

——高等学校教材——

电 工 学

下 册

秦曾煌編

高 等 教 育 出 版 社

高等学校教材



电 工 学

下 册

秦 曾 煌 编

高等教育出版社

本书是由秦曾煌同志按照 1962 年 5 月高等工业学校教学工作會議审訂的高等工业学校本科五年制机械制造类各专业适用的《电工学教学大纲(試行草案)》編写的。全书分三册出版。上册包括电路、磁路及电工測量部分；中册包括电机、控制及供电部分；下册包括工业电子技术与非电量的电測法部分。每册均附有习题。

本书由西安交通大学袁旦庆同志审閱，并經高等工业学校电工課程教材編审委员会电工学及电工基础課程教材編审小組复审通过。

本书可作为高等工业学校本科五年制机械制造类各专业电工学課程的試用教科书，也可供有关工程技术人員参考。

电 工 学

下 册

秦 曾 煌 編

北京市书刊出版业营业許可証出字第 119 号

高等教育出版社出版(北京景山东街)

人民教育印刷厂印装

新华书店北京发行所发行

各地新华书店經售

統一书号 K15010·1141 开本 850×1168 $\frac{1}{32}$ 印张 4 $\frac{7}{16}$

字數 107,000 印數 00,001—15,000 定价(7) 0.50

1965 年 2 月第 1 版 1965 年 2 月北京第 1 次印刷

下册目录

第三部分 工业电子技术与非电量的电测法

| | |
|----------------------------|----|
| 第十五章 整流器 | 2 |
| 15-1. 概述..... | 2 |
| 15-2. 真空二极管..... | 3 |
| 15-3. 热阴极充气二极管..... | 6 |
| 15-4. 半导体整流元件..... | 9 |
| 15-5. 单相整流电路..... | 13 |
| 15-6. 三相整流电路..... | 19 |
| 15-7. 整流滤波器..... | 20 |
| 15-8. 闸流管..... | 24 |
| 15-9. 汞弧整流器..... | 29 |
| 15-10. 引燃管..... | 31 |
| 15-11. 二极管相敏整流电路..... | 32 |
| 第十六章 放大器 | 34 |
| 16-1. 概述..... | 34 |
| 16-2. 三极管的构造和栅极的控制作用..... | 35 |
| 16-3. 三极管的静态特性曲线和静态参数..... | 37 |
| 16-4. 三极管放大器的图解分析法..... | 41 |
| 16-5. 栅偏压和放大器的工作状态..... | 46 |
| 16-6. 三极管放大器的等效电路分析法..... | 50 |
| 16-7. 多极管..... | 53 |
| 16-8. 阻容耦合放大器..... | 56 |
| 16-9. 功率放大器..... | 61 |
| 16-10. 放大器中的负反馈..... | 69 |
| 16-11. 直流放大器..... | 75 |
| 16-12. 相敏整流放大器..... | 77 |
| 16-13. 晶体三极管及其放大原理..... | 78 |

| | |
|-------------------------------|-----|
| 第十七章 振荡器 | 82 |
| 17-1. 概述..... | 82 |
| 17-2. 电子管振荡器的自激条件..... | 82 |
| 17-3. <i>LC</i> 振荡器的基本原理..... | 84 |
| 17-4. <i>LC</i> 振荡器的基本电路..... | 86 |
| 17-5. <i>RC</i> 振荡器..... | 88 |
| 17-6. 锯齿波发生器..... | 90 |
| 第十八章 电子仪器和电子继电器 | 92 |
| 18-1. 电子示波器..... | 92 |
| 18-2. 电子管伏特计..... | 100 |
| 18-3. 电子继电器..... | 103 |
| 第十九章 非电量的电测法 | 108 |
| 19-1. 概述..... | 108 |
| 19-2. 电阻变换器(测量温度)..... | 109 |
| 19-3. 电阻变换器(测量应变)..... | 114 |
| 19-4. 电感变换器..... | 116 |
| 19-5. 电容变换器..... | 120 |
| 19-6. 热电偶温度计..... | 123 |
| 附录 | 125 |
| 附录一 阳极电压、栅极电压和阳极电流的符号..... | 125 |
| 附录二 国产电子管、离子管型号命名方法..... | 125 |
| 附录三 国产半导体器件型号命名方法..... | 126 |
| 附录四 常用电子管的特性参数..... | 128 |
| 附录五 几种电子管的特性曲线..... | 131 |
| 习题 | 134 |
| 第十五章..... | 134 |
| 第十六章..... | 135 |

