

新
版

21世纪

高职高专系列教材

模拟电子 技术基础

◎张志良 主编

◎邵 菁 张慧莉 参编



提供电子教案增值服务



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

21 世纪高职高专系列教材

模拟电子技术基础

张志良 主编
邵 菁 参编
张慧莉



机械工业出版社

本教材内容包括半导体器件、放大电路基础、放大电路中的负反馈、集成运算放大器、功率放大电源、直流稳压电流、正弦波振荡电路、高频电路基础、调制与解调和晶闸管电路。

本书根据职业技术教育要求和学生特点编写，内容覆盖面较宽，但难度较浅；突出基本内容和基础知识，突出结论和结论的应用；减少理论推导和计算过程，注意实用；习题丰富，共有各种类型不同层次的习题 1068 道，与本书配套的《模拟电子学习指导及习题解答》一书给出了这些习题的解答，以便于教学和自学。

本书适合高等职业技术教育电子类专业学生使用，并可供工程技术人员学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子技术基础/张志良主编. —北京: 机械工业出版社, 2006.7

(21 世纪高职高专系列教材)

ISBN 7-111-19362-8

I. 模… II. 张… III. 模拟电路-电子技术-高等学校; 技术学校-教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 063820 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 赵丽欣 版式设计: 张世琴

责任校对: 姚培新 责任印制: 洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2006 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm × 260mm · 19.5 印张 · 484 千字

0 001—5 000 册

定价: 27.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

编辑热线电话 (010) 88379753

封面无防伪标均为盗版

21 世纪高职高专电子技术专业系列教材 编委会成员名单

主 任 曹建林

副 主 任 张中洲 张福强 祖 炬 董维佳
俞 宁 蒋蒙安 吕何新 伍湘彬
任德齐 华永平 吴元凯

委 员 (按姓氏笔画排序)

马 彪	邓 红	王树忠	王新新	尹立贤
白直灿	包中婷	冯满顺	华天京	吉雪峰
刘美玲	刘 涛	孙吉云	孙津平	朱晓红
李菊芳	邢树忠	陈子聪	杨元挺	张立群
张锡平	苟爱梅	姚建永	曹 毅	崔金辉
黄永定	章大钧	彭文敏	曾日波	谭克清

秘 书 长 胡毓坚

副秘书长 戴红霞

出版说明

根据《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》中提出的高等职业院校必须把培养学生动手能力、实践能力和可持续发展能力放在突出的地位,促进学生技能的培养,以及教材内容要紧密结合生产实际,并注意及时跟踪先进技术的发展等指导精神,机械工业出版社组织全国40余所院校的骨干教师对在2001年出版的“面向21世纪高职高专系列教材”进行了修订。

在几年的教学实践中,本系列教材获得了较高的评价。因此,在修订过程中,各编委会保持了第1版教材“定位准确、注重能力、内容创新、结构合理和叙述通俗”的编写特色。同时,针对教育部提出的高等职业教育的学制将由三年逐步过渡为两年,以及强调以能力培养为主的精神,制定出了本次教材修订的原则:跟上我国信息产业飞速发展的节拍,适应信息行业相关岗位群对第一线技术应用型操作人员能力的要求,针对两年制兼顾三年制,理论以“必须、够用”为原则,增加实训的比重,并且制作了内容丰富而且实用的电子教案,实现了教材的立体化。

针对课程的不同性质,修订过程中采取了不同的处理办法。核心基础课的教材在保持扎实的理论基础的同时,增加实训和习题;实践性较强的课程强调理论与实训紧密结合;涉及实用技术的课程则在教材中引入了最新的知识、技术、工艺和方法。此外,在修订过程中,还进行了将几门课程整合在一起的尝试。所有这些都充分地体现了修订版教材求真务实、循序渐进和勇于创新的精神。在修订现有教材的同时,为了顺应高职高专教学改革的不深入,以及新技术新工艺的不断涌现和发展,机械工业出版社及教材编委会在对高职高专院校的专业设置和课程设置进行了深入的研究后,还准备出版一批适应社会发展的急需教材。

信息技术以前所未有的速度飞快地向前发展,信息技术已经成为经济发展的关键手段,作为与之相关的教材要抓住发展的机遇,找准自身的定位,形成鲜明的特色,夯实人才培养的基础。为此,担任本系列教材修订任务的教师,努力将最新的教学实践经验融于教材的编写之中,并以可贵的探索精神推进本系列教材的更新。由于高职高专教育处在不断的发展中,加之我们的水平和经验有限,在教材的编审中难免出现问题和错误,恳请使用这套教材的师生提出宝贵的意见和建议,以利我们今后不断改进,为我国的高职高专教育事业作出积极的贡献。

机械工业出版社

前 言

“模拟电子技术”是工科类专业非常重要的专业基础课，各类模拟电子技术教材很多，本书与其他同类教材略有不同的是：

(1) 内容覆盖面较宽。除一般公认内容外，还包含了高频电子电路和晶闸管电路。并在集成运放应用、集成功放电路、开关型稳压电源等章节，增加了一些新型、实用的线路内容。

