


21世纪高等院校教材

电子信息类

# 模拟集成电路教程

浙江工业大学电子学教研室

● 龙忠琪 主编  
金燕 李如春 副主编

 科学出版社  
www.sciencep.com

21 世纪高等院校教材(电子信息类)

# 模拟集成电路教程

浙江工业大学电子学教研组

龙忠琪 主 编

金 燕 李如春 副主编

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书是高等院校电子技术课程模拟电路部分的选用教材,是为面向 21 世纪素质教育而专门组织编写的。全书共 10 章,分五个部分:①模拟电路分析设计基础;②常用模拟集成电路;③模拟集成电路应用;④电子电路机助分析与设计;⑤基础练习题与思考题。书中紧紧围绕集成电路这个中心,给出了模拟集成电路分析设计的必要基础知识之后,详细介绍了模拟集成电路的常用芯片,包括集成运放、集成功放、集成稳压器等的电路组成、工作原理、使用方法及实用电路等。部分地引入了一些较新的器件与电路,如 DMOS、TMOS、BiCMOS、可编程模拟芯片 ispPAC 及 OTA 电路等;介绍了新技术,如电流模技术、开关技术(如开关滤波、开关电流源)等。在机助分析与设计一章中,以界面友好、使用方便的 EWB 软件为例,介绍了机助分析与机助设计的概念、方法与使用操作。

本书适于作高等院校电子技术课程教材,也可供自学者参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

模拟集成电路教程/龙忠琪主编. —北京:科学出版社,2004

ISBN7-03-012400-6

I. 模… II. 龙… III. 模拟集成电路-高等学校-教材 IV. TN431.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 099146 号

---

责任编辑:马长芳/责任校对:陈丽珠

责任印制:安春生/封面设计:陈敬

**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>

**双青印刷厂 印刷**

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2004 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2004 年 1 月第一次印刷 印张:20

印数:1—4 000 字数:462 000

**定价:26.00 元**

(如有印装质量问题,我社负责调换<环伟>)

## 前 言

本教程是高等院校电子技术课程模拟电路部分的选用教材,是为面向 21 世纪素质教育而专门组织编写的,是电子技术课程《数字集成电路教程》(科学出版社,2001,龙忠琪等编著)的姊妹篇。本教程与以往教材相比,有以下特点:

1. 根据电子技术越来越呈现出的电路与系统集成化、分析与设计自动化、实验与测试智能化的发展趋势,大幅度地删除了分立元件的内容,全面转向以集成电路为主。

2. 在内容组织与构架方面,一改往常以不同类型的放大电路平行讲授模式(如单管放大器、多级放大器、阻容放大器、反馈放大器、差分放大器等),代之以阐述半导体电路的基础理论方法为主,其中包括半导体器件基础、半导体电路分析基础和设计基础,然后介绍常用模拟集成电路芯片及其常见的典型应用。

3. 为适应电子技术迅速发展的需要,体现与时俱进精神,本书在内容上努力体现先进性和新颖性、实用性和实践性,为此引入了一些较新的东西,如 VMOS、DMOS、TMOS、BiCMOS、可编程模拟芯片 ispPAC 等新器件或新工艺,电流模、OTA 电路、开关技术(如开关滤波、开关电流源)等一些较新的电路理论和电路技术;并在最后一章中,以 EWB 为例,介绍了电子电路机助分析与机助设计的基本概念与基本方法,目的是增强学生关于系统的概念和使用 EDA 工具的意识与能力,以适应电路分析与电路设计自动化、工具化的发展趋势。

4. 为体现内容的实用性和实践性,教程中的器件大都选用有代表性的典型常用芯片、标称参数,设计举例尽量采用实例,以缩小理论教学与实际应用之间的距离,努力体现技术理论与工程实践相结合。

5. 在努力体现内容先进性的同时,基础理论部分着意适当加强,比如,本教程用近一半的篇幅论述半导体电路的基础理论和方法,尤其适当加强了器件基础部分。器件(包括 D、BJT、FET 等)的工作原理、电路模型等的讲解更加深入细致,重在概念。作者认为,只有学好电子器件,对电子线路的理解和掌握才更容易、更深刻,使用工具软件设计与开发电路才更自如。

6. 详略有别是本教程面向素质教育在内容处理上的一种策略性尝试。书中多数内容讲解详细深入、浅显易懂,并伴有大量例题与习题;但另一方面,有的内容只作简单介绍,甚至点到为止,有的则作为“印象知识”,这样既可避免内容的简单重复,更重要的是,给学生留有一定的思考或探求空间,以利于培养学生的形象思维和激发学生的求知欲望。