第三部分 工业电子技术与 非电量的电测法

工业电子技术是研究各种电子器件^①在工业上应用的一門科学技术。

电子器件在工业上有着极为广泛的应用。例如：广泛地利用电子管整流器、离子管整流器或半导体整流器把交流电能变为直流电能；利用可控整流器对生产机械实现离子拖动；在非电量的电测技术中常用到放大、振荡、调制等各个环节；在高频加热和超声波技术中也都利用了电子管构成的振荡器；利用电子计算机控制机床（譬如程序控制机床），能自动地完成复杂的加工过程。此外，各种电子仪器（例如电子示波器、电子管伏特計、电子显微鏡、电子稳压器及电子继电器等）在生产上和科学研究上是用得最普遍的。

电子器件在工业上的应用这样广泛，是由它本身的特征所决定的。应用这种电子器件可以极其迅速、精确、灵敏地觉察和控制任何反应和动作，解决其他技术设备所不能解决的问题，并能实现遥远控制和测量。

工业电子技术还是一项年轻的科学技术，它仍在不断发展中，其应用也是与日俱增的。

在本书下册中着重讨论各种基本的整流电路、放大电路、振荡电路的工作原理和其中主要元件的作用，对电子器件本身只说明其简单构造和主要特性。电子示波器是最常用的一种电子仪器，因此，对于它的结构原理和使用方法，作了较为详细的阐述。至于非电量的电测法，只是通过几个实例来说明它的一般原理。

^① 电子管、离子管、光电管、电子束管、晶体管等统称为电子器件。

第十五章 整流器

15-1. 概述

一般发电厂所生产的都是交流电，而生产上应用的也主要是交流电。但是，必须应用直流电的地方也是很多的，譬如直流电动机、同步电机的励磁、蓄电池的充电设备、电解与电镀、电子仪器、自动控制系统、测量设备等等，都要用到直流电。在直流电源中，除直流发电机和各种电池外，电子管整流器、离子管整流器和半导体整流器也是经常用到的一种。所谓整流器，就是一个把交流电能转换为直流电能的能量转换器。这种能量的转换是很方便和很经济的。

整流器的方框图如图 15-1 所示，它表明把交流电能转换为直流电能的过程。图中各个组成部分的功用如下：

整流变压器——把交流电网电压变换为所需要的数值，以供整流元件之用。但在有些场合下也可以直接把电网电压加到整流元件上进行整流，所以此变压器不一定需要。

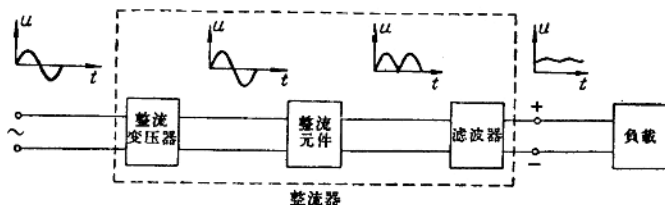


图 15-1. 整流器的方框图。

整流元件——把交变电压变为单向的脉动电压。它是整流器中的主要组成部分，有电子管、离子管及半导体整流元件三种类

型。它們都具有单向导电的共同特性。

滤波器——具有抑止諧波的作用，能使整流电压的脉动程度减小到近于恒定，以适合負載的需要。

15-2. 真空二极管

真空二极管簡称为二极管，它有两个电极——阳极 a 和 阴极 k，它們都装在高度真空的玻璃管或金屬管内(图 15-2)。阳极由鍍片(大型管用鋁或石墨)制成，圍繞着阴极。阴极被加热后就发射电子，这种发射称为热电子发射。阴极可以制成直热式或間热式两种形式。所謂直热式，就是直接利用通有加热电流的灯絲作为

