

无线电电子学

上册

华南师范学院物理系编

孙崇德主编

人民教育出版社

73.45
673

无线电电子学

上册

华南师范学院物理系编
孙崇德主编

人民教育出版社

1977年·北京

无线电电子学

上 册

华南师范学院物理系编

孙崇德 主编

*

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

*

1977年2月第1版 1977年11月第1次印刷

书号 13012·043 定价 1.90 元

编者的话

本书是根据华南师范学院物理系近几年来教学实践中编写的讲义改编而成的。内容包括：二极管及单相整流电路、晶体管低频放大器、电子管低频放大器、直流放大器、正弦振荡器、调制、解调与变频、超外差式收音机、脉冲技术、农村有线广播、电视、数字集成电路、电子仪器共十二章分上下两册。

为了突出重点，避免不必要的重复，除在放大器部分用两章篇幅按晶体管和电子管分别编写外，其他各章则合起来编写，以利于读者对照、类比，更好地掌握电子器件与电路的知识。

本书以讲解电路为主，电子器件为副。对于电路力求将理论与实践，数学分析与物理概念密切结合，着重基本原理和基本训练，以培养学员独立分析问题和解决实际问题的能力；对于电子器件（晶体管、电子管等）只介绍其结构、特性、参数和使用时应注意的问题，至于工艺和内部物理过程则不作深入的探讨。

各章设有内容提要和小结，以归纳学习的重点和基本要求，并设有思考问题和习题，方便读者自学，还附有一些技术资料，可供查阅。

本书编写工作，第一、七两章由孙崇德、何学淡同志负责。第二、十两章由何锡年同志负责。第三章由黄建铭同志负责。第五章由何学淡同志负责。第九章由戴明淡同志负责。大纲和第四、六、八、十一、十二各章以及全书的修改定稿由孙崇德同志负责。黄振鹏同志参加了初稿的审阅。本系76届、77届部分同学也参加了编写和整图工作。

本书在编写过程中得到广东省科技情报所、广东省广播事业局、广东省五金交电公司、广东工学院、中山大学、广州广播设备厂、广州曙光无线电厂、广州南粤无线电厂、广州南方无线电厂、惠州无线电厂、惠州地区五金交电公司、惠阳县广播站、佛山无线电一厂、中山无线电厂、上海无线电十八厂、上海广播器材厂、上海元件五厂、上海无线电十四厂、上海电讯器材厂、上海无线电十九厂、天津无线电厂、河南省安阳无线电一厂等有关单位的大力支持和帮助，我们在此表示衷心的感谢。

由于我们的思想水平不高，业务理论知识有限，书中肯定会有不少缺点和错误，希望读者给予批评指正，以便修改提高。

主编 孙崇德

1977年10月

目 录

第一章 二极管及单相整流电路

1-1 真空二极管的构造和特性	1	1-6 整流电路	25
1-2 热阴极充气二极管的构造和特性	7	1-7 滤波电路	38
1-3 半导体的结构与导电性能	10	1-8 整流电路实例	49
1-4 PN结的特性	14	实验 整流滤波电路	54
1-5 晶体二极管的结构、特性与参数	17	附录 周期信号的频谱	55

第二章 晶体管低频放大器

2-1 概述	63	实验 晶体管直流和交流参数的测量	98
2-2 晶体三极管	64	2-6 阻容耦合放大器	100
附录 国产半导体器件型号命名法	73	实验 阻容耦合放大器	108
2-3 晶体管放大器的工作原理	74	2-7 变压器耦合放大器	109
附录 增益的分贝表示法	77	2-8 放大器中的反馈	111
2-4 偏置电路及工作点的稳定	78	2-9 低频功率放大器	118
附录 放大器在工农业生产中应用的 简例	84	实验 推动级和功放级串级的研究	128
2-5 晶体管的 h 参数等效电路	85	2-10 晶体管扩音机	128
附录一 等效电源定理	93	2-11 场效应管放大器	131
附录二 晶体管三种接法的比较	96	附录 光敏二、三极管简介	133
		2-12 集成化低频放大器	134

第三章 电子管低频放大器

3-1 真空三极管	141	3-7 电子管扩音机	181
3-2 多极管	151	实验 14 瓦电子管扩音机	188
3-3 阻容耦合电压放大器	155	附录一 国产电子管命名法	194
3-4 放大器中的负反馈	166	附录二 国产扩音机常用部分电子管 的性能	196
3-5 低频功率放大器	168		
3-6 倒相电路	177		

第四章 直流放大器

4-1 直流放大器	199	4-4 串联式稳压电路	219
4-2 差动放大器	204	附录 实用稳压电源	231
附录 直流放大器应用举例	212	实验 稳压电源	235
4-3 并联式稳压电路	214		

第五章 正弦振荡器

5-1 单谐振回路	237	5-5 振荡的稳定	272
5-2 耦合谐振回路	249	实验 正弦振荡器	276
5-3 振荡的建立	263	5-6 RC 振荡器	276
5-4 LC 振荡器	265		

第六章 调制、解调与变频

6-1 无线电广播的基本原理	284	6-7 幅度检波	315
6-2 无线电波的传播	288	6-8 频率检波	324
6-3 非线性电路及其研究方法	292	6-9 变频	331
6-4 调幅	294	附录一 简易信号发生器	341
6-5 调频	305	附录二 DTX-AM100 袖珍电台	342
6-6 电视广播	311		