(2) 文字叙述注重条理化，使学生容易记忆理解，也便于教师教学。对学生不易理解和容易混淆的概念，给出较为详尽的解说，便于自学。

(3) 习题量大。书中共选编了各种不同层次、不同题型的习题 1068 道。并在与之配套的《模拟电子学习指导及习题解答》中给出全部解答。既便于学生自学练习，又便于教师选用。

本书由上海电子信息职业技术学院高级讲师张志良主编，邵菁、张慧莉参编。其中第 1、2、3 章由张慧莉编写，第 4、5、6 章由邵菁编写，其余部分由张志良编写。上海电子信息职业技术学院洪志刚、张佩茵、戴均、谭克清老师各审阅了部分书稿。

限于编者水平，书中错误不妥之处，请读者批评指正（编者的 E-mail: zzlls@126.com）。

为配合教学，本书提供免费电子教案，读者可在 www.cmpbook.com 上下载。

编 者

目 录

前言

第 1 章 半导体器件	1
1.1 PN 结	1
1.1.1 半导体的导电特性	1
1.1.2 PN 结	3
1.2 普通二极管	6
1.2.1 普通二极管概述	6
1.2.2 二极管的伏安特性	7
1.2.3 二极管的主要特性参数	7
1.2.4 二极管电路的分析方法	8
1.2.5 二极管的检测与选用	12
1.3 特殊二极管	14
1.3.1 稳压二极管	14
1.3.2 发光二极管	16
1.3.3 光敏二极管	16
1.3.4 变容二极管	17
1.4 双极型三极管	17
1.4.1 三极管概述	17
1.4.2 三极管的特性曲线	19
1.4.3 三极管的主要参数	22
1.4.4 h 参数等效电路	25
1.4.5 三极管的检测和选用	27
1.5 场效应管	31
1.5.1 场效应管概述	31
1.5.2 场效应管的特性曲线	32
1.5.3 场效应管的主要参数	34
1.5.4 场效应管的 h 参数等效电路	35
1.5.5 场效应管的使用常识	35
1.6 习题	37
第 2 章 放大电路基础	48
2.1 放大电路基本概念	48
2.1.1 放大电路概述	48
2.1.2 放大电路基本框图	48
2.1.3 放大电路的性能指标	49
2.2 共射基本放大电路	50
2.2.1 电路组成和元件作用	50

2.2.2 直流通路和交流通路	51
2.2.3 图解法	52
2.2.4 微变等效电路法	54
2.2.5 非线性失真	55
2.3 静态工作点稳定电路	59
2.3.1 温度对静态工作点的影响	59
2.3.2 分压式偏置电路	59
2.3.3 其他稳定静态工作点电路	62
2.4 共集电极电路	63
2.5 共基极电路	66
2.5.1 共基极电路分析	66
2.5.2 放大电路三种基本组态比较	67
2.6 场效应管放大电路	69
2.7 多级放大电路	71
2.7.1 多级放大电路的基本概念	71
2.7.2 阻容耦合多级放大电路 的分析计算	73
2.8 阻容耦合放大电路的 频率特性	75
2.9 习题	77
第 3 章 放大电路中的负反馈	90
3.1 反馈的基本概念	90
3.1.1 反馈的定义和分类	90
3.1.2 基本负反馈电路	91
3.1.3 多级放大电路负反馈类型 的判别	93
3.1.4 负反馈放大电路方框图	95
3.2 负反馈对放大电路性能的 影响	96
3.2.1 提高电路增益的稳定性	96
3.2.2 减小非线性失真	97
3.2.3 扩展通频带	97
3.2.4 改变输入输出电阻	97
3.2.5 引入负反馈的一般原则	99
3.3 深度负反馈电路的分析 计算	100