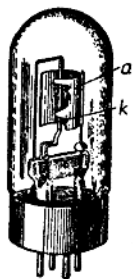


图 15-2. 二极管。



图 15-3. 直热式阴极。

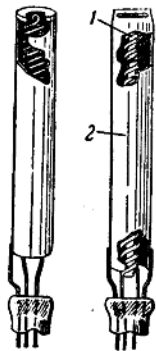


图 15-4. 間热式阴极：
1—灯絲；2—阴极。

阴极(图 15-3)。間热式的阴极(发射电子)和灯絲(通以加热电流)是分开的。灯絲放在筒形氧化物阴极的里面，两者相互絕緣(图 15-4)。阴极的热量来自灯絲。电极的引綫通过玻璃管心而与管座下面的金屬管脚相联接。

图 15-5 是具有直热式和間热式阴极的二极管的表示符号。

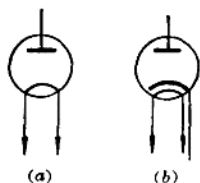


图 15-5. 二极管的表示符号:
(a)直热式; (b)间热式。

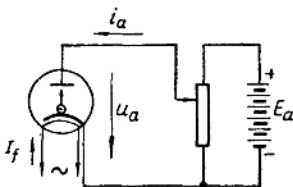


图 15-6. 求作二极管特性
曲线的电路图。

当灯丝通有电流(来自灯丝变压器或电池)后, 阴极就发射电子。今在阳极电路中接入阳极电源。它的正极与二极管的阳极相联, 而负极则与阴极相联(图 15-6)。这样, 阳极的电位较阴极为高, 所以从阴极发射出来的电子在电场的作用下奔向阳极, 经阳极电路回到阴极, 而形成了阳极电流 i_a 。

如果将电子管的阳极接到电源的负极, 而将阴极接到正极(即加一反向电压), 则阳极的电位较阴极为低。这样, 电子将受到电场的推斥作用而返回阴极, 因而就没有电流通过二极管。所以二极管只允许电流向一个方向(在电子管内从阳极到阴极)流通。这就是电子管的单向导电性。利用这种特性, 在二极管的阳极电路中加上交变电压时, 可以获得单方向的电流。这就是整流。二极管是常用的整流元件之一。

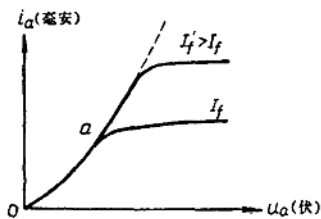


图 15-7. 二极管的伏安特性曲线。

阳极电流 i_a 的大小与阳极和阴极之间的电压 u_a (阳极电压) 的大小有关。在灯丝电流 I_f (或阴极温度) 一定时, 表示 i_a 与 u_a 之间的关系的关系的曲线 $i_a = f(u_a)$ 称为二极管的伏安特性曲线, 如图 15-7 所示。这一曲线可用图

15-6 所示的电路通过实验求出。

由伏安特性曲线可见, i_a 随着 u_a 的增高而加大, 最后达到饱和值。关于这点可解释如下。从阴极发射出来的电子在阴极与阳极间形成负空间电荷 (因为电子带负电), 当 u_a 较低时, 在阴极附近出现一个负电位 (较阴极电位低)。这个负电位对从阴极发射出来的电子产生排斥力。只有一些速度较高的电子才能克服这个排斥力而到达阳极, 因此阳极电流较小。随着 u_a 的逐渐增高, 空间电荷所产生的负电位逐渐减小, 于是将有较多电子到达阳极, 因而电流 i_a 随着增加, 如图 15-7 中曲线 oa 段所示。此后, u_a 继续增高, 但 i_a 不再增大, 因为这时由空间电荷所产生的负电位已经消失, 在一定灯丝温度下, 阴极在单位时间内所能发射出来的电子全部都到达阳极, 阳极电流就达到饱和值。灯丝电流愈大 (或阴极温度愈高), 单位时间内所能发射的电子愈多, 阳极电流的饱和值也愈大。应当注意, 实际上灯丝电流或灯丝电压的大小是有严格规定的, 不允许任意提高或降低。