第一章 二极管及单相整流电路

〔内容提要〕 本章前五节主要介绍真空二极管, 充气二极管和晶体二极管的结构、工作原理、特性和参数。后三节着重介绍半波整流、全波整流和电容滤波器、电感滤波器, T 型滤波器和 π 型滤波器的电路结构、工作原理、特性和整流效率、纹波因数等的一般计算方法。

PN 结是半导体器件的基本结构。因此, 在本章将作比较详细的叙述。另外在介绍整流、滤波电路的同时还将分析常用的扩音机、电视机的电源电路, 并且以举例的方式介绍整流、滤波电路的一般计算方法。

1-1 真空二极管的构造和特性

一 真空二极管的构造

真空二极管的主要结构如图 1-1-1 所示。(a) 是二极管的外形图, (b) 是二极管的构造, (c) 是二极管的符号。在高度真空的玻璃管壳内装有两个金属电极, 里面的一个是阴极 (记作 K), 起发射电子的作用。套在阴极外面的电极叫阳极或板极 (记作 a 或 p), 能接受由阴极发射来的电子流。

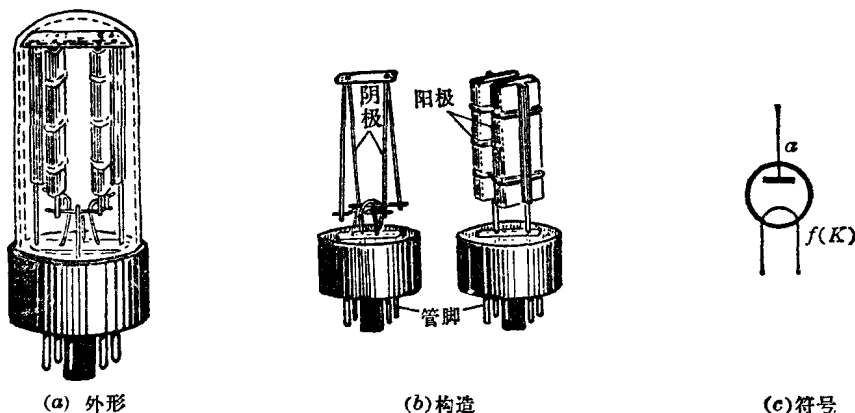


图 1-1-1 真空二极管的构造和符号

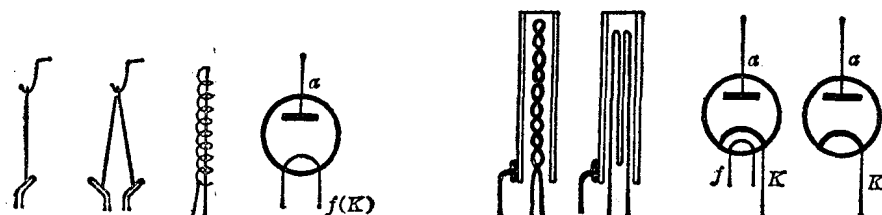
金属原子的外围电子 (价电子) 受原子核吸引较弱, 因而能在各金属原子之间自由运动, 成为公有化的自由电子, 它们在金属内时刻不停地作无规则的热运动, 其能量决定于金属的温度 (温度愈高能量愈大), 并且, 在同一温度下, 金属中各电子所具有的能量并不相等。尽管有的电子能量很大, 但是在常温下电子不能从金属里飞出来, 这表明金属表面对电子有一种束缚作用。使电子从金属内飞逸出来的办法很多, 其中之一是用加热的办法提高金属的温度增大电子的动能,

使那些能量较大的电子能克服金属表面束缚力向外飞出, 这就是热电子发射现象。

实验表明, 金属温度愈高, 发射的电子也愈多。为帮助自由电子从金属中飞逸出来所必须补充给它的最低能量 W , 称为电子的逸出功。不同的金属, 其电子的逸出功也不同。由此可见, 为使阴极发射更多的电子, 必须采用逸出功小又能耐高温(即熔点高)的金属材料作阴极。通常是在阴极基底金属(如钨、钼、镍)上涂敷一层逸出功较小的其他金属(如钍、钡、铯或碱土金属钡、锶、钙)的氧化物薄膜。后者叫氧化物阴极, 因为它在比较低的温度下(约 $1000\sim 1150\text{ K}$ 即 800°C 左右)可获得较大的电子发射, 故为小功率电子管所普遍采用。钍层钨阴极工作温度在 $1800\sim 1900\text{ K}$, 常用在中功率电子管上。纯钨阴极工作温度在 $2500\sim 2600\text{ K}$, 只用在大功率电子管上。

按照给阴极加热的不同方式, 阴极可分成两种:

一种是直热式阴极。其加热电能直接通过阴极, 使电能变成热能, 以直接升高阴极的温度。直热式阴极常做成直线型或螺旋线型, 如图 1-1-2(a) 所示。由于这种阴极材料的热容量小, 所需要加热的功率也小, 故在干电池供电的小功率直流电子管中, 一般都用直热式阴极。