3.4	负反馈放大电路的稳定	101	5.2.1	互补对称功放电路的基本概念	159
3.4.1	高频自激及其消除方法	102	5.2.2	OTL 电路	161
3.4.2	低频自激及其消除方法	102	5.2.3	OCL 电路	162
3.5	习题	103	5.2.4	BTL 电路	163
第 4 章	集成运算放大器	109	5.2.5	集成功放电路	164
4.1	集成电路中的元器件和电流源电路	109	5.3	变压器耦合乙类功放电路	169
4.1.1	集成电路中的元器件	109	5.4	新型大功率器件简介	170
4.1.2	电流源电路	110	5.4.1	VMOS 器件	170
4.2	差动放大电路	113	5.4.2	IGBT 器件	170
4.2.1	基本差动放大电路	113	5.5	功率管的安全使用	170
4.2.2	具有电流源的差动放大电路	116	5.5.1	功率管的散热	170
4.2.3	差动放大电路的输入输出方式	117	5.5.2	二次击穿及功率管安全工作区	171
4.3	集成运放的组成和主要参数	120	5.5.3	功率管安全使用	172
4.3.1	集成运放的组成	120	5.6	习题	173
4.3.2	集成运放的主要参数	121	第 6 章	直流稳压电源	179
4.3.3	集成运放的发展概况	122	6.1	整流电路	179
4.3.4	理想化集成运放	123	6.1.1	半波整流电路	180
4.4	集成运放基本运算电路	124	6.1.2	全波整流电路	180
4.4.1	基本输入电路	124	6.1.3	桥式整流电路	181
4.4.2	基本运算电路	127	6.1.4	倍压整流电路	181
4.5	集成运放的线性运用	131	6.2	滤波电路	182
4.5.1	精密仪用放大器	132	6.2.1	电容滤波电路	183
4.5.2	阻容耦合放大器	132	6.2.2	电感滤波电路	184
4.5.3	线性整流电路	133	6.2.3	复式滤波电路	185
4.6	集成运放非线性应用	135	6.3	线性串联型稳压电路	185
4.6.1	电压比较器	135	6.3.1	线性串联型稳压电路的工作原理	186
4.6.2	方波发生器	138	6.3.2	三端集成稳压器	187
4.6.3	有源滤波器	141	6.4	开关型直流稳压电路	191
4.7	习题	144	6.4.1	开关型稳压电路基本概念	192
第 5 章	功率放大电路	156	6.4.2	开关型稳压电路实例	194
5.1	功率放大电路的基本概念	156	6.5	习题	198
5.1.1	功率放大电路的特点和要求	156	第 7 章	正弦波振荡电路	204
5.1.2	功率放大电路的主要技术指标	157	7.1	正弦波振荡电路的工作原理、组成和分类	204
5.1.3	功率放大电路的分类和选择	158	7.2	RC 正弦波振荡电路	205
5.2	互补对称功放电路	159	7.2.1	RC 串并联正弦波振荡电路	206
			7.2.2	RC 移相式正弦波振荡电路	207
			7.3	LC 正弦波振荡电路	208

7.3.1	LC 并联电路的频率特性	208	9.2.3	模拟乘法器频谱搬移原理	249
7.3.2	变压器反馈式 LC 正弦波 振荡电路	209	9.3	调幅、变频与检波	251
7.3.3	电感三点式正弦波振荡电路	210	9.3.1	调幅波	251
7.3.4	电容三点式正弦波振荡电路	211	9.3.2	变频器	255
7.4	石英晶体振荡电路	215	9.3.3	检波器	258
7.4.1	石英晶体的基本特性	215	9.3.4	自动增益控制电路	260
7.4.2	石英晶体正弦波振荡电路	216	9.4	调频与鉴频	263
7.5	习题	217	9.4.1	调频波	263
第 8 章	高频电路基础	224	9.4.2	调频电路	265
8.1	三极管高频等效电路及 频率参数	224	9.4.3	鉴频电路	266
8.1.1	三极管共射混合 π 型等效 电路	224	9.5	自动频率控制和锁相环路	271
8.1.2	共射放大电路高频响应	226	9.5.1	自动频率控制	271
8.2	宽带放大器	228	9.5.2	锁相环路的基本概念	272
8.2.1	宽带放大器的基本概念	228	9.5.3	锁相环路的应用	273
8.2.2	扩展放大器通频带的方法	229	9.5.4	集成锁相环路	275
8.3	谐振放大器	233	9.6	习题	277
8.3.1	谐振放大器的作用、分类 和主要技术指标	233	第 10 章	晶闸管及其电路	286
8.3.2	单调谐谐振放大器	234	10.1	晶闸管基本知识	286
8.3.3	双调谐谐振放大器	236	10.2	单相可控整流电路	288
8.3.4	集成中频放大器	237	10.2.1	电阻性负载单相半控桥式 整流电路	289
8.4	习题	238	10.2.2	电感性负载单相半控桥式 整流电路	290
第 9 章	调制与解调	242	10.3	晶闸管控制触发电路	291
9.1	无线电通信的基本概念	242	10.3.1	单结晶体管触发电路	291
9.1.1	无线电信号调制	242	10.3.2	微机控制触发电路	294
9.1.2	无线电信号解调	243	10.4	双向晶闸管	295
9.1.3	频率变换的基本概念	244	10.5	习题	297
9.1.4	无线电波波段划分	246	附录		300
9.2	集成模拟乘法器	247	附录 A	国产半导体器件和美国、 日本半导体器件命名法	300
9.2.1	集成模拟乘法器概述	247	附录 B	本书常用符号说明	301
9.2.2	集成模拟乘法器运算电路	248	参考文献		304

第 1 章 半导体器件

本章要点

- PN 结单向导电性
- 二极管的伏安特性及主要参数
- 理想二极管及二极管电路分析方法
- 稳压二极管及稳压管稳压电路
- 三极管输入输出特性曲线
- 三极管三种基本组态和三种工作状态
- 三极管的主要参数
- 三极管 h 参数及简化的 h 参数等效电路
- 场效应管特性曲线及主要参数
- 场效应管的主要特点（与三极管性能比较）

当今世界电子技术飞速发展，电子产品琳琅满目，特别是电视机、电子计算机及电子通信产品的发展，几乎改变了世界和人们的生活。然而组成这些电子产品的基础是半导体材料和半导体器件，本章主要分析讨论半导体器件。

