

电 工 学

DIANGONGXUE

下 册

大连工学院机制专业《电工学》编写组



人 民 教 育 出 版 社

内 容 提 要

本书论述了二极管、晶体管、场效应管、可控硅等半导体元件的性能以及由这些元件所组成的整流、放大、振荡和脉冲电路,最后还扼要介绍了机床的数字控制电路。可作为高等工科院校和工人大学机制专业的教学参考书,也可供有关技术人员参考。

高等学校教学参考书

电 工 学

下 册

大连工学院机制专业《电工学》编写组

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 14 字数 306,000

1978年12月第1版 1979年6月第1次印刷

印数 00,001—100,000

书号 15012·0107 定价 1.20 元

关于本书所用文字符号下标的说明

本书所用文字符号的下标,除国际通用者外,其余一律采用汉语拼音字母。为了便于区别起见,文字符号下标用两种字体排印:凡国际通用符号均排为斜体;凡汉语拼音字母则均排为小写正体。兹将本书所用汉语拼音字母下标的意义,按照书中出现的先后次序列表说明如下。已在上、中册中说明的在这里不重复。

下标符号	意义	汉语拼音	举 例	下标符号	意义	汉语拼音	举 例
w	稳定	wending	稳定电压 U_w	s	上升	shangsheng	上升时间 t_s
w	稳压	wenya	稳压电阻 R_w	j	下降	xiajiang	下降时间 t_j
sr	输入	shuru	输入电压 U_{sr}	k	宽度	kuandu	脉冲宽度 t_k
sc	输出	shuchu	输出电压 U_{sc}	cd	充电	chongdian	充电时间常数 τ_{cd}
x	下限	xiaxian	下限频率 f_x	fd	放电	fangdian	放电时间常数 τ_{fd}
s	上限	shangxian	上限频率 f_s	y	延迟	yanchi	延迟时间 t_y
f	反馈	fankui	反馈信号 x_f	z	主振	zhuzhen	主振脉冲 M_{nz}
t	调制	tiaozhi	调制电压 u_t	w	完了	wanle	时序脉冲完了信号 M_{nw}
k	控制	kongzhi	控制电压 U_k				

1
年
月
日
第
一
次
印
刷

目 录

引言	1
----	---

第一章 半导体二极管和整流电路

1-1 <i>N</i> 型半导体和 <i>P</i> 型半导体	2	1-5 滤波器	12
1-2 <i>PN</i> 结和它的单向导电性	4	1-6 三相整流电路	21
1-3 半导体二极管	6	1-7 硅稳压管稳压电路	24
1-4 单相整流电路	8		

第二章 半导体三极管

2-1 双极结型晶体管	29	2-3 金属-氧化物-半导体场效应晶体管	44
2-2 单极结型场效应晶体管	38		

第三章 放大电路

3-1 晶体管单管低频交流放大器	50	3-5 负反馈放大器	82
3-2 场效应管单管低频交流放大器	64	3-6 直流放大器	86
3-3 阻容耦合放大器	68	3-7 调制式直流放大器	90
3-4 功率放大器	70	3-8 放大器应用的实例	97

第四章 正弦波振荡器

4-1 <i>LC</i> 振荡器	106	4-2 <i>RC</i> 振荡器	112
-------------------	-----	-------------------	-----

第五章 可控硅及其应用

5-1 可控硅的结构、工作原理和特性	116	5-4 单结晶体管触发电路	126
5-2 单相可控整流电路	120	5-5 可控硅元件的选择和保护	130
*5-3 三相可控整流电路	122	5-6 可控硅的应用	133

第六章 脉冲电路

6-1 脉冲的波形	138	6-5 脉冲信号的控制——门电路	146
6-2 基本的半导体开关电路	139	6-6 半导体集成电路	151
6-3 脉冲的产生——多谐振荡器	140	6-7 脉冲信号的记忆——触发器	154
6-4 脉冲波形的变换	143		

第七章 机床的数字控制电路

7-1 数字控制的基本概念	160	7-4 数控装置的基本部件	170
7-2 数的表示法	163	7-5 插补原理	194
7-3 逻辑代数	167	7-6 数控装置的实例	202

附 录

1. 国产半导体器件型号命名法	208	4. 与非门集成电路主要参数	219
2. 常用半导体元件参数表	208	5. 步进电动机	219
3. 电阻器、电容器的标称系列值	218		

引 言

《电工学》下册所要讨论的是电子技术方面的一些问题。

电子技术是研究电子器件应用的科学。研究电荷在真空、稀薄气体和半导体中的运动规律及其应用的科学,它是在十九世纪末叶无线电发明之后才发展起来的。进入二十世纪,由于各种真空管(又叫电子管)的陆续问世,电子技术不仅引起了通信技术的根本变革,而且逐步推广到国民经济的各个部门,进行物理量的测量,数据的运算和处理,能量的转换和控制,从而推动测量技术、计算技术以及自动控制技术的迅速发展。因此,电子技术也就区分为应用在远距离通信上的无线电电子技术和应用在工业生产上的工业电子技术。

电子技术之所以能够在各个科学领域中占有十分重要的地位,乃是由于电子器件具有反应迅速、灵敏度高以及使用轻便等等特点的缘故。例如电子计算机每秒能进行上亿次的运算,电子温度调节器可以将温度的变化维持在千分之一度的范围以内。

到了二十世纪五十年代,又出现了半导体三极管(又称晶体管)这一新的电子器件。由于它的体积小、重量轻、功耗小、寿命长等一系列优点,逐步代替了大部分真空管,这是电子技术领域内的一次飞跃。因此人们往往把真空管称为第一代电子器件,而把晶体管称为第二代电子器件。

随着电子计算技术的广泛应用,宇宙飞行的迅速发展,对电子线路的微型化和可靠性提出的要求越来越高,以致原来由单个电阻、电容、半导体二极管和晶体管等分立式元件所组成的电路远远不能满足迅速发展的需要,于是出现了将元件和电路接线制作在一块固体上,代替了传统的分立式元件而组成一个不可分割的整体。这就是通常所说的集成电路,它被称为第三代电子器件。