(a) 直热式的灯丝阴极及其二极管的符号

(b) 旁热式阴极及其二极管的符号

图 1-1-2 直热式和旁热式灯丝及其二极管的符号

另一种是间热式(或旁热式)阴极, 常做成圆筒形的套管, 如图 1-1-2(b)。在套管中间放入加热用的热丝(也叫灯丝, 记作 f)。热丝上涂上氧化铝(Al_2O_3)作为绝缘, 以防止热丝与阴极间通路。加热电流不直接通过阴极, 而是通过阴极中心的金属热丝, 由热丝加热间接地使阴极温度升高。由于旁热式阴极面积较大, 热容也较大, 用交流电加热时阴极温度能保持稳定, 不随电流交变而变化, 故最宜用在交流供电的场合, 所以旁热式阴极应用最广。但是, 也由于是间接地给阴极加热, 故必须在接通热丝电源一段时间(约半分钟)后, 待整个阴极温度升高发射电子时, 电子管才能开始进行正常工作。

直热式阴极电子管在大多数情况下不能用交流电加热, 但用作整流二极管时不受此限制。

板极的功用是收集阴极发射出来的电子, 因此, 板极常加正的电压(即板极电位高于阴极)。由于电子撞在板极上后, 电子动能变成板极的热能, 板极温度将升高。为防止过热烧坏板极, 防止因板极温度过高而放出材料内残余气体影响管内的真空度, 在正常工作时, 板极温度必须低于阴极的温度。板极多采用熔点高的镍制成(大功率管用钨或石墨), 为了增大热幅射的散热能力, 在板极上常涂有碳化物黑色薄膜。

阴极在很高温度下工作, 由于空气中存在氧气, 炽热的阴极就会与氧气起反应而损坏。为了避免处于高温下工作的阴极氧化损坏, 以及避免电子与气体分子相碰撞, 电子管均抽成高度真

空,其气压不超过 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 毫米汞柱。所以,电子管也称为真空管。

二 真空二极管的特性

图 1-1-3(a)是研究二极管特性的实验电路。灯丝电压固定为 U_f 伏,因此阴极温度就固定在发射电子所要求的工作温度上。 K 是双刀双掷开关。 K 掷向右边时,二极管的板极接电源的正极,阴极接负极; K 掷向左边时,二极管板极和阴极所加电压的极性就反转过来。逐点改变板压 U_a ,记下相应的各点板流 I_a ,绘成曲线如图 1-1-3(b)。称为二极管的伏安特性曲线。它反映了通过二极管的板流随板压变化的规律性。从曲线形状上看,二极管工作时有以下三个特点:

1 U_a 为负时,即板极电位低于阴极电位时,板流等于零。说明真空二极管在负板压作用下不导电。

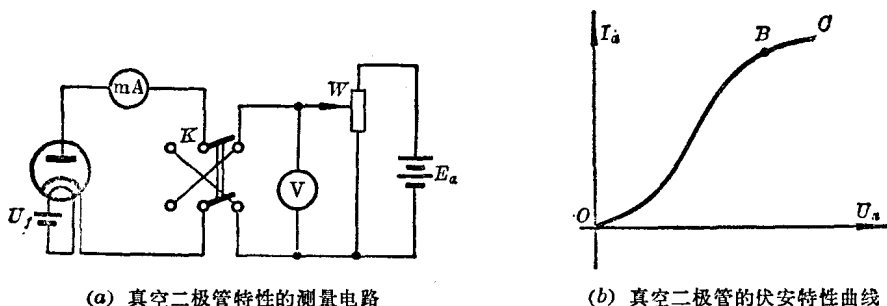


图 1-1-3 真空二极管特性的测量电路及其伏安特性曲线

2 U_a 为正且比较小时,板流 I_a 随板压 U_a 的增加而增加。说明真空二极管在正向电压作用下导电,板压有控制板流的作用,但 I_a 与 U_a 间不是成直线地变化。

3 当 U_a 为正且很大时,板流 I_a 基本上不随 U_a 的增加而增加。说明真空二极管在很高的正板压作用下,虽然导电,但板压失去了控制板流的作用。

由此可见,真空二极管具有单向导电的特性,通过二极管的板流 I_a 与加在板、阴极间的板压 U_a 是非线性关系,不服从欧姆定律。故二极管常称为非线性元件,以区别于一般电阻、电容和空心电感等线性元件。

为什么真空二极管有图 1-1-3(b)所示的伏安特性呢?

应该“从事物的内部、从一事物对他事物的关系去研究事物的发展。”我们知道,当 $U_a=0$,即板、阴极间没有外加电压作用时,灯丝通电,阴极被加热向空间发射电子,它们围绕阴极形成所谓电子云,即空间电荷。由于电子带负电,故空间电荷会阻碍阴极发射电子,使那些刚从阴极发射出来而动能较小的电子又折回到阴极上去。因此,空间电荷至阴极间存在着减速电场,由于空间电荷与阴极的相互作用,就构成了电子从阴极发射出去和折回阴极的两个相对立的矛盾运动。当空间电荷至阴极间的减速电场还不够强时,电子发射出来的运动占优势。其结果,增大了空间电荷密度,加强了减速电场,从而使发射运动逐步削弱,折返运动逐步加强。当减速电场达到某一强度,阴极发射出来的电子数与返回阴极的电子数恰好相等时,发射与折回运动达到动态平衡,空间电荷密度就不再增大。若板极距阴极较远,最大动能的电子还不足以飞到板极,则 $I_a=0$ (准确地说, $U_a=0$ 时, $I_a \neq 0$,但因电流极小,可视为此时没有板流)。