1.1 PN 结

1.1.1 半导体的导电特性

1. 导体、半导体与绝缘体

自然界的物质按其导电特性（电阻率）大致可分为导体、绝缘体和半导体三类。

- (1) 导体：电阻率 $\rho < 10^{-6}\Omega\cdot\text{m}$ ；
- (2) 绝缘体：电阻率 $\rho > 10^8\Omega\cdot\text{m}$ ；
- (3) 半导体：电阻率介于导体与绝缘体之间， $10^{-6}\Omega\cdot\text{m} < \rho < 10^8\Omega\cdot\text{m}$ 。

2. 半导体的导电特性

半导体之所以成为近代电子工业最重要的材料，并不在于其导电能力的强弱，主要是由于其独特的导电特性。

(1) 掺杂特性。纯净的半导体掺入微量杂质后，电阻率变化很大。例如在纯硅中掺入百万分之一的硼后，电阻率约从 $2 \times 10^3\Omega\cdot\text{m}$ 变化为 $4 \times 10^{-3}\Omega\cdot\text{m}$ ，变化数量级达到 10^6 之多。这种特性是半导体所特有的。在金属或绝缘体中即使加入较多杂质，对电阻率的影响也不大，例如在纯铜中加入锌，电阻率变化在同一数量级。

(2) 热敏和光敏特性。半导体在受热和光照后导电能力明显增强。而金属和绝缘体在受热时，电阻率变化不大；受光照时，电阻率几乎无变化。

人们正是利用了半导体的掺杂特性，制成了各种半导体器件；利用了半导体的热敏和光敏特性，制成了半导体热敏元件和光敏元件。

3. P型半导体和N型半导体

(1) 本征半导体。

纯净的半导体材料称为本征半导体（顾名思义，具有半导体本来特征）。本征半导体具有晶体结构，如图 1-1a 所示，游离于共价键之外的自由电子和空穴仅是极少数。自由电子和空穴统称为载流子（运载电荷的粒子），自由电子带负电荷，空穴带正电荷，但整体对外仍呈电中性。这些载流子的数量与温度（包括受光照）有关，载流子吸收能量才能脱离原子核对其束缚而游离于共价键之外，称为本征激发。另一方面，自由电子在运动过程中会因碰撞其他电子而能量下降，被相邻原子核捕获而重新被束缚（即填补空穴），称为复合。被碰撞的其他电子又因获得能量而成为新的自由电子。在一定温度下，激发与复合达到动态平衡。

本征半导体掺入杂质后称为掺杂半导体，根据其掺入杂质元素的化学价可分为 P 型半导体和 N 型半导体。

(2) N 型半导体。

N 型半导体是 4 价元素（例如硅）掺入微量 5 价元素（例如磷）后形成的，如图 1-1b 所示。5 价元素原子与 4 价元素原子组成共价键后多余出一个电子，并游离于共价键之外，但即使是掺入微量杂质，多余出来电子的绝对数量与不掺杂时相比也是一个天文数字。

在 N 型半导体中，自由电子数远多于空穴数（在本征半导体中，自由电子数 = 空穴数）。自由电子称为多数载流子（简称“多子”）；空穴称为少数载流子（简称“少子”）。但在 N 型半导体中，尽管自由电子数远多于空穴数，由于同时存在许多对应的正离子（5 价元素组成共价键时多出一个正电荷），所以从整体上看，N 型半导体仍是电中性的。

需要说明的是，在 N 型半导体中，多数载流子（自由电子）由两部分组成，一小部分是由本征激发形成，数量很少，且与温度和光照有关；绝大部分是由掺杂形成，数量很多，且与温度和光照无关。少数载流子（空穴）则全部由本征激发形成。

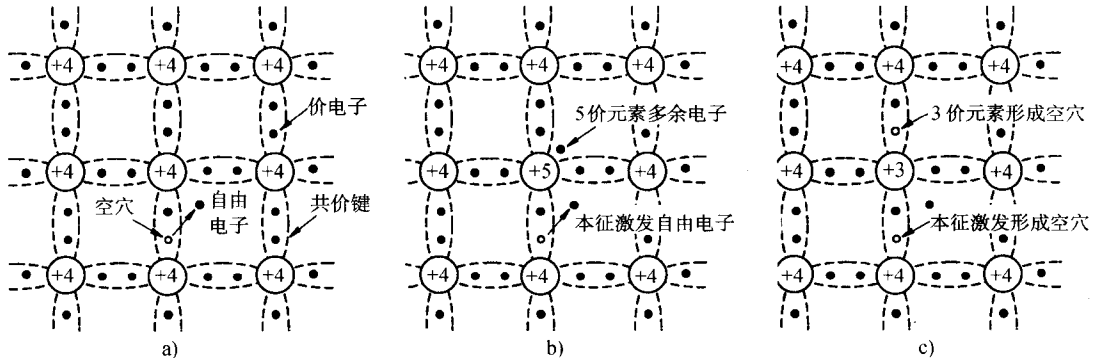


图 1-1 本征半导体与掺杂半导体结构示意图

a) 本征半导体 b) N 型半导体 c) P 型半导体

(3) P型半导体。

P型半导体是4价元素掺入微量3价元素（例如硼）后形成的，如图1-1c所示。3价元素原子与4价元素原子组成共价键后缺少一个电子，即多余一个空穴。因此，空穴数远多于自由电子数，空穴成为多数载流子，自由电子成为少数载流子。同理，P型半导体中的多数载流子（空穴）也由两部分组成，主要是掺杂形成；少数载流子（自由电子）全部由本征激发形成。