7. 习题分为基础练习题和思考题两部分。基础练习题主要用于巩固所学知识,达到基本要求;思考题是从研究生入学试题以及国内外优秀教材中精选出来的,难度有所提高,主要用于锻炼学生的独立思考能力、综合运用所学知识的能力。题中特别注意了对识图能力的训练。

本教程由浙江工业大学信息工程学院电子学教研组集体讨论编写,龙忠琪教授全程执键。参加部分编写工作和提供帮助的还有毛礼武、顾传驷、贾立新、张美玉、陈秀丽、余佩琼、孙惠英、胡净及浙江大学的龙胜春等老师,在此一并表示感谢。

编 者

2003年9月于杭州

# 目 录

## 前言

第一部分 模拟电路分析设计基础	1
1 绪论	1
1.1 模拟电路、模拟信号及模拟系统	1
1.1.1 模拟电路与模拟信号	1
1.1.2 模拟系统	1
1.2 模拟电子技术的发展及应用	2
2 半导体器件基础	4
2.1 半导体二极管	4
2.1.1 半导体和PN结	4
2.1.2 半导体二极管	6
2.1.3 二极管的特性	7
2.1.4 二极管的参数	9
2.1.5 二极管的电路模型	10
2.1.6 二极管的应用举例	16
2.1.7 特种二极管	17
2.2 半导体三极管	21
2.2.1 半导体三极管的结构及工作原理	22
2.2.2 半导体三极管的特性	26
2.2.3 半导体三极管的参数	31
2.2.4 半导体三极管的模型	33
2.2.5 半导体三极管的简单应用举例	40
2.3 MOS场效应晶体管	40
2.3.1 NMOS场效应管的结构及工作原理	41
2.3.2 NMOS场效应管的特性	42
2.3.3 NMOS场效应管的参数	45
2.3.4 NMOS场效应管的模型	46
2.3.5 PMOS场效应晶体管	48
* 2.3.6 VMOS、DMOS和TMOS场效应管	49
2.4 结型场效应晶体管	51
2.4.1 MES结型场效应管(MESFET)	52
2.4.2 PN结型场效应管(pnJFET)	54
2.4.3 结型场效应管的主要参数	57
2.5 本章小结	58

3	半导体电路分析基础	59
3.1	放大电路及其性能表征	59
3.1.1	放大与放大电路	59
3.1.2	放大电路的性能表征	60
3.2	放大电路的直流分析	64
3.2.1	直流工作点分析	64
3.2.2	直流传输特性分析	73
* 3.2.3	直流敏感度分析	74
3.3	放大电路的交流分析	74
3.3.1	小信号放大的基本概念	75
3.3.2	交流小信号分析的基本方法	77
3.3.3	BJT 放大电路的交流小信号分析	78
3.3.4	MOSFET 放大电路的交流小信号分析	90
* 3.3.5	JFET 放大电路的交流小信号分析	93
3.4	放大电路的频率响应分析	94
3.4.1	半导体器件的频率响应	94
3.4.2	不同电路组态对频率特性的影响	96
3.4.3	耦合电容、旁通电容和负载电容对电路频率响应的影响	99
3.5	放大电路的瞬态响应分析	100
3.6	本章小结	101
4	半导体电路设计基础	102
4.1	半导体放大电路的构建准则	102
4.2	放大电路中器件的偏置技术	104
4.2.1	几种常用偏置技术	104
4.2.2	集成电路中的偏置技术	107
4.3	放大电路中的信号耦合技术	108
4.3.1	阻容耦合	108
* 4.3.2	变压器耦合	108
4.3.3	直接耦合	109
* 4.3.4	光电耦合	111
4.4	电流源及有源负载	112
4.4.1	镜像电流源	113
4.4.2	微电流源和比例电流源	116
4.4.3	威尔逊电流源	118
4.4.4	MOS 电流源	119
4.4.5	有源负载电路	123
4.5	复合管及复合结构电路	124
4.5.1	复合管	124
4.5.2	复合结构电路	126

