

免费提供
精品教学资料包
服务热线: 400-615-1233
www.huatengedu.com.cn



21世纪高等学校电子信息系列精品教材

“互联网+”创新型教材

M
ONI DIANZI JISHU
JICHU

模拟电子技术基础

模拟电子技术基础

邢迎春
主编

M
ONI DIANZI JISHU
JICHU

模拟电子技术基础

邢迎春 主编

- ◎内容实用，叙述精练，反映了现代电子测量的新方法、新技术、新动态及新仪器，还特别增加了自动测试系统和虚拟仪器的测试，追踪现代测量技术及测量仪器的最新动向。
- ◎将“互联网+”思维融入教材中，以二维码的形式展现教学资源。

ISBN 978-7-5608-7009-0



9 787560 870090

定价: 45.00元

同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

21 世纪高等学校电子信息系列精品教材
“互联网+”创新型教材

模拟电子技术基础

主 编 邢迎春
副主编 马振峰 于 军
主 审 牛永奎

同济大学出版社·上海

内容提要

本书是为满足应用型人才培养的需求而编写的,主要内容包括半导体二极管及其电路分析、交流放大电路基础、场效应管及其放大电路、集成运算放大电路、负反馈放大电路、信号发生电路、功率放大电路、直流稳压电源、电路设计、电子技术技能综合训练。

本书可作为高等院校电子类相关专业的教材,也可作为相关人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础 / 邢迎春主编. --上海: 同济大学出版社, 2017. 5(2024. 9 重印)

ISBN 978 - 7 - 5608 - 7009 - 0

I. ①模… II. ①邢… III. ①模拟电路-电子技术
IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 099999 号

模拟电子技术基础

邢迎春 主编

责任编辑 汪丹 朱振华 责任校对 徐春莲 封面设计 黄燕美

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址: 上海市四平路 1239 号 邮编: 200092 电话: 021 - 65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 大厂回族自治县聚鑫印刷有限责任公司

开 本 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张 14.75 插页 1

字 数 359 000

版 次 2017 年 5 月第 1 版

印 次 2024 年 9 月第 5 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5608 - 7009 - 0

定 价 45.00 元

本书若有印装质量问题, 请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

前 言

Preface

本教材是为满足应用型人才培养的需求而编写的。

本教材包括半导体二极管及其电路分析、交流放大电路基础、场效应管及其放大电路、集成运算放大电路、负反馈放大电路、信号发生电路、功率放大电路、直流稳压电源、电路设计及电子技术技能综合训练 10 章内容。

本教材在内容的选取及编写上具有如下特点：

(1) 避免烦琐的公式推导和数学论证，力求理论联系实际，学以致用。

(2) 有利于引导学生利用已有的知识与经验主动探索知识的发生与发展，同时也利于教师创造性地教学；突出应用性、实用性、针对性，将知识与能力有机结合。

(3) 教材内容的组织符合学生的认知发展规律，从简单到复杂，从形象到抽象，由浅入深、循序渐进、螺旋上升。

(4) 应用电路设计及电子技术技能综合训练的内容，可加深、拓宽学生的知识面，并提高其实践技能。

本书由大连海洋大学邢迎春任主编，马振峰、于军任副主编。具体编写分工如下：第 1、2、3、4、8 章由邢迎春编写；第 5、6、7 章由马振峰编写；第 9、10 章由于军编写。邢迎春负责全书统稿，大连海洋大学牛永奎教授任主审。

由于编者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

编 者

目 录 Contents

第 1 章 半导体二极管及其电路分析	1
学习目标	1
1.1 半导体的基本知识	1
1.1.1 半导体的导电特性	1
1.1.2 本征半导体	1
1.1.3 杂质半导体	3
1.1.4 PN 结及其单向导电特性	3
1.2 半导体二极管	6
1.2.1 二极管的结构与分类	6
1.2.2 二极管的伏安特性	6
1.2.3 温度对二极管特性的影响	8
1.2.4 二极管的主要参数	8
1.2.5 二极管的选择及使用常识	8
1.3 二极管应用电路分析	9
1.3.1 二极管模型	9
1.3.2 电路分析	10
1.4 特殊二极管	13
1.4.1 稳压二极管	13
1.4.2 发光二极管	14
1.4.3 光电二极管	14
1.4.4 变容二极管	15
本章小结	16
习题	16
第 2 章 交流放大电路基础	19
学习目标	19
2.1 半导体三极管	19

2.1.1	三极管的结构	19
2.1.2	三极管的电流放大作用	20
2.1.3	三极管的特性曲线	21
2.1.4	三极管的主要参数	23
2.1.5	三极管的选择和使用方法	24
2.2	共射基本放大电路的组成	27
2.2.1	共射基本放大电路的组成原则	27
2.2.2	共射基本放大电路各元件的作用	28
2.2.3	直流通路与交流通路	29
2.3	放大电路的分析	29
2.3.1	静态分析	29
2.3.2	动态分析	31
2.3.3	静态工作点对波形失真的影响	32
2.3.4	R_B 、 R_C 、 V_{CC} 对静态工作点的影响	33
2.4	放大电路的微变等效电路分析法	36
2.4.1	三极管微变等效电路分析	36
2.4.2	微变等效电路分析法	37
2.5	静态工作点的稳定问题	40
2.5.1	分压式偏置电路工作点的稳定原理	41
2.5.2	分压式偏置电路静态与动态分析	42
2.6	射极输出器	46
2.6.1	共集电极放大电路简介	46
2.6.2	静态及动态分析	46
2.7	共基极放大电路	49
2.7.1	电路组成	49
2.7.2	共基极放大电路静态、动态分析	49
2.7.3	三种基本组态放大电路比较	51
2.8	多级放大电路	52
2.8.1	多级放大电路的耦合方式	52
2.8.2	阻容耦合放大电路分析计算	53
2.8.3	频率特性	56
	本章小结	58
	习题	58
第3章 场效应管及其放大电路		64
	学习目标	64
3.1	绝缘栅型场效应管	64
3.1.1	绝缘栅型场效应管的结构与工作原理	64

3.1.2 场效应管的主要参数及使用时的注意事项	67
3.2 结型场效应管	68
3.2.1 结型场效应管的结构、符号及工作原理	68
3.2.2 结型场效应管的特性曲线	70
3.3 场效应管放大电路	73
3.3.1 场效应管放大电路的静态偏置	73
3.3.2 场效应管微变等效电路	74
3.3.3 场效应管放大电路	75
本章小结	77
习题	77
第4章 集成运算放大电路	80
学习目标	80
4.1 集成运算放大电路概述	80
4.2 差动放大电路	81
4.2.1 直接耦合电路的主要问题	81
4.2.2 差动放大电路分析	82
4.2.3 差动放大电路的输入/输出方式	86
4.3 集成运放的主要参数、分类及符号	88
4.3.1 集成运放的主要参数	88
4.3.2 集成运放的分类	89
4.3.3 集成运放的外形和符号	89
4.4 理想集成运放的模型	91
4.4.1 集成运放的电压传输特性	91
4.4.2 理想集成运放的特点	91
4.4.3 理想集成运放工作在线性区的特点	91
4.4.4 理想集成运放工作在非线性区的特点	91
4.5 基本运算电路	92
4.5.1 比例运算电路	92
4.5.2 加法运算电路	94
4.5.3 减法运算电路	96
4.5.4 积分和微分运算电路	97
4.6 集成运放的应用	100
4.6.1 集成运放的线性应用	100
4.6.2 集成运放的非线性应用	104
4.7 应用集成运放的注意事项	106
本章小结	107
习题	108

第 5 章 负反馈放大电路	112
学习目标	112
5.1 反馈的基本概念与分类	112
5.1.1 反馈的基本概念	112
5.1.2 反馈的分类	113
5.1.3 负反馈的一般表达式	114
5.2 负反馈放大电路类型的判别	115
5.2.1 电压串联负反馈	115
5.2.2 电流串联负反馈	116
5.2.3 电压并联负反馈	117
5.2.4 电流并联负反馈	117
5.3 负反馈对放大电路性能的影响	118
5.3.1 提高放大倍数的稳定性	118
5.3.2 减小非线性失真	119
5.3.3 展宽频带	119
5.3.4 改变输入和输出电阻	120
5.4 负反馈放大电路的分析	122
5.4.1 深度负反馈电路电压放大倍数的估算	122
5.4.2 放大电路引入负反馈的原则	124
本章小结	124
习题	125
第 6 章 信号发生电路	129
学习目标	129
6.1 正弦波振荡电路的基本概念	129
6.1.1 自激振荡的条件	129
6.1.2 自激振荡的建立及稳定过程	130
6.1.3 正弦波振荡电路的组成及分析方法	131
6.2 LC 正弦波振荡电路	131
6.2.1 LC 并联谐振电路的选频特性	132
6.2.2 变压器反馈式振荡电路	133
6.2.3 电感三点式 LC 振荡电路	133
6.2.4 电容三点式 LC 振荡电路	134
6.2.5 石英晶体振荡电路	135
6.3 RC 正弦波振荡电路	137
6.3.1 RC 桥式振荡电路	137
6.3.2 RC 移相式振荡电路	139