二极管的特性除表示在特性曲线上外, 还可用一些参数来表示。二极管的主要参数是内电阻, 简称内阻, 用 R_i 表示。内阻就是在额定灯丝电压下, 阳极电压的微小增量 Δu_a 对由其所引起的阳极电流的微小增量 Δi_a 的比值, 即

$$R_i = \frac{\Delta u_a}{\Delta i_a}$$

或

$$R_i = \lim_{\Delta i_a \rightarrow 0} \frac{\Delta u_a}{\Delta i_a} = \frac{du_a}{di_a} \quad (15-1)$$

所以内阻 R_i 等于伏安特性曲线上工作点 P 的斜率之倒数。

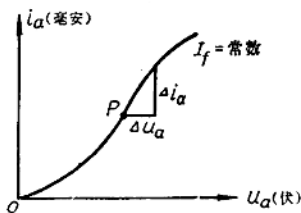


图 15-8. 求作二极管内阻的图解法。

由于二极管的伏安特性曲线不是直线 (二极管是非线性电阻

元件),故曲线上每一点所确定的内电阻的数值都不相同。通常二极管工作于伏安特性曲线的近于直线部分(中间一段),电子管手册中所列的内阻就是指相应于这部分的内阻,约为几百欧姆。

在阳极电流未达到饱和值之前,二极管的内阻主要反映了负空间电荷对 i_a 的限制作用。

此外,电子管在工作时要发热,这是由于电子撞击阳极时将其动能转换为热能,从而使阳极温度升高的缘故。当阳极温度过高时,可使其软化或熔化,并有发射电子的可能。因此,在使用电子管时,必须使阳极损失功率不超过最大容许值。

可以证明^①,阳极损失功率为

$$\Delta P_a = u_a i_a. \quad (15-2)$$

而 u_a 和 i_a 又由 $i_a = f(u_a)$ 曲线所联系。所以,要求阳极损失功率的平均值不超过最大容许值,也就是要求阳极电流的平均值不超过最大容许值。因此对每种二极管都规定了平均阳极电流(整流电流)的最大容许值,这些数值载于电子管手册中。

在手册中还列有灯丝电压、灯丝电流、瞬时阳极电流的最大容许值(受阴极发射能力限制)以及阳极与阴极间反向电压的最大容许值等(见附录四)。在使用电子管时,必须遵照手册中的规定。

