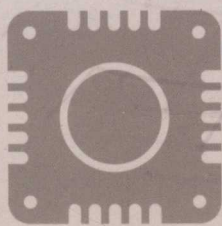


“十三五”高等教育电子类规划教材

模拟电子技术 及应用分析

MONI DIANZI JISHU JI YINGYONG FENXI

主 编 吴和静 邵雅斌 陈 晨
副主编 侯长波 刘 芳 赵 龙



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

“十三五”高等教育电子类规划教材

模拟电子技术及应用分析

主 编 吴和静 邵雅斌 陈 晨
副主编 侯长波 刘 芳 赵 龙



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

本书按照应用型本科高校的培养目标和特点,突出实用性、实践性的原则编写而成。全书主要包括:半导体器件及应用、放大电路及应用、负反馈放大电路、功率放大电路、集成运算放大电路、正弦波振荡器的制作。

本书适合作为以应用型为主的本科院校电气信息类专业的教材,并可供相关专业的科技人员作为参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术及应用分析 / 吴和静, 邵雅斌, 陈晨主编. -- 北京: 北京邮电大学出版社, 2018. 8
ISBN 978-7-5635-5515-4

I. ①模… II. ①吴… ②邵… ③陈… III. ①模拟电路—电子技术—研究 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 169063 号

书 名: 模拟电子技术及应用分析

著作责任者: 吴和静 邵雅斌 陈 晨 主编

责任编辑: 满志文 穆菁菁

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号 (邮编: 100876)

发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京玺诚印务有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 15.5

字 数: 392 千字

版 次: 2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-5515-4

定 价: 42.00 元

• 如有印装质量问题, 请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

前 言

“模拟电子技术及应用分析”是高等院校电子信息工程、通信工程、自动化、机电等理工科专业的一门重要的专业核心课程。该课程的应用领域非常广泛，几乎遍及电类及非电类的各个工程技术学科。在编写时，结合现代电子技术系列课程的建设实际，既考虑到要使学生获得必要的电子技术基础理论、基本知识和基本技能，也充分考虑到应用型院校学生的实际情况，并认真贯彻理论以够用为度，加强应用，提高分析和解决实际问题的能力。本书在编写上注重实用性，突出教学实践环节及特点，可把学生引入实际工作环境，强化学生实践能力。本书体现了“问题驱动”的教学思想，融入了操作性强、贴近实践的教学实例，提出问题、分析问题、解决问题，以“问题”驱动教学，便于教师授课和启发学生思考。

一个性能良好的电子设备，甚至是其中的一块功能电路，都有许多具体的技术细节，是许多基础知识的综合体现。本书在对基本电路进行原理分析的基础上，注重其实际应用。内容包括：半导体器件及应用、放大电路及应用、负反馈放大电路、功率放大电路、集成运算放大电路、正弦波振荡器的制作，并以附录的形式加强了对相关器件应用须知的介绍，以利突出实践环节教学，加强技能培养，适应工程实践的需求。本书力求做到内容深入浅出、概念清楚、通俗易懂，并注重实用性和先进性。本书还精心选编了大量的例题和习题，有利于培养学生分析问题和解决问题的能力。考虑到大学本科阶段的教学特点，本书在编写时注意教材的教学适用性，在总体结构上力求简明，章节内容安排上既注意了课程体系的连贯性，又保持了一定的独立性，以适应不同的教学要求和教学计划。

本书由黑龙江东方学院吴和静老师编写第1~第3章并负责全书的统稿和定稿；邵雅斌老师负责编写功率放大电路部分；陈晨老师负责编写集成运算放大电路部分；哈尔滨工程大学博士侯长波老师负责编写正弦波振荡器的制作部分；刘芳老师负责编写附录1~附录3，赵龙老师负责编写附录4~附录6。

