相应的线性元件构成的电路取代电路中的二极管, 能够近似模拟二极管伏安特性的电路称为二极管的等效电路。常用的二极管等效电路有: 理想模型、恒压降模型、折线模型和小信号模型。