1.1.2 PN结

在半导体中掺入杂质的意义，并不是为了提高其导电能力，而是为了形成P型半导体和N型半导体。P型半导体和N型半导体采用特殊的制造工艺结合在一起，则形成PN结。

1. PN结的形成

图1-2为PN结的形成和结构示意图。

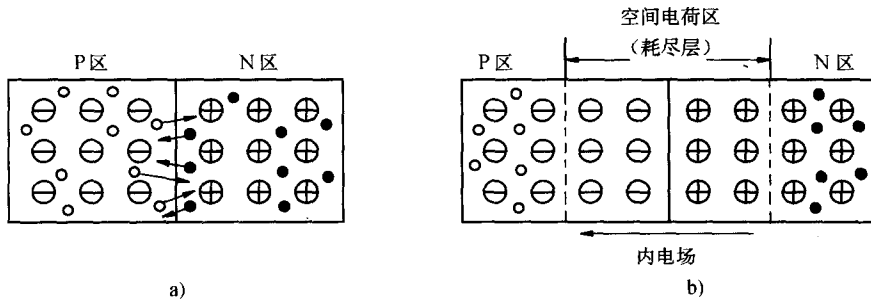


图1-2 PN结的形成

a) 载流子的扩散运动 b) 平衡状态下的PN结

(1) 扩散。P型半导体多数载流子是空穴，N型半导体多数载流子是电子。由于浓度差关系，P区的空穴要向N区扩散，N区的电子要向P区扩散，如图1-2a所示。

(2) 形成空间电荷区和内电场。扩散运动的结果，N区电子扩散到P区与空穴复合而消失，P区空穴扩散到N区与电子复合而消失。因而在两种半导体接触面上形成了一个没有自由电子和空穴的耗尽层，称为“空间电荷区”。

在这个空间电荷区，P型半导体由于空穴扩散和复合而带负电，N型半导体由于自由电子扩散和复合而带正电。正负电荷在界面两侧形成一个内电场，方向由N区指向P区，如图1-2b所示。

(3) 内电场的作用。内电场阻止扩散运动，促进漂移运动。众所周知，正电荷在电场中受力方向与电场方向相同，负电荷受力方向与电场方向相反。因此P区向N区扩散的空穴和N区向P区扩散的电子均受到PN结内电场的阻挡，即内电场阻止P型和N型半导体中多数载流子进一步的扩散运动。因此空间电荷区又称为“高阻区”、“阻挡层”或“势垒区”。

相反，内电场对P区少数载流子（电子）和N区少数载流子（空穴），则推动它们越过空间电荷区，进入对方区域。因此内电场促进少数载流子的漂移运动。

(4) 扩散运动与漂移运动的动态平衡。扩散和漂移是相互联系、相互矛盾的，在开始形

成空间电荷区时，多数载流子的扩散运动占优势，但随着空间电荷区的加宽，内电场逐步增强，于是多数载流子的扩散运动逐渐减弱，少数载流子的漂移运动逐步增强。最后，扩散运动与漂移运动达到动态平衡。

(5) PN 结内电场电位差。在一定温度下，PN 结的宽度相对稳定，PN 结内电场也相对稳定。在室温条件下，PN 结内电场的电位差，硅材料约为 0.5 ~ 0.7V，锗材料约为 0.2 ~ 0.3V。

2. PN 结单向导电性

PN 结外加电压时，显示出其基本特性——单向导电性。

(1) 加正向电压时导通。

P 区接电源正极，N 区接电源负极，称为加正向电压或正向偏置（简称正偏），如图 1-3a 所示。由于外电场方向与内电场方向相反，打破了原来扩散运动与漂移运动的平衡。P 区的多数载流子空穴在外电场的作用下进入空间电荷区，与空间电荷区 P 区一侧的负离子复合；同理，N 区的多数载流子电子在外电场的作用下，与空间电荷区 N 区一侧的正离子复合，从而使得空间电荷区变窄，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 I ，PN 结呈导通状态。外电场越强，扩散电流越大。

(2) 加反向电压时截止。

P 区接电源负极，N 区接电源正极，称为加反向电压或反向偏置（简称反偏），如图 1-3b 所示。由于外电场方向与内电场方向一致，同样打破了原来扩散运动与漂移运动的平衡。外电场力使 P 区的多数载流子空穴和 N 区的多数载流子电子离开空间电荷区两侧，使空间电荷区变宽，内电场增强，阻挡层电阻增大，两区中的多数载流子很难越过空间电荷区，因此无扩散电流通过，PN 结呈截止状态。