但是人们并不满足于集成电路的已有成就,仍在不断地向着新的深度和广度进军,从电路的集成进一步发展到系统的集成,这就是今天的大规模集成电路。这种大规模集成电路称为第四代电子器件。

作为机制专业电工学课程的一个部分,我们将要讨论的是各种半导体电路的基本原理及其在机械制造工业上的一些应用。全部内容都将涉及到“管”和“路”两个方面:管就是半导体管,包括半导体二极管、三极管、稳压管、单结晶体管和可控硅等;路就是由半导体管和电阻、电感、电容等元件组成的整流、滤波、稳压、放大、振荡以及脉冲电路等。在学习时,对于管的问题,可着重研究它们的特性和使用时应注意的事项;对于路的问题,必须从物理概念出发来了解一些典型电路的功能和各个元件所起的作用,要学会看懂电路图的门径。

第一章 半导体二极管和整流电路

交流电由于在生产、输送和使用方面所具有的许多优点,现今发电厂所提供的电能几乎全是交流电。但是有许多工艺过程和电气设备,例如电镀、电研磨、电磁工作台以及直流电动机等等,只有在直流供电时才能正常工作。这样,在供电和用电之间就发生了矛盾。这一矛盾是通过整流来解决的。所谓整流,就是把交流电能转化成直流电能,起这种作用的设备叫做整流器。

整流器有各种类型,根据整流元件的不同,可分为电子管整流器、离子管整流器和半导体整流器等。半导体整流器由于具有结构简单、体积小、重量轻、寿命长、不需要加热灯丝等一系列优点,应用日趋广泛。本章将讨论几种常用的半导体二极管和整流、滤波电路,最后还要介绍一下简单的稳压电路。

1-1. N型半导体和P型半导体

在自然界里的所有物体,根据导电性能分为导体、绝缘体和半导体三大类。银、铜、铝、铁等金属,导电能力很强,属于导体;橡皮、塑料、云母、陶瓷等非金属,导电能力极差,称为绝缘体;半导体的导电性能则介于导体和绝缘体之间,目前应用最广的是锗、硅、硒等。

我们知道,金属导体中含有大量自由电子,又称载流子,因此它的导电能力很强;绝缘体则因缺少自由电子而导电能力极差。在半导体内部,情况又是怎样的呢?下面以硅为例加以说明。

硅的原子结构如图 1-1 所示,它的最外层有四个电子。通常,原子外层的电子叫做价电子,有几个价电子的就叫几价元素,所以硅是四价元素。

硅制成单晶体时,原子排列得非常整齐,彼此之间的距离都是相等的。这时,每个原子最外层的四个电子,不仅受自身原子核的束缚,而且还跟周围相邻的四个原子发生联系,每两个相邻的原子之间都共有一对电子,电子对中的任何一个电子,即围绕自身的原子核运动,也时常出现在相邻的原子所属的轨道上。这样的组合叫做共价键结构,如图 1-2(a)所示。

在硅单晶体的共价键中,共有电子并不象绝缘体里那样受着很紧的束缚,当它受到热或光的激励时,有少数电子可能摆脱共价键的束缚而成为自由电子,同时在原来的位置上就缺少了一个应有的电子而留下一个空穴,如图 1-2(b)所示。纯净的半导体中,有了一个自由

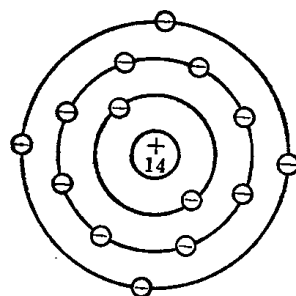


图 1-1 硅的原子结构平面示意图

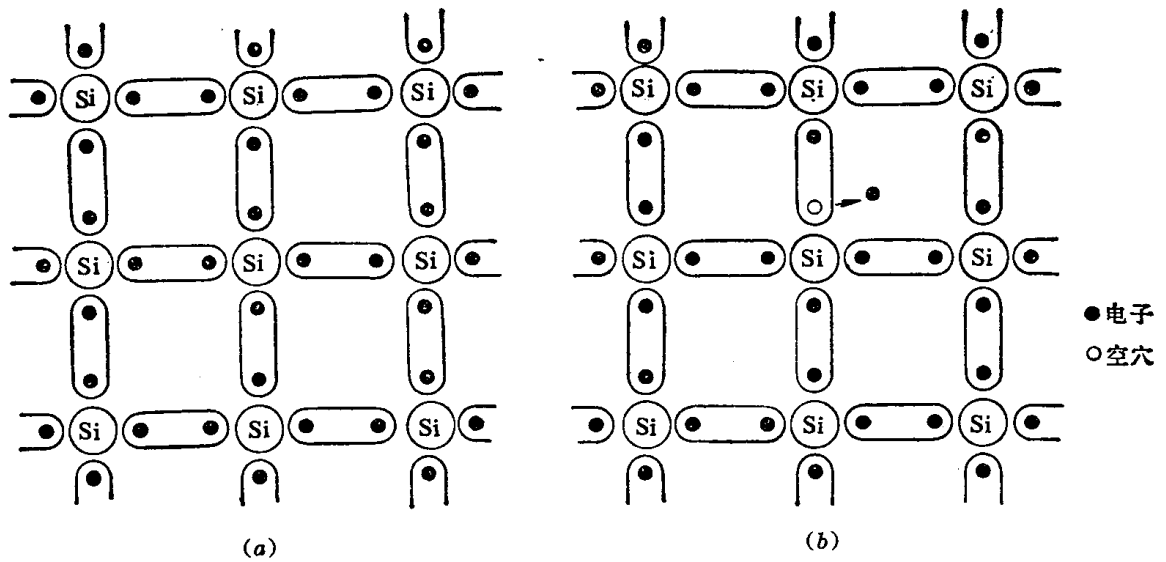


图 1-2 硅的晶体结构

电子，就必然有一个空穴，两者的数量是相等的。自由电子和空穴不断地产生，也不断地复合。

当有外界的电场作用时，半导体中的自由电子将沿着和电场相反的方向运动，同时在空穴邻近的电子，由于热运动脱离原来的原子而填充了这个空穴，但又在原处留下一个新的空穴。这样，空穴也在依次运动^①，它的方向则和电子的运动方向相反，如图 1-3 所示。因此，我们可以把空穴看作是和一个带有正电荷的粒子一样。半导体之所以能够导电，就是因为内部具有这两种载流子——电子和空穴的缘故。由于纯净的半导体中，电子和空穴的数量很少，因而它的导电能力远远不如导体。

