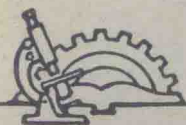


高等学校試用教科書



电 工 学

DIANGONGXUE

下 册

北京工业学院編

人 民 教 育 出 版 社

高等学校試用教科書



电 工 学

DIANGONGXUE

下 册

北京工业学院編



人 民 教 育 出 版 社

全书共三册,上中册为上海交通大学编写,已在1960年出版;下册原系北京工业学院所编写的讲义。全书在1961年3月間,經西安交通大学、上海交通大学、浙江大学、清华大学、南京工学院、哈尔滨工业大学、华中工学院、西北工业大学等校电工学教研组的有关教师加以修改增删后出版(上、中册只略作修改,此次系再版)。

本书上册包括电工基础和电气测量部分;中册包括电机、拖动控制和发电、输电、配电等部分;下册包括电子技术及非电量的电测法等部分。

本书下册的执笔者是:叶国璋、刘蕴陶、王崇仁、王世邦、罗伯祥、袁连生等同志。

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

电 工 学

下 册

北京工业学院编

北京市书刊出版业营业许可出字第2号

人民教育出版社出版(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

统一书号K15010·1029 开本 850×1168 1/32 印张 11⁵/₁₆ 插页2

字数 258,000 印数 82,001—101,000 定价(7) 1.30

1961年8月第1版 1963年5月北京第4次印刷

目 录

第三篇 电子学

第十四章 整流器	1
§ 14-1. 概述	1
§ 14-2. 电子发射	2
§ 14-3. 真空二极管	7
§ 14-4. 单相半波整流线路	12
§ 14-5. 单相全波整流线路	15
§ 14-6. 单相桥式整流线路	18
§ 14-7. 三相半波整流线路	19
§ 14-8. 三相桥式整流线路	20
§ 14-9. 倍压整流线路	22
§ 14-10. 平滑滤波器	23
§ 14-11. 热阴极充气二极管	35
§ 14-12. 半导体整流元件	37
§ 14-13. 闸流管	42
§ 14-14. 汞弧整流器	49
§ 14-15. 引燃管	54
§ 14-16. 整流器的设计	56
第十五章 放大器	65
§ 15-1. 概述	65
§ 15-2. 三极真空管的结构和作用	66
§ 15-3. 三极管的应用举例——单管放大器	68
§ 15-4. 三极管的静态特性和静态参量	71
§ 15-5. 三极管的动态特性	76
§ 15-6. 四极管	77
§ 15-7. 五极管	80
§ 15-8. 束射四极管	83
§ 15-9. 放大器概述	85
§ 15-10. 阻容耦合放大器	90
§ 15-11. 变压器耦合放大器	107
§ 15-12. 功率放大器	111

§ 15-13. 倒相电路.....	122
§ 15-14. 负反馈放大器.....	126
§ 15-15. 阴极输出器.....	132
§ 15-16. 宽频带放大器.....	135
§ 15-17. 直流放大器.....	139
§ 15-18. 相敏整流放大器.....	143
§ 15-19. 晶体三极管放大器的基本概念.....	147
第十六章 振荡器.....	154
§ 16-1. 概述.....	154
§ 16-2. LC 振荡器.....	155
§ 16-3. LC 振荡器的典型电路.....	162
§ 16-4. 高频电热.....	166
§ 16-5. RC 振荡器.....	168
第十七章 调制与检波.....	173
§ 17-1. 调制的基本概念.....	173
§ 17-2. 调幅的基本概念.....	173
§ 17-3. 阳极调制.....	176
§ 17-4. 栅极调制.....	179
§ 17-5. 调频波的基本概念.....	182
§ 17-6. 调频制和调幅制优缺点的比较.....	184
§ 17-7. 检波的基本概念.....	185
§ 17-8. 二极管检波器.....	186
§ 17-9. 其他几种检波器.....	188
第十八章 脉冲技术.....	193
§ 18-1. 概述.....	193
§ 18-2. 脉冲的特点和产生.....	194
§ 18-3. 微分电路.....	195
§ 18-4. 积分电路.....	199
§ 18-5. 削波器.....	202
§ 18-6. 双稳态触发电路.....	209
§ 18-7. 电子计数器.....	215
§ 18-8. 单稳态触发电路.....	221
§ 18-9. 自激多谐振荡器.....	223
§ 18-10. 电子开关.....	224
第十九章 电子继电器与电子仪器.....	227