6.4 非正弦信号发生电路	140
6.4.1 方波发生电路	140
6.4.2 三角波发生电路	141
6.4.3 锯齿波发生电路	142
本章小结	143
习题	143
第7章 功率放大电路	147
学习目标	147
7.1 功率放大电路概述	147
7.1.1 功率放大电路的特点及要求	147
7.1.2 功率放大电路的分类	148
7.2 乙类互补对称功率放大电路	149
7.2.1 电路的结构及工作原理	149
7.2.2 电路的分析计算	150
7.3 甲乙类互补对称功率放大电路	152
7.3.1 乙类互补对称电路的交越失真	152
7.3.2 基本甲乙类互补对称电路	153
7.3.3 OTL 甲乙类互补对称电路	153
7.3.4 准互补对称功率放大电路	155
7.4 集成功率放大器	156
7.4.1 LM386 集成功率放大器	156
7.4.2 D2006 集成功率放大器	157
7.5 功率管的散热问题	159
本章小结	160
习题	160
第8章 直流稳压电源	162
学习目标	162
8.1 直流稳压电源的组成	162
8.2 整流电路	163
8.2.1 单相半波整流电路	163
8.2.2 单相全波整流电路	164
8.2.3 单相桥式整流电路	165
8.3 滤波电路	167
8.3.1 脉动系数和纹波因数	167
8.3.2 电容滤波电路	167
8.3.3 电感滤波电路	169

8.3.4 复式滤波电路	170
8.4 稳压电路	171
8.4.1 硅稳压管稳压电路	171
8.4.2 串联型稳压电路	173
8.5 集成稳压器	175
8.5.1 三端固定式集成稳压器	175
8.5.2 三端可调集成稳压器	177
8.5.3 三端集成稳压器的选择及使用注意事项	178
8.6 开关稳压电源	179
8.6.1 开关稳压电源的分类	179
8.6.2 串联型开关稳压电源	179
8.6.3 集成开关稳压器	181
本章小结	181
习题	182
第9章 电路设计	185
学习目标	185
9.1 单管放大电路设计	185
9.1.1 放大电路的设计步骤	185
9.1.2 设计举例	185
9.2 直流稳压电源设计	187
9.2.1 直流稳压电源的设计步骤	187
9.2.2 设计举例	187
本章小结	189
习题	189
第10章 电子技术技能综合训练	190
学习目标	190
10.1 电子元器件的基本知识和检测方法	190
10.1.1 电阻器	190
10.1.2 电容器	194
10.1.3 电感器与变压器	197
10.1.4 半导体器件	200
10.1.5 集成电路	200
10.1.6 电声器件	201
10.2 电子电路的焊接工艺	203
10.2.1 手工焊接材料	203
10.2.2 焊接前的准备	205

10.2.3 手工焊接的步骤及注意事项	206
10.2.4 焊点的质量要求	207
10.2.5 元件的拆焊	207
10.2.6 焊接工序	208
10.3 电子电路调试及故障检查	208
10.3.1 电子电路调试	208
10.3.2 收音机的调试	210
10.3.3 电子电路故障检查	212
10.4 收音机整机安装实训	215
10.4.1 收音机的主要性能指标	215
10.4.2 超外差式收音机的基本原理	216
本章小结	223
习题	224
参考文献	225

半导体二极管及其电路分析



学习目标

- (1) 了解本征半导体和杂质半导体的导电特性。
- (2) 理解 PN 结的形成, 掌握 PN 结的特性。
- (3) 了解二极管的结构、类型, 掌握二极管的伏安特性。
- (4) 掌握用万用表检测二极管的方法, 了解二极管的选择原则。
- (5) 掌握二极管电路的分析方法。
- (6) 了解稳压管、光电二极管、发光二极管的工作原理。



视频
模拟电子技术
基础 课程特
点及学习方法



视频
模拟信号与模
拟电路

1.1 半导体的基本知识

自然界中的物质由于原子结构不同, 导电性也各不相同。按它们的导电能力的强弱, 物质可分为导体、绝缘体和半导体三大类。导体的电阻率很小, 在 $10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ 以下, 导电能力很强, 如铜、铝等金属; 绝缘体的电阻率很大, 在 $10^8 \Omega \cdot \text{m}$ 以上, 导电能力很差, 如橡胶、塑料等物质; 导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体, 其电阻率为 $10^{-6} \sim 10^8 \Omega \cdot \text{m}$, 常用半导体材料有硅、锗和砷化镓等。

1.1.1 半导体的导电特性

半导体材料除了导电能力与导体、绝缘体有所不同之外, 还具有一些独特的特性, 这些特性使得半导体材料在电子技术中得到广泛的应用。

(1) 半导体的导电能力对温度的反应非常灵敏。温度越高导电能力越强。利用这一特性, 可制成热敏元件, 用于温度变化的检测。

(2) 半导体的导电能力对光照非常敏感。光照越强导电能力越强。利用这一特性, 可制成光敏元件, 如光敏电阻、光电管等。

(3) 在纯净的半导体中掺入微量的杂质(指其他元素), 其导电能力会大大增强。利用这一特性, 可制造出各种半导体器件, 如二极管、三极管、场效应管、晶闸管等。

1.1.2 本征半导体

纯净的不含杂质、具有完整晶体结构的半导体称为本征半导体。一般情况下, 晶粒中的



视频
本征半导体



图文
光敏电阻



图文
场效应管



视频
测量晶闸管



视频
晶闸管驱动器
件工作原理



视频
晶闸管的选用



视频
晶闸管工作原理



视频
晶闸管的检测



图文
载流子



图文
共价键

原子排列是整齐的,但从晶体整体来说,每个晶粒的方向彼此不同,所以原子的排列还是无规律和不整齐的,这种晶体称为多晶体。一般来说,多晶体不能制成半导体器件。如果把多晶体拉成单晶体,使它的原子排列由无规律和不整齐的状态变成有规律和整齐的状态,那么这种单晶体就可以制成晶体管和集成电路。

图 1-1 所示为硅单晶体原子排列示意图。硅原子的最外层轨道上有 4 个电子,它们受原子核的束缚力较小,称为价电子。在晶体结构中,硅原子之间很近,每个硅原子的价电子不仅受到自身原子核的吸引,还受到相邻原子的吸引,这使得它们为相邻两个原子所共有,这样每相邻两个原子都共有一对电子,称为共用电子对。电子对中的任何一个电子,既围绕自身原子核运动,又出现在相邻原子所属的轨道上,这样的组合称为共价键结构。由原子结构理论可知,当原子的最

外层电子数为 8 时,其结构就变得比较稳定。

在温度 $T=0$ K(开尔文)和没有外界影响的条件下,半导体内的价电子全部束缚在共价键中,没有能自由运动的电子,但与绝缘材料相比,半导体材料中的价电子受共价键的束缚力较小。当半导体的温度升高或受光线照射等外界因素影响时,某些共价键中的价电子获得能量,挣脱共价键的束缚,离开原子成为自由电子,形成带负电的载流子,同时在共价键中留下相同数量的空位,这种由于原子共价键结构的破坏而造成的空位称为空穴。空穴与自由电子是成对出现的,称为电子-空穴对,如图 1-2 所示。

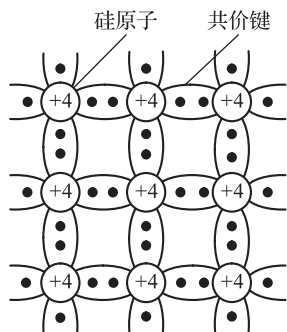


图 1-1 硅单晶体原子排列示意图

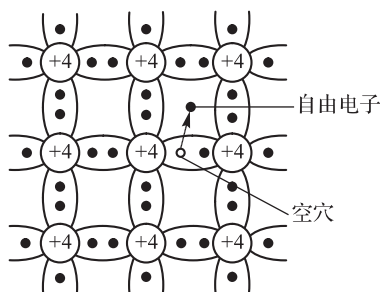


图 1-2 电子-空穴对

由于含空穴的原子带有正电,它将吸引相邻原子中的价电子,并使它挣脱原来共价键的束缚去填补前者的空穴,从而在自己的位置上出现新的空穴。这样,当电子按某一方向填补空穴时,就像带正电荷的空穴沿相反方向移动。空穴和电子一样,也是一种载流子。

在本征半导体中,自由电子的数量和空穴的数量是相等的。每形成一个自由电子,同时出现一个空穴,它们成对出现,这种现象称为本征激发。自由电子在运动过程中,又会和空穴相遇,重新结合而成对消失,这种与激发相反的过程称为复合。在一定温度下本征激发与复合不断发生,达到动态平衡。在室温条件下,电子-空穴对的数目很少,并保持不变。当温度升高时,电子-空穴对的数目将增加,因此,本征半导体的导电能力随温度增加而显著增强。

在导体中,只有自由电子的运动形成的电流,而在半导体中既有带负电荷的自由电子的运动,又有带正电荷的空穴的运动,因此,在外电场作用下,将形成电子电流和空穴电流。如

果从本征半导体引出两个电极并接上电源,此时带负电的自由电子将向电源正极做定向运动,形成电子电流,带正电的空穴将向电源负极做定向运动,形成空穴电流,外电路中的电流为电子电流与空穴电流之和。