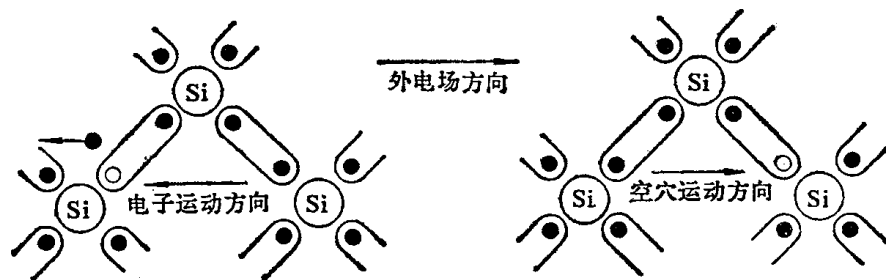


图 1-3 电子和空穴的运动方向

如果我们在纯净的半导体硅中掺入少量的杂质，如五价的元素磷(P)，[图 1-4(a)]，晶体中就会出现许多被排斥在共价键以外的自由电子。这些新出现的电子，数量远远超过原来未掺入杂质时的电子和空穴的数量，因此在全局载流子中，占压倒多数的是电子，而空穴的数量则很少。在这种半导体中，起支配地位的载流子是电子，导电作用主要由电子决定，

^① 为了理解空穴的运动情况，我们在这里作一个通俗的比喻：当大家在一起看节目时，如果前排座位上走了一个人而出现空位，后排的人递补空位向前坐，看起来就象空位在向后移动。当然，这种空位移动和没有座位的人到处走动是不一样的，后者好比是自由电子的运动，而有座位的人依次地递补空位则好比是空穴的运动。

所以称电子为多数载流子，而空穴则是少数载流子。这种类型的半导体叫做电子型半导体，简称N型半导体。

相反，如果在纯净的半导体硅中掺入三价元素硼(B)[图1-4(b)]，晶体中就会使一些共价键缺少电子而形成空穴。这些空穴的数量远远超过未掺杂时原有的电子和空穴的数量，因此在全部载流子中占压倒多数的是空穴，而电子的数量则很少。所以这种半导体对导电起支配地位的是空穴。空穴是多数载流子，电子是少数载流子。这种类型的半导体叫做空穴型半导体，简称P型半导体。

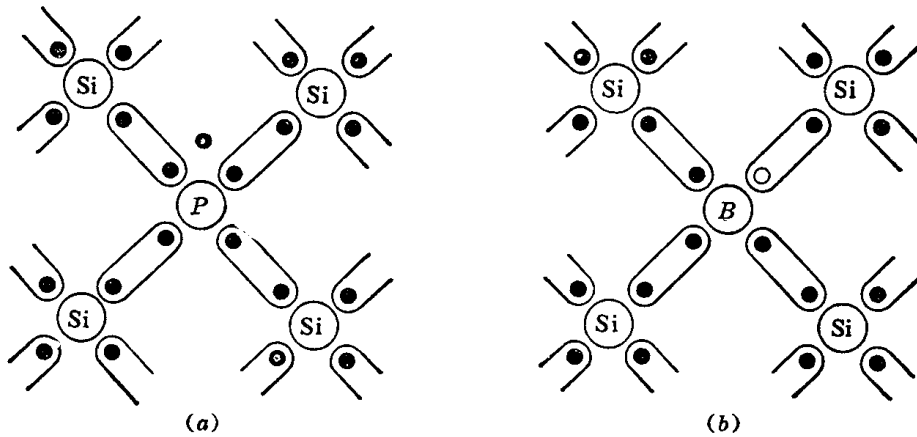


图1-4 杂质半导体的晶体结构

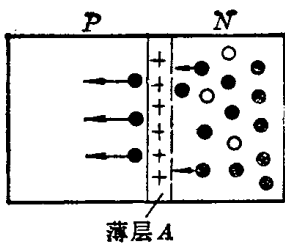
由此可见，由于纯净的晶体中掺入的杂质不同，两种类型半导体中的多数载流子和少数载流子也就有所不同。N型半导体和P型半导体中能够出现多数载流子是因为掺杂的结果，所以又叫做杂质半导体。杂质半导体有了多数载流子，因而它的导电能力要比纯净半导体强得多。

1-2. PN结和它的单向导电性

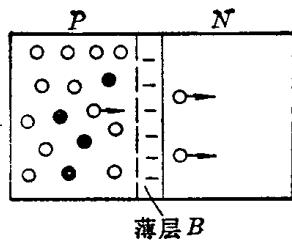
单纯的N型半导体和P型半导体是没有多大用处的。如果我们把一块N型半导体和一块P型半导体结合在一起，使之共处于同一晶体中，那么在两块半导体的交界处就会形成一个PN结。PN结是构成半导体二极管、三极管以及可控硅等半导体器件的基础。因此讨论PN结的形成和它的导电性能就显得十分必要了。

我们已经知道，N型半导体中有较多的电子，P型半导体中有较多的空穴。当两者结合在一起时，由于它们的载流子在浓度上的差异，N型半导体中的一部分电子将扩散到P型半导体中去，P型半导体中的一部分空穴也会扩散到N型半导体中去，结果在N型半导体中因失去电子而形成一个带正电的薄层A，而在P型半导体中因失去空穴而形成一个带负电的薄层B，如图1-5所示。

