

— 高职高专电气系列教材 —

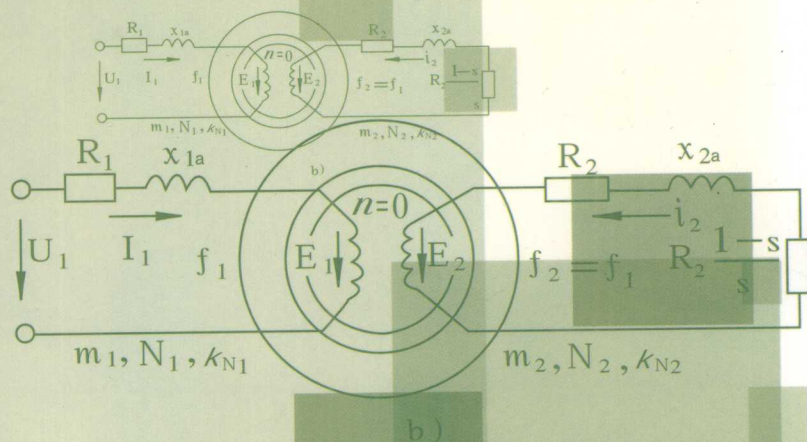
GAOZHI GAOZHUAN DIANQI XILIE JIAOCAI

模拟电子技术

MoNi DianZi JiShu

■ 主 编 冯守汉

■ 副主编 唐敬权



重庆大学出版社

模拟电子技术

主 编 冯守汉

副主编 唐敬权

重庆大学出版社

内 容 提 要

本书是根据高职院校电子通信类、电气类和相近的电类专业开设的《模拟电子技术》课程的教学要求编写的,共有7章:半导体二极管及整流电路、半导体三极管及放大电路、反馈与运算放大电路、波形发生器、模拟集成电子电路及应用、场效应管及应用、晶闸管及应用。

根据高职院校电类专业培养目标对“模拟电子技术”课程的实际要求,本书对模拟电子技术的内容进行了合理整合:一是从工程应用出发,理论够用为度,实用为上的原则,删除纯理论计算的内容;二是尽可能引入电子技术领域中的新技术、新器件及新成果,教材内容与时俱进;三是分析方法以识图为主线,以掌握定性分析方法为主要目标,力求授人以渔。

本书参考学时为65~80学时。有些章节内容,各校可根据实际情况进行调整。

本书适合普通高职、普通专科学校、成人高校作为电子技术教材,也可供从事电子技术的工程技术人员及本科院校的学生参阅。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/冯守汉主编. —重庆:重庆大学出版社,2004.5

(高职高专电气类系列教材)

ISBN 7-5624-3115-9

I. 模... II. 冯... 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(2004)第034706号

模拟电子技术

主 编 冯守汉

副主编 唐敬权

责任编辑:彭宁 杨琨 版式设计:彭宁

责任校对:廖应碧 责任印制:张立全

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鸽盛

社址:重庆市沙坪坝正街174号重庆大学(A区)内

邮编:400030

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn (市场营销部)

全国新华书店经销

重庆华林天美彩色报刊印务有限公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:10.25 字数:256千

2004年6月第1版 2004年6月第1次印刷

印数:1—5000

ISBN 7-5624-3115-9/TN·85

定价:15.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有 翻印必究

前言

本次教材编写是在全国高职院校经过了多年的教学实践和经验总结的基础上,结合高等职业教育培养面向生产、技术和管理第一线的高级技术应用型人才的任务,充分发挥和应用各对口学校教学改革成果的前提下完成的。本书主要由具有近 30 年教学和工程实践经验的教师主笔,编写过程中充分兼顾“模拟电子技术”课程的特点,即电子技术既有基础性,要为后续专业课程服务,又具有很强的专业性和应用性。为此,本书大胆突破了传统的编写模式和表述方法,具有鲜明的时代特点及高职特色:

(1)对内容进行合理整合,删除纯理论推导和繁琐的计算,增加实用而有效的工程分析方法和现场测算方法,体现了“理论够用为度”和内容更新与时俱进的特点,篇幅大为减小,体现少而精的原则。

(2)对章节进行符合逻辑过程的整合,使前后章节内容衔接紧密,知识逐步深入,思路清晰,条理性强,方便组织教学,适合自学。

(3)编写思路坚持先定性后定量。识图是电子技术的基础和核心,本书重点介绍各种单元电路的电路结构及实用有效的分析方法,再辅之以工程测算方法,赋予学习者以渔的效果。

(4)本书重要章节后附有精简实用的“知识要点”,读者在课后根据“知识要点”去复习和应用,既实用又方便,有提纲挈领之作用。

(5)本书所列实例大多都出自工程应用,习题也贯彻以“应用”为主旨,做到理论联系实际。

本书第 1 章由冯道宁执笔,第 2 章、第 3 章由冯守汉执笔,第 4 章由唐敬权执笔,第 5 章由胡琳和周洪源执笔,第 6 章由李翠英执笔,第 7 章由向俐霞执笔。全书由冯守汉统稿。