1.1.3 杂质半导体

本征半导体载流子数量少,导电能力很差。如果在纯净的本征半导体中掺入微量有用杂质,变成杂质半导体后,就会使其导电性能发生显著变化。按照掺入杂质的不同,杂质半导体可分为N型半导体和P型半导体。



视频
杂质半导体

1. N型半导体

在本征半导体中掺入微量5价元素,如磷(或砷、锑等),如图1-3所示。由于磷原子的最外层电子轨道上有5个价电子,其中4个和相邻的硅原子构成共价键,多出的一个价电子无法组成共价键,受到的束缚力很小,很容易摆脱原子核的束缚成为自由电子,同时磷原子因为失去一个价电子而带正电,变为正离子。每掺入一个磷原子都能提供一个自由电子,由于自由电子数目增多,这种半导体导电主要靠电子,所以称为电子型半导体,即N型半导体。在N型半导体中,自由电子是多数载流子,空穴为少数载流子。

2. P型半导体

在本征半导体中掺入少量3价元素硼(镓、铟等),如图1-4所示。由于硼原子的最外层电子轨道上的价电子只有3个,当它与硅原子组成共价键时,因缺少一个价电子而形成空位,相邻共价键上的价电子受到激发很容易来填补这个空位,这样硼原子多一个电子而带负电,变为负离子,而失去价电子的硅原子形成一个空穴。每掺入一个硼原子都能提供一个空穴,由于空穴的数目大大增加,而自由电子数很少,这种半导体的导电主要靠空穴,因此称为空穴型半导体,即P型半导体。P型半导体的空穴是多数载流子,电子是少数载流子。

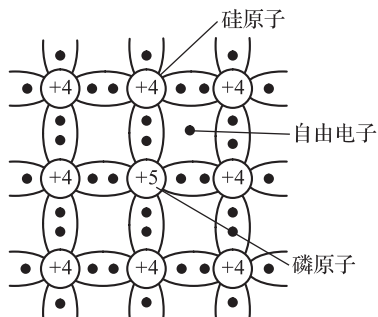


图 1-3 N型半导体

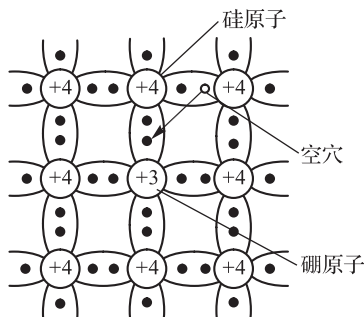


图 1-4 P型半导体

N型半导体、P型半导体中的多数载流子都是掺入杂质造成的,尽管杂质含量很小,但它们对半导体的导电能力却有很大影响。而少数载流子的数量与本征激发和复合有关,尽管数量很少,但对温度非常敏感,对半导体的性能有很大影响。

1.1.4 PN结及其单向导电特性

1. PN结的形成

当P型半导体和N型半导体利用某种工艺连接为一体时,在交界处就出现了电子和空穴的浓度差别,由于P型半导体中空穴多于电子,N型半导体中电子多于空穴,这样电子和

空穴都要从浓度高的地方向浓度低的地方扩散,这种由于浓度差引起的运动称为扩散运动,如图 1-5 所示。

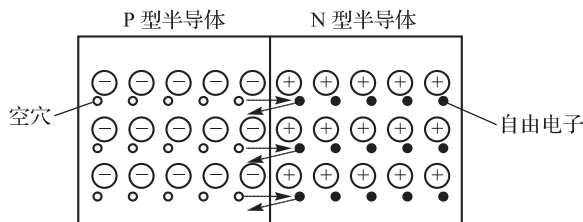


图 1-5 扩散运动

在两种半导体界面附近,P 型半导体中的空穴向 N 型半导体中扩散,并与 N 型半导体中的电子复合,在 P 型半导体一侧留下不能移动的负离子;同样地,N 型半导体中的电子向 P 型半导体中扩散,与 P 型半导体中的空穴复合,在 N 型半导体一侧留下不能移动的正离子。界面附近留下的不能移动的正离子、负离子区域称为空间电荷区。

当空间电荷区形成以后,界面附近就形成了一个内电场,内电场方向由 N 型半导体指向 P 型半导体。内电场一方面阻碍多数载流子的扩散,故空间电荷区也称为阻挡层;另一方面,内电场有助于少数载流子的漂移运动,漂移是指在电场作用下少数载流子的定向运动。因此,N 型半导体中的空穴向 P 型半导体漂移,P 型半导体中的电子向 N 型半导体漂移,其结果是使空间电荷区变窄,内电场削弱,这又将引起多数载流子扩散。当扩散与漂移达到动态平衡时,电子从 N 型半导体到 P 型半导体的扩散电流必然等于它从 P 型半导体到 N 型半导体的漂移电流;同样地,空穴的扩散电流和漂移电流也必然相等。这时,空间电荷区相对稳定,形成了 PN 结,如图 1-6 所示。

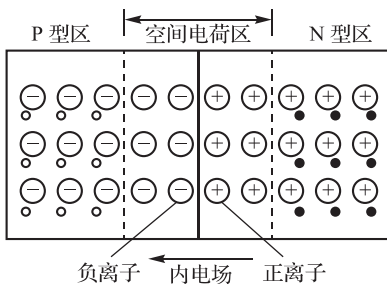


图 1-6 PN 结的形成

在无外电场或其他因素激发时,PN 结处于平衡状态,没有电流通过,空间电荷区是恒定的。另外,在这个区域内,多数载流子已扩散到对方并复合掉了,好像耗尽了一样,因此,空间电荷区又称为耗尽层。

2. PN 结的单向导电性

PN 结的基本特性是具有单向导电性。

(1)正向特性。正向特性是 PN 结外加正向电压,即电源正极接 P,电源负极接 N 时的特性,如图 1-7 所示。PN 结外加正向电压也称为正向偏置,这时外电场与内电场方向相反,因而削弱了内电场,使空间电荷区宽度减小,N 型半导体中的电子和 P 型半导体中的空穴都能顺利地通过 PN 结,形成较大的扩散电流;少数载流子数量很少,其漂移形成的电流很小,与扩散电流相比可忽略。所以,外加正向电压时,主要是扩散电流流过 PN 结,也称为正向

电流,此时 PN 结处于导通状态,电阻很小。

(2)反向特性。反向特性是 PN 结外加反向电压,即电源正极接 N,电源负极接 P 时的特性,如图 1-8 所示。PN 结外加反向电压也称为反向偏置,这时外电场与内电场方向一致,空间电荷区加宽,多数载流子的扩散难以进行,扩散电流大大减小;但空间电荷区加宽有利于少数载流子的漂移,少数载流子形成的漂移电流与扩散电流方向相反,因此漂移电流又称为反向电流。反向电流是少数载流子形成的,少数载流子的浓度很低,所以反向电流很小;温度一定时,反向电流基本不随反向电压变化。



视频
PN 结的形成
及单向导电性



视频
PN 结的电容
效应

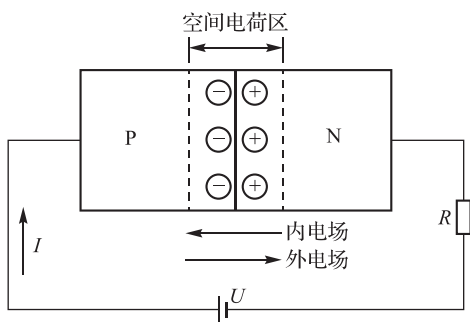


图 1-7 外加正向电压

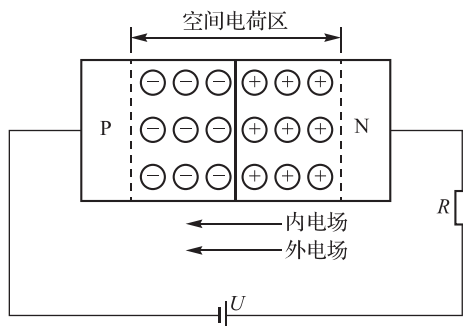


图 1-8 外加反向电压

综上所述,PN 结加正向电压时有较大电流流过,呈现低电阻,PN 结处于导通状态;PN 结加反向电压时电流很小,呈现高电阻,PN 结处于截止状态。PN 结具有单向导电性。

3. PN 结的结电容

PN 结形成后的空间电荷区可以等效为一个可变电容,当外加正向电压时,空间电荷区电量减少,PN 结变窄,相当于结电容“放电”;当外加反向电压时,PN 结变宽,相当于结电容“充电”。PN 结的结电容与其连接方式和外加电压的大小有关,不是一个常数。正向电压大时,结电容大;反之,结电容小。利用这个特性可制成变容二极管。

