

高等学校試用教科书



电 工 学

DIANGONGXUE

第 三 册

浙江大学电机工程系电工学教研组編

(修 訂 本)

人 民 教 育 出 版 社



电 工 学

DIANGONGXUE

第 三 册

浙江大学电机工程系电工学教研组编

(修 訂 本)

人 民 教 育 出 版 社



本书原是浙江大学电工学教研组编写的,于1960年由本社出版。在1961年3月間,经过浙江大学、西安交通大学、南京工学院、上海交通大学、哈尔滨工业大学、清华大学、华中工学院、西北工业大学等校电工学教研组的有关教师略加修改后再版。

全书共分三册。第一册包括电工基础及电气测量部分;第二册包括电机、电器及拖动、控制部分;第三册包括工业电子学及非电量的电测法等部分。

本书可作高等工业学校非电类专业“电工学”课程的试用教科书,也可供电工技术人员参考。

簡 装 本 說 明

目前 850×1168 毫米規格紙張較少,本书暫以 787×1092 毫米規格紙張印刷,定价相应减少 20%。希鉴諒。

电 工 学

第三册

(修訂本)

浙江大学电机工程系电工学教研组編

人民教育出版社出版 高等学校教学用书編輯部
北京宣武門內承恩寺7号
(北京市书刊出版业营业許可証出字第2号)

商务印书馆上海厂印装
新华书店上海发行所发行
各地新华书店經售

統一书号 15010·1061 开本 787×1092 1/32 印張 4 4/16
字数 108,000 印数 10,001—22,500 定价(4) 0.40

1960年11月初版(精裝合訂本共印30,000册)

1961年7月修訂第2版 1961年8月上海第2次印刷

第三册 目录

第十七章 电子和离子器件及整流器

17-1. 电子学的发展和应用	537
17-2. 电子发射	538
17-3. 二极管	540
17-4. 充气二极管	544
17-5. 二极管电子管和充气二极管的应用	547
17-6. 多相整流电路	553
17-7. 充气三极管——闸流管及可控整流器	556
17-8. 汞弧整流器	561
17-9. 引燃管	565
17-10. 光电管	567
17-11. 三极管	570
17-12. 多极管	575
17-13. 晶体二极管	578
17-14. 氧化铜整流器和硒整流器	584
17-15. 晶体三极管	588
17-16. 半导体光电效应及其应用	591
附录 17-1. 几种二极管参数及底座图	592
附录 17-2. 几种三极管和多极管参数及底座图	593
附录 17-3. 电子与离子器件的编号制度	595

第十八章 电子管放大器及振荡器

18-1. 电子管放大器的基本概念	596
18-2. 电子管放大器的分类	602
18-3. 多级耦合放大器	605
18-4. 功率放大器	612
18-5. 放大器电路中的回输	618
18-6. 电子管振荡器的基本概念	619
18-7. 自激电子管振荡器	624
18-8. 弛张振荡器	627

第十九章 电子与离子设备

19-1. 概述	631
----------------	-----

19-2. 电子延时继电器	631
19-3. 光电继电器	632
19-4. 电子管稳压器	638
19-5. 电子管电压表	634
19-6. 阴极射线示波器	638
19-7. 电子计算机的基本概念	645

第二十章 非电量的电测法

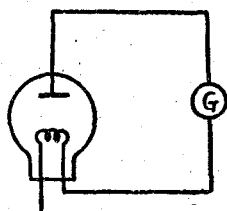
20-1. 概述	654
20-2. 参数式变换器	656
20-3. 发电式变换器	660
20-4. 压力的测量	664