本书独具特色,受版权保护。由于编写时间较为仓促,书中疏漏和错误在所难免,恳请指正。

编 者
2004 年 3 月

目 录

第 1 章 半导体二极管及整流电路	1
1.1 PN 结	1
1.2 半导体二极管	4
本节知识要点	10
1.3 单相整流电路	10
本节知识要点	15
1.4 无源基本滤波电路	15
本节知识要点	19
1.5 整流滤波电路应用举例	19
习题 1	20
第 2 章 半导体三极管及其放大电路	22
2.1 半导体三极管	22
本节知识要点	33
2.2 三极管放大电路的基本组成及读图方法	33
本节知识要点	40
2.3 三极管放大电路的参数及估算方法	40
本节知识要点	49
2.4 放大器的非线性失真	49
本节知识要点	52
2.5 多级放大电路	52
2.6 放大电路的频率特性	55
本节知识要点	60
习题 2	60
第 3 章 反馈与集成运算放大器	66
3.1 集成运算放大器	66
本节知识要点	71
3.2 反馈电路	72
本节知识要点	79
3.3 集成运算放大器的应用	79
本节知识要点	89
习题 3	89

第4章 波形发生电路	92
4.1 波形发生电路的组成	92
4.2 正弦波振荡电路	93
4.3 石英晶体振荡电路	105
4.4 集成信号发生器	108
本节知识要点	110
习题4	110
第5章 模拟集成电子电路及应用	113
5.1 模拟集成电路的基本知识	113
5.2 功率放大器	114
5.3 集成功率放大器	119
本节知识要点	123
5.4 稳压电源	123
5.5 线性集成稳压电源	126
5.6 开关型稳压电源	129
习题5	129
第6章 场效应管及其应用	131
6.1 场效应管	131
6.2 场效应管放大电路	138
本节知识要点	140
习题6	141
第7章 晶闸管及其应用	142
7.1 晶闸管	142
本节知识要点	147
7.2 晶闸管应用电路	148
习题7	155
参考文献	157

第 1 章

半导体二极管及整流电路

1.1 PN 结

1.1.1 半导体的导电特性

硅和锗是制造半导体器件最常用的两种材料。它们的导电性能介于导体和绝缘体之间,所以称为半导体。半导体有两个特点:一是当温度升高或受光照时,会激发出少量自由电子,使其导电性能有所增加,同时在电子离开的位置上留下了一个带正电荷的空位,称之为空穴。因此,在半导体中既有带负电的自由电子参与导电,也有带正电的空穴参与导电,这是半导体的一个重要特征。二是人们可以通过掺入杂质的方法,精确地控制半导体的电学特性,使其导电性能显著提高。通常将物质内部运载电荷的粒子称为载流子,其数量的多少是决定物质导电能力的一个重要因素。在正常情况下,半导体通过热激发产生的导电载流子是很少的,称为少数载流子;而通过掺入杂质形成的导电载流子是大量的,称为多数载流子。

通常把掺入五价元素(如磷、砷、锑)而形成的以电子载流子为主体的半导体叫做 N 型半导体,而把掺入三价元素(如硼、镓、铟)而形成的以空穴载流子为主体的半导体称为 P 型半导体。不论是 P 型还是 N 型半导体均受到温升和光照的影响,因而在这两种掺杂半导体中都存在有少量与多数载流子不同的另一种载流子,即在 P 型半导体中既有掺杂形成的多数载流子空穴,又有热激发产生的少数载流子电子;同理,在 N 型半导体中多数载流子电子是掺杂的结果,而少数载流子空穴则是热激发产生的。温度升高时热激发使少数载流子的数量增加,少数载流子是干扰和破坏半导体器件正常工作的主要因素,对此必须有足够的认识和重视。

P 型半导体用图 1.1(a)表示。小圆圈表示掺入三价元素后产生的带正电荷的空穴,内有负号的大圆圈代表掺入杂质的原子,意思是当有外来电子中和掉空穴时,原先不带电的原子变成了带负电荷的负离子。N 型半导体用图 1.1(b)表示,图中小黑点表示掺入五价元素产生的电子,内有正号的大圆圈则指该电子跑掉后杂质原子带正电荷。

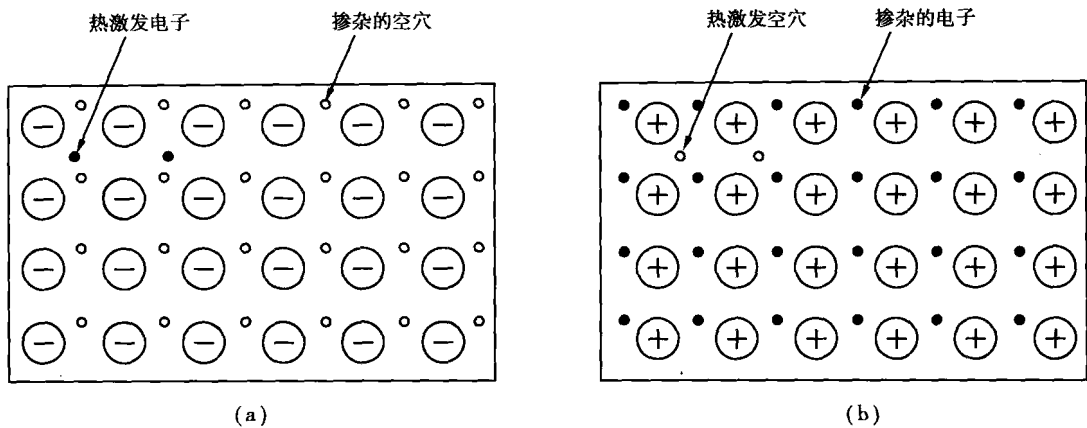


图 1.1 P 型半导体和 N 型半导体的载流子示意图

(a) P 型半导体 (b) N 型半导体

1.1.2 PN 结及其特性

如果在一块纯净半导体(也称本征半导体)上用掺杂工艺使其一边形成 P 型半导体,另一边形成 N 型半导体,则在这两部分的接触面上就会形成一个特殊的薄层,称为 PN 结。PN 结是构成晶体管、固体组件及可控硅等许多半导体器件的基础。