【练习题】

1. 1. 1 半导体的导电特性有哪些?
1. 1. 2 半导体导电与金属导电各有什么特点?
1. 1. 3 填空题。

(1)N 型半导体主要靠_____导电,所以称为_____。P 型半导体主要靠_____导电,所以称为_____。

(2)在 N 型半导体中,_____是多数载流子;在 P 型半导体中,_____是多数载流子。

(3)在杂质半导体中,多数载流子是由于_____造成的,而少数载流子是_____产生的。

(4)内电场有助于少子的_____运动。

(5)PN 结两端加正向电压时,电阻_____;PN 结两端加反向电压时,电阻_____,PN 结具有_____。

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管的结构与分类

PN 结两端加上引线,再用外壳封装起来,就构成了半导体二极管。由 P 型半导体引出的是阳极,由 N 型半导体引出的是阴极。二极管的外形与符号如图 1-9 所示。



视频
二极管的伏安特性



视频
二极管的动态特性



视频
半导体二极管的结构



图文
整流二极管的概念



视频
二极管的电流方程



视频
二极管工作原理



图文
发光二极管



图文
稳压二极管

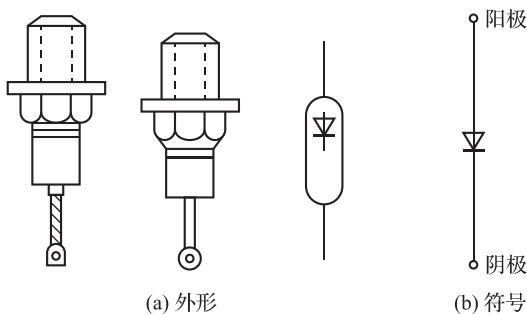


图 1-9 二极管的外形与符号

二极管的分类形式如下:

- (1) 半导体二极管按制造材料不同有硅二极管和锗二极管。
- (2) 按用途不同有整流二极管、稳压二极管、发光二极管、光电二极管等。

(3) 按功率大小有小功率二极管、中功率二极管和大功率二极管。

(4) 按结构不同有点接触型二极管、面接触型二极管和平面型二极管。点接触型二极管的特点是 PN 结面积小,结电容小,工作电流小,可以在高频下工作,常用于高频检波、混频电路;面接触型二极管的特点是 PN 结面积大,允许通过的正向电流大,但因面积大,结电容较大,只能在较低的频率下工作,常用于整流电路;平面型二极管是一种特制的硅二极管,它不仅能通过较大的电流,而且性能稳定可靠,多用于开关、脉冲及高频电路中。点接触型、面接触型和平面型二极管的结构如图 1-10 所示。

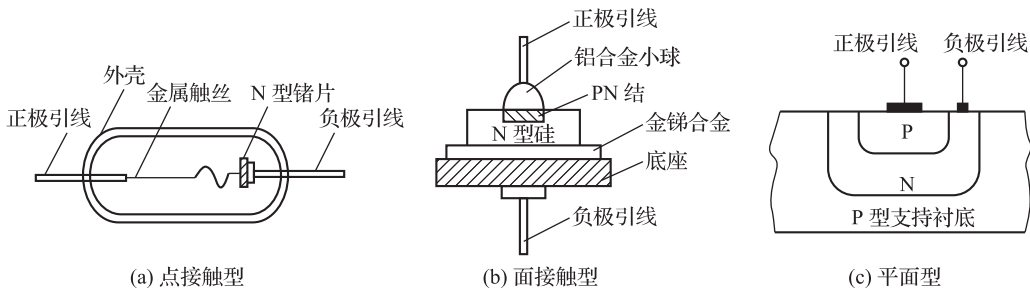


图 1-10 点接触型、面接触型和平面型二极管的结构

1.2.2 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性是指二极管两端电压 u 和流过管子的电流 i 之间的关系,其数学表

达式为

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

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

式中, I_S 为反向饱和电流; k 为玻尔兹曼常数, $k = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; q 为电子电量, $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$; U_T 为温度电压当量, 一般在室温下 ($T = 300 \text{ K}$), $U_T \approx 26 \text{ mV}$ 。

二极管的伏安特性如图 1-11 所示(以硅管为例), 可分为以下三部分:

1. 正向特性

由图 1-11 的第①段可见, 在二极管的正向特性的起始部分, 当外加正向电压较小时, 外电场还不足以克服 PN 结内电场对多数载流子造成的阻力, 因此, 这时的正向电流几乎为零, 二极管呈现很大的电阻, 这个电流为零的范围称为死区, 相应的电压称为死区电压。死区电压也称为门限电压或阈值电压。一般硅管的死区电压约为 0.5 V , 锗管的死区电压约为 0.1 V 。当外加正向电压大于死区电压后, 内电场被削弱, 正向电流迅速增加, 二极管正向导通后, 外加电压稍有增加, 电流即有很大增加, 这时二极管呈现的电阻很小。一般情况下, 硅管的正向导通压降为 $0.6 \sim 0.8 \text{ V}$, 典型值可取 0.7 V ; 锗管的正向导通压降为 $0.2 \sim 0.4 \text{ V}$, 典型值可取 0.3 V 。

2. 反向特性

二极管的反向特性对应图 1-11 中的第②段。二极管的 PN 结在反向电压作用下, 由少数载流子漂移形成的反向电流很小, 在反向电压不超过某一范围时, 反向电流基本恒定, 故通常称之为反向饱和电流, 此时二极管处于截止状态。在同样的温度下, 硅管的反向电流比锗管小。正常情况下硅管的反向电流约为 $1 \mu\text{A}$ 至几十微安, 锗管的反向电流可达几百微安。

3. 反向击穿特性

当反向电压继续增加到某一值时, 反向电流急剧增大, 称为反向击穿, 此时, 二极管两端的反向电压几乎不变, 该电压称为反向击穿电压, 用 U_{BR} 表示。反向击穿特性对应图 1-11 中的第③段, 反向击穿后二极管就失去了单向导电性。

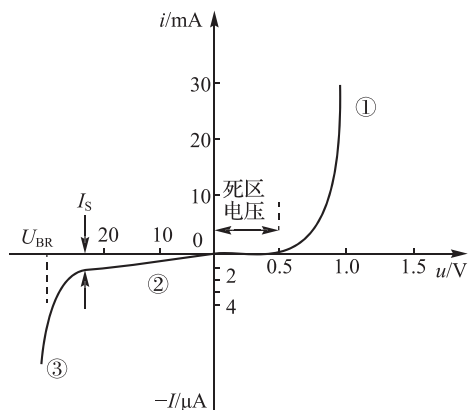


图 1-11 硅二极管的伏安特性

二极管击穿并不意味着损毁。击穿有电击穿和热击穿两种, 电击穿是可逆的, 在外加反向电压和反向电流的乘积不超过允许的耗散功率时, 外加电压减小后, 反向击穿现象会消失, PN 结不会损坏; 如果电击穿后, 反向电压不能及时减小, 使反向电压和反向电流的乘积



视频
二极管伏安特
性的测试

超过了允许的耗散功率,将造成热击穿,热击穿是不可恢复的,工作中要避免发生热击穿。

1.2.3 温度对二极管特性的影响

半导体的导电性能与温度有关,所以二极管的伏安特性也会随温度变化而变化。在同一正向电流下,随着温度的升高,二极管的正向导通压降会减小,通常温度每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,二极管的正向导通压降将减小 2 mV 左右;二极管的反向饱和电流随着温度升高急剧增大,通常半导体的温度每升高 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,其反向饱和电流约增加一倍;二极管的反向击穿电压也会随温度升高有所降低。

1.2.4 二极管的主要参数

1. 最大整流电流 I_F

最大整流电流是二极管长期使用时允许流过的最大正向平均电流,它由PN结的面积和散热条件决定。使用时注意不能超过这个数值,否则二极管会过热而损坏。一般二极管的最大整流电流为毫安数量级,整流二极管的电流可达几百安甚至几千安。

2. 最大反向工作电压 U_{RM}

最大反向工作电压是指二极管使用时允许承受的最大反向电压。二极管一旦反向击穿,电流会很快增大,会烧毁二极管。一般手册上给出的最大反向工作电压约为击穿电压的一半。通常最大反向工作电压在十几伏到几十伏之间。

3. 最大反向电流 I_{RM}

最大反向电流是指二极管加最大反向工作电压时的反向电流。其值越小,二极管的单向导电性能越好。反向电流是少数载流子运动形成的,因此,温度对反向电流影响很大,使用时应加以注意。一般硅二极管的反向电流为纳安数量级,锗二极管的反向电流为微安数量级。

4. 最高工作频率 f_M

最高工作频率主要由二极管PN结电容的大小决定。使用中若频率超过 f_M ,二极管的单向导电性能会变差,甚至无法使用。

1.2.5 二极管的选择及使用常识

1. 型号、种类选择

根据需要正确地选择型号,要求导通电流大时,应选用平面型二极管;要求工作频率高时,应选用点接触型二极管;用于整流电路时,应选用整流二极管。

要求反向电流小、温度稳定性好、反向击穿电压高、耐温度时,应选用硅管;要求导通电压低时,应选用锗管。硅管与锗管不能互相代用。

2. 参数选择

为保证电路正常工作,管子的参数应满足电路的要求,切勿超过手册中规定的最大允许电流和电压值,并要有足够裕量。

3. 使用常识

二极管使用时应避免靠近发热元件,并保证散热良好。工作在高频或脉冲电路的二极管引线,要尽量短,不能用长引线或把引线变成圈来达到散热目的。焊接二极管时最好用

45 W 以下的电烙铁,并用镊子夹住引线根部,防止烫坏管芯。

【练习题】

1.2.1 为什么硅二极管的热稳定性比锗二极管好?