第十七章 电子和离子器件及整流器

17-1. 电子学的发展和应用

电子学是研究在真空、稀薄气体或半导体中的导电现象，及电子、离子器件的构造和作用原理，并把它应用到生产技术上去的一门应用技术科学。

第一只真空管是在 1873 年产生的，这就是目前应用最广的碳丝白炽灯。后来在 1881 年，在白炽灯中发现热电发射效应。如图 17-1 所



示，当把检流计 G 接在灯丝和辅助阳极之间时，就发现检流计的指针会偏转。可见有电流通过检流计，这个现象说明炽热灯丝产生热电发射效应。

一直到 1895 年，有了无线电通讯以后，才加速了电子学的发展，使之成为一门应用技术的科学。无线电发明后不久，1904 年制成了第一只热阴极真空二极管，有圆筒形的金属阳极和炭质的热阴极，当时被用作无线电通讯的收报机中的检波器。

现代的电子、离子器件分为两类：真空管和充气管。真空管或称电子管，泡内的真空度达到非常高的数值，气压为 10^{-6} — 10^{-7} 毫米汞柱；充气管或称离子管，泡内抽成真空后充入少量惰性气体或汞。它们的特性和应用范围有很大差别。

电子学首先应用在水无线电通讯上，但是由于科学技术不断进步，近年来电子学有了很大发展，在工业上、交通运输业上得到日新月异的应

用。例如：广泛地利用汞弧整流器及半导体整流器把交流电变成直流电；利用可控整流的离子拖动已成为最完善拖动技术的一种；利用振荡管的高频加热和超声波加工都创造了新的工艺过程。

由于电子、离子器件具有独特的优点，例如：准确度高、控制灵敏、惯性小等，所以它成为远距离控制和自动化技术的基础。例如应用电子计算机及其他各种电子装置来控制机床，制成了程序控制机床和提綱控制机床，能自动地完成复杂的加工过程，大大提高了产品质量和劳动生产率。

17-2. 电子发射

电子从金属表面逸出到真空或稀薄气体中的现象称为电子发射。差不多所有的电子管和离子管都是靠着电子发射而工作的。

根据现代的电子理论，金属中存在大量的自由电子，它们可以在金属内部自由移动。但是除了个别的偶然具有很大能量的电子能逸出金属边界外，一般的电子如没有外来的能量激发是不可能离开金属表面的。这是因为：(1)电子离开金属表面后，在金属表面上出现了与逸出电子电量相等的正电荷，对电子产生吸引力。如图 17-2 所示。(2)金属表面附近有电子组成的所谓“电子云”存在。这电子云是由刚从金属逸出，但由于受到先前逸出金属的电子的排斥而积聚在金属表面附近的电子所形成的。电子云形成带负电的电荷层，阻止电子逸出金属。所以只有当电子能量足以克服上述两种扼制力时，才能从金属表面逸出。

当电子逸出金属表面时，由于克服扼制力而作功，所以电子的动能必须损失一部分或全部，而电子位能则增加。图 17-3 表示电子位能与距离间关系。纵坐标代表电子位能，横坐标代表离开金属表面的距离。

由此可见，为了使电子从金属逸出，除了金属中电子本身所具有的最大能量 W ，以外，还必须加上一定数值的能量 $e\phi_0$ 。电子从金属逸出

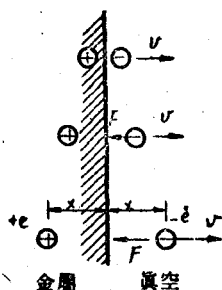


图 17-2. 电子从金属表面逸出。

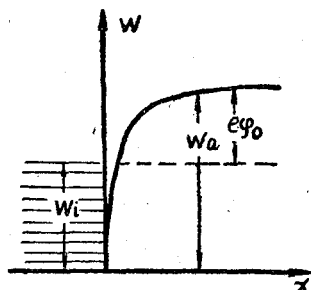


图 17-3. 金属能量图。

所必需的总能量 W_a 决定于上述两个数值之和, 即

$$W_a = W_i + e\phi_0 \quad (17-1)$$

或者

$$W_a - W_i = e\phi_0. \quad (17-2)$$

所加能量 $e\phi_0$ 称为“逸出功”。逸出功 $e\phi_0$ 通常以“电子伏”计量。逸出功的大小决定于金属的性质和表面情况。如果金属表面涂以其他物质, 视这物质性质的不同可以使逸出功增加或减少。例如: 钨的逸出功为 4.52 电子伏, 钪为 3.5 电子伏, 而敷钪的钨则为 2.63 电子伏。逸出功的大小也可在其他原因的影响下发生变化, 如外加电场就能使逸出功减少。