这时,如果外加正板压 U_a ,则板极至阴极的空间出现板极加速电场,并且,部分空间电荷在正板压的作用下被引至板极形成板流,空间电荷密度减小。结果,这两种情况都削弱了空间电荷至阴极间的减速电场,从而打破了原来的动态平衡,使电子发射运动占了优势,直至发射出去与折返回来的电子数之差构成板流为止,新的动态平衡又在新的条件下出现。此时,板极不断地从空间电荷里吸收电子形成板流,到达电源正极。在电源电动势作用下,电子由电源负极源源不断地供给阴极作热电子发射,以维持新的动态平衡需要。

对应于一个 U_a 值的动态平衡状态,就有一个相应的 I_a 值。随着板压 U_a 从零慢慢增大,板流 I_a 也增大,相当于图 1-1-3(b) 二极管伏安特性曲线的 OB 段。由于 U_a 增大,板极加速电场增强,电子云中有较多的空间电子被吸入板极,使 I_a 也很快增大。

可是,当正板压 U_a 增大到一定程度时, I_a 增大的速度变慢,以致最后 I_a 基本上不随 U_a 增加,而维持在一定数值上,相当于伏安特性曲线的 BC 段。从二极管内部的物理过程来看,这是因为当加速电场大到超过阴极附近电子云至阴极间的减速电场时,板、阴极间合成电场处是加速场,围绕阴极的电子云消失,热电子从阴极发射出来后能全部加速地飞到板极,于是板流等于阴极的最大发射电流。由于阴极温度一定时(即灯丝加热电压固定),最大发射电流也有一定值,故板流基本上不随板压增大而增大。这时在板流叫饱和板流。

如果外加板压 U_a 为负值,即阴极电位高于板极电位时,空间电荷至阴极间减速场得到加强,则电子返回阴极的运动增强,原有的动态平衡被打破,此时,不但能量小的电子,而且中等能量的电子也会返回阴极,因此,折返回去的电子数比发射出来的要多,电子云密度减少。直至最后,发射与折返的电子数维持相等,在新的条件下又出现新的动态平衡。因负板压排斥电子,故板流为零,二极管不导电。但是当负板压大到一定数值时,金属板里的电子能在很强的阴极加速电场作用下,从板极里被硬拉出来,向阴极里加速地飞去。形成所谓场致发射,二极管被击穿而反向导电,单向导电性被破坏。这时能量强大的电子流射向阴极,还会击毁阴极,故二极管最大负板压必须有一定限制。

从以上的分析中我们清楚地看到,由于二极管的内部结构使热阴极能够发射电子,而这些热电子形成的空间电荷又成为阴极继续发射电子的障碍,于是就构成了电子管内电子发射运动与折返运动的矛盾斗争。当从外部在板阴之间加进电压 U_a 后,打破原来的动态平衡,促使矛盾斗争达到激化。 $U_a > 0$,削弱了空间电荷至阴极间的减速电场,使发射运动加强,折返运动减弱,单位时间内两者电子数之差形成了板极电流 I_a ,二极管导电; $U_a < 0$,增强了空间电荷至阴极间的减速电场,使折返运动加强,发射运动减弱,板极排斥电子,板流 $I_a = 0$,二极管不导电。只要 U_a 为一定值,则在此条件下发射运动与折返运动的矛盾斗争就达到动态平衡。可见,真空二极管内部电子发射运动与折返运动的矛盾斗争是二极管具有单向导电和伏安特性曲线性的根本原因,外加板压的作用则是第二位原因。

三 真空二极管的参数

为了确定二极管质量的优劣与运用条件,除了特性曲线外,人们还定义了一系列参数,用它作为选用二极管的依据。在电子管手册里都有列出,这里只介绍一些主要的参数。

1 内阻

真空二极管的内阻是板极与阴极之间的电阻,它有直流内阻和交流内阻两种。

(1) 直流内阻一是指二极管导电时,在额定灯丝电压下,直流板极电压 U_a 与直流板极电流的比值。

$$R_n = \frac{U_a}{I_a}$$

它表示板压控制板流的能力。 R_n 大,说明板压控制板流的能力弱;反之 R_n 小,说明板压控制板流的能力强。显然,图 1-1-4 中点 A_1 处的直流内阻 R_n 就等于由原点 O 至 A_1 点间所作直线 OA_1 的斜率的倒数。由于二极管伏安特性曲线的非线性,曲线上不同点处的直流内阻也不同。在有空间电荷作用的 OB 段曲线范围内,曲线下部的直流内阻比上部近于直线部分的直流内阻为高(即空间电荷密度大的时候电子管内阻高)。

对于整流电路常用的小功率真空二极管,其直流内阻的平均值都在 200 欧姆左右。这就是说,若通过二极管的直流板流为 100 毫安时,在二极管上将产生约 20 伏的电压降落。使用期过长的电子管,其阴极发射电子的能力将下降(即衰老),直流内阻将增大。用做整流时,要求二极管上直流电压降愈小愈好。

(2) 交流内阻一交流内阻又称微变内阻或简称板阻,它是指二极管导电时,在额定灯丝电压下,板压的增值 ΔU_a 与相应的板流增值 ΔI_a 之比的极限。

$$r_n = \lim_{\Delta I_a \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \right) = \frac{dU_a}{dI_a}$$