1.2.2 二极管正向特性有什么特点?

1.2.3 填空题。

(1)半导体二极管按结构不同可分为_____、_____和_____;按材料不同可分为_____和_____。

(2)二极管加正向电压时,锗管死区电压约为_____,硅管死区电压约为_____。

(3)锗管的正向导通压降约为_____,硅管的正向导通压降约为_____。

(4)温度升高,二极管的正向导通压降_____,反向饱和电流_____。

1.3 二极管应用电路分析

1.3.1 二极管模型

二极管为非线性器件,分析时常用一些等效的线性器件模型代替。

1. 理想模型

理想模型是指在正向偏置时,二极管导通,其导通压降为零,相当于开关的闭合;当反向偏置时,二极管截止,电流为零,阻抗为无穷大,相当于开关的断开。

在实际电路中,当电源电压远大于二极管的导通压降时,可利用此模型进行分析,此模型简单实用。

2. 恒压降模型

在很多情况下,二极管的导通压降不能忽略,这时可用恒压降模型。恒压降模型是指二极管在正向导通时,其导通压降为恒定值,且不随电流变化。硅二极管的导通压降为 0.7 V,锗二极管的导通压降为 0.3 V。在流过二极管的电流很小时,二极管工作在特性曲线下部弯曲部分,电流变化引起的导通压降变化较大,这时使用这种模型不恰当,只有当二极管的电流接近或大于 1 mA 时,才可以使用恒压降模型。在实际电路中,此模型的应用非常广泛。

3. 交流小信号模型

二极管的交流小信号模型如图 1-12 所示。假如二极管工作在静态工作点 Q,对应的直流电压和直流电流为 U 、 I ,则直流电阻为

$$R_D = U/I \quad (1-3)$$

二极管在静态工作点 Q 有一个小的变化量 ΔU 和 ΔI ,则可把 $u-i$ 特性看成一条直线,该直线斜率的倒数就是小信号模型的交流电阻,即

$$r_d = du/di \quad (1-4)$$

将式(1-1)代入式(1-4),可得

$$r_d \approx \frac{26 \text{ mV}}{I} \quad (1-5)$$



视频
二极管的直流
等效电路(直
流模型)



视频
二极管的交流
等效电路和主
要参数

r_d 为交流等效电阻,它表明二极管工作在交流状态时可以用这样的交流电阻来等效表示。

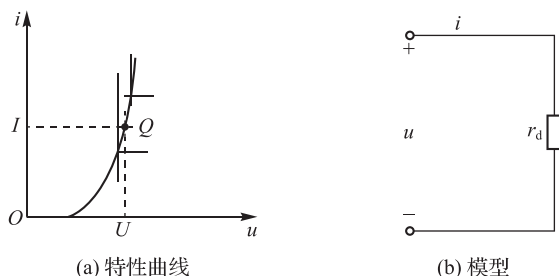


图 1-12 二极管的交流小信号模型

1.3.2 电路分析

利用二极管可以构成检波、整流、限幅等电路。

1. 二极管导通、截止判断

分析判断二极管导通与否的方法是:断开二极管,分析加在二极管阳极、阴极间的电压,若加正向电压,且大于导通电压,则二极管导通;若加反向电压,或小于导通电压,则二极管截止。

【例 1-1】 判断图 1-13 中二极管是导通还是截止? 计算流过二极管的电流 I 及输出电压 U 。

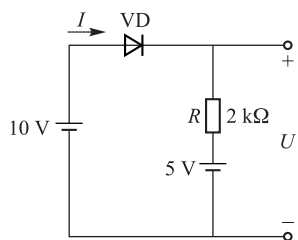


图 1-13 例 1-1 图

解 二极管承受正向电压,导通。

二极管采用理想模型分析,则

$$I = \frac{10 - 5}{2} = 2.5 \text{ mA}$$

$$U = 10 \text{ V}$$

二极管采用恒压降模型分析,二极管的正向导通压降取 0.7 V ,则

$$I = \frac{10 - 0.7 - 5}{2} = 2.15 \text{ mA}$$

$$U = 10 - 0.7 = 9.3 \text{ V}$$

2. 检波电路

图 1-14 所示为二极管检波电路及其波形。

检波是利用二极管单向导电性将叠加在高频载波上的低频信号或音频信号检出来。在半导体收音机、收录机、电视机及通信设备等的小信号电路中广泛应用。

检波电路由二极管和电容组成。

接收机接收到载波信号后,首先利用二极管的单向导电性将载波信号的负半周削去,如图 1-14(c)所示;再利用旁路电容将高频信号滤掉,输出信号就是低频信号,如图 1-14(d)所示,被取出的低频信号经放大后即可在荧光屏上显示出图像或从扬声器中发出声音。

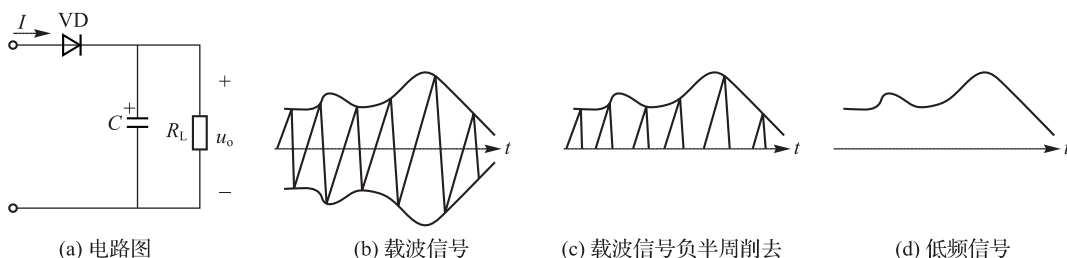


图 1-14 二极管检波电路及其波形

3. 限幅电路

利用二极管恒定的导通压降对输入信号进行限幅。

【例 1-2】 如图 1-15(a)所示, $U_{\text{REF}}=2\text{ V}$, 画出相应的输出电压波形。

解 二极管采用理想模型分析。如果输入信号 u_i 大于 $U_{\text{REF}}(2\text{ V})$, 二极管承受正向电压, 导通, 此时输出电压 $u_o=U_{\text{REF}}=2\text{ V}$ 。如果输入信号 u_i 小于 U_{REF} , 二极管承受反向电压, 截止, 此时输出电压 $u_o=u_i$ 。如图 1-15(b)中实线所示。

二极管采用恒压降模型分析(二极管的正向导通压降为 0.7 V)。如果输入信号 u_i 大于 $U_{\text{REF}}+0.7\text{ V}(2.7\text{ V})$, 二极管承受正向电压, 导通, 此时输出电压 $u_o=U_{\text{REF}}+0.7\text{ V}=2.7\text{ V}$ 。如果输入信号 u_i 小于 $U_{\text{REF}}+0.7\text{ V}$, 二极管承受反向电压, 截止, 此时输出电压 $u_o=u_i$ 。如图 1-15(b)中虚线所示。

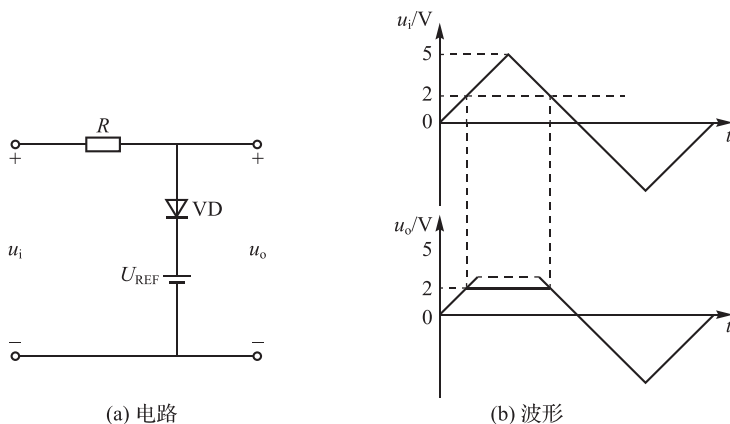


图 1-15 例 1-2 图

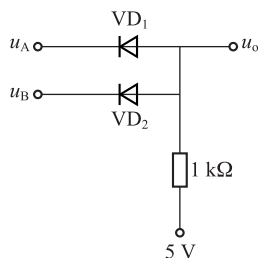
4. 逻辑运算电路

在数字电路中, 常用二极管构成逻辑运算电路。

(1) 如图 1-16 所示, 若 $u_A=u_B=0\text{ V}$, 从图中可知 VD_1 、 VD_2 承受正向电压, VD_1 、 VD_2 导通, 忽略二极管导通压降, 输出电压 $u_o=0\text{ V}$ 。

(2) 若 $u_A=0\text{ V}$, $u_B=3\text{ V}$, 刚开始 VD_1 、 VD_2 承受正向电压, VD_1 、 VD_2 均导通, 但由于 VD_1 导通后, VD_1 阳极电位为 0 V , 迫使 VD_2 承受反向电压而截止, 输出电压 $u_o=0\text{ V}$ 。