由于编者水平有限，统稿时间仓促，书中不妥之处恳请读者给予批评指正，以便日后修订，使之成为日臻完善的应用型本科教材。

编 者

目 录

第1章 半导体器件及应用	1
1.1 半导体基础	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 杂质半导体	3
1.1.3 PN结及其单向导电性	4
1.1.4 实验项目一:实训室常用电子仪器的操作与使用	5
1.2 半导体二极管	8
1.2.1 二极管的结构及符号	8
1.2.2 二极管的伏安特性和主要参数	9
1.2.3 二极管应用电路	11
1.3 整流电路的应用	12
1.3.1 单相半波整流电路	12
1.3.2 单相桥式整流电路	15
1.4 滤波电路的应用	18
1.4.1 纹波系数和电容滤波	18
1.4.2 π 型滤波电路	20
1.5 特殊二极管	21
1.5.1 稳压二极管	21
1.5.2 发光二极管	23
1.5.3 光电二极管	24
1.5.4 变容二极管	24
1.6 集成稳压电路的特点与使用	24
1.6.1 固定稳压集成电路	24
1.6.2 可调稳压集成电路	26
1.7 小功率直流稳压电源的制作与调试	27
1.7.1 可调式稳压电路的组成与分析	27
1.8 半导体三极管	31

1.8.1	三极管的结构及符号	31
1.8.2	三极管的电流放大作用	32
1.8.3	三极管的特性曲线及主要参数	34
1.9	三极管的识别与检测	37
1.9.1	三极管	37
1.10	特殊三极管	45
1.10.1	光电三极管	45
1.10.2	光耦合器	46
1.10.3	复合管	46
	本章小结	47
	习题1	48
第2章	放大电路及应用	54
2.1	放大电路概述	54
2.1.1	放大电路的组成和工作原理	54
2.1.2	放大电路的主要性能指标	57
2.2	共发射极放大电路	59
2.2.1	共射放大电路	59
2.2.2	实验项目二:共射放大电路调测	67
2.3	静态工作点稳定电路	71
2.3.1	温度变化对静态工作点的影响	71
2.3.2	静态工作点稳定电路的组成及工作过程	71
2.3.3	静态工作点稳定电路的分析	72
2.3.4	实验项目三:静态工作点稳定电路调测	75
2.4	差动放大电路	79
2.4.1	零点漂移的概念	79
2.4.2	差动放大电路的基本组成	79
2.4.3	实验项目四:恒流源式差动放大电路调测	82
2.5	共集电极放大电路	87
2.5.1	共集放大电路	87
2.5.2	实验项目五:共集电极放大电路调测	90
2.6	共基极放大电路	93
2.7	场效应管放大电路	95
2.7.1	电路组成	95
2.7.2	电路分析	96

2.8 多级放大电路	98
2.8.1 多级放大电路的耦合方式	98
2.8.2 多级放大电路的分析方法	100
2.8.3 实验项目六:两级阻容耦合放大电路调测	101
2.9 放大电路的频率响应	105
2.9.1 单级放大电路的频率响应	105
2.9.2 多级放大电路的频率响应	108
2.9.3 实验项目七:两级阻容耦合放大电路频率响应调测	109
本章小结	112
习题 2	113
第 3 章 负反馈放大电路	121
3.1 反馈的概念	121
3.1.1 反馈	121
3.1.2 反馈放大电路的一般表达式	122
3.2 反馈的类型及判断方法	123
3.2.1 正反馈和负反馈	123
3.2.2 交流反馈和直流反馈	124
3.2.3 电压反馈和电流反馈	125
3.2.4 串联反馈和并联反馈	125
3.2.5 交流负反馈放大电路的 4 种组态	126
3.3 负反馈对放大电路性能概述	128
3.3.1 负反馈对放大电路性能的影响	128
3.3.2 放大电路引入负反馈的一般原则	130
3.4 深度负反馈放大电路	131
3.4.1 深度负反馈放大电路的特点	131
3.4.2 深度负反馈放大电路的估算	132
3.4.3 实验项目八:负反馈放大电路调测	133
本章小结	136
习题 3	137
第 4 章 功率放大电路	141
4.1 功率放大电路概述	141
4.1.1 功放的特点及主要技术指标	141
4.1.2 功率放大电路的分类	142