按照使电子从金属逸出的方法的不同, 电子发射形式可以分为下列几种:

(1) 热电发射: 将金属加热, 使金属内自由电子吸收了热能而增加了动能, 就有可能逸出金属表面。在许多电子和离子器件中, 广泛应用这种热电发射的方法。

(2) 光电发射: 当辐射线 (可见或不可见的) 照射到金属上时, 由于光子被金属吸收, 改变了原子中电子能量的状态, 而有电子从金属表面逸出, 这种现象称为光电发射。

(3) 二次发射：当高速的电子或离子打击到金属表面，由于高速电子或离子的动能部分或全部被金属吸收，改变了金属原子中电子能量的状态，而有电子从金属表面逸出，这种现象称二次发射。

(4) 强场发射：当金属表面附近的电场强度很大(约 10^6 伏/厘米)时，电场力减低了逸出功，使电子有可能逸出金属表面，这种现象称强场发射。

视电子发射形式不同，电子和离子器件可以分为下列几种：

热阴极真空管(电子器件)和热阴极充气管(离子器件)——属于热电子发射。

汞弧整流器和引燃管(离子器件)——属于强场发射。

光电管(电子或离子器件)——属于光电发射。

17-3. 二极管

二极管是利用热电子发射来工作的。它是一个抽成高度真空的玻璃泡，泡中装有两个电极：一个叫阴极——由金属丝做成，用来发射电子；另一个叫阳极——做成平板形或圆筒形，用来吸引电子。

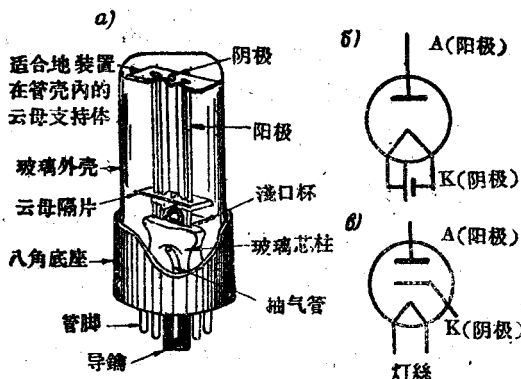


图 17-4. a—二极管外形图；b—直接热式二极管表示符号；

c—旁热式二极管表示符号。

阴极的加热形式可分直接(直热)和间接(旁热)二类。在直热式时,发射电子的阴极就是加热体,可以用钨丝制成。但钨具有较大逸出功,所以为了得到足够大的电子发射,有时在钨丝上涂以逸出功较小的钽或碱土金属(钡、锶,有时还加入钙)的碳酸盐。如直热式灯丝电源采用交流,则电子发射将有脉动,影响阳极电流,故不宜用于灵敏放大器中,一般用作整流。在旁热式中,发射电子的阴极和加热灯丝是分开的。现代的旁热式的阴极通常用含有各种激活物质的镍管制成,在其表面复以氧化物涂料。装在镍管中的加热灯丝则通常用钨、钼或钨钼合金做成,在其上则复以钨钼石粉,以便与阴极(镍管)绝缘。这种加热的缺点是经济性比较差,需要半分钟才能达到运用温度,然而电子发射不致于有显著的脉动性,因为阴极与灯丝分开,阴极的热惯性大,跟不上加热电流的变化。图 17-4 表示二极管的外形以及直热式和旁热式二极管的表示符号。