故交流内阻 r_n 是等于特性曲线上某点 A_2 的切线斜率的倒数。它与 R_n 是不同的,如在特性曲线的水平部分, BC 段任意一点上, R_n 为有限值而 r_n 却为无限大。只有在特性曲线的直线部分 R_n 才近似等于 r_n 。

通常在电子管手册上所列出的内阻即指实际特性曲线上直线部分的电阻。

由于 R_n 和 r_n 的大小反映了二极管性能的优劣,因此称它们为二极管的性能参数。

2 额定灯丝电压 U_f 与灯丝电流 I_f 一是指电子管正常工作时的灯丝电压和通过其中的电流。其值过大,将使阴极温度过高,缩短电子管寿命;反之,若过小,则阴极发射电子的能力降低,影响电子管的正常工作。对氧化物阴极来说,允许有额定值 $\pm 10\%$ 以内的差额。

3 最大板极反向电压 $U_{af\max}$ 一是指板极电位低于阴极时板阴极之间所能承受的最大负板压,若电子管上加的是交流电,则 $U_{af\max}$ 是指最大板极反峰电压。此电压的大小决定于电子管的绝缘程度及真空度。如果反向电压过高,超过电子管电极间的绝缘强度,则将发生击穿。

4 最大板极耗散功率 $P_{a\max}$ 一是指电子管板极在允许的工作温度下能耗散的最大功率。由于板极加正电压时,电子流被加速而撞在板极上,电子在阴极与板极之间的加速场中所积累起来的能量完全转变为热能使板极发热、温度升高。在板极上如此产生的热量是一种无益的损耗,称

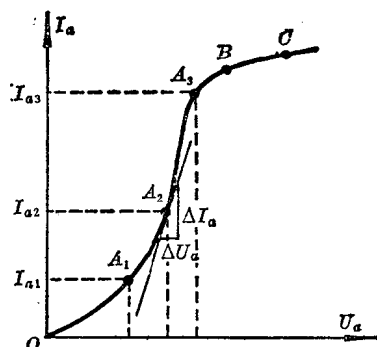


图 1-1-4 真空二极管的伏安特性曲线

为板极损耗。用功率表示,则板极耗散功率等于板极电压 U_a 与板极电流 I_a 的乘积,即 $P_a=U_a I_a$ 。板极应能及时将所得到的热能散发出去,否则温度过高会使板极发红或熔化。故与最高工作温度对应的最大允许板极损耗功率称为最大板极损耗功率 P_{amax} 。因此,使用电子管时,必须注意保持板极损耗在允许的范围内,即应使电子管正向板压 U_a 与正向板流 I_a 之积不超过 P_{amax} 。

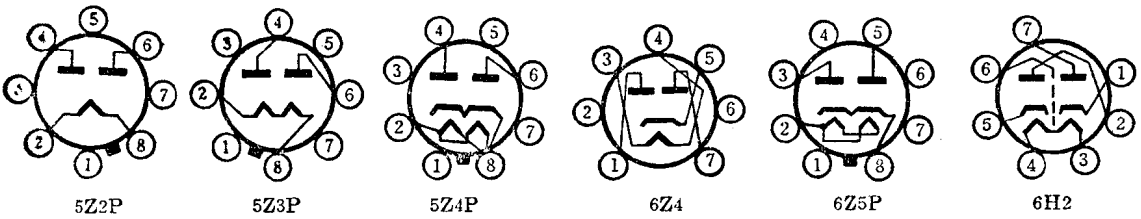
在电子管手册中,对二极管常常不给出 P_{amax} 而给出最大板极电流 I_{amax} ,因为它是由最大板极耗散功率所决定的。在数值上 I_{amax} 是指通过二极管的最大直流电流。

P_{amax} 、 I_{amax} 、 U_{afmax} 是二极管的最高额定值,超过这些数值会使工作不正常,甚至会毁坏二极管,因此称它们为极限参数,在选管时要注意这一点。

表1-1列出了几种常用的真空二极管及双二极管(即在一个管泡内装进了二个二极管。它们或共用一个阴极,如:5Z2P与5Z4P,或有各自的阴极,如6H2)的电气参数^①。

表 1-1

型 号	用 途	阴 极 型 式	灯 丝		最 高 额 定 值			国外同类管型号
			$U_f(V)$	$I_f(A)$	$U_{afmax}(kV)$	$I_{amax}(mA)$	$I_a(mA)$	
5Z2P	全波整流	直热	5	2	1.4	400	2×62.5	5Y3C 5Y3
5Z3P	"	"	5	3	1.55	675	2×112.5	5U3C 5V4G
5Z4P	"	间热	5	2	1.35	375	2×62.5	5U4C 5Z4GT
6Z4	"	"	6.3	0.6	1.00	300	2×37.5	6U4Π 6X4
6Z5P	"	"	6.3	0.6	1.10		2×37.5	6U5C 6X5
6H2	检波, 弱电整流	"	6.3	0.3	0.45	90	2×10	6X2Π 6AL5
1Z11	高电压弱电整流	直热	1.2	0.2	20.0	2	0.3	1U11Π
2Z2P	"	间热	2.5	1.75	12.5	100	6.8	2U2C