4.2 基本功率放大电路	143
4.2.1 OCL 功率放大电路	143
4.3 OTL 功率放大电路	146
4.3.1 OTL 功率放大电路	146
4.3.2 实验项目九:OTL 互补对称功率放大电路调测	151
4.4 集成功率放大器	154
4.4.1 LM386 内部电路	155
4.4.2 LM386 的典型应用电路	155
4.4.3 实验项目十:集成功率放大电路调测	156
本章小结	158
习题 4	159
第 5 章 集成运算放大电路	163
5.1 集成运算放大器概述	163
5.1.1 集成运放的基本组成	163
5.1.2 集成运放的主要性能指标	164
5.1.3 集成运放的选择与使用	165
5.2 理想运放及运放工作的两个区域	168
5.2.1 理想集成运算放大器	168
5.2.2 集成运算放大器的两个工作区域	168
5.3 信号运算电路	170
5.3.1 比例运算电路	170
5.3.2 求和运算电路	172
5.3.3 实验项目十一:比例求和运算电路调测	173
5.3.4 积分与微分电路	177
5.3.5 实验项目十二:积分与微分电路调测	179
5.4 有源滤波电路	182
5.4.1 低通滤波电路	182
5.4.2 高通滤波电路	183
5.4.3 带通滤波和带阻滤波电路	184
5.4.4 实验项目十三:有源滤波电路调测	185
5.5 电压比较器	189
5.5.1 单限比较器	189
5.5.2 滞回比较器	190
5.5.3 实验项目十四:电压比较电路调测	192

本章小结.....	196
习题 5	196
第 6 章 正弦波振荡器的制作	201
6.1 RC 正弦波振荡器	202
6.1.1 信号发生器	202
6.1.2 正反馈	203
6.1.3 RC 正弦波振荡器	204
6.1.4 设计 RC 正弦波振荡器	209
6.2 LC 正弦波振荡器	213
6.2.1 LC 正弦波振荡器	213
6.2.2 石英晶体振荡电路	217
知识拓展.....	220
本章小结.....	221
习题 6	221
附录 常用半导体器件手册	222
附录 1 半导体分立器件的命名方法	222
附录 2 常用半导体二极管的主要参数	226
附录 3 常用稳压二极管的主要参数	228
附录 4 常用整流桥的主要参数	228
附录 5 常用半导体三极管的主要参数	229
附录 6 模拟集成电路的主要参数	233
参考文献	236

第 1 章

半导体器件及应用

本章导读:半导体器件是现代电子技术的基础,要学习电子技术,就必须了解器件的相关知识。本章作为全书的开篇,首先介绍半导体的基础知识和主要特性,以及半导体器件的核心部分——PN结,然后引出几种常用的半导体器件——半导体二极管、三极管和场效应管。本章的实验内容包括:实训室常用电子仪器操作与使用;半导体器件的识别与检测。

本章基本要求:掌握PN结的结构及单向导电性;了解二极管、三极管、场效应管等半导体器件的内部结构及工作原理,熟悉它们的符号、主要参数、特性曲线、测试方法和典型应用电路;掌握常用电子仪器操作与使用方法和半导体器件的识别与检测方法。

◆ 1.1 半导体基础 ◆

自然界中的物质,按其导电能力分为导体、半导体和绝缘体。导电能力较强的物质称为导体,如金、银、铜、铝等金属材料和离子溶液;导电能力差的物质称为绝缘体,如橡胶、玻璃、陶瓷等材料;半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间,现代电子技术中最常用的半导体材料主要有硅(Si)和锗(Ge)以及一些化合物半导体等,硅是最常用的一种半导体材料,其次是锗半导体材料。

半导体具有一些其他物质所不具备的性质,它对温度、光照、压力等都非常敏感。半导体的电子特性主要表现在以下几个方面。

- (1) 热敏性:当外界温度变化时,半导体材料的导电能力将发生显著改变。
- (2) 光敏性:当受外界光照射时,半导体材料的导电能力将发生显著改变。
- (3) 掺杂性:在纯净半导体材料中掺入微量杂质,它的导电能力将显著提高。

利用半导体导电的这些特点,可以制成热敏电阻、光敏电阻和二极管、三极管、场效应管等半导体器件。

1.1.1 本征半导体

具有一定晶体结构的半导体才能更好地实现其功能。一般把完全纯净、结构完整的半导体晶体称为本征半导体。

1. 本征半导体中的共价键

硅和锗都是四价元素,它们都具有4个价电子(最外层电子)。在本征半导体材料硅和锗

中,每个原子外层的价电子会同时受到自身原子核以及相邻原子核的束缚,被相邻两个原子核所共有,就形成了晶体中的共价键结构。一个共价键内含有两个电子,由相邻的原子核各提供一个,称为束缚电子。图 1.1 所示为硅和锗的原子结构和共价键结构。