由于电子和空穴的扩散是同时进行的，所以带正电的薄层A与带负电的薄层B同时产生于N型和P型半导体交界面的两侧，因而在薄层A、B间产生一个电场，如图1-6所示。这



(a) 电子由N区扩散到P区



(b) 空穴由P区扩散到N区

图 1-5 载流子在半导体中的扩散

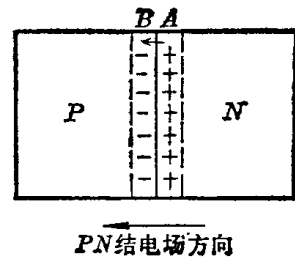


图 1-6 PN 结的电场

个电场的方向是由N型半导体指向P型半导体，它企图阻止多数载流子的继续扩散。所以薄层A和B称为阻挡层，也就是PN结。这样，电子和空穴的扩散力与PN结的电场力构成了一对矛盾。电子和空穴的扩散导致了PN结的产生，而PN结一经产生，就力图阻止扩散的继续进行。当扩散力大于电场力时，电子和空穴继续扩散，PN结的电场力也跟着增强；当扩散力与PN结的电场力相等时，电场力的作用完全抵消了扩散力的作用而达到平衡状态。这时薄层A、B上的正、负电荷量是相等的，其中可以自由移动的载流子都已经扩散完毕，因此薄层A和B又叫做耗尽区。如果N型半导体和P型半导体的掺杂浓度相等，薄层A和B的厚度也是相等的；如果两者的浓度不等，为了保持薄层A、B上的正、负电荷量相等，掺杂浓度较低的半导体一侧的薄层就要厚一些。换句话说，耗尽区向掺杂较少的半导体中延伸得多一些。

那么PN结究竟有什么特性呢？如图1-7所示，我们用一个由PN结构成的半导体二极管和一个灯泡以及零点在中间的电流表串联，然后接到直流电源上去。当开关K向左闭合时，电源的正极接到二极管的P型半导体上，电源的负极则经电流表与灯泡而跟N型半导体接通，这时灯泡发光，电流表上有较大的读数。若将开关K向右闭合，使二极管的P型半导体与电源的负极联接，而N型半导体则与电源的正极接通，这时灯泡就不发光，电流表在和以前相反的方向上有极其微小的读数。

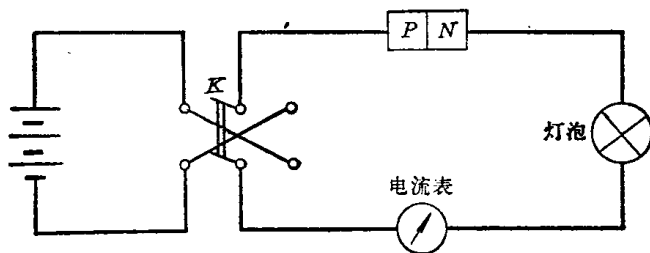


图 1-7 PN 结通电的实验

灯泡是否发光和电流的大小是人们看到的现象，问题的实质是PN结具有只让电流从一个方向流通的单向导电性，也就是说，PN结正反两个方向的导电能力是不一样的。

当PN结正向联接时，即P端接电源正极，N端接电源负极，这时外加电压在PN结中产生的电场方向是由P型半导体指向N型半导体，恰好与PN结形成的电场方向相反，如图1-8(a)。因此PN结中原来的电场减弱了，耗尽区的厚度变薄了。P型半导体中的空穴

和N型半导体中的电子就较容易地扩散到对方去。这就是正向联接时形成较大电流而使灯泡发光的原因。外加正向电压越大,PN结的电场削弱得越弱,所以电流更要增加。

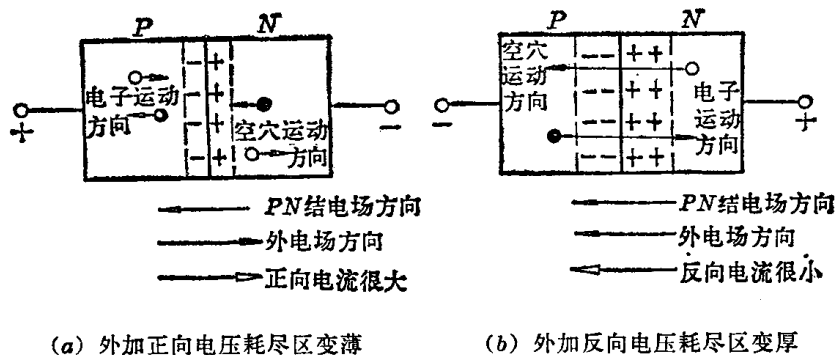


图 1-8 外加电场对 PN 结的影响

当PN结反向联接时,即N端接电源正极,P端接电源负极,这时外加电压在PN结中产生的电场方向是由N型半导体指向P型半导体,与PN结原有的电场方向一致,如图1-8(b)。因此PN结的电场增强,耗尽区加厚,N型半导体中的多数载流子——电子和P型半导体中的多数载流子——空穴很难通过PN结而扩散到对方去。不过这时P型半体中的少数载流子——电子和N型半导体中的少数载流子——空穴在反向电场作用下却通过PN结移到对方去,形成反向电流。但是由于少数载流子的数量很少,所以反向电流是很小的,灯泡因而也不能发光。

因此,我们可以把PN结看成是电路上的一个开关,接上正向电压时,开关接通,让电流通过,我们称之为PN结导通;接上反向电压时,开关断开,阻止电流通过,我们称之为PN结截止。这就是PN结的单向导电性。

1-3. 半导体二极管

(一) 构造

半导体二极管实际上就是在PN结的两端加上电极引线做成管心,并以管壳封装加固而成。常见的几种半导体二极管的外形如图1-9所示。

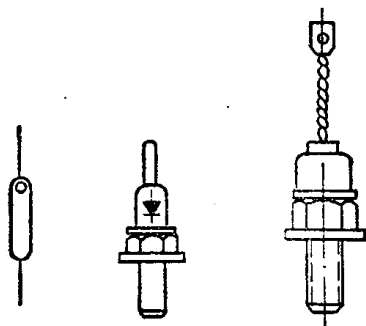


图 1-9 半导体二极管的外形

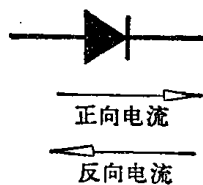


图 1-10 半导体二极管的符号

半导体二极管的两个电极分别称为阳极(又称正极,即P型半导体引出线)和阴极(又称负极,即N型半导体引出线)。由于它具有单向导电性,通常用如图1-10所示的符号表示,箭头表示电流的方向。