4.6	差分放大	127
4.6.1	差分放大电路及其工作原理	128
4.6.2	差分放大器的性能表征	130
4.6.3	BJT 有源负载差分放大器	135
4.6.4	FET 有源负载差分放大器	136
4.6.5	BiCMOS 差分放大器	137
4.7	反馈	137
4.7.1	反馈的基本概念	138
4.7.2	反馈的基本组态	138
4.7.3	反馈的基本表达式	146
4.7.4	反馈的基本分析方法	147
4.7.5	引入负反馈的好处和问题	153
*4.8	电流模技术	156
4.8.1	电流模的基本概念	156
4.8.2	电流模电路的分析设计原理	156
4.8.3	电流模电路的分析举例	158
4.9	本章小结	160
<b>第二部分 常用模拟集成电路</b>		161
5	集成运算放大器	161
5.1	集成运放的组成及工作原理	161
5.1.1	概述	161
5.1.2	集成运放的组成及特点	161
5.2	常用集成运算放大器	162
5.2.1	双极型通用集成运放 741	163
5.2.2	双极型通用集成四运放 124//224//324	175
5.2.3	CMOS 程控四运放 14573	177
5.2.4	其他集成运算放大器	179
5.3	本章小结	181
6	集成功率放大器	183
6.1	功率放大器的特点及分类	183
6.1.1	功率放大器的特点	183
6.1.2	功率放大器的分类	184
6.2	甲乙类双电源互补功放电路	187
6.3	常用集成功放电路	188
6.3.1	双极型集成功放 LM380/LM384	188
6.3.2	BiCMOS 集成功放 SHM1150	189
6.3.3	其他常用功放芯片	190
7	集成稳压电路	192
7.1	直流稳压电源的组成及工作原理	192



7.1.1	直流稳压电源的电路组成	192
7.1.2	直流稳压电源的工作原理	193
7.2	直流稳压电源的性能参数	198
7.3	常用集成稳压电路	199
* 8	在系统可编程模拟集成电路 ispPAC	202
8.1	在系统可编程模拟集成器件 ispPAC10	202
8.2	其他 ispPAC 电路	204
<b>第三部分 模拟集成电路应用</b>		205
9	模拟集成电路的应用	205
9.1	集成运放的应用	205
9.1.1	信号放大	205
9.1.2	信号运算	209
9.1.3	信号滤波	213
9.1.4	信号比较	218
9.1.5	信号产生	220
9.1.6	集成函数发生器 8038	227
9.1.7	集成运放使用注意事项	227
9.2	集成功放的应用	229
9.2.1	'4100 芯片接成音频功放的典型线路	229
9.2.2	'2822 接成双通道音频功放	230
9.2.3	LM4860 接成桥式音频功放电路	230
9.3	集成稳压器的应用	231
9.3.1	常用固定电压三端稳压器的应用	231
9.3.2	常用可调电压集成稳压器的应用	232
9.3.3	集成开关稳压器 MC34063 及其应用	233
9.4	本章小结	237
<b>第四部分 电子电路计算机辅助分析与设计</b>		238
10	电子电路的机助分析与设计	238
10.1	概述	238
10.2	电子工作平台 EWB 简介	239
10.2.1	EWB 的基本功能	239
10.2.2	EWB 的基本资源	240
10.2.3	EWB 的主要特色	245
10.3	电子电路 EWB 辅助分析	245
10.3.1	电子电路 EWB 辅助分析方法	245
10.3.2	电子电路 EWB 辅助分析举例	248
<b>第五部分 基础练习题及思考题</b>		257
附录 I	部分习题答案	302
附录 II	本书所用符号体系及常用符号	307
<b>参考文献</b>		311
<b>作者简介</b>		312

# 第一部分

## 模拟电路分析设计基础

---

### 1 绪 论

**导读:**本章主要讲述两个问题:①模拟电路、模拟信号与模拟系统的基本概念;②模拟电子技术的发展与应用。

**关键词:**模拟信号,模拟电路,模拟系统

#### 1.1 模拟电路、模拟信号及模拟系统

##### 1.1.1 模拟电路与模拟信号

模拟电路,简单地说,就是处理模拟信号的电路,其特点是,电路的输出是一个或一些连续变化的模拟信号。所谓模拟信号,是在时间上和幅值上连续变化的信号,例如语音信号、温度信号、压力信号、速度信号等等,模拟信号波形示例如图 1.1.1-1 所示。应当指出,在客观世界中,多数物理量都是以模拟形式存在的,因此,研究模拟信号的代表与处理具有重要的实际意义。