(1) PN 结的形成

图 1.2(a)所示是一块掺杂不同的半导体,把 P 型部分叫做 P 区,N 型部分叫做 N 区。在 P 区与 N 区的界面两边,载流子的性质和浓度都不同,交界处 P 区一侧空穴浓度大,而 N 区一侧电子流浓度大。在自然界中,物质由浓度大的地方向浓度小的地方运动称为扩散运动,如把黑墨水滴在一杯清水中,墨水就会慢慢扩散开来,在 PN 结中载流子的扩散运动也是如此。P 区的空穴向 N 区扩散,P 区留下些失去空穴的杂质原子,成为带负电荷的负离子;而 N 区的电子向 P 区扩散,在 N 区留下失去电子的杂质原子,成为带正电荷的正离子。由于离子质量较大不能移动,随着扩散的进行,在 P 区和 N 区的交界处两边,就形成了在 P 区一侧为负离子,在 N 区一侧为正离子的很狭窄的离子电荷区,称为 PN 结层,简称 PN 结。

一旦产生了 PN 结薄层,在 PN 结内部就建立了一个电场,电场方向由正离子指向负离子,如图 1.2(b)所示。PN 结内电场的建立,一方面,阻止扩散运动的进行,另一方面使少数载流子在电场作用下作定向运动,即空穴移向 P 区,电子移向 N 区,载流子在内电场作用下的定向运动称为漂移运动。显然,扩散运动和漂移运动是反方向的,是互相矛盾的两个运动,正是这两个矛盾运动的结果决定着 PN 结层的厚薄。当扩散与漂移运动达到动态平衡时,PN 结的厚度既不会增加也不会减少(约几 μm ~ 几十 μm)。

PN 结的形成过程可简明表述如下:开始多数载流子的扩散运动占主要矛盾,随着扩散的进行→离子电荷区形成→内电场建立→扩散运动↓→漂移运动↑→扩散运动与漂移运动达到动态平衡,PN 结厚度保持不变。