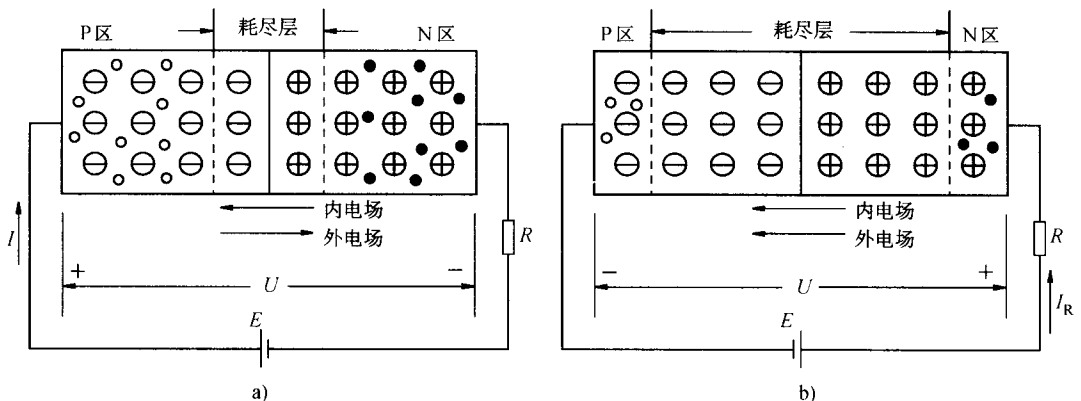


图 1-3 外加电压时的 PN 结

a) 正偏 b) 反偏

需要说明的是，P 区的少数载流子（电子）和 N 区的少数载流子（空穴）在内外电场的共同作用下，形成反向电流 I_R 。由于少数载流子数量很少，因此反向电流 I_R 很小。又由于少数载流子是由本征激发形成的，其数量取决于温度（包括光照）而与外加电压基本无关（外加电压过大，超过 PN 结承受限额，另当别论）。在一定温度下，反向电流基本不变，因

此也称为反向饱和电流。另外，由于硅和锗原子结构的差异，锗比硅多一层电子，最外层电子离原子核距离较远，原子核对其束缚能力较弱，即锗的最外层电子更容易受本征激发而成为自由电子，因此锗材料半导体少数载流子的数量远多于硅材料半导体，即锗材料 PN 结的反向电流一般远大于硅材料 PN 结的反向电流。

3. PN 结伏安特性

伏安特性，即器件两端电压 u （单位为伏特）与流过器件的电流 i （单位为安培）之间的函数关系。一般非线性器件通常用伏安特性对其进行描述，PN 结属非线性器件，其伏安特性如图 1-4 所示。

PN 结的伏安特性可分为正向和反向两大部分。

(1) 正向特性。

PN 结正向特性可分为两段：

①死区段。对应于图 1-4 中的 OA 段，此时 PN 结虽然加正向电压，但外加电压小于 PN 结内电场电压，因此 PN 结仍处于截止状态。死区电压又称为门坎电压或开启电压，用 U_{th} 表示，硅材料 $U_{th} \approx 0.5V$ ，锗材料 $U_{th} \approx 0.2V$ 。

②导通段。对应于图 1-4 中的 AB 段，此时外加电压大于 PN 结内电场电压，PN 结处于导通状态。导通电压用 U_{on} 表示，实际上是 PN 结导通时的正向压降，硅材料 $U_{on} = 0.6 \sim 0.7V$ ，锗材料 $U_{on} = 0.2 \sim 0.3V$ 。

(2) 反向特性。

PN 结反向特性也可分为两段：

①饱和段。对应于图 1-4 中的 OC 段，此时 PN 结处于反偏截止状态，仅有少量反向电流，用 I_S 表示。因反向电流主要取决于温度而与外加电压基本无关，因此 OC 段与横轴基本平行，呈饱和特性，即反向电流基本上不随外加反向电压增大而增大。

②击穿段。对应于图 1-4 中的 CD 段，此时由于外加反向电压超出 PN 结能承受的最高电压 U_{BR} ，反向电流急剧增大。

PN 结的伏安特性可以用数学表达式 (1-1) 表示。

$$i_D = I_S(e^{u_D/U_T} - 1) \quad (1-1)$$

式中， I_S 为 PN 结反向饱和电流； U_T 为温度电压当量， $U_T = kT/q$ ，其中 k 为玻耳兹曼常数 ($k = 1.380 \times 10^{-23} J/K$)， T 为热力学绝对温度 (单位 K)， q 为电子电量 ($1.6 \times 10^{-19} C$)。在常温条件 ($T = 300K$) 时， $U_T \approx 26mV$ 。

需要指出的是式 (1-1) 不适用于反向击穿段。

4. PN 结击穿特性

从图 1-4 中看出，当外加反向电压超出 U_{BR} 时，PN 结反向电流急剧增大， U_{BR} 称为 PN 结反向击穿电压。反向击穿后，只要反向电流和反向电压的乘积不超过 PN 结允许的最大功耗，PN 结就不会损坏。减小反向电压后，PN 结特性恢复，这种击穿称为电击穿，电击穿具有可逆性。但若反向击穿电流过大，超出 PN 结允许的最大功耗，会导致 PN 结结温过高而烧坏，这种击穿称为热击穿，热击穿是不可逆的。热击穿也可发生在正向导通时，其条件仍为超出 PN 结允许的最大功耗。