15-3. 热阴极充气二极管

真空二极管中的电流是很小的,常以毫安计,这是因为一方面热阴极发射的电子数量有限,另一方面电流又受到负空间电荷的

^① 一个电子由阴极奔向阳极所获得的动能(假定电子离开阴极时速度为零,到达阳极时速度为 v)为

$$\frac{1}{2}mv^2 = eu_a.$$

如果平均每秒钟由阴极到阳极的电子数目为 n ,则每秒钟转换在阳极上的热能(即消耗在阳极上的功率)为

$$\Delta P_a = neu_a = u_a i_a,$$

式中 $ne = i_a$ 。

限制的緣故。因此，要增大电流，必須要有新的电子来源，并且要消除負空間电荷的影响。在管中充以稀薄气体，就能达到上述目的。这种充气管也叫离子管。

在充气管(离子管)中，除阴极发射的电子外，电子在电場的作用下(当阳极电位高于阴极电位时)奔向阳极的途中，还与气体分子碰撞而使之电离，产生新电子和正离子。因电离而产生的新电子与阴极发射的电子一道奔向阳极，因而这种新电子也形成了电流，而且在电場加速以后，它們还可以成为电离其他气体分子的生力軍。多次电离的結果，就使电流大大地增加。与此同时，因电离而产生的正离子在电場作用下移向阴极。虽然正离子相对于电子來說，較为笨重，速度較低，它們所形成的电流是微不足道的(阳极电流主要是由电子形成的)，但是，正离子在阴极附近所形成的空間电荷能中和由电子形成的負空間电荷。这样，便减小了电子从阴极奔向阳极所受到的阻力(因此充气管两端的电压和內阻是很低的)，因而也使得电流增大。

由此可见，在充气管中由于气体电离的結果，既有了新的电子来源，又消除了負空間电荷的影响。因此，阳极电流較电子管有显著的增加。

我們將首先討論热阴极充气二极管(简称充气二极管)，其結構与表示符号如图 15-9 所示。图中， k 是阴极， a 是阳极(由金屬或石墨制成)。制造时，在玻璃管中先排除空气，而后充以少量的汞或惰性气体^①。

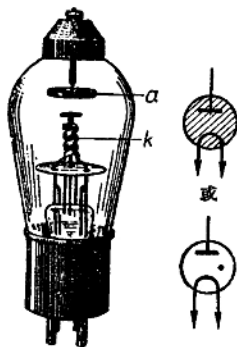


图 15-9. 充气二极管及其表示符号。

^① 汞蒸汽和惰性气体(氖、氩、氦等)不会对电极起化学作用。汞蒸汽的电离电位很低(10.4 伏)，容易电离。

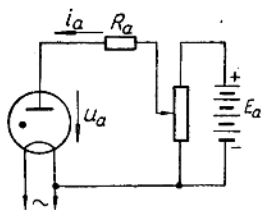


图 15-10. 求作充气二极管伏安特性曲线的电路图。

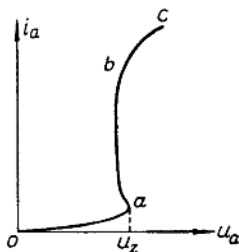


图 15-11. 充气二极管的伏安特性曲线。

充气二极管的伏安特性曲线 $i_a = f(u_a)$ 如图 15-11 所示，它可用图 15-10 所示的电路通过实验求出。在 oa 段，由于阳极电压 u_a 尚低，电子动能尚小，不足以使气体电离，因此电流很小，与真空二极管相同。当 u_a 增高到某一值 u_z 时，气体开始电离（阳极与阴极间发生弧光），电流剧烈增加，其大小由阳极电路中串接的电阻 R_a 和阳极电源电压确定。电压 u_z 称为起燃电压，一般在 10—15 伏之间。

电离发生后，如果再增加电源电压或减小阳极电阻 R_a ，就会发现电流随着增加，但电压 u_a 几乎不变（ ab 段）。通常充气二极管就在这部分工作。这时，充气管两端的电压（管压降） u_a 是很低的，对汞汽二极管而言，约为 9—12 伏。

当电流增大到 b 点以后，就超过了阴极正常的热电发射电流（在一定温度下，阴极发射电子的数量是一定的）。因此必须加强电离或用其他发射方式来获得更多的电子。这时，管压降 u_a 势必相应增加。这一方面可加速电子，从而加强电离；另一方面可使正离子的动能也有所增加，它们轰击阴极也可促使其发射电子，这种发射称为二次发射。但是与此同时，由于正离子加速轰击阴极表面的结果，阴极将遭受损坏，这是不允许的。因此，充气二极管绝对不

能在 bc 段工作,即使是短時間也不允許。

充气二极管和真空二极管一样,也有单向导电性,所以它也是一种常用的整流元件。它的平均阳极电流的容許值通常为 0.25—6 安。此外,对各种充气二极管还規定了灯絲电压、灯絲电流、瞬时电流的最大容許值(受阴极发射能力限制,相应于特性曲綫 b 点的电流)以及反向电压的最大容許值等。