按结构(P型和N型半导体的接触方式)的不同,半导体二极管可分为点接触式和面结合式两种,如图1-11所示。点接触式的接触点小,只能通过较小的电流;面结合式的接触面大,可以通过较大的电流。

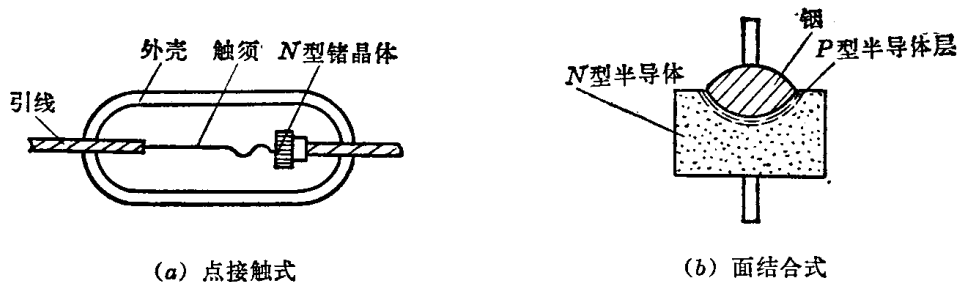


图 1-11 二极管的构造

根据所使用的半导体材料的不同,又分为锗二极管和硅二极管两种。目前大容量的整流元件,一般都采用硅材料。

(二) 伏安特性

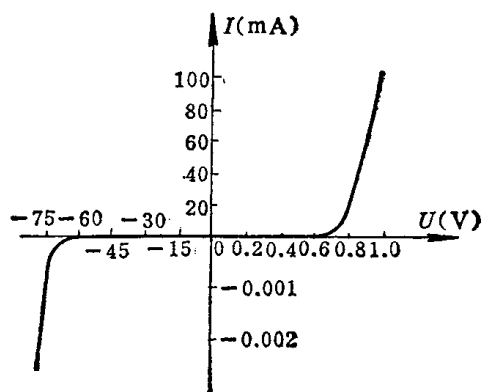


图 1-12 2CP14 的伏安特性曲线

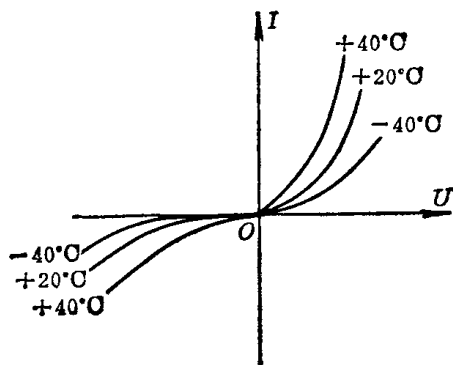


图 1-13 温度对二极管特性的影响

在生产实践中,常常用伏安特性曲线来表示二极管的性能。所谓伏安特性曲线就是指加在二极管两端的电压和流过二极管的电流之间的关系曲线。

图1-12就是根据测量结果而描绘出来的硅二极管2CP14的伏安特性曲线。从伏安特性曲线可知:

(1) 二极管接正向电压时,电流很容易通过,这时二极管导通。若电压稍有增加,电流增加很大,也就是说它的正向电阻很小,管压降很小。在实用中,希望正向压降越小越好。

(2) 二极管接反向电压时,电流基本上不能通过,也就是二极管截止,这时只有很小的反向电流。当反向电压增加时,反向电流变化很小,也就是反向电阻很大。在实用中,希望

反向电流愈小愈好。但是当反向电压增加到一定数值时,反向电流突然剧增,二极管的单向导电性遭到破坏,这叫做二极管的反向击穿。这时所加的电压叫做反向击穿电压。正常使用时是不允许出现这种情况的。不同的二极管,反向击穿电压的数值也不一样。

对于用不同半导体材料、不同结构和不同工艺制成的二极管,它们的伏安特性是不一样的,正向电流随正向电压上升的速度有时差别较大,反向电流的差别更大,但是伏安特性曲线的形状基本相似。

就目前常用的锗二极管和硅二极管来说,锗二极管正向电流上升很快,正向压降要比硅二极管小,但锗二极管的反向电流要比硅二极管大几十倍甚至几百倍。

半导体二极管的特性受温度的影响很大,当温度升高时,正、反向电流都随着增大,而反向击穿电压则要下降。图 1-13 表明温度对二极管伏安特性的影响。硅二极管 PN 结允许的工作温度可达 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$,锗二极管只能在 100°C 以下的范围内使用。这就是说,在同样的 PN 结的面积条件下,硅管允许通过的电流比锗管大。这是硅管的优点之一。因此大功率二极管几乎都是用硅制造。

(三) 额定参数

在使用二极管时,不能超过二极管参数的额定值,否则就会损坏二极管。二极管常用的额定参数有两个:

(1) 额定工作电流 I_F ——是指长期运行时允许通过的最大正向平均电流。因为电流通过要发热,发热量超过限度就会把 PN 结烧坏。对于大功率的半导体二极管,为了降低它的温度,提高其额定电流,通常在电极上加装散热片。散热片的尺寸都有规定。在使用二极管时,工作电流不能超过它的额定工作电流。

(2) 最高反向工作电压 U_{PR} ——保证半导体二极管的单向导电性所允许施加的最大反向电压,通常比二极管的反向击穿电压要低一些。在使用时,加在二极管的反向电压不能超过这个额定值,以免管子反向击穿而损坏。

除了这两个额定参数外,还有使用工作温度、最高工作频率等参数,在半导体器件的手册里均可查到。附录 2 中列举了一些常用的二极管的参数。

1-4. 单相整流电路

正象前面已经提到的那样,为了满足某些工艺过程和电气设备对直流电的要求,我们可以利用半导体二极管的单向导电性,把交流电能转化成直流电能。下面即将分别讨论几种常用的、比较典型的单相整流电路。

(一) 单相半波整流电路

单相半波整流电路如图 1-14 所示,其中 B 为变压器,由它把电源电压 u_1 变成适合负载要求的交流电压 u_2 ; D 为整流元件(半导体二极管); R_{Lz} 为需要直流的负载。