(2) PN 结的单向导电特性

PN 结形成后,在内部形成正、负离子区而存在一内电场,此内电场的大小以伏特衡量。实

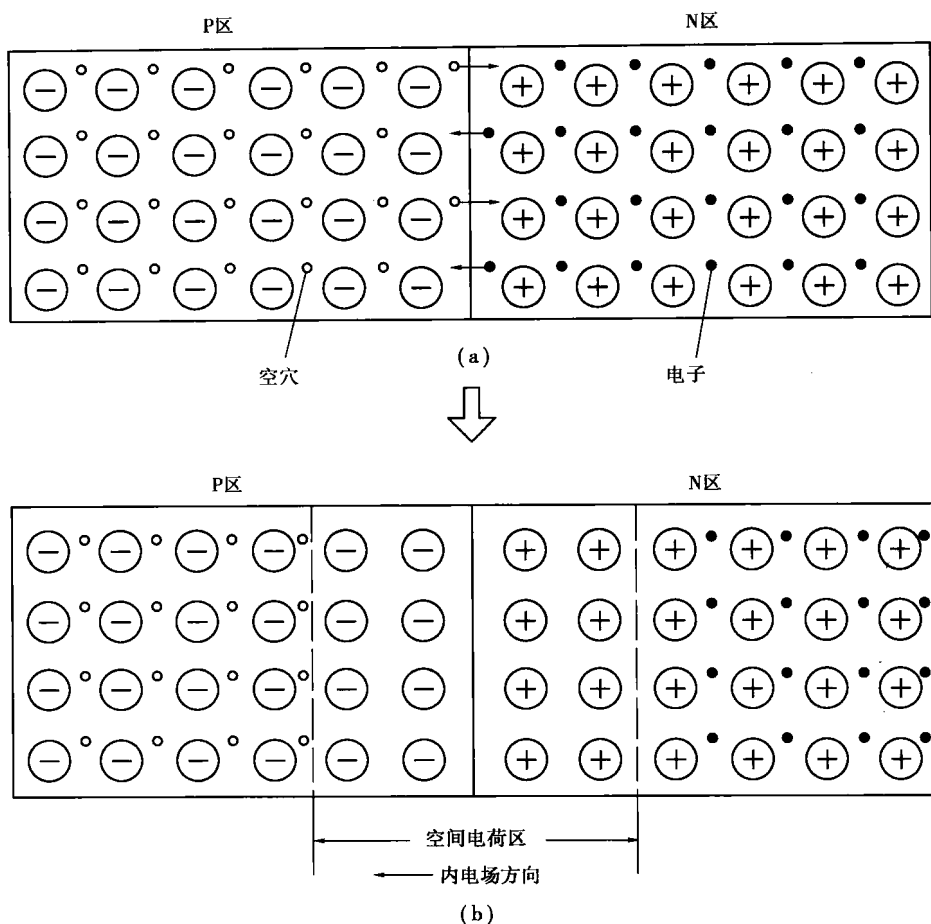


图 1.2 PN 结的形成过程

实验结果证明,用硅材料制成的 PN 结,其内电场强度约 0.5 V;用锗材料制成的 PN 结,其内电场强度约 0.1 V。

1) 加正向电压促使 PN 结转化为导通状态。在图 1.3(a)中,当 PN 结加上正向电压(即外部电压正极接 P 区,负极接 N 区)时,外电场与内电场方向相反,削弱了内电场。在外电场力的作用下,使 P 区的空穴和 N 区的电子(即多数载流子)分别从 PN 结两边进入结内,中和掉部分正、负离子,使离子形成的电荷区变窄,内电场强度变弱,破坏了原来扩散与漂移运动的动态平衡关系,扩散运动增强,多数载流子在外电场力的驱动下源源不断地通过 PN 结,形成了较大的扩散电流,同时电源还不断地向半导体提供空穴和电子,使电流得以维持,该电流称为正向电流。由此可见,PN 结加正向电压时便导通,呈现很小的电阻,好像导体,也像开关闭合状态。

2) 加反向电压促使 PN 结转化为截止状态。如图 1.3(b),给 PN 结加反向电压(即外部电压正极接 N 区,负极接 P 区)时,外电场与内电场方向一致。在外电场作用下,N 区内的部分电子被推向电源正端中和掉,而 P 区内的部分空穴被移向电源负极中和掉,结果使 PN 结原有的正、负离子层加宽,内电场增强。这也破坏了原有的扩散与漂移运动的动态平衡关系,使扩散运动更难进行,但少数载流子形成的漂移运动得到增强,形成了漂移电流,称为反向漏电流。

由于少数载流子数目有限,在正常情况下反向漏电流是很小的。

硅材料制成的 PN 结反向漏电流小于 $1\ \mu\text{A}$, 锗材料制成的 PN 结小于 $1\ \text{mA}$ 。值得注意的是,随着温度的升高,热激发运动加剧,少数载流子数目增加,反向漏电流也随之增大。可见,PN 结加反向电压时便截止,呈现出很大的电阻,好像绝缘体,也像开关断开状态。

由以上分析可以得出结论:PN 结具有单向导电性能,电流只能从 P 区流向 N 区。了解 PN 结的形成及特性非常重要,PN 结是组成二极管、三极管、晶闸管及集成电路的基本单元。