(3) 若 $u_A=3\text{ V}$, $u_B=0\text{ V}$, VD_2 导通, VD_1 截止, 输出电压 $u_o=$ 图 1-16 逻辑运算电路



0 V。

(4)若 $u_A = u_B = 3\text{ V}$, VD_1 、 VD_2 承受正向电压, VD_1 、 VD_2 导通, 忽略二极管导通压降, 输出电压 $u_o = 3\text{ V}$ 。

由此可见, u_A 、 u_B 两个输入信号均为 3 V(高电平)时, 输出为 3 V(高电平); u_A 、 u_B 两个输入信号有一个为 0 V(低电平), 输出为 0 V(低电平), 实现了与逻辑功能。

测试: 普通二极管的识别与检测

1. 观测符号标记

通常在二极管的外壳上标有二极管的符号, 根据符号可知二极管的阳极和阴极。对于标有色点或色环的二极管, 靠近色环的一端为阴极, 标有色点的一端为阳极。

2. 二极管阳极、阴极及质量检测

(1)指针式万用表检测。当万用表处于电阻挡时, 红表笔为表内电源的负极, 黑表笔为表内电源的正极。用万用表测量二极管的正、反两次电阻, 两次测量中电阻小的那次, 黑表笔接的是二极管阳极, 红表笔接的是二极管阴极。两次电阻值相差越大, 说明二极管的单向导电性越好。两次电阻值均为无穷大, 说明二极管内部断路; 两次电阻值均为 0, 说明二极管内部短路。若两次阻值相差不大, 说明管子性能差, 为劣质管。若正向电阻为几千欧, 则为硅管; 若正向电阻为几百欧, 则为锗管。

在测试小功率二极管时, 一般使用 $R \times 100$ 挡或 $R \times 1k$ 挡, 以免损坏管子。

(2)数字式万用表检测。数字式万用表的红表笔为表内电源的正极, 黑表笔为表内电源的负极。将数字式万用表置于电阻挡, 两表笔接二极管两引脚, 正、反两次读取显示值, 若两次都显示 1, 说明二极管内部断路; 若两次都显示 0.000, 则二极管内部短路。

若在工作电路中将数字式万用表置于二极管挡, 测量二极管压降, 显示 $0.2 \sim 0.7\text{ V}$ 是二极管正向压降, 此时与红表笔相连的是二极管的阳极。若显示数值为 0.2 V 左右, 为锗管, 若显示数值为 $0.5 \sim 0.7\text{ V}$, 为硅管。

【练习题】

1.3.1 为什么用万用表电阻挡的不同量程测量同一个二极管的正向电阻, 读数会不同?

1.3.2 什么情况下二极管可看作理想模型? 什么情况下二极管可看作恒压降模型?

1.3.3 如图 1-17 所示电路, VD 为理想二极管, 判断二极管是导通还是截止。输出电压是多少?

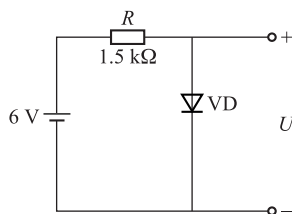


图 1-17 练习题 1.3.3 图

1.4 特殊二极管

二极管种类很多,实际中还有一些具有特殊用途的二极管,如稳压二极管、发光二极管、光电二极管、变容二极管等。

1.4.1 稳压二极管

稳压二极管是用特殊工艺制造的面接触型硅二极管,因为它具有稳定电压的作用,故称为稳压管。稳压管的伏安特性曲线及符号如图 1-18 所示。稳压管的正向特性曲线与普通二极管相似,而反向特性却不同。当加于稳压管的反向电压从零开始增加时,起初电流很小,甚至不导通;当电压增加到稳压管击穿电压时,反向电流突然增大,此后电流虽然在很大范围内变化,但稳压管两端电压却变化很小。如果将稳压管和负载并联,就能在一定条件下保持输出电压不变,这就是稳压管的作用。由于硅管热稳定性好,因此一般都采用硅二极管作为稳压管。

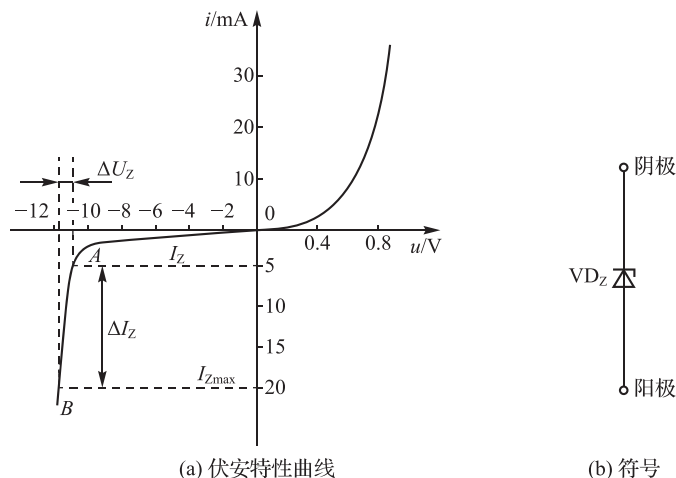


图 1-18 稳压管的伏安特性曲线及符号

硅稳压二极管有以下几个主要参数:

1. 稳定电压 U_Z

稳定电压(击穿电压)是稳压管在正常工作下其两端的电压,是选择稳压管的主要依据。由于制造的分散性,即使同一型号的管子,其稳压值也有一定差别。例如,2CW76 的稳定电压为 11.5~12.5 V,是指这种型号的某个管子,它的稳定电压是在这个范围内的一个确定数值,在使用时要进行测试,按需要挑选。

2. 稳定电流 I_Z

稳定电流是指稳压管正常工作时的最小电流值。电流低于此值时,管子稳压效果差;高于此值时,只要不超过额定功率,稳压管都可以正常工作,且电流越大,稳压效果越好,只是管子的功耗要增加。

3. 动态电阻 r_z

动态电阻是指稳压管在正常工作时,电压变化量与电流变化量之比,即 $r_z = \frac{\Delta U_z}{\Delta I_z}$ 。其数值随工作电流不同而改变。 r_z 越小,稳压效果越好。

4. 最大允许耗散功率 P_{ZM}

最大允许耗散功率是指稳压管工作时所允许的最大耗散功率。它等于最大稳定电流与相应的稳定电压的乘积,即 $P_{ZM} = I_{ZM} U_z$ 。

5. 电压温度系数 a_u

电压温度系数是稳定电压值随温度变化的参数。硅稳压管稳压值 U_z 低于 4 V 时,具有负温度系数,高于 7 V 时具有正温度系数,而在 4~7 V 时,电压温度系数很小。

1.4.2 发光二极管

发光二极管(LED)是一种能将电能转换成光能的半导体器件,具有体积小、亮度高、工作电压低、功耗小、驱动简单、响应速度快、寿命长、可靠性高、环保、光束集中等优点。发光二极管与普通二极管一样是由一个 PN 结组成的,也具有单向导电性。当正向电压达到工作电压时,有正向电流通过,发光二极管就会发光。普通发光二极管的符号如图 1-19 所示。



图 1-19 普通发光二极管的符号

1. 发光二极管的分类

发光二极管由含镓(Ga)、砷(As)、磷(P)、氮(N)等元素的化合物制成。

(1)发光二极管按发光颜色分为红色、橙色、黄色、绿色、蓝色、白色,另外,有的发光二极管中包含两种或三种颜色的芯片。

(2)根据发光二极管出光处掺或不掺散色剂、有色还是无色,上述各种颜色的发光二极管还可分为有色透明、无色透明、有色散色和无色散色四种类型。

(3)发光二极管按出光面特征分为圆灯、方灯、矩形、面发光管、侧向管等。

(4)发光二极管按结构分为全环氧封装、金属底座环氧封装、陶瓷底座环氧封装和玻璃封装等结构。

(5)发光二极管按发光强度和工作电流分为普通亮度、高亮度和超高亮度。

2. 发光二极管的工作电压

发光二极管的工作电压随制造材料不同而不同。普通红、绿、黄、橙发光二极管的工作电压约为 2 V,白色发光二极管的工作电压通常高于 2.4 V,蓝色发光二极管的工作电压通常高于 3.3 V。发光二极管的工作电流一般为 2~25 mA。超高亮度的发光二极管,如手电筒中用的发光二极管,它的工作电压较高,通常为 3.35~3.65 V,工作电流也相对较大,为 30~50 mA。

发光二极管的反向击穿电压约为 5 V。

发光二极管在民用、工业、科技、国防、航空和航天等领域得到了广泛的应用。

1.4.3 光电二极管

光电二极管又称光敏二极管,其在反向电压作用下工作。光电二极管的管壳上有一个

玻璃透镜,以便接受光照。在没有光照时,光电二极管的反向电流很小,该电流称为暗电流,此时反向电阻高达几十兆欧;当有光照时,反向电流迅速增大到几十微安,称为光电流,反向电阻降为几千欧至几十千欧。反向电流大小随光照强度的变化而变化,与光照强度成正比,实现光、电信号的转换。光电二极管主要用于需要光电转换的自动探测、控制装置及光导纤维通信系统中作为接收器件等。图 1-20 所示为光电二极管的符号。