这个电路之所以能够把交流电变成直流电,关键在于整流元件 D 的单向导电性,即正向

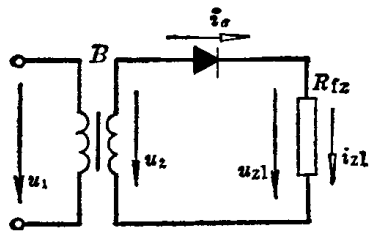


图 1-14 单相半波整流电路

联接时, D 导通, 反向联接时, D 截止。假定变压器副绕组的电压 u_2 随时间作正弦变化[图 1-15(a)], 即

$$u_2 = \sqrt{2} U_2 \sin \omega t \quad (1-1)$$

式中 U_2 为变压器副边电压的有效值。

在 $0 \leq \omega t \leq \pi$ 的正半周时, 变压器副绕组使整流元件 D 承受正向电压而导通, 电流经整流元件 D 流过负载 R_{fz} 。如果略去整流元件上的电压降不计, 流经负载的电流

$$i_{zL} = \frac{u_2}{R_{fz}} = \frac{\sqrt{2} U_2 \sin \omega t}{R_{fz}} \quad (1-2)$$

它的幅值

$$I_{zLm} = \frac{\sqrt{2} U_2}{R_{fz}} \quad (1-3)$$

在 $\pi \leq \omega t \leq 2\pi$ 的负半周时, 整流元件 D 承受反向电压而截止, 负载上没有电流。因此, 尽管变压器的电压是交变的, 由于整流元件的单向导电性, 在负载上得到了方向不变而大小还随时间作周期性变化的电流, 如图 1-15(b) 所示。这样的电流我们把它叫做半波脉动电流, 它在整个周期内的平均值

$$I_{zL} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} i_{zL} d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_{zLm} \sin \omega t d(\omega t) = \frac{I_{zLm}}{\pi} \quad (1-4)$$

作用在负载上的电压, 也就是直流输出电压, 如图 1-15(c) 所示, 它的平均值

$$U_{zL} = I_{zL} R_{fz} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0.45 U_2 \quad (1-5)$$

这就是说, 在单相半波整流电路中, 整流元件内阻压降略去不计时, 直流输出电压的平均值是变压器副边电压有效值的 0.45 倍。

在单相半波整流电路中, 整流元件是和负载串联的, 通过整流元件的电流和负载电流是一样的, 其平均值

$$I_a = I_{zL} \quad (1-6)$$

在使用整流元件时, 反向电压过大, 会使整流元件反向击穿, 所以必须考虑其所承受的最大反向电压。从图 1-15(d) 中可知, 在负半周时, 整流元件所承受的最大反向电压

$$U_{fmax} = \sqrt{2} U_2 \quad (1-7)$$

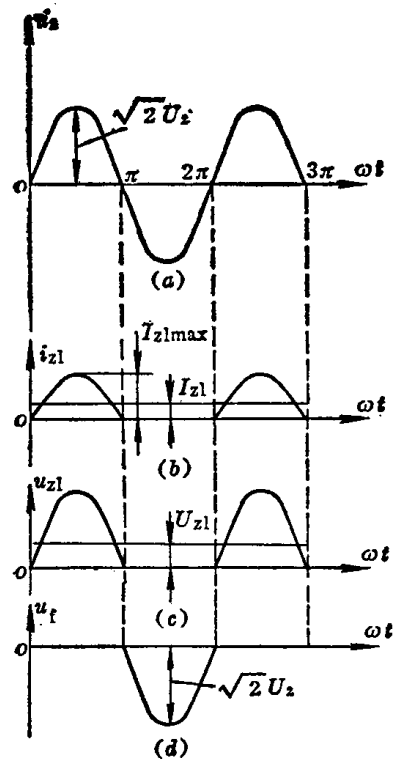


图 1-15 单相半波整流的波形图

由此可见,在单相半波整流电路中所用的整流元件,必须是

$$\left. \begin{aligned} \text{额定工作电流 } I_F &\geq I_{z1} = \frac{0.45 U_2}{R_{fz}} \\ \text{最高反向工作电压 } U_{PR} &\geq U_{fmax} = \sqrt{2} U_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

单相半波整流电路虽然简单,但明显的缺点是整流后的电压平均值低,大小随时间变化的脉动大,效率也不高(只有交流的半周被利用)。因此仅在 10 毫安以下的小电流场合才采用它。对于需要较大电流时,必须在电路上加以改进。

(二) 单相全波整流电路

单相全波整流电路,实际上是由两个半波整流电路组成,只不过是由变压器副绕组中心抽头将它分成完全对称的两部分,如图 1-16 所示。对中心点 o 来说,副绕组 ao 和 bo 这两部分的电压大小相等,相位互差 180° ,即

$$\left. \begin{aligned} u_{ao} &= \sqrt{2} U_2 \sin \omega t \\ u_{bo} &= \sqrt{2} U_2 \sin(\omega t - 180^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

在 $0 \leq \omega t \leq \pi$ 的半个周期内,若电压 u_{ao} 为正,则 u_{bo} 为负,变压器副绕组加于整流元件 D_1 两端的电压 u_{ao} 为正向电压, D_1 导通,加于整流元件 D_2 两端的电压 u_{bo} 为反向电压, D_2 截止,这时电流自 a 点经整流元件 D_1 通过负载 R_{fz} 而由 o 点返回。

在 $\pi \leq \omega t \leq 2\pi$ 的半个周期内,电压 u_{ao} 为负, u_{bo} 为正,于是 D_1 截止而 D_2 导通,电流自 b 点经整流元件 D_2 流过负载 R_{fz} 而由 o 点返回。