① 国产二极管命名法: 由四个部分组成

5	Z	2	P
数字: 表示加热电压 U_f 的伏特数(有小数时只取整数)	字母: 表示管子内部结构	数字: 用以区别同类型管的序号(电参数不同而已)	字母: 表示外壳的形状
5——5V 6——6.3V 1——1.2V 2——2.5V	D——二极管 H——双二极管 Z——整流管		P——普通玻璃管 无——指形管($\phi 19$ 和 22.5mm)

1-2 热阴极充气二极管的构造和特性

二极管用作整流时,希望通过它的电流很大,但管压降要很小。可是从真空二极管伏安特性曲线形状的分析中知道,在低板压区由于空间负电荷的存在,使二极管内阻很大,板流很小。因此为了获得较大的板流,就必须提高板极电压,以削弱空间负电荷至阴极间减速场的作用。但是这样做的结果,既增加了管压降,又增加板极耗散功率。可见,空间负电荷的影响,是限制真空二极管在低板压时板流增大的主要因素,若能设法补偿空间负电荷的影响,就能制成大电流低压降的大功率整流二极管。热阴极充气二极管就是因此而出现的,它是利用气体电离后的正离子来补偿空间负电荷作用的。

一 热阴极充气二极管的构造

热阴极充气二极管的构造如图 1-2-1 所示,图中(a)为它的内部构造,(b)是代表符号。它是在玻璃管泡内排除空气后,又充入低压气体(汞汽或氩、氙等惰性气体)。因此,气体电离后,除了电子外还有正负离子参加导电,故充气二极管常称为离子管。

为适应气体放电固有的特性及大功率整流的需要,热阴极充气二极管各电极的结构的特点是:

1 因受气体电离电压的限制,灯丝加热电压不能高(常为 2.5~5 伏)。为了通过大的电流,灯丝常用卷成螺旋形的粗金属丝或金属带做成。

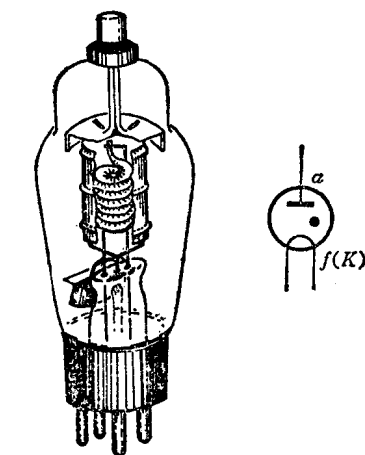
2 小功率的阴极做成直热式。大功率的阴极做成旁热式,涂有氧化物的镍制阴极圆筒,套在螺旋形的钨丝加热器上。为了减少阴极的热辐射损失,提高发射效率,减弱正离子对阴极的轰击,延长阴极的寿命和避免阴极发射的高速电子碰撞玻璃管壳产生二次电子发射。大功率充气二极管的阴极常放在与阴极相连接的圆柱状屏蔽筒里面。

3 小功率整流管的板极多是用镍制的圆盘;大功率整流管的板极则是用铁或石墨制成,或为半球形,罩在阴极上,或为顶端封闭的圆柱形,套住阴极。

二 热阴极充气二极管的伏安特性

在真空二极管符号图中,加圆点就是热阴极充气二极管的符号,圆点表示管内充有气体。

按图 1-2-2 所示电路联接,当灯丝由额定电压加热后,慢慢增加板极电源电压,可测得如图 1-2-3 所示的热阴极充气二极管的伏安特性曲线。从伏安特性曲线上看,热阴极充气二极管工作时有如下的特点:



(a) 充气二极管的构造 (b) 充气二极管的符号
图 1-2-1 充气二极管的构造及其符号

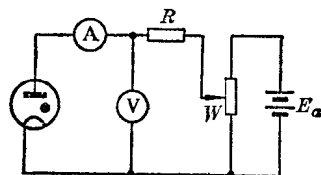


图 1-2-2 充气二极管特性的测量电路

1 当板压很低时,板流是很小的。随着板压的增加,板流也慢慢增加。这相应于曲线 OA 段。

2 当板压达到一定数值 U_{ay} ,管内的气体导电产生强烈的弧光放电,板流急剧的增加,这时,我们就说充气管起燃了。由于板流迅速增加,在板极电路电阻 R 上电压降也加大,故充气管的压降在起燃后的瞬间下降,(如图1-2-3曲线中 AB 段所示)。这样就可限制通过管子的板流保护管子,故 R 叫限流电阻。

3 充气二极管点燃后, BC 段曲线表明,点燃后的板压基本上维持恒定(通常为10~12伏),与板流几乎没有什么关系。

4 当板流超过一定数值后(曲线 CD 段),管压降随着板流的增大很快地增大,充气二极管会很快地损坏。故与 C 点对应的板流 I_{amax} 是充气二极管能允许的最大板流。

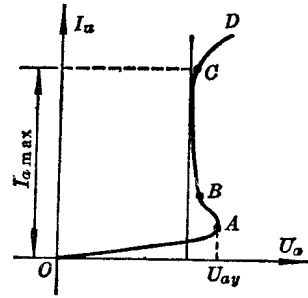


图1-2-3 充气二极管的伏安特性曲线

从伏安特性可见,热阴极充气二极管具有单向导电性,也是一个非线性元件。但是它的曲线形状与真空二极管完全不同。那么充气二极管伏安特性所反映的规律性,其物理本质又是什么呢?