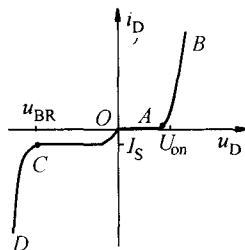


图 1-4 PN 结伏安特性

PN 结电击穿机理可分为雪崩击穿和齐纳击穿两种。雪崩击穿是反向电压足够大时，发生碰撞电离、连锁反应而使阻挡层中载流子大量增多，类似雪崩现象。齐纳击穿是由于半导体掺杂浓度很高，空间电荷区很薄，即使不高的反向电压也能在很薄的空间电荷区建立起很强的电场，将价电子从共价键中强行拉出，引起反向电流急剧增加。

PN 结电击穿时，有时很难认定是雪崩击穿或齐纳击穿，一般认为，高于 6V 击穿为雪崩击穿，低于 6V 击穿为齐纳击穿。雪崩击穿电压呈正温度系数，齐纳击穿电压呈负温度系数，击穿电压在 6V 左右，两种击穿会同时发生，相应击穿电压的温度系数趋近零。

5. PN 结电容效应

PN 结具有电容效应，体现在随着外界电压的增减，有电荷的充放电现象。根据其形成原理的不同可分为势垒电容 C_B 和扩散电容 C_D 。PN 结正向偏置时， $C_D \gg C_B$ ，结电容主要由 C_D 决定；PN 结反向偏置时， $C_B \gg C_D$ ，结电容主要由 C_B 决定。PN 结结电容大小约几至十几皮法，且 PN 结结面形成后，结电容大小取决于外加电压，因此 PN 结结电容是非线性电容。

复习思考题

- 1.1 半导体有什么独特的导电特性？
- 1.2 什么叫本征半导体、N 型半导体、P 型半导体？
- 1.3 P 型、N 型半导体中的多数载流子和少数载流子是怎样形成的？
- 1.4 如何理解 PN 结的单向导电特性？
- 1.5 为什么 PN 结反向电流取决于温度而与外加电压基本无关？
- 1.6 为什么锗 PN 结的反向电流远大于硅 PN 结的反向电流？
- 1.7 试分析 PN 结的伏安特性。
- 1.8 什么叫电击穿和热击穿？哪一种击穿是可逆的？
- 1.9 PN 结击穿电压为何值时，具有零温度系数特性？
- 1.10 PN 结结电容约为何值？什么叫非线性电容？

相关习题

填空题：1.1~1.6；选择题：1.31~1.39。

1.2 普通二极管

1.2.1 普通二极管概述

将 PN 结加上相应的电极引线和管壳，就形成了二极管。P 端引出的电极称为阳极（正极），N 端引出的电极称为阴极（负极）。

普通二极管的符号如图 1-5 所示。

二极管的分类如下：

(1) 按制作材料分，可分为硅二极管和锗二极管。

(2) 按 PN 结结面大小分，可分为点接触和面接触。点接触 PN 结结面积小，结电容小，高频特性好，但不能通过较大电流。面接触 PN 结结面积大，结电容大，工作频率低，但能通过较大电流。

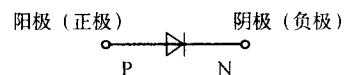


图 1-5 普通二极管符号

(3) 按用途分, 可分为普通管、整流管、稳压管和开关管等。

1.2.2 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性与 PN 结伏安特性相同, 有关问题进一步说明如下。

1. 硅二极管与锗二极管比较

图 1-6 为在同一坐标轴上画出的硅二极管和锗二极管的伏安特性, 从图中看出, 两种二极管的伏安特性相似, 主要区别是:

(1) 硅管的死区电压比锗管大: $U_{th(\text{硅})} \approx 0.5\text{V}$; $U_{th(\text{锗})} \approx 0.2\text{V}$ 。硅管导通正向压降比锗大: $U_{on(\text{硅})} \approx 0.6 \sim 0.7\text{V}$; $U_{on(\text{锗})} \approx 0.2 \sim 0.3\text{V}$ 。

为便于统一, 除有特别说明外, 本书例题和习题计算中, 一律取 $U_{on(\text{硅})} = 0.6\text{V}$; $U_{on(\text{锗})} = 0.2\text{V}$ 。

(2) 硅管的反向饱和电流 I_S 比锗管小得多。一般来讲, 小功率硅二极管 I_S 小于 $0.1\mu\text{A}$, 可忽略不计; 小功率锗二极管 I_S 为几十至几百微安。 I_S 的大小体现了二极管单向导电特性的好坏, 即质量的优劣。