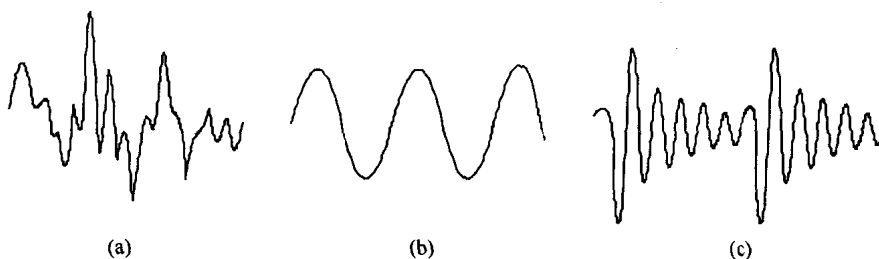


图 1.1.1-1 模拟信号例

(a)环境噪声信号 (b)钟摆摆幅信号 (c)语音信号[a:](啊...)

##### 1.1.2 模拟系统

模拟系统,是用连续方式表征与处理信号的系统,是一些相互连接的功能模块的集合。比如教室里的无线话筒扩音器,就是一个简单的模拟电路系统。如图 1.1.2-1 所示:语音信号经话筒变为电压信号,一般此信号较小,需经电压放大,然后用无线电发送空中,并被无线电接收机接收,在无线电接收机中进行高频放大、中频放大、解调(检波)等,再经低

频电压放大和功率放大,驱动扬声器(喇叭),最后以较大的音量、保真的音质播放出来,达到扩音之效果。整个过程皆为模拟处理,故为模拟系统。其中,小信号前置放大、低频电压放大和输出端的功率放大、电源等部分属本课程研究内容,可见,模拟电子技术是研究信号的不失真放大、产生、传输、变换、滤波、运算等的一门科学。虚线框内的无线电收发部分属另一门课程《高频电子线路》的范畴。

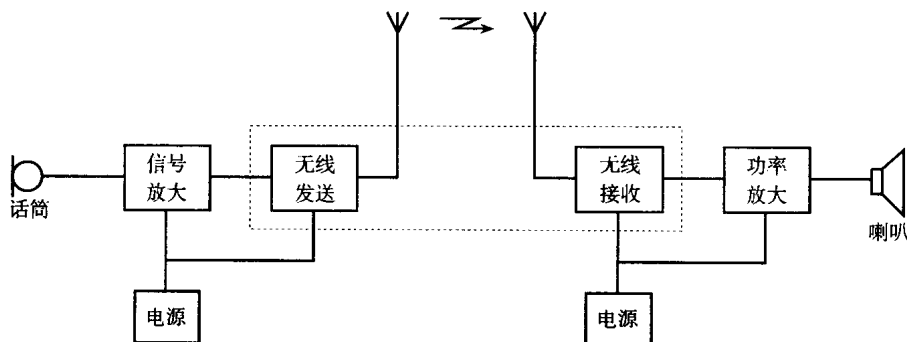


图 1.1.2-1 模拟系统例——无线话筒扩音系统

## 1.2 模拟电子技术的发展及应用

电子技术是研究电子器件和电子线路的一门科学,主要有模拟电子技术和数字电子技术两个分支。1906年世界上第一只电子管问世后,电子技术随即兴起,而首先兴起的即是模拟电子技术。

1947年12月23日,世界上第一只晶体管在美国贝尔实验室诞生,从此翻开了微电子技术新的一页,并带动了一连串的科学技术与现代工业的发展与变革,一场以微电子技术为主导技术的新技术革命逐渐燃发,同时随着微电子学和微电子技术的迅猛发展,一批重要的尖端技术群陆续兴起并取得突破性进展,进而对社会的各个层面发生了并将继续发生着极为广泛、深刻而久远的影响,包括经济的或政治的,科技的或生活的,家庭的或个人的,从国防军工到国计民生的各个层面,各个领域……。众所周知,印刷术、指南针等重大发明,曾经深刻地改变了先人的生活,蒸汽机的发明使人类进入了工业社会。但微电子学和微电子技术的出现及其对社会产生的巨大影响和冲击却是空前的、无与伦比的,它带来的是整个社会的变革,是工业社会向信息社会的迅速转型,而这场变革的漩涡中心就是集成电路和以集成电路为硬件基础的计算机。