我们知道,充气管区别于真空管的地方就在于管泡排除空气之后又充进了低压气体。而气体在正常状态是绝缘体,不导电的。

当板压很低、小于 U_{ay} 时,热阴极发射的大量电子构成空间负电荷,积聚在阴极附近,它们排斥从阴极继续发射出来的电子。只有那些速度稍大的部分电子,在低板压作用下加速运动到板极,才构成板流。由于这些电子的动能还没有大到使气体分子或原子发生碰撞电离的程度,故这时参与导电的电子流很微弱(这与图1-1-3曲线 OA 段相对应)。

当板压升高时,电子流也逐渐增大,电子的运动速度也在增大。当板压达到一定数值,电子获得足够的能量,能够与气体原子发生碰撞并将气体内的电子击出来时,气体电离而导电,产生弧光放电。气体原子大量电离后产生的大量电子、负离子与正离子,在板极与阴极间的电场作用下分别向板极与阴极移动。由于正离子的质量远大于电子的质量,正离子移向阴极的运动速度比电子向板极运动的速度低得多,因而正离子在空间逗留的时间比较长。这样向阴极慢慢移动的正离子在阴极附近就形成一个正电荷区,从而削弱了阴极附近原有空间负电荷的影响,直到阴极附近正离子数目和空间电子数目相等,空间电荷的作用被正离子的作用所完全中和时为止,在阴极附近就出现了平均电荷等于零的等离子区。由于等离子区对电子不产生减速作用,故充气管点燃时内阻急剧变小,因而通过大板流时,管压降亦很小,在曲线 BC 段范围内,管压降差不多保持恒定。

但是,当板流增加到超过 I_{amax} (也就是阴极的最大发射电流)值时,由于阴极发射能力的限制,为了增大板流,则只有增大管内电压降,以便使正离子获得较大的动能,撞击阴极表面产生大量的二次电子发射补充。这就是图1-2-3曲线 CD 段出现管压降随板流继续增大而迅速升高的现象的原因。然而这种情况是不正常的,因为这时阴极表面氧化物层将因正离子高速撞击而损

坏,寿命大为缩短。故热阴极充气二极管是不允许工作在特性曲线 CD 段的。任何时候,板流均不得超过 $I_{a\max}$ 值。

三 热阴极充气二极管的参数

1 最大许可整流电流 $I_{a\max}$

上面已述及,这是充气二极管的主要参数,其值等于阴极的正常发射电流。注意,作整流用时,通过管子的平均电流 I_a 和最大瞬时电流 I_{aM} 都不应超过 $I_{a\max}$ 值(通常使 $I_a = \frac{1}{3}I_{a\max}$)。

2 板极最大反向峰压 $U_{af\max}$

是指充气二极管作整流运用时,所能承受而不致引起逆弧的最大反向峰压。因为在整流电路中,加在二极管板阴极间电压是交变的,当充气管板压从正半周导电过渡到负半周时,虽然管子电弧熄灭,但由于放电空间的电子、负离子和正离子不能马上复合,因而部分正离子被吸往带负电的板极,部分电子与负离子则被吸往带正电的阴极,它们构成充气二极管的反向电流。当反向板压较低时,反向板流通常是很小的。可是如果反向板压很高,则获得大能量的正离子碰撞板极时能使板极产生二次电子发射,这些二次电子受此时处在正电位的阴极吸引而作加速运动,从而使气体重新电离,新的正离子作加速运动并撞击板极,又打出很多新的二次电子,如此扩展下去,会使逆电流迅速增加,产生逆电弧,整流作用被破坏。由于逆电流可能远远超过许可值,所以充气管将很快损坏。从以上分析可见,逆弧的产生主要是由于过高的反向板压而引起的,故必须对热阴极充气二极管的最大反向峰压加以限制。

3 灯丝电压与灯丝电流

对充气管来说,灯丝电压与灯丝电流不能比额定值高得太多,否则灯丝蒸发得快,缩短充气管的寿命;但也不能比额定值低得太多,否则阴极温度不高,发射电子量不够,为了满足外界电流增加的要求,将使管压降增大,并利用正离子对阴极的轰击来产生额外的电子,结果使阴极很快地损坏。因此,热阴极充气二极管的灯丝电压或电流,不能高于额定值的 10%,也不能低于额定值的 5%,故在电网电压不稳定的地区,使用汞汽整流管时,要用调压变压器随时调整电压。

四 使用热阴极充气二极管时的注意事项

充气二极管内的物理过程在本质上是与真空二极管的不同。这就决定了在使用中对充气二极管的一些特殊要求,除了上述三点外,还须注意:

1 保证灯丝预热时间

这可视管的功率大小及周围环境温度而定。在一般情况下,夏天应预热 3~5 分钟,冬天应预热 15~20 分钟左右。灯丝预热的目的是为了保证阴极达到额定的温度。在汞汽二极管中更重要的是让液体汞受热蒸发,使充气管内汞汽压强达到正常值(10^{-2} 毫米汞柱左右)。这时,电显著,管压降小,正离子运动速度没有超过允许限度,能保护阴极正常工作,不致遭受损坏。