由此可见,当电源电压交变一周时,两个整流元件在正、负半周内各自导通一次,从而使负载得到了单方向流动的全波脉动电流,波形如图 1-17(c)所示。由于两个整流元件 D_1 和 D_2 轮流导通,所以全波整流的输出电流和输出电压的平均值比半波整流时大一倍,即

$$I_{z1} = \frac{2}{\pi} I_{z1m} \quad (1-10)$$

$$U_{z1} = 0.9 U_2 \quad (1-11)$$

但是在每个整流元件中所通过的平均电流却只是输出电流的一半,即

$$I_{a1} = I_{a2} = \frac{1}{2} I_{z1} \quad (1-12)$$

作用在整流元件上的最大反向电压

$$U_{fmax} = 2\sqrt{2} U_2 \quad (1-13)$$

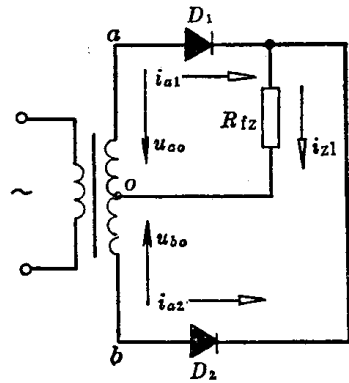


图 1-16 单相全波整流电路

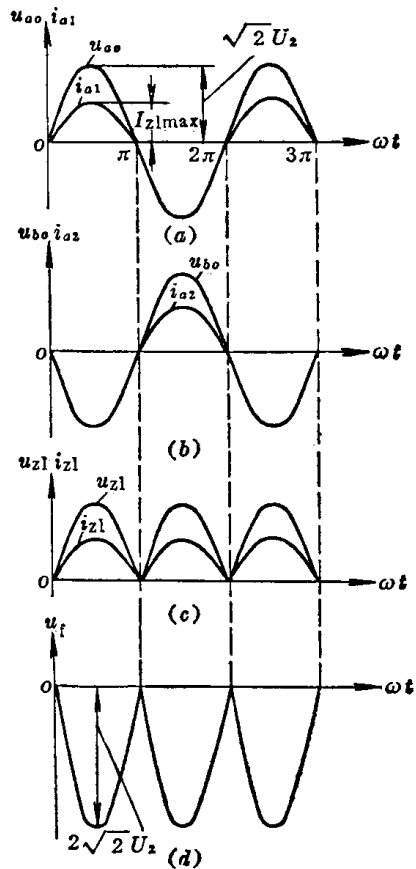


图 1-17 单相全波整流的波形图

因为当整流元件 D_1 导通时,在略去管内压降的情况下,它的阴极电位和阳极电位相等,这时整流元件 D_2 截止,它的阴极和 D_1 的阴极同电位,所以作用在整流元件 D_2 上的反向电压应该等于变压器副绕组的全部电压。整流元件 D_2 导通而 D_1 截止时, D_1 所承受的反向电压也是这样。

单相全波整流电路和半波整流电路相比,输出电压高、电流大、脉动程度小,这是它的优点。它的不足之处在于变压器要有中心抽头,整流元件承受的反向电压大,而且变压器的利用率仍然不高。为了克服这些缺点,往往采用桥式整流电路。

(三) 单相桥式整流电路

单相桥式整流电路由四个整流元件组成桥形,电路图通常有如图 1-18 所示的几种画法。

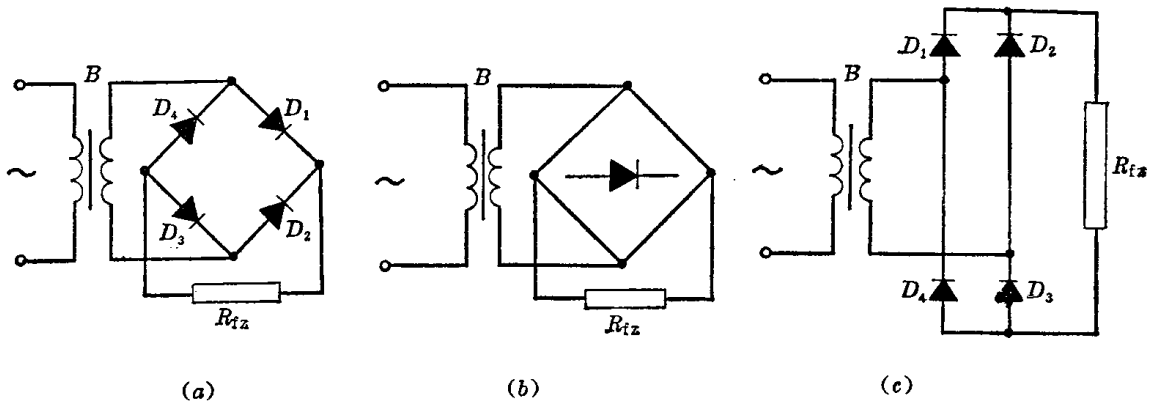


图 1-18 单相桥式整流电路

当电源在 $0 \leq \omega t \leq \pi$ 的正半周时,假如变压器副边电压 $u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t$ 的极性是 a 端为正, b 端为负,则整流元件 D_1 和 D_3 导通, D_2 和 D_4 截止,电流就从变压器副绕组的 a 端经 D_1 、负载 R_{tz} 、 D_3 而由 b 端返回,如图 1-19(a) 所示。

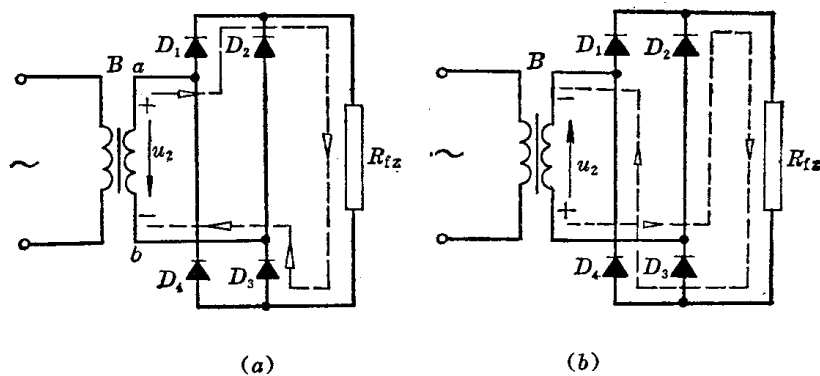


图 1-19 单相桥式整流电路的导电情况

当电源在 $\pi \leq \omega t \leq 2\pi$ 的负半周时,变压器副边的 a 端为负, b 端为正。这时整流元件 D_1 和 D_3 截止而 D_2 和 D_4 导通,电流就改自 b 端经 D_2 、 R_{tz} 、 D_4 而由 a 端返回,如图 1-19(b) 所示。