2. 本征激发和两种载流子

在半导体内部可以自由移动的带电粒子称为载流子,其可分为自由电子和空穴两类。在绝对零度($T=0\text{ K}$)下,本征半导体中没有载流子,不导电。但在一定的温度下,如 $T=300\text{ K}$ 时,由于热激发,少数电子会获得足够的能量脱离共价键的束缚而成为自由电子,在原来的位置留下一个空位,称为空穴,这种现象称为本征激发。温度越高,半导体材料的本征激发现象越剧烈。在本征半导体中,自由电子和空穴总是成对出现和消失,因此其数量相同,如图 1.2 所示。

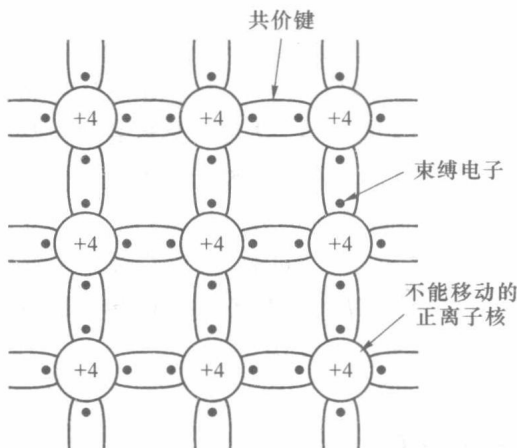


图 1.1 硅和锗的原子结构和共价键结构

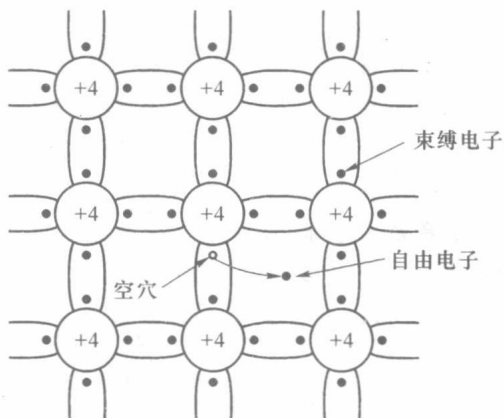


图 1.2 本征激发现象示意图

3. 空穴的运动

当空穴(如图 1.3 中位置 1 所示)出现以后,可被邻近的束缚电子(如图 1.3 中位置 2 所示)填补,同时在该电子的原有位置上形成一个空穴,这种电子填补空穴的运动称为复合;而这个空穴又可以被另一个束缚电子(如图 1.3 中位置 3 所示)填补,再次出现一个新的空穴,这样就形成了空穴的运动。由此可见,空穴也是一种载流子。半导体材料中空穴越多,其导电能力也就越强。空穴的出现是半导体导电区别导体导电的一个主要特征。

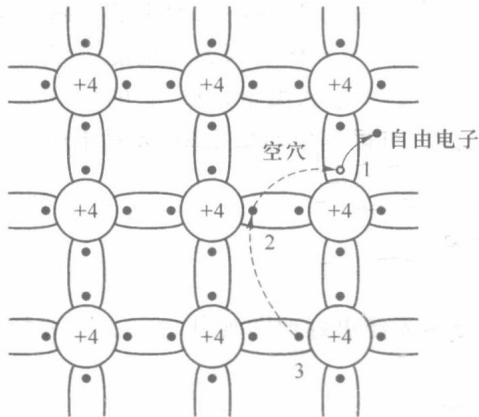


图 1.3 束缚电子填补空穴的运动

4. 结论

(1) 半导体导电的本质是载流子运载电荷形成电流,载流子分为两种,一种是带负电的自由电子,另一种是带正电的空穴。

(2) 在本征半导体中,自由电子和空穴总是成对产生,数目相等。

(3) 在一定温度下,本征半导体中电子—空穴对的产生与复合会达到动态平衡,其数目相对稳定。

(4) 温度升高,激发的自由电子—空穴对数目增加,半导体的导电能力增强。

1.1.2 杂质半导体

为了提高本征半导体的导电性,可在其中加入微量杂质,形成杂质半导体。根据掺入杂质的性质不同,杂质半导体可分为电子型(N型)和空穴型(P型)。

1. N型半导体

N型半导体是在硅(或锗)半导体晶体中掺入微量磷(P)、砷(As)等五价元素形成的。五价元素具有5个价电子,它们在与相邻的四价硅、锗原子组成共价键时,多出来的一个价电子很容易成为自由电子,使得N型半导体中自由电子的数目大大增加。自由电子参与导电移动后,原本位置的五价原子失去一个电子,成为一个不能移动的正离子,虽然此时没有相应的空穴产生,但半导体仍然呈现电中性,如图1.4所示。



请思考:为什么N型半导体仍然呈现电中性?