§ 19-1. 光电管及光电继电器	227
§ 19-2. 电子式时间继电器	230
§ 19-3. 电子温度控制器	232
§ 19-4. 电子管稳压器	234
§ 19-5. 真空管电压表	238
§ 19-6. 电子管示波器	246
§ 19-7. 脉冲示波器	259
第二十章 非电量的电测法	262
§ 20-1. 概述	262
§ 20-2. 接触变换器	264
§ 20-3. 变阻器式变换器	267
§ 20-4. 电阻丝变换器	269
§ 20-5. 热电阻变换器	272
§ 20-6. 电感变换器	277
§ 20-7. 电容变换器	281
§ 20-8. 光电变换器	285
§ 20-9. 游离变换器	283
§ 20-10. 感应变换器	290
§ 20-11. 热电变换器	292
§ 20-12. 压电变换器	294
§ 20-13. 逆变换器	295
§ 20-14. 测量电路	296
§ 20-15. 力和压力的测量	302
§ 20-16. 转速的测量	305
附录	311
附录一 电源变压器的结构设计	311
附录二 苏联真空管型号命名简单说明	323
附录三 常用真空管特性	324
附录四 充气管和光电管	341
附录五 常用晶体管特性	343
附录六 我国电真空器件、离子器件和半导体器件型号命名方法	348
附录七 电阻、电容规格	354

第三篇 电子学

第十四章 整流器

§ 14-1. 概述

由于生产和科学技术的发展,直流电已为生产和科学技术部門中不可缺少的能源,許多設備必須在直流供电下才能正常地工作,或在直流电工作时才具有比較大的优越性。例如在自动控制系统、調节系統和測量設備中,在充电設備中,在电子离子拖动系統中,在电机励磁系統中,都要用到直流电。此外,在无綫电工程中,在各种电子仪器設備中,都必須在直流供电下才能工作。因此在今天,直流电是有一定用量的。

但是一般发电厂所生产的都是交流电。这样,电力生产方式与用电需要产生了矛盾。解决这矛盾是通过整流器实现的。所謂整流器就是一个将交流电能变为直流电能的变换器。

工程中使用的整流器有多种类型。根据所用整流元件的不同,整流器可分为机械整流器、电子管整流器、离子整流器和半导体整流器等。这些整流器各有特点,必須根据用途不同加以选用。一般說来上述几种整流器的整流过程可用图 14-1 来表示。

简单說来,上述各种整流器的整流过程是这样的:

(1)交流电源的电压首先經過电源变压器予以升高或降低至某一数值,这数值是根据所需的直流电压决定的。

(2)变压器副繞組输出的交流电压經過具有单向导电性能的整流元件后,就轉变为大小仍随時間作周期性变化而方向不变的

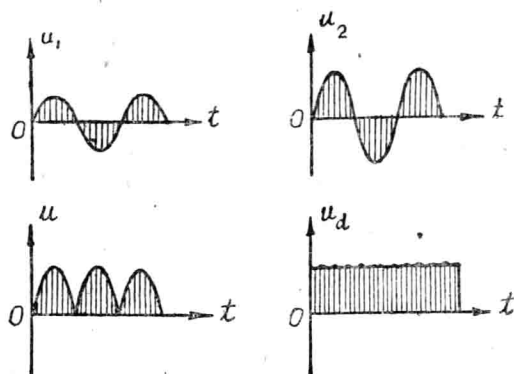


图 14-1. 一般整流器的整流过程。

脉动直流电压。

(3) 再把脉动的直流电压加在滤波器的输入端以后, 在滤波器的输出端便可获得脉动很小的直流电压, 这就完成了整个整流过程。

§ 14-2. 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运动。但是除了个别的偶然具有很大大能量的电子能逸出金属边界以外, 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, 这些正电荷对电子产生吸引力, 如图 14-2 所示。(2) 金属表面附近有电子形成的所谓“电子云”存在。这电子云是由刚从金属逸出, 但由于受到先前从金属逸出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 14-3 表示电子位能与距离的关系。纵坐标代表电子位能，横坐标代表离开金属表面的距离。