为了利用炽热阴极的热电发射,在电子管中必须装有第二个电极——阳极。电子管的阳极大部分用逸出功高的金属(例如镍、钨)制成,这样可减少二次电子发射。此外,阳极应经过很好的去气,以免在工作过程中放出气体而损坏管内真空度。

为了把阴极发射的电子引向阳极,必须在电子管内建立一个电场。如将电源正端接到二极管的阳极,负端接到阴极,如图 17-5 所示。则热阴极发射

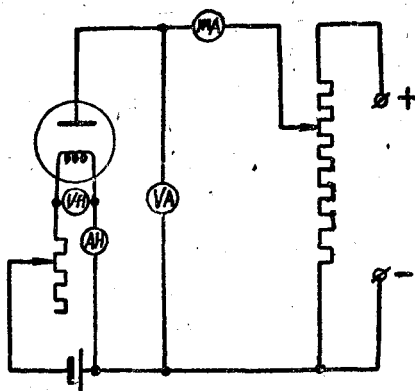


图 17-5. 测定二极管特性的电路。

出来的电子就因电场的作用而向阳极运动,电子管便导电。电流表 mA 就有读数。如果将电源的正负端换接,则电场将阻止发射出来的电子

向阳极运动,而力图把发射的电子推回阴极,因此电路中就不会有电流通过。由此可见,电流只在一种情况下,就是阳极电位高于阴极电位的时候,能通过电子管。所以如果外加电源为交流电源,则只有阳极相对于阴极为正电位的瞬间,才有电流通过二极管。二极管的这种特性称为单向导电性。

二极管电流的大小,决定于加在阳极和阴极间的电压(阳极电压)和阴极的温度。如果阴极的温度保持一定,则二极管的阳极电流 I_a 随阳极电压 U_a 而变。当阳极电压很低时,阳极电流也很小,这是因为从阴极表面发射出来的电子中,只有一部分速度较高的到达了阳极,另外一些速度较低电子聚集在阴极附近形成负空间电荷(电子云),使该处的电位低于阴极电位。负空间电荷所生的电场,对从阴极发射出来的电子产生作用力,迫使其返回阴极。故从阴极发射出来的电子,只有初速度大的,能突破低电位区域而达到阳极。当阳极电位增高时,负空间电荷电场受到削弱,于是将有更多电子到达阳极,因而通过二极管的电流随之增加,如图 17-6 曲线 Oa 段所示。当电压增至某值时,继续

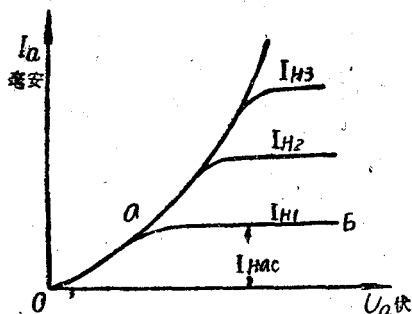


图 17-6. 在不同的阴极加热电流值 I_H 时阳极电流和阳极电压的特性曲线族。

增加电压将不再引起电流的增加,这是因为所有从阴极发射出来的电子都到达了阳极的缘故。这时的电流称为电子管的饱和电流 I_{Hac} 。

实用上,二极管一般在阳极电流未饱和状况运用,也就是说,阳极电流要比阴极发射电流为小。根据实验与理论上分析:在未饱和部分阳极

电流和阳极电压间关系,近似地可用所谓“二分之三次方定律”来表示:

$$I_a = KU_a^{\frac{3}{2}}, \quad (17-3)$$

式中系数 K 由电极的形状、尺寸和位置来决定。

由于电子管的阳极电流和电压不成正比, 因此它们不遵循欧姆定律。

如果改变阴极的温度(改变灯丝加热电流), 使阴极发射电流改变, 则饱和电流 (I_{nac}) 的数值也随之改变。图 17-6 表示不同灯丝加热电流(阴极温度)时的特性曲线族。