此外,在使用充气管时,必須注意下列两项:

1. 由于阴极质量較大(常用鎢絲做成較粗的螺旋綫),需要較长的加热時間,方可达到正常工作溫度。因此規定,必須先加上灯絲电压,使充气管預热一定時間,而后再加阳极电源电压。否則,由于加热不足,一方面阴极发射电子尚少,同时汞还没有来得及完全蒸发,汞蒸汽密度太小,不易发生电离,所以阳极电流很小,不能滿足需要。此时,如果仍要維持正常工作电流,管压降 u_a 势必相应增高,以加强电离和形成阴极的二次发射。但如前所述,管压降增高后,会使正离子加速轰击阴极表面,而使阴极损坏。通常小型充气管的預热時間約为 2—3 分钟,大型充气管則需要半小时左右。

使用完毕后,应先除去阳极电源电压,后除去灯絲电压。

2. 阳极电路中一定要串联負載电阻,否則,在产生电离后,由于阳极电源电压总是高于維持电离所需要的电压,电流将急剧增大,使管子燒毀。

15-4. 半导体整流元件

除了上述两种整流元件外,半导体整流元件也是常用的一种。而这种整流元件与电子管或充气管整流元件比較,具有下面一些优点:使用寿命长,維護簡單,不用加热,尺寸小(有些半导体整流元件具有此优点),通过不同的联接可以获得不同的电压和电流。

关于半导体整流元件的整流作用,今简述如下:

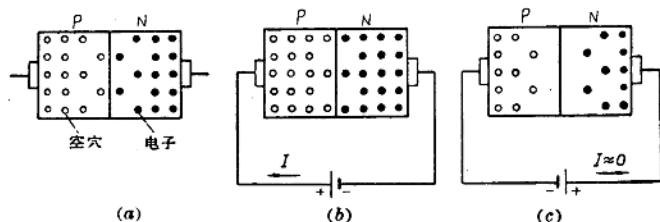


图 15-12. 半导体整流元件的单向导电性。

在物理学中已经讲过, 半导体分为P型和N型两类。前者具有空穴导电性, 后者具有电子导电性。如果经过适当的处理, 把P型半导体和N型半导体相接在一起, 那么, 由于扩散的结果, 在交界处电子填补了空穴, 电子和空穴的密度因而减小(图 15-12, a), 于是形成一层电阻很高的所谓阻挡层^①。如果在其两端加上电压, 让P型半导体接在电源的正极(电位较高), N型半导体接在负极(电位较低), 这正好使空穴和电子在电场作用下都向交界处移动, 交界处载流子的密度因而增加(图 15-12, b), 阻挡层的电阻大为减低, 通过的电流(正向电流)也就较大。如果在两端加上反向

电压, 即P型半导体接在电源的负极, N型半导体接在正极, 那么, 空穴和电子在电场作用下都背离交界处, 在交界处它们的密度因而减小(图 15-12, c), 阻挡层的电阻大为增高, 通过的电流(反向电流)也就很小。通常正向电流比反向电流要大几百倍到几千倍。

以上所述, 就是将适当的P型半导体和N型半导体相接在一起, 使其

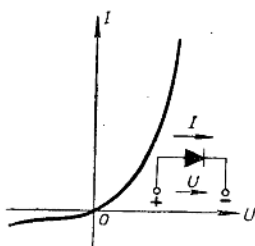


图 15-13. 半导体整流元件的伏安特性曲线。

^① 半导体中, 载流子(空穴或电子)密度愈小的地方, 电阻率愈高。

具有单向导电性(整流作用)的简单原理。

半导体整流元件的伏安特性曲线如图 15-13 所示。图中还示出了半导体整流元件的表示符号。

常用的半导体整流元件有下列几种:

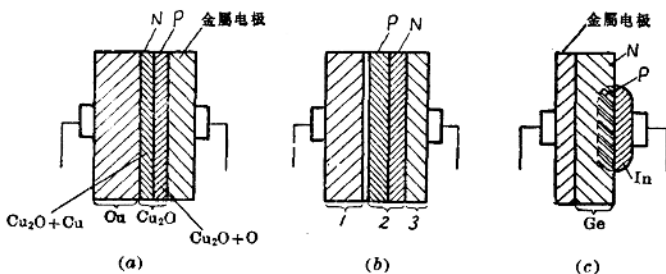


图 15-14. 常用的半导体整流元件的结构图: (a)氧化亚铜整流元件;
(b)硒整流元件; (c)锗整流元件。

1. 氧化亚铜整流元件

氧化亚铜整流元件的结构如图 15-14, a 所示。将纯铜片的一面用热处理及化学的方法, 使产生一层氧化亚铜(Cu_2O), 再在该薄层上面复盖或喷涂一层金属(铅或铝)作为电极。

由于经过特殊的处理, 靠近金属电极的氧化亚铜表层有多余的氧原子(杂质), 而形成 P 型半导体; 靠近铜的内层则有多余的铜原子(杂质), 而形成 N 型半导体。

2. 硒整流元件

硒整流元件的结构如图 15-14, b 所示。在涂有镍薄层的铁片或铝片 1 上, 喷涂一薄层硒的结晶体 2, 在硒层上又喷涂铋锡铝合金 3, 作为电极。采用专门工艺, 使靠近合金电极的硒与渗进的镉原子作用, 产生一层硒化镉, 形成 N 型半导体, 而硒本身具有空穴导电性(在处理过程中掺有杂质原子, 例如氟), 是 P 型半导体。

3. 锗整流元件

鍺整流元件的結構如图 15-14, c 所示。在鍺的結晶薄片的一边用合金法熔入錒, 形成 P 型半导体; 而鍺本身則为 N 型半导体。鍺片的另一边是錫鎳合金的电极。

在使用各种半导体整流元件时, 必須遵照規定的技术数据: 整流电流或电流密度、最大反向电压、最高工作溫度等(見表 15-1)。

表 15-1. 各种半导体整流元件的性能

| 整流元件类别 | 电流密度(安/厘米 ²) [自然冷却] | 最大反向电压 (伏) | 最高工作溫度 (°C) | 效率(%) |
|--------|------------------------------------|---------------|----------------|-------|
| 氧化亚銅 | 0.04—0.05 | 5—8 | 40—50 | 78 |
| 硒 | 0.04—0.07 | 15—25 | 75—80 | 92 |
| 鍺 | 40 | 100 | 65 | 98.5 |
| 硅 | 80 | 400 | 140 | 99.6 |

氧化亚銅整流元件在很多方面都不如硒整流元件。但是它有一个优点, 即在工作时较为稳定, 因此在測量仪器(如整流式仪表、万用电表等)中还采用它; 而硒整流元件在很多方面又不如鍺整流元件。但是它的价格便宜, 过载能力较大, 工作溫度较高, 因此硒整流元件是目前应用得最普遍的一种。鍺整流元件的尺寸小, 效率高, 寿命长, 整流功率大, 已經开始广泛应用于电解、冶金等工业用的大功率整流装置中。

此外, 尚有硅整流元件, 它的整流功率、效率、反向电压較鍺整流元件的还要大。目前在國內也已开始广泛应用。

半导体整流元件的电流密度是有一定限度的, 在长期工作时不应超过这个限度, 否則就会由于过载而使溫度升高, 整流作用将受到影响。故在需要較大工作电流的情况下, 必須选用面积較大的整流片, 或将面积較小的整流片并联起来使用。另外, 半导体整流元件的反向电压的最大值也是有一定限度的。反向电压过高, 整流片便会被击穿, 从而失去整流作用。故在需要較高整流电压的情况下, 必須将整流片串联起来, 使每片所受到的反向电压不超