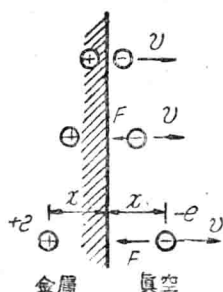


图 14-2. 电子从金属表面逸出。

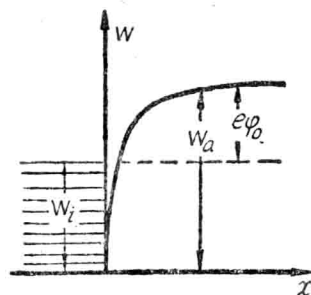


图 14-3. 金属能量图。

由此可见，为了使电子从金属逸出，除了金属中电子本来具有的最大能量 W_i 以外，还必须加上一定数值的能量 W_0 。电子从金属逸出所必需的总能量 W_a 决定于上述两数值之和，即

$$W_a = W_i + W_0 \quad (14-1a)$$

或者

$$W_a - W_i = W_0. \quad (14-1b)$$

所加能量 W_0 称为“逸出功”。逸出功 W_0 通常以“电子伏”计量。一个电子伏等于一个电子在电场中升高 1 伏特的电位所获得的能量。

$$1 \text{ 电子伏特} = 1.601 \times 10^{-19} \text{ 库} \times \text{伏}$$

$$\approx 1.6 \times 10^{-19} \text{ 焦。} \quad (14-2)$$

逸出功也可以用功作为单位：

$$W_0 = e\varphi_0, \quad (14-3)$$

式中 φ_0 称为逸出电位, 单位为伏特。各种金属的逸出功参阅表 14-1。

表 14-1

金 属	$e\varphi_0$, 电子伏特	金 属	$e\varphi_0$, 电子伏特
铂(Pt)	6.0	钍(Th)	3.4
钨(W)	4.52	钙(Ca)	3.2
汞(Hg)	4.5	钡(Ba)	2.52
钼(Mo)	4.3	钠(Na)	1.9
钽(Ta)	4.1	钾(K)	1.8
铜(Cu)	4.1	铯(Cs)	1.8

按照使电子从金属逸出的方法不同, 电子发射的方式可以分为下列几种:

(1) 热电子发射 电子发射最重要方法之一是将金属加热到高温, 使金属内自由电子吸收了热能而增加动能, 从而逸出金属表面。这就是所谓热电子发射。加热温度愈高, 获得动能后具有足够的逸出功的电子数目就愈多, 那末离开金属的电子也就愈多。应用热力学定律推导出热电子发射的公式为:

$$J = AT^2 e^{-\frac{e\varphi_0}{kT}}, \quad (14-4)$$

式中 A ——普通常数, 对纯金属来说约等于 60;

k ——波尔兹曼常数(0.863×10^{-4} 电子伏特/ $^\circ\text{K}$);

T ——绝对温度, 以 $^\circ\text{K}$ 表示;

$e\varphi_0$ ——加热金属材料的逸出功;

J ——热电子发射的电流密度(安/厘米²)。

从上式中可见电子发射的电流密度对温度的变化很敏感。以钨为例, 钨的逸出功等于 4.52 电子伏。在温度自 2000°K 到 2600°K 的范围内, 电流密度的变化如下:

$T^{\circ}\text{K}$	J 安/厘米 ²
2000	1.15×10^{-3}
2100	4.16×10^{-3}
2200	14.2×10^{-3}
2300	43.8×10^{-3}
2400	120×10^{-3}
2500	300×10^{-3}
2600	740×10^{-3}