从以上分析可知, 阳极电流与阳极电压的关系不遵循欧姆定律。所以在许多情况下都必须根据二极管的特性曲线和阳极电压随时间变化的曲线, 用作图的办法来决定阳极电流曲线。但是在另外许多场合下也可以应用一种简化办法: 把代表二极管特性的某些平均量, 即所谓参数, 代到相应方程式里去计算。

二极管的第一个参数是跨导 S , 通常也叫特性曲线斜率。因为特性曲线是非线性的, 所以特性曲线斜率是指特性曲线上任何一点电流增量 dI_a 与阳极电压增量 dU_a 之比值:

$$S = \frac{dI_a}{dU_a} \text{ 毫安/伏。} \quad (17-4)$$

二极管的跨导 S 愈大, 则它的内部电压降以及消耗的阳极功率愈小, 因此电子管愈完善。

第二个参数是二极管跨导的倒数称为内电阻(简称内阻):

$$R_i = \frac{dU_a}{dI_a} \text{ 伏/毫安。} \quad (17-5)$$

二极管内阻一般很大(100—100000 欧)。二极管内阻之所以很大, 是因为在阳极和阴极之间充满着负空间电荷, 形成电子云, 这些负电荷的电场阻碍了电子从阴极发射出来, 这样就限制了阳极电流。所以二极管内电压降落较大, 而电流比较小, 只有几十毫安。

在选用二极管时还有以下几个参数。

灯絲电压 U_n 和灯絲电流 I_n 。灯絲电压太低, 灯絲电流就不能到达規定值, 阴极达不到正常工作温度, 結果阴极发射电子不够多, 非但实际工作效率低, 而且縮短二极管寿命。相反灯絲电压太高, 阴极受热太高, 电子发射太多, 阴极表面的物质蒸发太快, 也会縮短管子的寿命。

阳极和阴极間最大反电压 $U_{обp}$: 可以經受的不至于破坏二极管单向导电性的最大电压, 决定于二极管結構上的絕緣强度。

阳极最大瞬时电流 $I_{макс}$: 在正常运用下可允許的阳极最大瞬时电流。

阳极平均电流 I_a : 管内允許連續通过的最大平均电流, 决定于二极管的散热能力。

阳极最大損耗功率 $P_{a макс}$: 阳极是管内发热零件之一。因为飞到阳极的电子在撞击阳极时, 将它自身动能傳給阳极物质里的粒子, 而使这些粒子的混乱热运动加强, 阳极温度可能大大提高, 直到使阳极熔化。所以在运用时, 阳极上消耗功率应小于 $P_{a макс}$ 。

17-4. 充气二极管

充气二极管也是装有两个电极——吸引电子的阳极和发射电子的阴极的玻璃泡。它和二极真空管的区别在于把玻璃泡抽成真空以后, 充以水銀蒸汽或惰性气体: 氫、氛或氦。图 17-7 表示充气二极管外形及其表示符号。在二极真空管中充以气体后, 就完全改变了它的特性。

如果充气管的阳极对阴极具有正的电位, 則由于热电发射的作用而从阴极发射出来的电子将受电場加速而趋向阳极。飞向阳极的电子将与管中气体的原子或分子相碰撞。如果碰撞电子动能很小, 可能发生彈性碰撞。如果增加阳极和阴极之間的电压, 亦即提高电子飞向阳极速度, 这时电子动能增加, 当与中性原子碰撞时, 可使原子分裂成带电的正离子和自由电子, 即产生“碰撞电离”。这样所生的自由电子也将受外电場加速, 并也能引起电离。在足够强大的外电場作用下, 气体