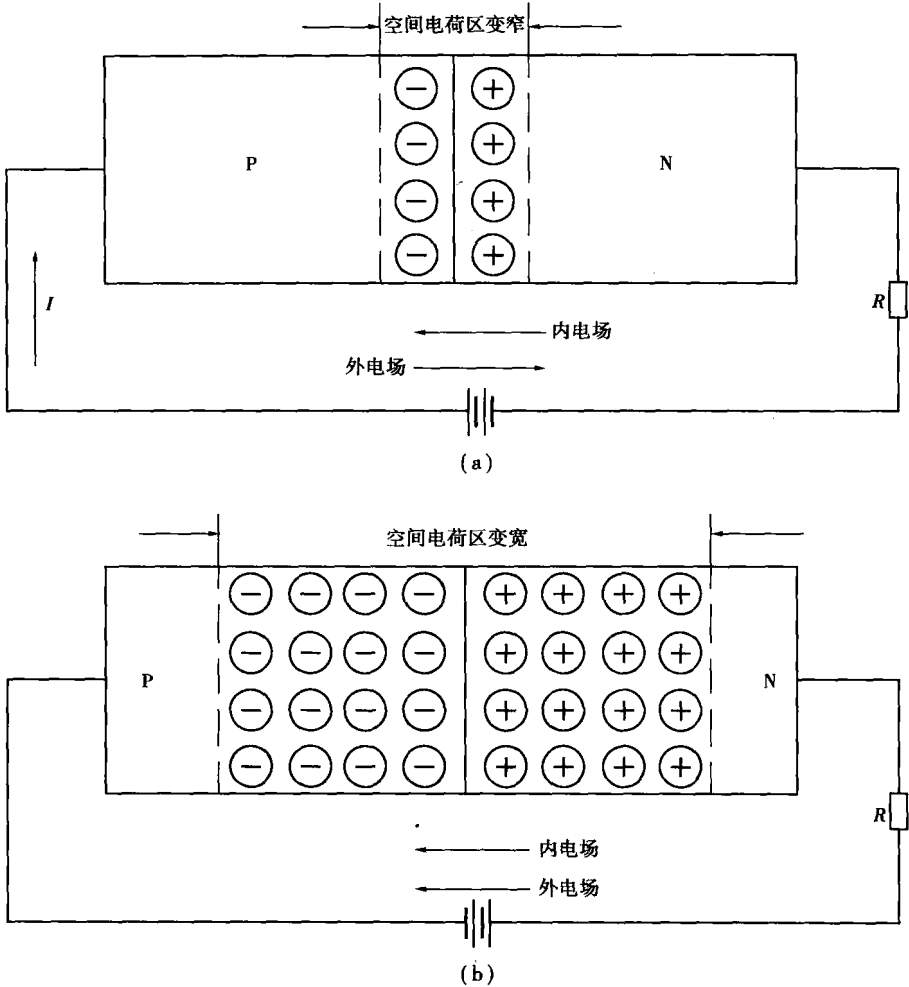


图 1.3 PN 结单向导电原理
(a)加正向电压导通 (b)加反向电压不导通

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管的结构、符号和型号

晶体二极管实际上就是一个 PN 结,加上两根电极引线再封上管壳制成。由 P 区引出的

电极为正极,由N区引出的电极为负极,其符号见图1.4(c),箭头所指方向为正向电流通过的方向。

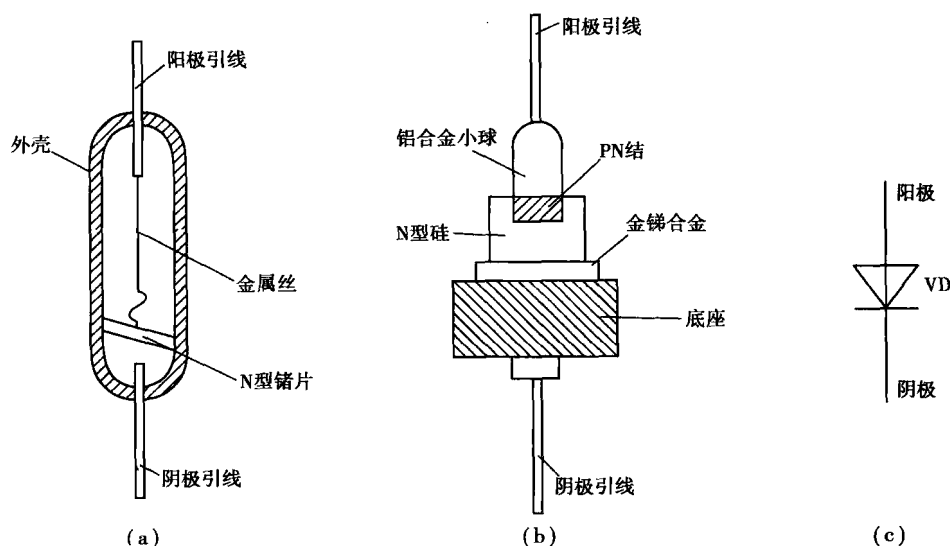


图1.4 二极管的结构和符号

二极管按内部结构的不同可分为点接触和面接触两种类型。点接触型二极管如图1.4(a)所示,其特点是PN结面积很小,不能通过大电流,容量为几十mA以下的小功率管,但由于面积小,结电容小,高频特性好,常用在检波或脉冲电路里。面接触型二极管结构如图1.4(b)所示,其特点是PN结面积大,能通过较大的正向电流,容量从几百mA到几百A,适于作整流用。

1.2.2 二极管的伏安特性

二极管既然是由PN结制成的,它的特性就是PN结的特性,即具有单向导电性。但仅仅知道二极管只允许电流单方向通过是不够的,还必须进一步了解在二极管两端所加电压和流过二极管的电流之间的关系,即伏安特性,才能正确地使用它。

图1.5是较典型的锗和硅二极管的两条伏安特性曲线,曲线可分为三部分来说明。

(1) 正向特性

当外加正向电压较小时(一般小于PN结内电场强度),外电场不足以克服内电场对载流子扩散的阻力,此时二极管的正向电阻还很大,正向电流很小。如曲线上的OA和OB段。

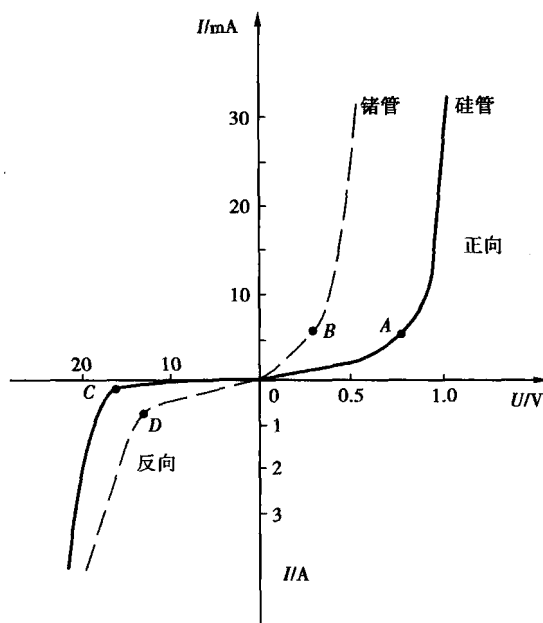


图1.5 二极管的伏安特性曲线

当外加正向电压超过某一值时(这个数值通常称为PN结的死区电压,它随管子的材料和温度不同稍有改变,硅管约0.5 V,锗管约0.1 V),内部电场被大大削弱,二极管的正向电阻变得很小,于是正向电流增长很快,如曲线上A、B以上的部分。特别要指出的是,一旦二极管正向导通之后,流过二极管的正向电流增加很快,而二极管两端的正向电压降(称管压降)却变化甚微,硅管维持在0.6~0.8 V之间,锗管维持在0.15~0.25 V之间,即其伏安特性呈非线性特征。

(2) 反向特性

当加反向电压后,外电场与PN结内电场方向相同,有利于少数载流子通过PN结,形成反向漏电流。

反向漏电流有两个特点:①当外加电压在一定范围时,反向漏电流基本不随电压变化而变化,这是因为正常情况下,少数载流子的数目是有限的,在一定温度下和每个单位时间内,只提供一定数量的载流子,只要外加电压所产生的电场足够把它们都吸引过来形成电流之后,则电压即使再高,也不能使载流子的数目增加,所以反向漏电流又称为反向饱和电流。反向漏电流大,说明管子的单向导电性能差。②随着温度升高反向漏电流还要增大许多倍。这是在实际应用中要关注的问题。