这样依次重复,在负载上就能得到同单相全波整流一样的电流和电压,波形如图 1-20

所示。

因此,单相桥式整流的输出电流、输出电压以及流过整流元件的电流的平均值是和全波整流一样的,即

$$\left. \begin{aligned} I_{z1} &= \frac{2}{\pi} I_{z1m} \\ U_{z1} &= 0.9 U_2 \\ I_a &= \frac{1}{2} I_{z1} \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

但是整流元件所承受的最大反向电压却与全波整流不同,它等于

$$U_{fmax} = \sqrt{2} U_2 \quad (1-15)$$

这在图 1-19 里很容易看出: 在正半周内,当 D_1 和 D_3 导通而 D_2 和 D_4 截止时,略去管内压降不计, D_2 和 D_4 的阴极与 a 点等电位,它们的阳极与 b 点等电位,所承受的反向电压就是变压器副边的电压。在负半周内, D_1 和 D_3 所承受的反向电压也是这样。

桥式整流电路和全波整流电路相比,它的优点是变压器无需中心抽头,变压器的利用率高,而且整流元件的反向电压降低了一半。因此这种整流电路得到了广泛的应用。例如 X52K 型立式铣床、7610 型卧式镗床、MM7120 型平面磨床、C534 J₁ 立式车床、B 2012 A 龙门刨床的控制电路中,都采用有这种将交流电转变为直流电的整流电路。这种整流电路的缺点是所用的整流元件比全波整流电路多了一倍。

[例 1-1] 有一台三相异步电动机的能耗制动控制电路,要求制动的直流电压为 27 伏,直流电流为 90 安。整流电路采用单相桥式的,试选用所需的整流元件。

解: 由于控制电路中所用的是单相桥式整流电路,根据给定的条件,整流元件所通过的电流

$$I_a = \frac{1}{2} I_{z1} = \frac{1}{2} \times 90 = 45 \text{ 安}$$

整流元件所承受的最大反向电压

$$U_{fmax} = \sqrt{2} U_2 = \sqrt{2} \cdot \frac{U_{z1}}{0.9} = \sqrt{2} \cdot \frac{27}{0.9} = 42 \text{ 伏}$$

因此,选用的整流元件,必须是额定工作电流 $I_F \geq I_a = 45$ 安,最高反向工作电压 $U_{PR} \geq U_{fmax} = 42$ 伏,查阅附录 1,可选用额定工作电流为 50 安,最高反向工作电压为 50 伏的 2CZ-50 型整流二极管四个。

1-5. 滤 波 器

整流电路虽然可以把交流电转化成直流电,但是经过整流出来的电压和电流还存在着

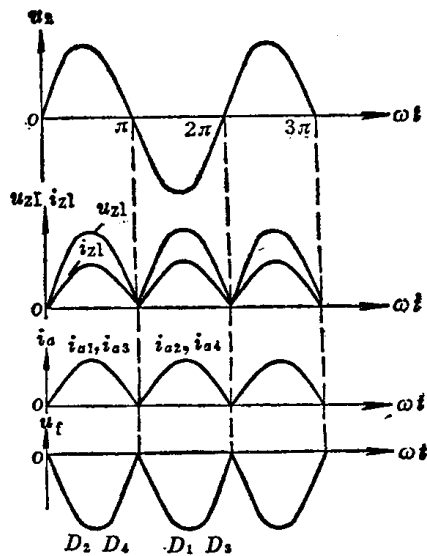


图 1-20 单相桥式整流的波形图

脉动现象,在要求不高的设备中,如电镀、电解等处运用是可以的。如果在要求直流电压比较平稳的场合,如作电子仪表、自动控制设备中的电源运用时,则远不能满足需要。因此在实际使用时,往往在整流电路后面加上滤波器,借以提高直流电的平稳度。

滤波器是由电容、电感(有时也用电阻)等元件所组成的电路,最常用的有如下的几种形式:

(一) 电容滤波器

电容滤波器是利用电容的充电和放电来使脉动的直流电变成平稳的直流电。在上册6-5节里,我们提到过电容器充、放电的概念。为了更好地理解电容的滤波作用以及它在电子技术其它方面的应用,现在我们先对电容充、放电的规律作进一步的探讨。

(1) 电容充、放电的规律

在图 1-21 所示的电路中,电容 C 、电阻 R 与零点在中间的电流表 A 串联在一起。当将单刀双掷开关向左闭合而使电路与电压为 U 的直流电源接通时,电流表的指针立即偏转到某一刻度值,然后又慢慢地回到零点。这一现象表明电路在刚接通的短暂时间内是有电流流动的。这个过程就是电容的充电过程。

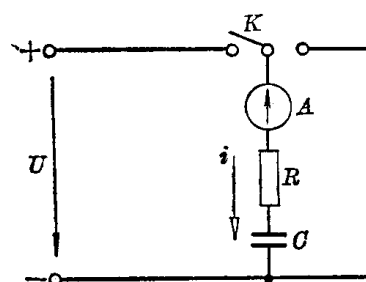


图 1-21 电容的充放电实验

在电路接通后的某一瞬间,如果电路里的电流为 i ,电阻的端电压为 u_R ,电容的端电压为 u_C ,略去电流表上的压降不计,则

$$U = u_R + u_C = iR + u_C \quad (1-16)$$

倘若这时电容电极上的电荷为 q ,则

$$u_C = \frac{q}{C}$$

$$i = \frac{dq}{dt}$$

于是方程式(1-16)可以改写成

$$R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = U \quad (1-17)$$

这是一个一阶常系数线性微分方程,在开关 K 刚闭合,即 $t=0$ 时,电容电极上的电荷 $q=0$ 的初始条件下,求得这个微分方程的解为

$$q = CU(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) = Q(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1-18)$$

其中 $Q=CU$ 是电容电极上最后所储积的电荷; $\tau=RC$ 称为电阻电容串联电路的时间常数,单位为秒;电阻 R 的单位为欧姆;电容 C 的单位为法拉。

由式(1-18)可知,在充电过程中,电容端电压的变化规律为

$$u_C = \frac{q}{C} = U(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1-19)$$