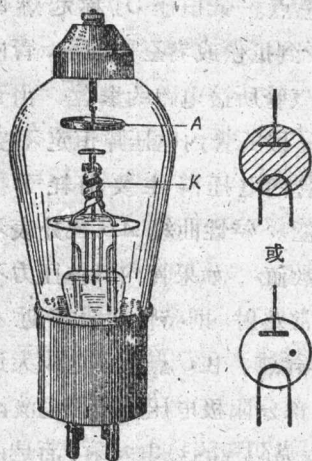


图 17-7. 充气二极管及其符号表示法。

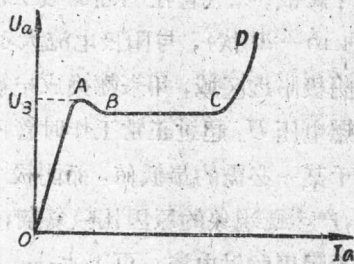


图 17-8. 充气二极管电压电流特性曲线。

电离的过程如雪山崩溃一样地增加。当然在气体电离过程的同时，也发生电子和离子重新合成中性原子的现象，此种现象称复合。此时参加复合的离子和电子以光量子的形式把以前与电子碰撞时所得能量放出来，因此有可见的光发生。

这样，充气管的极间空间不仅充满着负电子，而且也充满着正离子。正离子在电场作用下也会逐渐跑向阴极，形成正空间电荷。这电荷与扼制电子发射的阴极附近的负空间电荷中和；另一方面在阴极周围形成了正离子层，由于正离子层非常迫近阴极，使强大的电子流容易通过。因此充气管极间空间象一个良导体，即使在很大的电流下，极间电压降也显得很小。充气管比真空管优越就是能通过大的工作电流而管内损耗却很小。

图 17-8 所示为充气二极管的典型电压电流特性曲线。从图中可见，这条曲线包含数个不同部分： OA 部分特性可用气体尚未发生碰撞电离来说明，此时从阴极逸出的电子还未得到产生气体电离的必需速度，所以由于阴极附近负空间电荷的影响，限制了阳极电流。在 A 点附

近, 阳极电压使气体电离充分发展, 称起燃点。此电压 U , 称起燃电压。此时阴极附近的负空间电荷部分地受到抵偿或者全部消除, 管内已成为良导体, 所以阳极电流仅受制于充气管所接电路的参数。由于这个缘故, 充气管在特性曲线工作部分 BC 段的管内电压降恒定不变 (约 15—20 伏), 与阳极电流大小无关。管内电压降主要消耗于靠近阴极附近区域, 用来转换成电离所需动能。特性曲线 AB 部分表示起燃电压 U , 超过正常工作时管内压降之数值。如果管内气体压力不低于某一必需的最低值, 而阴极又保持正常发射, 则特性曲线接近水平, 产生此现象的原因比较复杂, 这里不再详述。在 C 点阳极电流大致等于阴极发射电流。再下去——曲线 CD 部分阳极电压随阳极电流而增加, 因为在这范围内, 电流的增加并不依靠阴极的热电发射, 而是由于气体内电离过程发展的结果。在阴极方面, 也为此而要求增加阴极电位降。所以绝对不能在 CD 段运行, 甚至暂时地也不允许, 因为正离子动能增加 (由于阴极电压降增加), 所以轰击阴极表面作用也增强, 阴极氧化物涂层会很快损坏。所以充气管对过载较灵敏, 这是其缺点之一。

充气管另一缺点是比真空管容易发生逆弧。当正半波电压完毕后, 充气管不导电, 此时管内存在的电子和离子相互复合。但复合需一定时间, 在电压负半周, 来不及复合的正离子向负电位的阳极运动。如果负电压很大, 则正离子获得的能量很大, 撞击阳极, 就能引起阳极表面电子发射。随着这种发射的增加, 使管内气体重新电离而反向导电, 从而破坏了二极管单向导电性。此种现象称逆弧。

充气二极管使用时必须严格保持加热灯丝电压为额定值。如果加热灯丝电压太低, 阴极就得不到足够温度, 发射的电子就不够供给工作电流的需要, 此时如果仍要维持正常工作电流就必须增加管内电压降, 因此会使正离子轰击阴极表面的力增强, 而使阴极毁坏。加热灯丝电压也不能太高, 否则也会影响充气管的寿命。运用时, 加热灯丝电压允