在N型半导体中,自由电子由掺杂的五价元素提供,其数量远多于因本征激发产生的空穴。因此对于N型半导体来说,自由电子为多数载流子,简称为多子;空穴为少数载流子,简称为少子。N型半导体主要靠自由电子导电。

2. P型半导体

P型半导体是在硅(或锗)半导体晶体中掺入微量硼(B)、镓(Ga)等三价元素形成的。三价元素具有3个价电子,它们在与相邻的四价原子组成共价键时会多出来一个空位,形成空穴,此时没有相应的自由电子产生,半导体仍然呈现电中性,如图1.5所示。

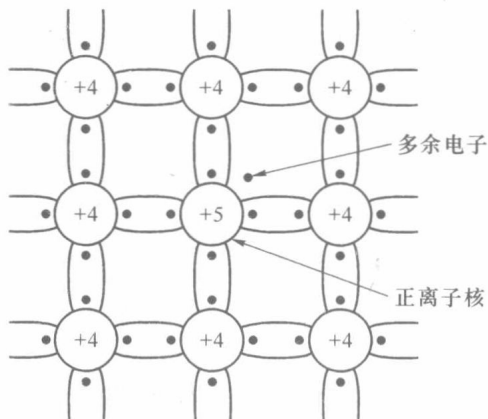


图 1.4 N型半导体的共价键结构

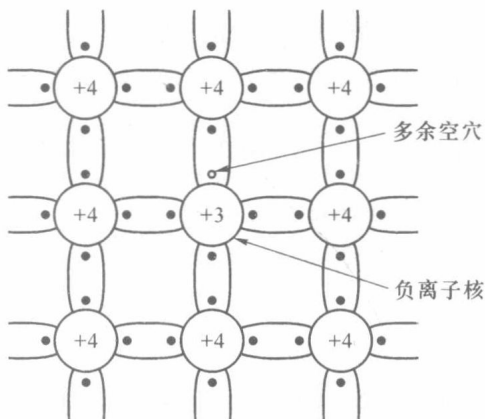


图 1.5 P型半导体的共价键结构

在P型半导体中,空穴为多子,自由电子为少子。P型半导体主要靠空穴导电。

1.1.3 PN 结及其单向导电性

1. PN 结的形成

将一块半导体的两侧分别制成 P 型半导体和 N 型半导体,由于 P 型半导体中和 N 型半导体中的载流子存在浓度的差别,会发生扩散现象。P 型区中的多子(空穴)将越过交界面向 N 型区扩散,留下不能移动的负离子;而 N 型区中的多子(自由电子)会向 P 型区扩散,留下不能移动的正离子。多数载流子的这种因浓度上的差异而形成的运动称为扩散运动,如图 1.6 所示。

原本 P 型区和 N 型区均呈现电中性,由于自由电子和空穴的扩散运动,使得 P 型区和 N 型区原来的电中性被破坏,在交界面的两侧分别形成不能移动的、带异性电荷的离子层,称为空间电荷区,这就是通常所说的 PN 结。

在 PN 结中,多数载流子扩散到对面发生复合而耗尽。因此空间电荷区又称为耗尽层,如图 1.7 所示。

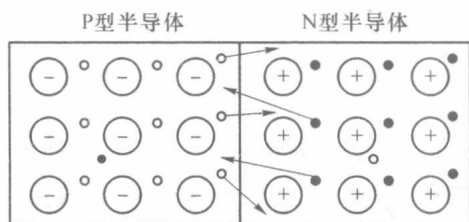


图 1.6 交界处载流子扩散示意

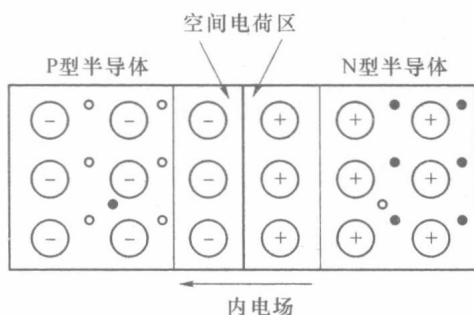


图 1.7 PN 结的形成

空间电荷区的 N 侧带正电,P 侧带负电,会产生一个从 N 型区指向 P 型区的内电场。显然,内电场的方向会对多数载流子的扩散运动起阻碍作用。与此同时,内电场可推动少数载流子(P 型区的自由电子和 N 型区的空穴)越过空间电荷区,形成漂移运动。

漂移运动与扩散运动的方向相反,在无外加电场时会形成动态平衡,此时扩散电流等于漂移电流,PN 结的宽度保持不变,处于稳定状态。



请思考:稳定状态下的 PN 结呈现电中性吗?