图 1-20 光电二极管的符号

1.4.4 变容二极管

变容二极管利用 PN 结的电容效应进行工作,结电容的大小与外加电压大小有关,反向电压增大,结电容减小,反向电压减小,结电容增大。变容二极管多用于电视机、录像机、收录机的调谐电路和自动频率微调电路中。图 1-21 所示为变容二极管的符号。

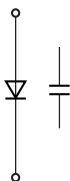


图 1-21 变容二极管的符号

测试:特殊二极管的检测

1. 稳压二极管的检测

从外形上看,金属封装稳压二极管的阳极为平面形,阴极一端为半圆面形;塑封稳压二极管上印有彩色标记的一端为阴极,另一端为阳极。

用指针式万用表判别稳压二极管极性与普通二极管相同,即用万用表 $R \times 1$ 挡,正反两次测量稳压二极管的电阻,阻值较小的那一次,黑表笔接的是稳压二极管的阳极,红表笔接的是稳压二极管的阴极。

2. 普通发光二极管的检测

(1) 阳极、阴极的判别。一般引脚引线较长者为阳极,较短者为阴极。若管帽上有凸起标志,则靠近凸起标志的引脚为阴极。

(2) 阳极、阴极及性能的检测。

① 万用表检测。利用具有 $R \times 10k$ 挡的指针式万用表可以大致判断发光二极管的阳极、阴极及性能好坏。正常时,二极管正向电阻为几十千欧至 $200 k\Omega$,反向电阻为 ∞ 。因此,通过测量正反两次电阻就可以判断阳极和阴极。若测得正向电阻为 0 或 ∞ ,反向电阻很小或为 0,则发光二极管损坏。

② 外接电源测量。用 3 V 稳压源或两节串联的干电池及万用表(指针式或数字式皆可)可以较准确地测量发光二极管的光、电特性。按图 1-22 所示电路连接,如果测得发光二极管电压为 $1.4 \sim 3 V$,且发光亮度正常,说明发光二极管发光正常。如果测得发光二极管电压为 0 或 3 V,且不发光,说明发光二极管已坏。

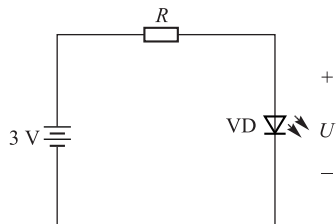


图 1-22 外接电源测试发光二极管

3. 光电二极管的检测

用万用表 $R \times 1k$ 挡,正常的光电二极管的正向电阻约为 $10 k\Omega$,无光照情况下,反向电阻为 ∞ ;有光照时,反向电阻随光照强度增强而减小,阻值可达几千欧,若测得反向电阻为 0 或 ∞ ,则光电二极管已坏。

【练习题】

1.4.1 稳压二极管有什么特点?

1.4.2 发光二极管与光电二极管有什么不同?

1.4.3 填空题。

(1)稳压二极管工作在_____状态下具有稳压作用。

(2)常用的特殊二极管有_____、_____、_____和_____。

(3)变容二极管结电容的大小与外加电压大小有关,反向电压增大,结电容_____,反向电压减小,结电容_____。

本章小结

(1)半导体器件是组成电子线路的关键元件,电子线路的性能与其所用的半导体器件的特性有着密切的关系。常用的半导体材料有硅、锗和砷化镓等。半导体具有热敏、光敏特性,掺杂对半导体导电性能影响较大。

(2)半导体中有自由电子和空穴两种载流子,根据掺入杂质的不同有N型半导体和P型半导体。N型半导体中自由电子为多数载流子,P型半导体中空穴为多数载流子。半导体中的少数载流子会影响半导体器件工作的热稳定性。

(3)PN结具有单向导电性,PN结加正向电压时有较大电流流过,呈现低电阻,PN结处于导通状态;PN结加反向电压时电流很小,呈现高电阻,PN结处于截止状态。

(4)二极管的伏安特性体现了二极管的单向导电性。二极管是非线性元件,它的死区电压,硅管约为0.5V,锗管约为0.1V。当二极管加正向电压导通时,硅管的正向导通压降为0.6~0.8V,典型值可取0.7V,锗管的正向导通电压降0.2~0.4V,典型值可取0.3V。

(5)在大信号作用时,普通二极管等效为理想模型,即加正向电压时导通,相当于开关闭合,加反向电压时截止,相当于开关断开。

(6)利用二极管可组成检波、限幅等电路。

(7)利用半导体的特性可制成硅稳压二极管、发光二极管、光电二极管、变容二极管等特殊二极管。稳压二极管工作在反向击穿区。光电二极管工作时加反向电压。

习 题

1-1 如何使用万用表判断普通二极管阳极、阴极及二极管的质量?

1-2 如图1-23所示电路,假设二极管是理想二极管,判断图中二极管是导通还是截止,并求出A、B两端电压 U_{AB} 。

1-3 如图1-24所示电路,二极管导通压降为0.7V,计算电路中各电流。

1-4 如图1-25所示电路,二极管为理想二极管,根据表1-1的输入值,判断二极管状态,确定输出电压 u_o 值。

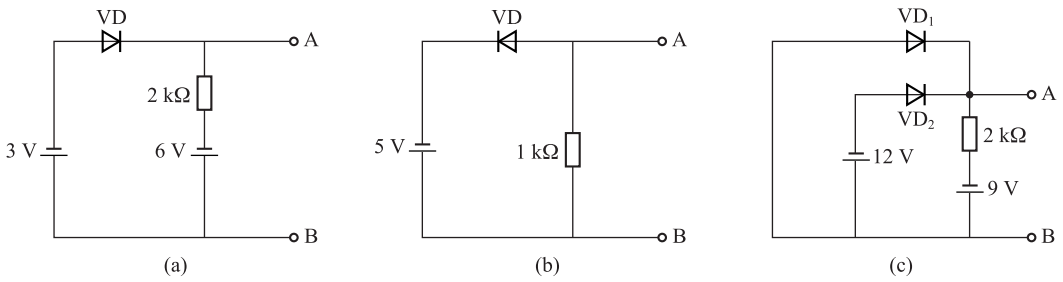


图 1-23 习题 1-2 图

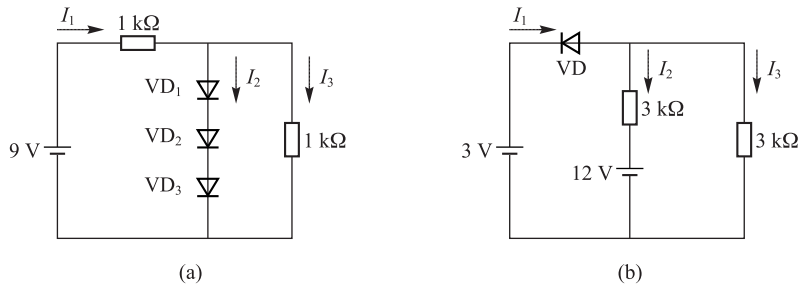


图 1-24 习题 1-3 图

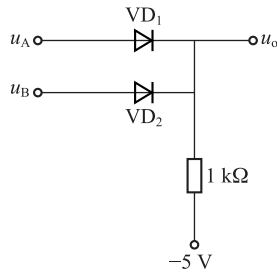


图 1-25 习题 1-4 图

表 1-1 习题 1-4 表

u_A/V	u_B/V	u_o/V
0	0	
0	3	
3	0	
3	3	

1-5 如图 1-26 所示电路,二极管为理想二极管, $u_i = 10\sin \omega t$,试画出 u_o 的波形。若二极管正向导通压降为 0.7 V ,波形又如何变化?

1-6 如图 1-27 所示电路,分析二极管是导通还是截止,三个灯是否都发光?

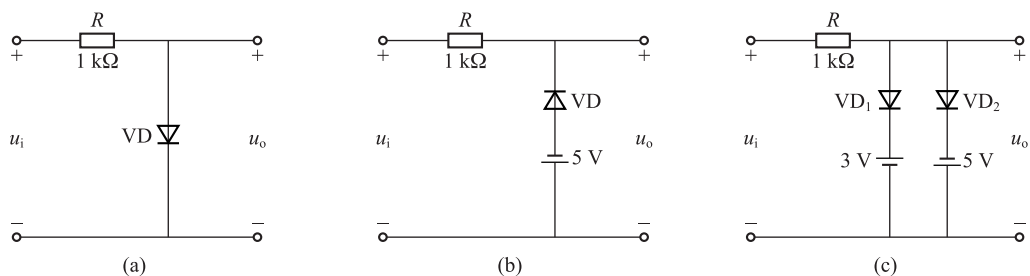


图 1-26 习题 1-5 图

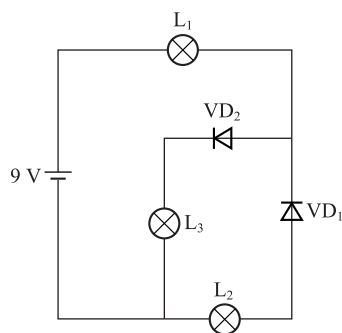


图 1-27 习题 1-6 图

1-7 有两个稳压管,其稳压值 $U_{Z1} = 8.5 \text{ V}$, $U_{Z2} = 6 \text{ V}$,正向导通压降为 0.7 V ,若两个二极管串联,可以得到几种电压?若两个二极管并联,又可以得到几种电压?