微电子学和微电子技术,简单地说,是电子器件和电子设备由大变小、由小变微的科学与技术。其中微电子学是电子系统-整机-部件-元器件-工艺-材料进行综合性微型化研究设计与开发应用的一门学科。作为微电子技术象征的集成电路,就好比是电子工业等多种行业的建筑材料,而模拟电子技术则是集成电子技术的基石,其重要性不言而喻。但是,当前电子技术发展的现实表明,电子技术从分立向集成化方向转变,从模拟向数字化方向转变,从小规模向大规模方向转变的趋势是不可逆转的,模拟电路的传统领地已经或正在被数字电路所抢占,模拟电子技术的作用或重要性受到了挑战。但是,电子技术发展到现在,其基本器件和基本电路仍是模拟电子技术为基础的,模拟电子技术在许多领域中的优

势和地位是难以动摇的,比如比例放大、频率变换、信号滤波、模拟运算、稳定电源等线性操作领域,在无线电发射、无线电接收、语音通信等无线电或声频视频领域中,模拟电子技术在很长时间内将是不可替代的。到目前为止,还没有发现任何一个实际的电子系统是能够脱离模拟技术的,并且在不少场合下,模拟实现比数字实现更简单、更方便、性价比更高。因此,模拟电路不但是所有电子线路的硬件基础,对学好后续课程有着重要意义,而且其本身就具有重要的实用和研究价值。因为,一般地说,模拟电路集成技术比数字集成技术更复杂,实现更困难,对器件和电路元件的要求更高,因此很多领域还有待人们去探索,去研究,并有着无可限量的发展空间。我国将模拟集成电路领域的研究、开发列入国家近期重点发展规划之一,即可见一斑。

## 2 半导体器件基础

**导读:**电子线路,包括模拟电路和数字电路,是由电子元件和电子器件等组成的。电子器件主要是双极型器件、场效应器件和真空管器件等。电子器件的工作特性及性能的好坏将直接影响电子系统的工作及性能,所以研究电子线路和电子系统必须首先研究电子器件的工作原理、工作特性和使用方法等。本章将重点介绍作为集成电路基础的双极型器件:半导体二极管和半导体三极管;场效应器件:MOS 场效应管、结型场效应管;以及功率器件:VMOS 管、DMOS 管和 TMOS 管。这些常用器件是模拟电路和数字电路的器件基础,只有学好电子器件,对电子线路的理解和掌握才更容易、更深刻。本章名词术语和概念较多,希望学习时注意。

### 2.1 半导体二极管

**关键词:**半导体,本征半导体和掺杂半导体,N 型半导体和 P 型半导体,价电子、束缚电子、自由电子和空穴,多子、少子、载流子,激发与复合,扩散与漂移,PN 结和半导体二极管,正偏与反偏,导通与截止,正向电流与反向电流,单向导电性,器件模型,齐纳击穿和雪崩击穿,LED 和 SBD,二极管的开关特性,三极管的开关特性,开通时间,关断时间,反向恢复时间,存储时间,渡越时间,限幅,钳位

#### 2.1.1 半导体和 PN 结

##### 1. 半导体

所有物体,按导电性能分,可分为导体(简称导体,如金、银、铜、铝等)、不导体(又称绝缘体,如石头、木头、橡胶等)和半导体(如硅、锗等)。

半导体有纯净半导体和掺杂半导体之分。

纯净半导体,又称本征半导体,由单一元素组成。在本征半导体中,由于原子间的距离很近,每个原子外层轨道上的电子(称为价电子)既受到本身原子的束缚,又受到邻近原子的约束(吸引),使得每个价电子为相邻原子所共有,成为“共价电子”,相邻原子间组成所谓共价键;共价键束缚着电子从而使所有的原子相互紧密地连接在一起,形成一个整体并呈电中性(原子核带的正电荷数总等于电子带的负电荷数)。不难想像,共价键中的电子由于受到相邻原子核的双重约束是不能自由运动的,故称束缚电子,所以本征半导体的导电性能很差,比如在绝对零度时,价电子均被束缚在共价键内,本征半导体变成为不导体。但在受到外界激发时,如光照、热辐射或电驱动等,获得较大能量的一部分价电子将挣脱共价键的束缚脱离原子成为自由电子,遂具导电性,此称为本征激发。注意,本征激发每产