2. PN 结的单向导电性

在 PN 结两端加上不同极性的电压,它会呈现出不同的导电性能,这是 PN 结最重要的特性之一。

(1) PN 结外加正向电压

PN 结外加正向电压(P 端接高电位,N 端接低电位),称为 PN 结正向偏置,简称正偏,如图 1.8 所示。外加电压在 PN 结上形成的外电场方向与内电场方向相反,驱使 P 型区的空穴和 N 型区的自由电子分别由两侧进入空间电荷区,打破了 PN 结原来的平衡状态,从而使空间电荷区变窄,内电场被削弱,有利于扩散运动不断进行。这样,多数载流子的扩散运动大为

增强,从而形成较大的扩散电流。外部电源不断向半导体提供电荷,使电流得以维持,这时PN结所处的状态称为正向导通。



请思考:如果外电场小于内电场,PN结能正向导通吗?

(2) PN结外加反向电压

PN结外加反向电压(P端接低电位,N端接高电位),称为PN结反向偏置,简称反偏,如图1.9所示。此时内外电场方向相同,抑制扩散运动,使空间电荷区变得更宽。同时少数载流子的漂移运动却被加强,形成了反向的漂移电流。由于少数载流子的数目很少,故形成的反向电流也很小。PN结这时所处的状态称为反向截止。少数载流子由本征激发产生,温度越高,其数量越多,所以温度对反向电流的影响很大。



请思考:反向电压能否无限加大?

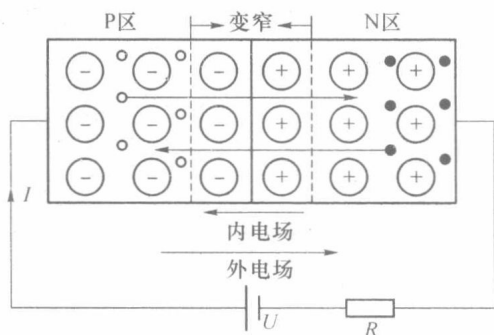


图 1.8 PN结外加正向电压

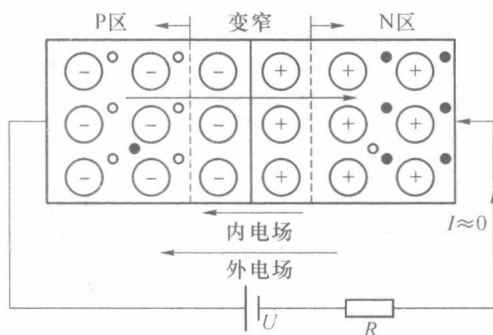


图 1.9 PN结外加反向电压

3. 结论

(1) PN结外加正向电压时处于导通状态,外加反向电压时处于截止状态,称为PN结的单向导电性。

(2) PN结正偏时通过的正向导通电流较大,反偏时通过的反向截止电流很小。

1.1.4 实验项目一:实训室常用电子仪器的操作与使用

1. 实验目的

- (1) 了解示波器与信号发生器的主要技术指标、性能及其使用方法;
- (2) 掌握用示波器观察测量波形的幅值、频率的基本方法;
- (3) 掌握仪器共地的概念、意义和接法。