学习目标

- (1) 了解三极管的结构、分类,理解三极管的放大原理。
- (2) 掌握三极管的伏安特性和工作状态。
- (3) 理解放大电路的组成及各元件的作用。
- (4) 掌握放大电路的静态与动态、直流通路与交流通路。
- (5) 掌握共发射极放大电路的静态工作点的估算法和图解法。
- (6) 掌握放大电路的微变等效电路分析法,能进行放大倍数、输入和输出电阻的计算。
- (7) 掌握共集电极电路的特点及电路分析。
- (8) 掌握多级放大电路的耦合方式,掌握多级放大电路的电压放大倍数、输入和输出电阻的计算。
- (9) 了解放大电路的频率特性、上限和下限截止频率、通频带的概念。
- (10) 了解三极管的选择原则,能用万用表检测三极管,会进行放大电路的接线及测试。

2.1 半导体三极管

半导体三极管是组成放大电路的核心部件。

2.1.1 三极管的结构

半导体三极管是由两个背靠背的 PN 结组成的。根据排列方式不同,半导体三极管可分为 PNP 型和 NPN 型,如图 2-1 所示,图中同时画出了它们的电路符号。

每个三极管都有三个不同的区域,中间是基区,两侧是发射区和集电区。每个区上引出一个电极,基区引出基极,用符号 B 表示;发射区引出发射极,用符号 E 表示;集电区引出集电极,用符号 C 表示。基区与发射区之间的 PN 结称为发射结,基区与集电区之间的 PN 结称为集电结。

PNP 型和 NPN 型三极管符号的区别是发射极的箭头指向不同,箭头向里的为 PNP 型,箭头向外的为 NPN 型,它表示发射结在正向接法时的电流真实方向。PNP 型和 NPN 型三极管的工作原理相似。使用时,电源连接极性不同。



视频
晶体三极管的
结构和符号

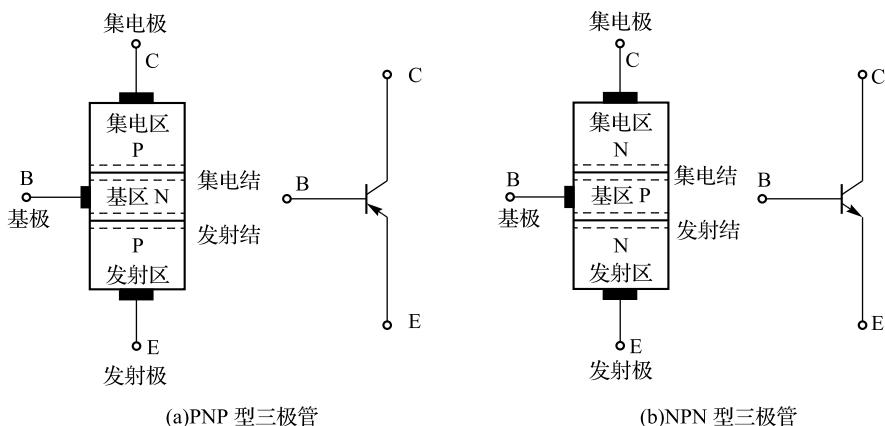


图 2-1 三极管结构示意图及符号

为保证三极管具有电流放大作用，三极管在制造时应满足以下条件：

- (1) 发射区掺杂浓度最高。
- (2) 基区很薄，基区掺杂浓度最低。
- (3) 集电区面积大，掺杂浓度比基区高，比发射区低。

以 NPN 型三极管为例，发射区的自由电子浓度比基区空穴浓度高 100 倍以上。

常见三极管的外形如图 2-2 所示。



视频
晶体三极管放大原理

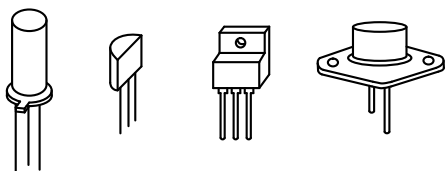


图 2-2 常见三极管的外形

2.1.2 三极管的电流放大作用

1. 偏置电压

三极管的结构特点是它具有放大作用的内部条件，而放大作用的外部条件是发射结要正向偏置，集电结要反向偏置。如图 2-3 所示电路，三极管接成两个回路，即基极回路和集电极回路，发射极是公共端，这种接法称为三极管的共发射极接法。以 NPN 型三极管为例，电源 V_{BB} 的正极接基极，负极接发射极，使发射结正偏；电源 V_{CC} 接在集电极与发射极之间，且 $V_{CC} > V_{BB}$ ，使集电结反偏，即 $U_C > U_B > U_E$ 。若为 PNP 型三极管，发射结正向偏置，集电结反向偏置时应满足 $U_E > U_B > U_C$ 。

2. 三极管内部多数载流子运动的过程

(1) 发射区向基区发射电子形成发射极电流 I_E 。由于发射结加正向电压，发射结内电场被削弱，发射区的多数载流子电子大量扩散到基区，形成发射极电流 I_E ，同时基区多数载流子空穴也扩散到发射区，但三极管的发射区掺杂浓度远大于基区，因此，基区扩散到发射区的空穴电流很小，可以忽略不计。

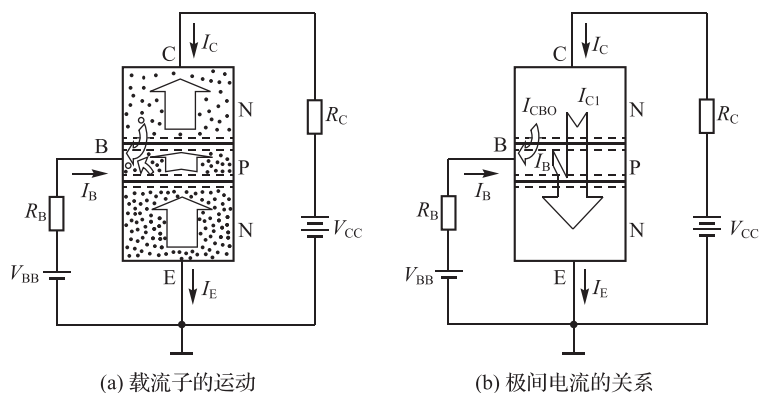


图 2-3 三极管中载流子的运动和极间电流的关系

(2) 电子在基区扩散与复合形成基极电流 I_B 。由发射区扩散到基区的电子变成了少数载流子,在集电极反向电压作用下,这些电子会继续向集电区方向运动,在运动过程中有少量电子与基区的空穴复合,形成基极电流 I_B 。由于基区很薄,且空穴浓度很低,所以 I_B 很小。

(3) 电子被集电极收集形成集电极电流 I_C 。绝大多数电子运动到集电结边缘,由于集电结加反向电压,集电结内电场增强,阻碍了集电结两边多数载流子的扩散,促进了少数载流子的漂移,所以运动到集电结边缘的电子在电场作用下将向集电区漂移,被集电极收集,形成集电极电流 I_C 的主要成分 I_{C1} ;同时,因集电结加反向电压,集电区的少数载流子空穴要向基区漂移,形成基极与集电极之间的反向饱和电流,数值很小,用 I_{CBO} 表示,即有 $I_C = I_{C1} + I_{CBO}$ 。

3. 电流关系

通过分析及测试可知 $I_E = I_B + I_C = I_B + I_{C1} + I_{CBO}$, 且 $I_C \gg I_B$, 这就是三极管的电流放大作用。

直流 I_C 与 I_B 之比称为直流电流放大系数 $\bar{\beta}$, 即

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B}$$

三极管能有电流放大作用,其外部条件是发射结正偏,集电结反偏。

2.1.3 三极管的特性曲线

三极管的特性曲线是指各电极电压与电流之间的关系曲线,它是三极管内部载流子运动的外部表现。这里介绍共发射极电路的输入特性曲线和输出特性曲线。图 2-4 所示为三极管共射特性曲线测试电路。

1. 输入特性

输入特性是指 U_{CE} 为一常数时,输入回路中基极电流 I_B 与基-射极之间电压 U_{BE} 的关系,即

$$I_B = f(U_{BE}) |_{U_{CE}=\text{常数}}$$

当 U_{CE} 等于零时,相当于集电极与发射极之间短路,基极与发射极之间相当于两个二极管并联,其输入特性应为两个二极管并联后的正向特性,如图 2-5 所示。

当 $U_{CE} \geq 1 \text{ V}$ 时,集电结已反向偏置,且内电场已足够大,可以把从发射区进入基区的绝大部分电子拉入集电区形成 I_C 。与 $U_{CE} = 0$ 时相比,在相同的 U_{BE} 下,流向基极的电流减小,



视频
晶体三极管的
输入特性和输出
特性