生一个自由电子,必在共价键中留下一个空位,空位常称为空穴。在本征半导体中,自由电子和空穴总是成对出现、同时存在的。

掺杂半导体,是在本征半导体中掺了少量其他元素(相对本征元素而言称为“杂质”)的半导体。掺杂半导体有两种,一种叫做 N 型半导体,一种叫做 P 型半导体。

N 型半导体,是以 5 价元素(如磷、砷等)为杂质的半导体。5 价杂质元素掺入到 4 价本征半导体(如常用的硅、锗)中时,其外层轨道上的价电子在受到杂质原子束缚的同时还会受到本征元素原子的束缚,成为共价电子。但是,由于 5 价元素外层轨道上有 5 个价电子,而 4 价的本征元素只有 4 个价电子,因此将多出一个杂质电子受不到本征元素原子的束缚,成为非共价电子,这种电子只需要很小的外界能量即可挣脱杂质原子的束缚而成为自由电子,所以掺 5 价元素的杂质半导体自由电子多。电子是带负电荷的,故这种掺杂半导体称为 N 型半导体(N=Negative)。应当指出,脱离杂质原子的束缚每产生一个自由电子,就一定有一个杂质原子因少一个带负电荷的电子而成为正离子,所以在 N 型半导体中,自由电子和正离子总是成对出现同时存在的,但并不在共价键中留下空位,因此并不同时产生空穴。

P 型半导体,是以 3 价元素(如硼、镉等)为杂质的半导体。因为 4 价的硅或锗原子有 4 个价电子,而 3 价的杂质原子只有 3 个电子,所以每个硅或锗原子共价键中因缺少一个电子而出现一个空位,即空穴。可见,在这种掺杂半导体中,空穴多而自由电子少,由于空穴是因缺少电子而出现的,故带正电荷,所以掺 3 价元素的杂质半导体称为 P 型半导体(P=Positive)。注意,因本征原子的吸引力,这些空位会吸引邻近共价键中的价电子前来填补,从而在新处留下新的空位,相当于空穴移到(即运动到)新处,所以空穴也像自由电子那样是会运动的。由上述可知,在 P 型半导体中主要是靠空穴导电的,即空穴是 P 型半导体中电流电荷的主要载体,就像导体或 N 型半导体中的自由电子(以下简称电子)是电流电荷的主要载体一样,所以电子和空穴都称为载流子。

P 型半导体或 N 型半导体中,由于本征激发,电子和空穴总是同时存在的,只是一种多些,另一种少些而已,故简称多者为多子(多数载流子),少者为少子。电子和空穴同时参与导电的半导体器件称为双极型器件,如即将介绍的半导体二极管和半导体三极管等;只有一种载流子参与导电的半导体器件称为单极型器件,如本书 2.1.7 节中将要介绍的 SBD 二极管和 2.3~2.4 节中将要介绍的 MOS 场效应晶体管等。

## 2. PN 结

块 P 型半导体和一块 N 型半导体,按照一定的工艺有机地结合在一起,就形成一个结,这就是 PN 结,其结构示意图如图 2.1.1-1 所示。PN 结可以认为是如下形成的:

① N 区电子多空穴少,P 区空穴多电子少,这种电子和空穴浓度上的差异,必将引起 N 区中的电子向 P 区扩散,P 区中的空穴向 N 区扩散——分别称之为电子浓度梯度扩散和空穴浓度梯度扩散。

② 靠近 P-N 边界的电子将首先向 P 区扩散,电子跨过边界进入 P 区后立即陷入 P 区空穴的层层包围之中,并被空穴所“吞没”,这就是电子和空穴的“复合”;与此同时,每跨过边界一个电子,就带走一个负电荷,同时在 N 区边界处多出一个因失去电子而带正电荷的正离子(图中用“ $\oplus$ ”号表示)。类似地,P 区中的空穴也会因浓度梯度差异向 N 区扩

散,并且每扩散过去一个空穴,就带走一个正电荷,同时在P区边界处留下一个负离子(图中用“⊖”号表示)……随着电子和空穴的不断扩散,P-N边界两侧便形成一个电荷层,如图2.1.1-1(a)所示。