(3) 反向击穿电压

当反向电压增大并超过某一值时,内外电场叠加的结果形成很强大的电场力,能够把共价键中的电子强制拉出,使少数载流子的数量急剧增加,破坏了原子的结构,使反向漏电流突然猛增,这一现象称为反向击穿。对应于曲线上C点和D点的电压称为PN结的击穿电压。

1.2.3 二极管的主要参数

二极管的参数是人们选择和使用二极管的依据。参数是生产厂家根据伏安特性曲线和有关性能测试决定的。二极管的主要参数有:

(1) 最大整流电流 I_F

I_F 是指二极管长时间工作时,允许流过二极管的最大正向平均电流值。当电流流过二极管时,PN结会发热,若正向平均电流过大,PN结会因发热过高而烧毁损坏。所以使用二极管时,实际通过二极管的正向平均电流不允许超过最大整流电流 I_F 。

(2) 最高反向工作电压 U_{RM}

U_{RM} 指二极管在工作时,允许通过的最高反向电压峰值。为安全起见,一般 U_{RM} 值定为实际击穿电压值的一半。如某型号二极管实际测试的击穿电压为1 000 V,则 U_{RM} 为500 V。

(3) 反向漏电流 I_S

I_S 是指在规定的反向电压和环境温度下测得的流过二极管的电流。这个电流是由少数载流子形成的。 I_S 越大,管子的单向导电性越差。小功率硅管在1 μA 以下,而锗管比硅管要大几十倍至几百倍。

此外,二极管的参数还有最高工作频率、结电容、最高工作温度等,需要时可从晶体管手册中查阅。

1.2.4 二极管的检测

在实际使用二极管前对二极管的极性和好坏必须有正确的认识与判断,否则会造成电路不能正常工作,甚至会造成二极管及电路其他元件的损坏。

(1) 二极管正负极判断

二极管正、负极判断首先是看外壳上的极性标志。目前所用的标志有两种,一是在管壳上直接标出二极管符号,二是在管壳一端标注色环或色点。标注有色环或色点的一端是二极管的负极,另一端是正极。

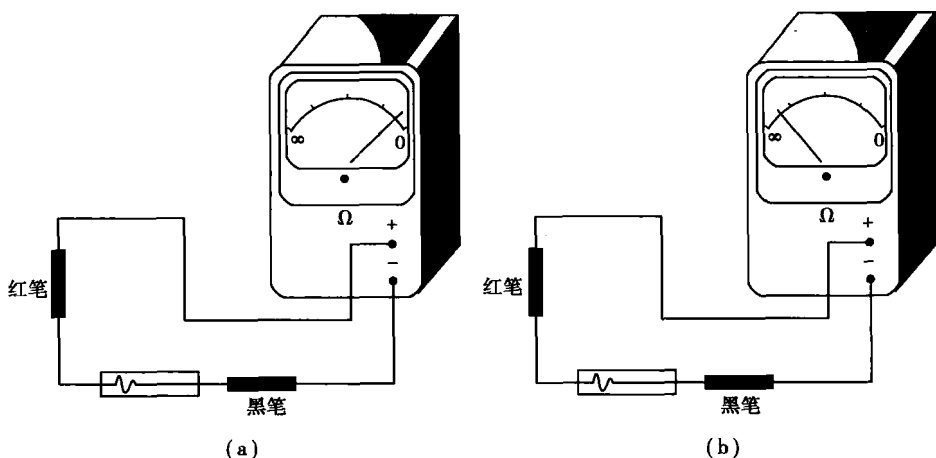


图 1.6 万用表检测二极管示意图

其次,借助万用表测量电阻的方法,也可以找出二极管管脚的极性。测量时将万用表拨到欧姆挡“ $\times 100$ ”(锗管)或“ $\times 1k$ ”(硅管)挡。万用表拨到欧姆挡,表内接有电池,要注意电池的正极是接于表壳上标有“-”的接线端钮,此端钮接黑色表笔;电池负极接表壳上“+”端钮,该端钮接红色表笔。如图 1.6(a)所接时,二极管测得的电阻值小,然后再将二极管的两个电极反接表笔,如图 1.6(b)所示,测得电阻很大(硅管约几百 $k\Omega$ 以上,锗管约几十 $k\Omega$ 以上),可以肯定图 1.6(b)中黑表笔所接为二极管的负极,另一个端为正极。

(2) PN 结好坏的判断

如图 1.6 所示进行两次测量,若两次所测得的电阻值相差很大,说明 PN 结好;如果两次测得的电阻值均为零或很小,说明 PN 结已短路或被击穿;如果两次测得的电阻均为无限大,说明 PN 结内部开路或烧毁,均不能再使用。

1.2.5 特殊半导体二极管

(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半导体二极管,其特点是反向击穿特性曲线很陡,当反向电流有较大的变化 ΔI_Z 时,只引起微小的电压变化 ΔU_Z ;并且在一定条件下使用时,反向击穿后,当外加电压减小或消失,PN 结能自动恢复,不至于损坏。因此,利用稳压二极管反向击穿具有恒压的特性,可实现稳压作用。稳压管的伏安特性及符号如图 1.7 所示。稳