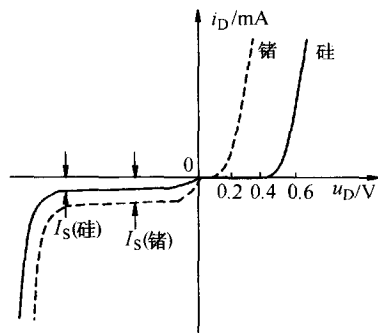


图 1-6 硅二极管与锗二极管伏安特性

(3) 反向击穿电压 U_{BR} 。一般硅二极管的 U_{BR} 比锗管大。

综上所述, 硅二极管以其比锗二极管优越的特性得到了更广泛的应用。目前, 除需要正低电压降的场合用锗管外, 几乎是硅管的一统天下。

2. 温度对二极管伏安特性的影响

图 1-7 为同一个二极管在不同温度下的伏安特性, 从图中看出:

(1) 温度升高后, 二极管死区电压 U_{th} 和导通正向压降 U_{on} 下降 (正向特性左移)。在室温附近, 温度每升高 1°C , U_{on} 约减小 $2 \sim 2.5\text{mV}$ 。

(2) 温度升高后, 二极管反向饱和电流 I_S 大大增大 (反向特性下移)。温度每升高 10°C , 反向饱和电流约增大一倍。这是因为反向饱和电流是少数载流子形成的电流, 而少数载流子属本征激发, 其数量主要与温度有关。

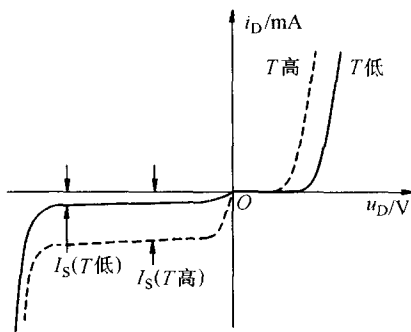


图 1-7 温度对伏安特性的影响

(3) 反向击穿电压 U_{BR} , 视大于或小于 6V 分: 大于 6V 属雪崩击穿, 呈正温度系数, 即温度升高, U_{BR} 增大; 小于 6V 属齐纳击穿, 呈负温度系数, 即温度升高, U_{BR} 减小。但无论正温度系数或负温度系数 U_{BR} 变化均不大。需要指出的是温度升高后, 反向电流增大, 功耗增大, 又促使其结温进一步升高, 形成恶性循环, 导致热击穿。因此从这一角度上讲, 温度升高后, 容易引起二极管击穿损坏。

1.2.3 二极管的主要特性参数

二极管的特性还可用参数来描述, 实际应用中, 可依据这些特性参数合理选用二极管。

1. 最大整流电流 I_F

I_F 定义为二极管长期运行允许通过的最大正向平均电流。从二极管正向伏安特性看出, 二极管正向导电电流无上限, 只要不超过二极管的 PN 结最大允许功耗, 二极管就不会损坏。 I_F 为保证二极管长期可靠运行的上限值。

2. 最高反向工作电压 U_{RM}

U_{RM} 是允许施加在二极管两端的最大反向电压。为保证二极管可靠工作, 通常规定 U_{RM} 为反向击穿电压 U_{BR} 的一半。

3. 反向电流 I_R 和反向饱和电流 I_S

I_R 是指二极管在一定温度下反向偏置时的反向电流, 因反向电流主要取决于温度而与外加电压基本无关, 因此 $I_R \approx I_S$ 。

4. 最高工作频率 f_M

f_M 是保证二极管具有单向导电特性的最高交流信号频率。 f_M 主要取决于二极管 PN 结电容的大小, 点接触二极管, f_M 高; 面接触二极管, f_M 低。

以上二极管参数, I_F 和 U_{RM} 是极限参数, 应用时不能超过, 可根据需要选用。 I_R 是性能质量参数, 越小越好。 f_M 也属于极限参数, 但只有在高频电路中才予以考虑。

几种常用二极管的特性参数如表 1-1 所示。

表 1-1 几种常用二极管的特性参数

型号	参数	最大整流电流 /mA	最高反向工作电压 /V	反向饱和电流 / μ A	最高工作频率 /MHz
2AP1		16	20	≤ 250	500
2AP7		12	100	≤ 250	500
2AP9		5	15	≤ 250	100
IN4001		1 000	100	≤ 0.1	3
IN4004		1 000	400	≤ 0.1	3
IN4007		1 000	1 000	≤ 0.1	3
IN5401		3 000	100	≤ 10	3
IN4148		450	60	≤ 0.1	250

1.2.4 二极管电路的分析方法

二极管属非线性器件, 分析非线性电路的方法主要有两种: 图解法和等效电路法。

1. 图解法

图解法可以分为静态分析和动态分析两种。

静态分析是指二极管加直流电压时的电路分析, 动态分析是指二极管同时加交直流电压时的电路分析。

(1) 二极管电路静态图解分析。

根据图 1-8a 所示的二极管电路, 可列出二极管直流负载方程

$$u_D = U_S - i_D R, \text{ 即 } i_D = \frac{U_S - u_D}{R} = -\frac{1}{R} u_D + \frac{U_S}{R} \quad (1-2)$$