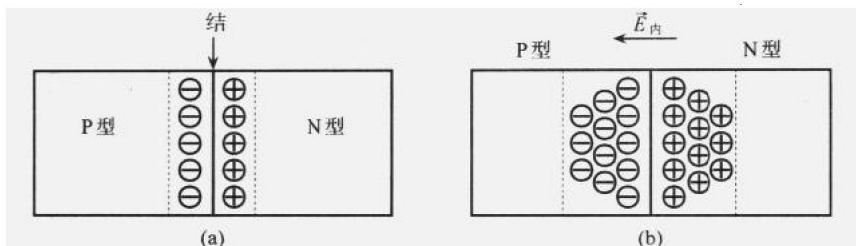


图 2.1.1-1 PN 结的形成

③ 必须指出,留在P-N边界两侧的正电荷和负电荷是离子电荷,是不能移动的,它们必须呆在原处,所以这些电荷称为空间电荷,这个电荷层就叫做空间电荷层。随着电子和空穴的不断扩散,空间电荷层越来越厚;但与此同时,这些离子电荷的出现生成了一个由正离子电荷指向负离子电荷的内电场  $E_{内}$ ,如图2.1.1-1(b)所示。注意,该电场的方向不利于电子或空穴的进一步扩散,所以随着时间的推移,在空间电荷层逐渐变厚的同时, $E_{内}$ 也逐渐增强,从而越来越“阻碍”载流子的进一步扩散……最后平衡下来,形成一个有一定宽度的空间电荷层。空间电荷层也叫做阻挡层或耗尽层。

PN结、空间电荷层、阻挡层和耗尽层,指的是同一个东西:PN结是指它的结构特征;空间电荷层是指它的离子特征;阻挡层是指它的阻挡载流子进一步扩散的功能特征;耗尽层是指载流子的分布特征——在空间电荷层中,电子和空穴都很少,可以认为是消耗殆尽,故名“耗尽层”。

### 2.1.2 半导体二极管

加了外引线并进行适当封装的PN结就是一个二极管,其结构如图2.1.2-1(a)所示,电路符号如图2.1.2-1(b),其中A称为阳极或正极,K称为阴极或负极。因为有两个电极,故名二极管。

二极管有多种封装,如玻璃封装(俗称玻封)、塑料封装(俗称塑封)、金属封装、陶瓷封装等,其中塑封便宜,玻封易碎,金属封装牢固,陶瓷封装性能好但价高。图2.1.2-1(c)中给出了部分封装样品实物照片。

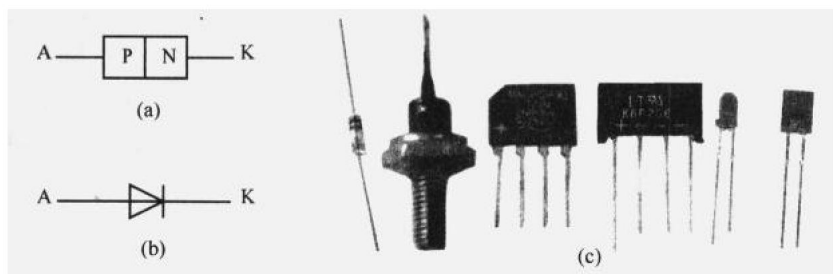


图 2.1.2-1 半导体二极管

(a)结构示意图 (b)电路符号 (c)部分二极管及二极管桥堆实物照片

二极管有多种类型,按所用材料分,有硅二极管、锗二极管、砷化镓二极管等;按结构分,有P型半导体和N型半导体之间用界面接触的面接触型二极管、接触面积很小的点接触型二极管,后者主要用在高频小电流场合,比较娇气,容易损坏,不常用;按用途分,则有普通二极管、开关二极管、整流二极管等,以及稳压二极管、发光二极管等特种二极管(见2.1.7节)。

国产二极管的型号,用数字“2”开头,后跟器件材料和器件类型的拼音字母,最后是器件编号。比如2CP10,其中数字“2”是二极管之意,“C”是N型硅材料,“P”是普通二极管(P=putong),数字“10”是编号。国外则用数字“1”开头,表示只有一个PN结,即二极管,如1N4001等。

### 2.1.3 二极管的特性

#### 1. 二极管的正偏与反偏

在二极管两端加一个电压,阳极加正(+),阴极加负(-),如图2.1.3-1(a)所示,此称二极管正向偏置,简称“正偏”。如果二极管两端加负电压,即阳极加负(-),阴极加正(+),如图2.1.3-1(b)所示,此称二极管反向偏置,简称“反偏”。

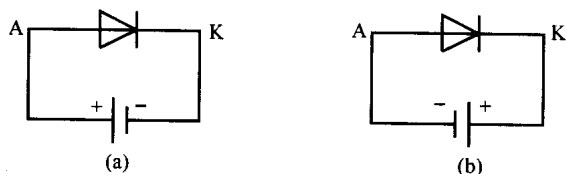


图 2.1.3-1 二极管的正偏和反偏

(a)正向偏置 (b)反向偏置

#### 2. 二极管的导通与截止

二极管正偏时,P区和N区因外加电压而形成外电场 $\bar{E}_外$ ,电场的方向由A指向K,显然,该外电场有利于电子和空穴向着对方区域运动。在此外电场作用下,由于P区内的空穴和N区内的电子都向P-N边界靠拢,空间电荷逐渐被中和,空间电荷层由厚变薄,由薄变没,阻挡层作用逐渐消失,电子和空穴便跨过边界进入对方区域(此称“注入”),并继续前进,且一边前进,一边存储,一边被复合,最后没有被复合的电子(或空穴)穿过P区(或N区)到达外线,从第一个电子(或空穴)到达外引线起,外引线中便出现了电流,这种现象称为二极管导通。