許在与額定电压相差 $+10-5\%$ 限度內波动。在接入阳极电压之前,必須預热阴极約 3—5 分钟,对于大容量的充气管甚至到 30 分钟。

除加热灯絲电压外,使用充气管时,还須注意下列参数:最大反电压;阳极最大瞬时电流;阳极平均电流。

17-5. 二极电子管和充气二极管的应用

二极真空管和充气二极管主要用来将交流电变换成直流电,也就是說用作整流器。只能让电流在一个方向通过或者使一个方向通过的电流显著大于另一个方向通过的电流,这种仪器称为整流器。

由于交流电在电能产生、輸送和应用上与直流电相比,有許多优点,所以現在电工技术上广泛采用交流电。但是在某些情况下直流电在技术上和經濟上具有高度优越性,例如在冶金和金属加工工业常采用直流电,于是不得不把交流电变成直流电。把交流电变成直流电可以用很多种方法实现,例如:可以用电动机-发电機組,也可用整流器或蓄电池。在需要小容量直流电源时,利用整流器整流比蓄电池方便。在大容量时,整流器又比电动机-发电機組有一系列优点:效率高、投資少、占地少、节省有色金属;当然也有缺点:如低压时效率低(所以在低压大电流的直流电源方面,如电鍍只需 3—12 伏,还不能代替发电机),功率因数低;但优点胜过缺点。相反,电动机-发电機組由于装置复杂、有轉动部分、效率低、需專門机座等缺点,所以在整流器制造和使用获得巨大成就的今天,电动机-发电機組逐漸让位給整流器了。因此目前在控制系統和調节系統的供电部分,在电子离子拖动技术中,以及一切需要直流电或者直流电具有优越性的动力部分,都可以遇到各种不同形式的整流器。

利用二极管的单向导电性,可将它作为整流器。整流綫路有很多种,在这里我們仅研究較簡單的几种。

半波整流綫路:图 17-9 表示最簡單的利用二极真空管的半波整

流线路。变压器的原绕组 I 接于交流电源上,副绕组 II 供电给二极管阳极电路;副绕组 III 用来加热灯丝。负载与阴极之间的联接一般通过绕组 III 中点。利用这种接法可以使电子管灯丝的两半部分工作均衡。为了方便起见,也有把负载直接与灯丝的一端联接的。

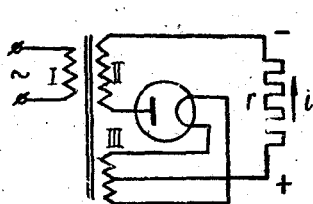


图 17-9. 二极管半波整流线路图。



图 17-10. 半波整流电压和电流曲线。

由于二极管具有单向导电性,所以只有当电压正半周(即阳极电位高于阴极电位的半周)时,电路中才能通过电流,当电压负半周时电路中无电流通过。

图 17-10 表示半波整流电压和电流曲线。如果忽略电子管内电压降,则导电期间变压器副绕组电压全部为负载电阻承受。由于在负半周整流电流瞬时值等于零,那末一个周期中整流电流平均值或整流电流直流分量,决定于半周期中交流电流的积分:

$$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi i_d d\omega t = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_m \sin \omega t d\omega t = \frac{I_m}{\pi}. \quad (17-6)$$

上式中

$$I_m = \frac{U_{2m}}{R_d}, \quad (17-7)$$

其中 U_{2m} 为变压器副绕组 II 电压的极大值。

而变压器副绕组和导线的发热应决定于电流有效值(均方根值):

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (I_m \sin \omega t)^2 d\omega t} = \frac{I_m}{2}. \quad (17-8)$$

由此可见,引起变压器发热的电流超过平均电流。电流的有效值显著