从(14-4)式中可以看出, 制造电子发射体——阴极——的材料应选用:

(i) 具有小的逸出功; (ii) 能承受高温。

实际上一一般采用这样两类材料作为阴极:

(a) 具有高的逸出功, 并能运用于高温的材料, 例如純金属的鎢、鉬、钽。

(b) 具有小的逸出功, 并运用于較低温度而有显著的电子发射, 例如鋇和鋇的氧化物, 敷鈷鉬或敷鈷鎢(鉬或鎢上涂有鈷层)。

这些材料的性能如表 14-2 所示。

表 14-2

阴 极 材 料	A	$e\varphi_0$ (电子伏)	运用温度 $^{\circ}\text{K}$
鎢	60—212	4.52	2500—2800
鉬	51—75	4.38	2000
钽	60	4.07	1900—2200
鎢上塗氧化物层	2.6×10^{-3}	0.81	800
敷 鈷 鎢	3	2.63	1200—1300

阴极的加热是通以电流而实现的。由于加热方式不同, 阴极又分为直热式和間热式两种。直热式阴极就是把直流或交流电直接通入由純金属絲制成的灯絲中, 以提高其温度而发射电子。直

热式阴极的形状如图 14-4a) 所示。此种阴极在用交流电流加热时, 灯丝各部分的电位起脉动变化, 电子发射也跟着脉动, 因而在电子管输出电路中发生电压或电流脉动, 在扩音器中产生交流哼声。为了应用交流电流加热又要避免上述的缺点, 制成間热式阴极, 它是外面涂着氧化物层的不同形状的镍管, 其中装有涂着絕緣物的加热用的灯丝。灯丝通电后将热量傳遞給镍管, 从而使镍管的温度升高而发射出大量电子。由于間热式阴极的热慣性很大, 虽然用交流电加热灯丝, 不会引起电子发射的脉动, 間热式阴极的形状如图 14-4b) 所示。

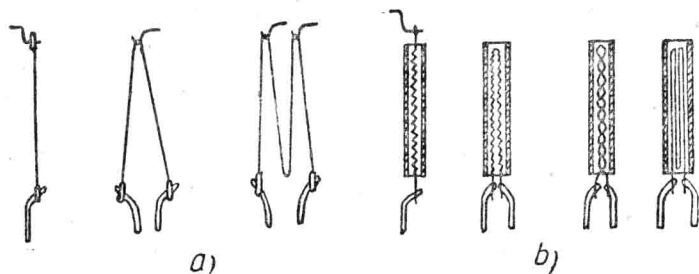


图 14-4. 电子管发射体的形状:
a) 直热式; b) 間热式。

(2) 光电发射 当幅射綫(可見或不可見的)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动能的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。这种现象称为二次发射。

(4) 强場发射 当金属表面附近的电場强度很大(約 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。

视电子发射方式不同,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。

§ 14-3 真空二极管

(一) 作用原理

在高度真空(管内的气压不超过 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 毫米水银柱)的玻璃管或金属管内封入一个能发射电子的电极和一个能吸引电子的电极,这样就构成了真空二极管。能发射电子的电极称为阴极,它的形状可制成金属丝形或圆筒形,如图 14-4a)、b) 所示。而吸引电子的电极则称为阳极或板极,其形状可制成板状或圆筒形。图

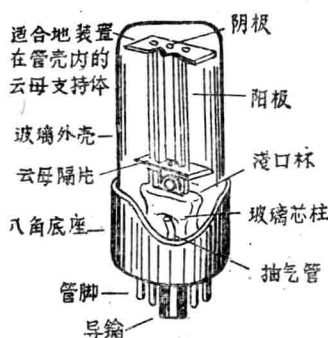


图 14-5. 二极管外形图。

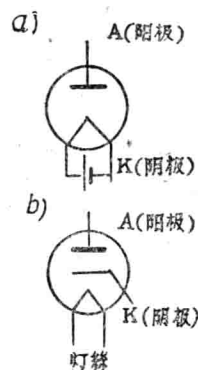


图 14-6. 二极管的表示符号:

a) 直热式二极管表示符号;

b) 间接热式二极管表示符号。

14-5 是真空二极管外形图。由于阴极加热方式不同, 真空二极管又分直热式和間热式两种。图 14-6 是这两种二极管的代表符号图。图 a) 表示直热式, 而图 b) 则表示間热式。