2. 实验设备

- (1) 数字双踪示波器;
- (2) 数字万用表;
- (3) 信号发生器。

3. 预习要求

- (1) 示波器的工作原理;
- (2) 万用表的操作和使用方法。

4. 实验内容及步骤

(1) 模拟电子电路中常用电子仪器布局

模拟电子电路中常用电子仪器布局,如图 1.10 所示。

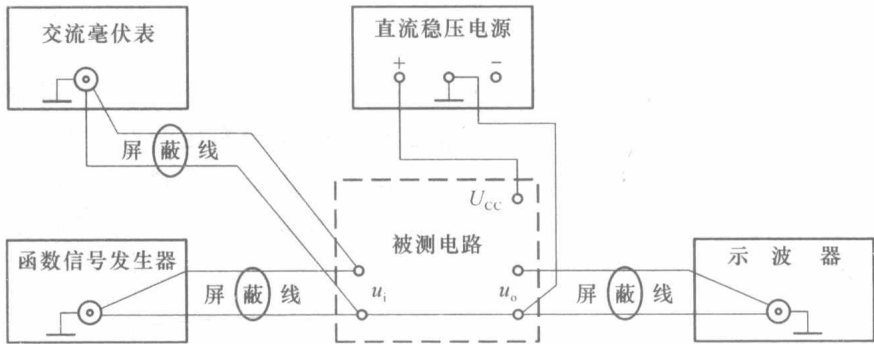


图 1.10 模拟电子电路中常用电子仪器布局图

(2) 用示波器机内校正信号对示波器进行自检

- ① 扫描基线调节。
- ② 测量校正信号的峰峰值 U_{PP} 和频率 f , 把它们与标准值作比较, 记入表 1.1。

表 1.1 校正信号数据记录

校正信号参数	标准值	实测值
峰峰值 U_{PP}/V		
频率 f/kHz		

(3) 用示波器测量信号源参数

① 用示波器测量信号幅值。

调节信号发生器, 送出一个频率为 1 kHz(可直接输入或通过旋钮调节)、幅值为 1 V(调节幅值旋钮)的正弦信号, 通过信号线连接到示波器的输入端, 用示波器测量该信号的峰峰值 U_{PP} , 记入表 1.2。

② 用示波器测试正弦信号的周期。

调节信号发生器, 送出一个频率为 1 kHz(可直接输入或通过旋钮调节)、幅值为 1 V(调节幅值旋钮)的正弦信号, 通过信号线连接到示波器的输入端, 用示波器测出该正弦波的周期 T 、频率 f , 记入表 1.2。

表 1.2 用示波器测量信号源参数记录

信号频率	示波器测量值			
	幅值/V	峰峰值/V	周期/ms	频率/Hz
100 Hz	1			
1 kHz				
100 kHz				

(4) 用示波器测试直流电压。

调节直流电源(实验箱上的直流稳压电源实物图,如图 1.11 所示)以输出一个+10 V 的直流电压(由数字万用表直流电压挡读出)。用双踪示波器测试该电压。

① 按示波器输入耦合于“GND”,显示出一条扫描线,此为 0 V 参考电位。

② 将输入耦合“GND”切换到“DC”,显示出一条上移扫描线,此为直流电平线。

③ 通过计算或用光标读出两线间的电压。

5. 实验报告要求

(1) 整理实验数据,求出误差、分析误差产生原因,按要求完成实验报告,如表 1.3 所示。

(2) 思考题:信号源输出的信号参数能不能用数字万用表测量?为什么?

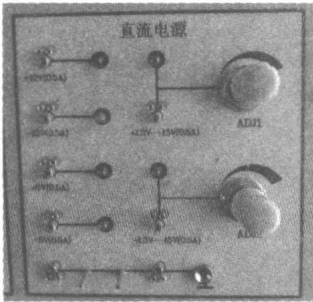


图 1.11 实验箱上的直流稳压电源实物图

表 1.3 模拟电子技术实验报告一:实训室常用电子仪器操作与使用

实验地点				时间		实验成绩	
班级		姓名		学号		组员姓名	
实验目的							
实验设备							
实验内容		1. 画出示波器自检波形,并将测试的数据填入下表中。					
		示波器机内信号		标准值		实测值	
		幅度 U_{PP}/V					
		频率 f/kHz					

实验内容	2. 画出测量信号源的波形图,并将测试的数据填入下表中。				
	信号频率	示波器测量值			
		幅值/V	峰峰值/V	周期/ms	频率/Hz
	100 Hz	1			
	1 kHz				
	100 kHz				
实验过程中遇到的问题 及解决方法					
实验体会与总结					
思考题					
指导教师评语					

◆ 1.2 半导体二极管 ◆

1.2.1 二极管的结构及符号

将一个 PN 结外加管壳和引线封装起来,制成半导体二极管(以下简称二极管),由 P 端引出的电极是正极,由 N 端引出的电极是负极。二极管和 PN 结一样,都具有单向导电性。