压管的正向特性与普通二极管相同。

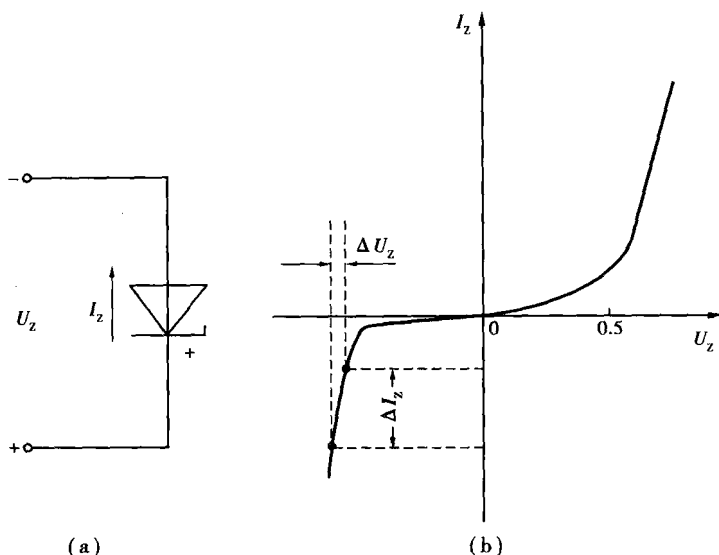


图 1.7 稳压二极管符号和特性

(a) 符号 (b) 典型稳压二极管的伏安特性

稳压二极管的主要参数有：

①稳定电压 U_z 它表示稳压管在规定的电流下工作时,其两端的电压值。由于制造工艺的分散性,同型号的不同管子也略有变化。

②稳定电流 I_z 稳压管在正常工作状态下的参考电流值。设计时要根据负载电流变化范围来考虑。

③动态电阻 R_z 指稳压管两端电压变化量与电流变化量之比值。这个数值随工作电流不同而改变。 R_z 越小,表明稳压性能越好。

④最大允许耗散功率 P_{ZM} 它表示稳定电压 U_z 和允许最大电流 I_{ZM} 之乘积。

稳压管使用时必须串入一个限流电阻,以限制流经稳压管的电流在稳压范围内。常用稳压电路如图 1.8 所示。

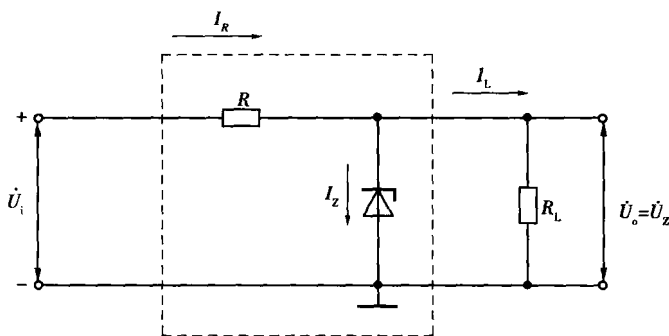


图 1.8 稳压电路

(2) 光电二极管

光电二极管又称光敏二极管,和稳压二极管一样,其PN结也是工作在反偏状态,特点是:反向电流的大小随光照强度的变化而变化。

用 E 表示光照强度, lx 表示照度单位,实验证明,光电二极管的反向电流与光照度成正比。光电二极管常用在光电转换控制器件或光的测量传感器中。其结构符号和特性曲线见图1.9。

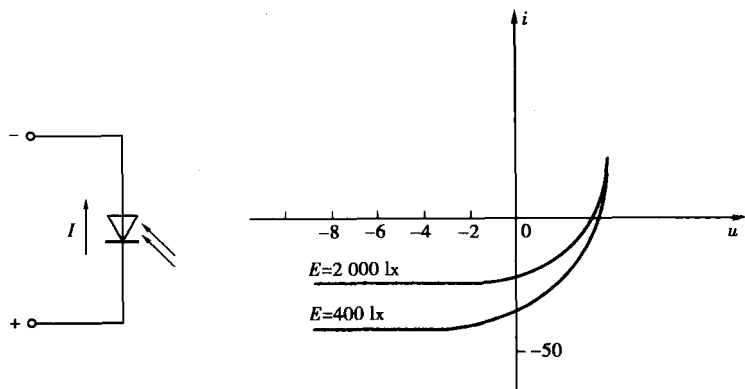


图 1.9 光电二极管的符号及特性

(3) 变容二极管

我们知道,当PN结加反向电压时,内电场把P区与N区隔开而绝缘,所以PN结加反向电压时客观上存在一个结电容。反偏电压越大,相当于绝缘层加宽,结电容越小,改变反偏电压大小可使结电容随之变化,如2CB14变容二极管,当反向电压在3~25V范围变化时,结电容在20~30pF范围变化。变容二极管常用在彩色电视机的高频头中作电视频道选择。其符号见图1.10所示。

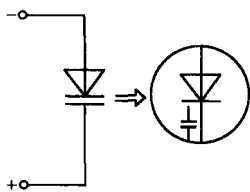


图 1.10 变容二极管的符号

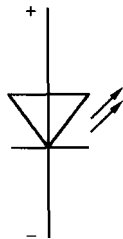


图 1.11 发光二极管的符号

(4) 发光二极管

发光二极管简称为LED。它通常用砷化镓或磷化镓等材料做成,其PN结工作在正向偏置状态。当正向电流通过发光二极管时,其内部的电子与空穴能直接复合释放出能量产生光子,使之发出一定颜色的光。材料不同发光颜色也不同,如砷化镓半导体发红光、磷化镓半导体发绿光。其符号见图1.11。