二极管反偏时,P区和N区内因外加电压形成一个外电场,但该电场的方向由K指向A,使P区内的空穴和N区内的电子越来越远离P-N边界,从而使耗尽层变得更厚,导电更困难,所以外引线中不会有电流出现,这种现象称为二极管截止。

正偏导通反偏截止,是二极管最重要的特性——单向导电性。



### 3. 二极管的伏安特性

所谓二极管的伏安特性,是指二极管两端外加电压与产生的二极管电流之间的关系特性。

硅二极管的伏安特性如图 2.1.3-2 所示,图中  $v_D$  是二极管两端的电压, $i_D$  是二极管电流。曲线右侧是  $v_D > 0$ ,即正偏时的情况;左侧是  $v_D < 0$ ,即反偏时的情况。

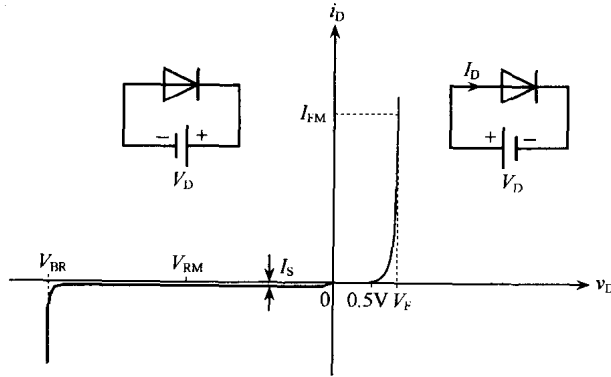


图 2.1.3-2 二极管的伏安特性

简单说明如下:

①当  $v_D = 0$ ,即二极管零偏时,没有外电场产生,空间电荷层中的载流子已经“耗尽”,所以二极管不会导通,故仍然  $i_D = 0$ 。这就是原点 0。

②当  $0 < v_D < 0.5V$  时,二极管处于正偏状态,正偏电压产生的外电场使空间电荷层变薄;但是,由于正偏电压较小,不足以克服 PN 结的内电场从而使空间电荷层完全消失,所以二极管仍是不导电的,即  $i_D \approx 0$ 。

③当二极管两端的电压上升到  $v_D = 0.5V$  时,正偏电压产生的外电场使空间电荷层几乎消失,电子或空穴开始跨过边界进入对方区域,二极管开始导通, $i_D \neq 0$ ,故  $0.5V$  称为硅二极管的开启电压,亦称门限电压或死区电压,常用  $V_T$  表示;电流  $i_D$  由 P 区流向 N 区,称为二极管的正向电流。当  $v_D > 0.5V$  时,随着  $v_D$  的增大,跨过边界进入对方区域的电子或空穴增多,存储在 P 区和 N 区中的载流子也越来越多,PN 结的导电性越来越好,所以二极管电流  $i_D$  随着  $v_D$  增大而急剧增大,理论和实验表明,此时的  $i_D-v_D$  曲线近似成指数关系,如下式所示:

$$i_D = I_S \left( e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1 \right) \tag{2.1.3-1}$$

式中,  $V_T = kT/q$  称为热电压,  $k$  是波尔兹曼常数 ( $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ),  $T$  是绝对温度,  $q$  是电子电荷 ( $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ ), 在室温 ( $27^\circ\text{C}$ , 即  $T = 300\text{K}$ ) 下,  $V_T \approx 26\text{mV}$ ;  $I_S$  称为反向饱和电流,典型值为  $10^{-8} \sim 10^{-14} \text{A}$ 。由式(2.1.3-1)可见,当  $v_D \gg V_T$  时,括号内的“1”可以忽略,  $i_D$  随  $v_D$  指数增大,如图 2.1.3-2 右侧的指数曲线所示。

④当二极管反偏,即  $v_D < 0$  时,反偏电压产生的外电场使空间电荷层变厚,不利于二极管导通,所以只有很小的、在外电场作用下由少子产生的反向电流,此电流不随反向电