若将灯絲与电源接通, 則有电流通过灯絲使阴极发热。当阴极温度达到一定数值时, 阴极产生热电子发射现象, 有电子从阴极发射到周围空間。当电子逸出金属表面时需要作功, 于是这些电子就失去了它們原有的絕大部分动能, 使得运动速度减至很小, 离开阴极的速度很慢, 加之先逸出的电子在阴极表面附近形成負电場,

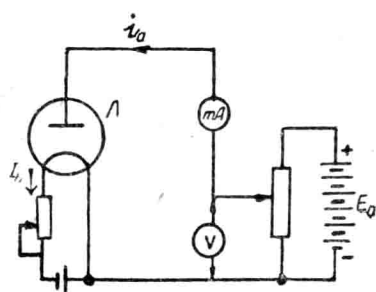


图 14-7. 真空二极管电路。

使电子的速度减为零。因而使阴极所发射出的电子积聚在阴极附近的空間, 形成了空間电荷。这个区域称为負空間电荷区。如果在阳极和阴极之間加一电压, 使阳极电位高于阴极, 如图 14-7 所示, 那么从阴极发射出的电子受到阳极正电場的吸引力, 而由阴极向阳极移动, 形成了阳极电流。习惯上規定电流的方向与电子流的运动方向相反。

如果把阳极电源的极性反接, 使阳极的电位低于阴极, 那末, 阴极发射出的电子, 受到了阳极負电場的排斥力, 就不能跑向阳极, 因而沒有阳极电流。由此可知: 二极管只允許电流由阳极流向阴极, 这种特性称为二极管的单向导电性。

(二) 伏安特性

真空二极管中的电流决定于加在阳极和阴极間的电压 (阳极电压) 和阴极加热温度。如果阴极温度不变, 那么阳极电流 i_a 随着阳极电压 u_a 而变化。将 i_a 随 u_a 的变化表成曲綫形状, 即 $i_a =$

$=f(u_a)$ 曲线。这种曲线称为二极管的伏安特性曲线，如图 14-8 所示。伏安特性形成原因说明如下：

当 $u_a < 0$ 时，阳极电流 i_a 实际上并不等于零，其原因是由于电子飞离阴极时，速度不同，其中速度较大的一些电子能克服阳极排斥力而到达阳极，形成极为微弱的电流。这种电流一般不予考虑。

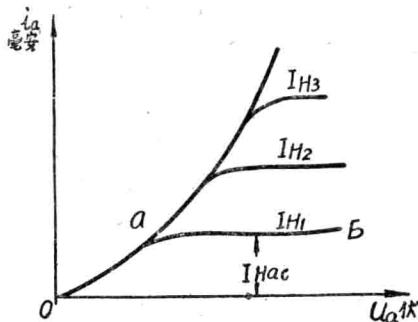


图 14-8. 在不同的阴极加热电流 I_H

时的伏安特性曲线族。

当阳极电压逐渐向

正的方向提高时，电流也逐渐增大，但并非从阴极逸出的电子全部到达阳极，而有很大一部分聚集在阴极附近空间形成所谓空间电荷。这些电荷带有负电，排斥着从阴极飞向阳极的电子，阻碍了阳极对它们的吸引，只有那些离开阴极时初速较大的电子才能到达阳极，因此最初一段 i_a 增长很慢。