值得注意的是,当通过发光二极管的电流在10~30mA范围时,正向压降约为1.5~3V。

发光二极管是把电能转换成光能的元件,广泛应用在音响设备、数控装置、微机系统的显示器上。

本节知识要点

1. P 型半导体主要靠带正电的空穴导电, N 型半导体主要靠带负电的电子导电。
2. PN 结本质上是 P 型和 N 型两块半导体结合形成的内电场, 此电场又称死区电压, 硅材料约 0.5 V, 锗材料约 0.1 V。PN 结具有单向导电特性。
3. 半导体二极管由一个 PN 结组成, 正极引出脚与 P 区相连, 负极引出脚与 N 区相连, 二极管的导电特性与 PN 结相同。

1.3 单相整流电路

在现实生活和生产活动中, 许多设备需要有直流电源供电, 如收音机、音响、手机、电视机等家电产品, 因为这类产品中大量使用各种半导体元件及由它们组成的各种电路。一台电视接上 220 V 交流电能工作, 是因为机内有一电路能把交流电转变为直流电的缘故, 此电路最基本的部分称为整流电路。

利用半导体二极管的单向导电性可以组成半波整流、全波整流、桥式整流和倍压整流等多种整流电路。

1.3.1 单相半波整流电路

(1) 电路形成及工作原理

单相半波整流电路如图 1.12 所示。图中变压器 B 是降压变压器, 能把 220 V 市电变换成需要的电压, R_L 是代表用电的负载, 二极管 VD 是整流的关键元件。

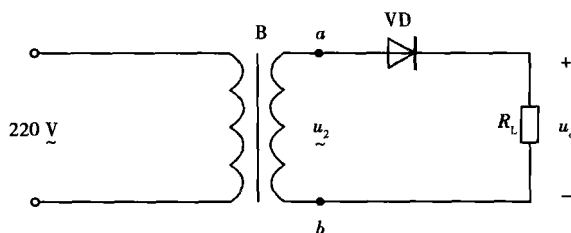


图 1.12 单相半波整流电路

设变压器副方电压为

$$u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t \quad (1.1)$$

式中, U_2 代表副方绕组电压有效值。

u_2 的波形如图 1.13(a) 所示为正弦交流电。

当 u_2 为正半周 ($0 \sim \pi$) 时, u_2 的 a 端为正 b 端为负, 二极管 VD 获正偏电压导通, 电流途径是: $a(+)\rightarrow \text{VD}\rightarrow R_L\rightarrow b(-)$, 负载上电压与 u_2 相同, 为上正下负, 见图 1.13(b)。

当 u_2 为负半周 ($\pi \sim 2\pi$) 时, 副方电压 u_2 变为 a 端为负 b 端为正, 二极管 VD 反偏截止, 回

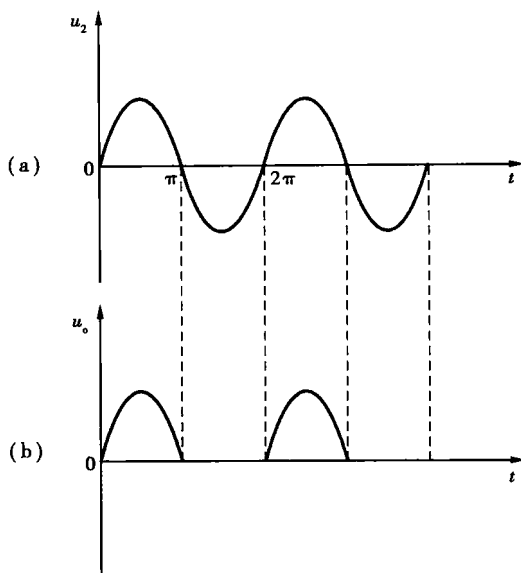


图 1.13 半波整流波形图

路电流为零, R_L 上电压为零。

交流电下一个周期, 电路重复上述工作过程, 因此, 负载 R_L 上只获一个方向的电压。可见, u_o 具备了直流电的基本特征(方向或极性不变)。但是, 其大小仍随 u_2 变化, 是脉动直流电, 还需要再加工处理才能应用。

如果 R_L 为纯电阻性负载, 则负载电流 I_L 的波形与 u_o 完全相同。

(2) 输出电压 U_o 与输入电压 U_2 的关系

一个周期内负载上只获得半个周期的工作电压, 因此, U_o 最多仅为 U_2 的 $\frac{1}{2}$, 考虑到管压降及变压器绕组的损耗等因素, U_o 约为 U_2 的 0.45 倍, 即

$$U_o = 0.45 U_2 \quad (1.2)$$

式(1.2)也可用定积分推导, 因为直流电是指一个周期内脉动电压的平均值, 即

$$U_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}}{2\pi} U_2 = 0.45 U_2$$

(3) 选择整流二极管的原则

只要知道二极管在电路中实际承受的最大电压及流过的最大电流值, 即可合理地选用二极管了。

在图 1.12 中, 负半周时 VD 不导通, 承受最大电压为 $\sqrt{2} U_2$, 而在正半周时, VD 两端电压仅为 0.6 ~ 0.7 V。

流过 VD 的电流与负载电流相同, 即

$$I_D = I_L = \frac{0.45 U_2}{R_L}$$

选择二极管可按下式选取

$$U_{RM} > \sqrt{2} U_2 \quad (1.3)$$