但是当 u_a 更大时，阳极对电子吸引作用就越来越大，也就是有越来越多电子穿过空间电荷区域到达阳极。最后，当阳极电压 u_a 为某一足够大的数值时，发射的电子可以全部都到阳极上去，这就形成饱和电流。此后电压再增加，电流也不会增加了，因为阴极发射电子的数目决定于阴极的温度。因此，阳极电流到达饱和以后，只有提高阴极温度，才能使阳极电流继续提高，这是因为阴极发射电子数目增加了的缘故。但是一般电子管在正常运用时，阴极加热温度是保持不变的。

通常电子管运用于某一温度的未饱和阶段。这段可用 $i_a = K u_a^{3/2}$ 近似地表示出来，这就是所谓二分之三次方定律。由于

此公式实用价值不大,这里不拟詳加証明。

(三) 参数及額定值

(1) 內阻 R_i 在使用和計算二极管的电路时,除了利用上述的特性曲綫外,还可利用真空二极管內阻 R_i 的概念。內阻 R_i 是用来表示阳极电流与阳极电压之間在数量上的关系的,它定义为在伏安特性曲綫的任一点阳极电压的增量与阳极电流的增量的比值:

$$R_i = \frac{du_a}{di_a} \quad (14-5)$$

从上面的关系可知,二极管的內阻是一个随二极管的阳极电压的变化而变化的可变量。通常在电子管手册中查到的二极管內阻属于特性曲綫上的直綫部分,因此它的数值是常数。

几乎所有整流二极管的內阻大約都有数百欧姆,因此整流二极管只适用于小功率的整流器以及高电压的整流器中,因为对于小功率的整流器來說,效率不起重要作用,而对于高电压的整流器來說,二极管中的电压降与負載上的电压降相比是很小的。

(2) 阳极耗散功率 P_a 从阴极发射出的电子,受到阳极与阴极間的电場作用,飞向阳极。当它与阳极相撞时,将动能傳給阳极,使阳极发热。設每一个电子到达阳极时所具有的能量为 $\frac{1}{2}mv^2 = eU_a$ (設电子离开阴极的初速为零),并設每秒钟內共有 N 个电子与阳极相撞,則阳极每秒钟吸收的能量为:

$$P_a = NeU_a \quad (14-6)$$

由于

$$I_a = Ne, \quad (14-7)$$

所以阳极上消耗的功率为

$$P_a = I_a U_a \text{ (瓦)}. \quad (14-8)$$

在阳极上所消耗的功率转变成热能，使阳极温度升高。如阳极温度过高，它将放出气体，破坏了正常的真空情况，甚至使阳极融化而损坏。因此在使用电子管时，其阳极的损耗绝不可超过允许的最大值。这个数值可在电子管的手册中查出。

(3) 阳极的最大允许平均电流 I_a 及最大允许脉冲电流 I_{ma} 从阳极耗散功率可以看出：阳极电流加大，消耗功率亦随之增大，因此阳极电流不能过大，否则电子管就会被损害。同时，最大允许的脉冲电流，亦不应超过一定数值，超过后，也会损坏电子管。

(4) 最大的反向电压 U_b 。当我们真空二极管阳极和阴极接至交流电压以进行整流（即把交流电变为直流电的过程）时，在阳极电压的正半周，有阳极电流产生，于是在负载 R 上有电位降，故阳极电压小于外加电压；但在交流电压的负半周，则没有阳极电流，于是外加电压全部加于阳极上，因此这时二极管阳极与阴极之间的电压最大。二极管所能承受的反向电压是有一定限制的。当外加电压的幅度超过了规定数值后，往往会引起电极间漏电过大，这样便破坏了二极管单向导电性。

(四) 二极管的类型

二极管根据它的用途可分两大类：一类用于整流，一类用于检波。本章所讨论的整流用的二极管又可根据其许可的电压范围分为：

(1) 低压和中压用的整流管 低压整流管广泛应用在各种类型的整流线路中，以及控制和调节系统中，平均电流可达到 500 毫安。中压整流管常用于各种试验设备中，平均电流可达 100 毫安。

(2) 高压用整流管 这种整流管的电压可达 200 千伏以上，电流可达 5 毫安。