2 严格遵守使用程序

通电源时,必须先加上灯丝电压,经过足够时间预热后再加板压;断电源时,必须先关断板

压,再关断灯丝电压。

3 改善环境温度

因为周围环境温度过高,充气管泡内温度也升高,使汞汽管内汞蒸气密度过大,电离的几率增大,在较低的反向板压时也会出现逆弧,严重影响管子稳定地工作。为了保证管泡温度不超过 $50\sim 60^{\circ}\text{C}$,当周围环境温度超过 35°C 时,应采用通风冷却的方法,使充气管颈底部温度降低(这就是汞汽管在工作时必须管泡朝上直立的原因)。

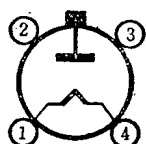
4 换上新汞汽管,或汞汽管长期搁置未用,或经过搬运,横放后,第一次使用时灯丝预热时间都应延长到半小时至一小时,以便使落在板极上的汞滴蒸发,避免产生逆弧,可延长管子的寿命。

5 充气二极管整流电路不能采用电容输入式滤波。原因是加上高板压的一瞬间,充气管的瞬时板流将超过 $I_{a\max}$ 而损坏充气管。所以常采用电感输入式滤波。

6 汞汽管在工作时,发生电离作用,常引起噪声,在接收机使用时,板极回路应加高频滤波装置。

表 1-2 是常用汞汽二极管的电气参数。符号 FG1-0.25/10 是表示此管为充汞汽整流二极管,平均板流 I_a 为 0.25 安,最大反峰板压为 10 千伏。

表 1-2

型 号	丝 压 U_f	丝 流 I_f	限 额		一 般 适 用 值		管 脚
			$U_{af\max}$	$I_{af\max}$	板流交流供给电压(有效值)	直 流 输 出 电 流	
EG1-0.25/10 (旧 866.866A)	2.5V	5A	10kV	1A	$<3.5\text{kV}$	0.25A	
EG1-0.3/8.5 (旧 866.866A)	2.5V	5A	8.5kV	1.25A	$<2.5\text{kV}$	0.3 A	
EG1-1.25/10 (旧 872.872A)	5V	10A	10kV	3A	$<3.5\text{kV}$	1.25A	

思 考 题

- 1 为什么真空二极管和充气二极管都具有单向导电性?
- 2 你能用简单实验的方法判断真空二极管的衰老情况吗?
- 3 为什么充气二极管在通电源时,必须先加灯丝电压后加板极电压,而关电源时要先关灯丝电压?
- 4 使用充气二极管时,为什么环境温度不能太高?

1-3 半导体的结构与导电性能

随着社会主义革命和社会主义建设事业的胜利发展,半导体及半导体器件在我国工农业生产,国防建设,科学研究及人民生活等方面,日益获得广泛的应用。那么,什么是半导体?它具有什么特性?半导体的导电性能与金属导电有什么不同。本节将讨论这些问题。

一 半导体的物理特性

大家知道,银、铜、铝、铁等金属材料是很容易导电的,我们把它们叫做导体;而塑料、橡胶、陶瓷、云母、石英、玻璃、木材和纸张等都不容易导电,尽管加很高的电压,仍然基本上没有电流,所以通常称之为电的绝缘体。如果用电阻率来表示物质的导电性能,导体的电阻率很小(约为 $10^{-6} \sim 10^{-3}$ 欧姆-厘米),绝缘体的电阻率很大(约 $10^8 \sim 10^{20}$ 欧姆-厘米)。导电性能介于导体与绝缘体之间的物质称为半导体,它的电阻率介于导体与绝缘体之间(约为 $10^{-3} \sim 10^8$ 欧姆-厘米)。如锗、硅、硒及大多数金属氧化物和硫化物、许多金属间化合物(如氧化铜、硫化铅、砷化镓、铟化铟……)等都是半导体。

半导体之所以能获得广泛的应用,不在于它的导电能力介于导体与绝缘体之间,而是由于半导体的导电能力具有在不同条件下发生很大变化的特性。

1 半导体的电阻率随温度、光照度的变化很大。例如温度每升高 1°C 半导体的电阻率下降 $3 \sim 6\%$,升高 10°C 约下降 75% ,而温度升高 100°C 时电阻率下降约50倍。可见,半导体的电阻率随温度的升高迅速下降,即其导电能力显著增加;另外,用光照射半导体时,半导体的导电能力也显著增加,光照度愈强,半导体的导电能力愈大。人们利用半导体的这种特性,可以制成供自动控制用的热敏元件和光敏元件(如热敏电阻、光敏电阻和光电管等)。

2 半导体的电阻率受半导体中杂质的影响很大。例如金属导体中含千分之一的杂质,电阻率的变化是微不足道的。但如果在纯硅中加百万分之一的杂质(如硼),硅的电阻率就会从原来的 2.14×10^5 欧姆-厘米降到 0.4 欧姆-厘米左右。因而人们利用掺杂的方法,制成不同性质,供不同用途的半导体材料。

二 半导体的结构

为什么有些物质容易导电,有些物质却不容易导电呢?

毛主席教导我们:“事物发展的根本原因,不是在事物的外部而是在事物的内部,在于事物内部的矛盾性。”当我们比较深入地分析了导体、绝缘体及半导体的内部结构后,就可以知道物质的导电能力是由物质内部的原子结构决定的。物质内部的载流子(即运载电荷的粒子,如自由电子等)愈多,导电能力愈强。

现在,我们先从物质的原子结构分析开始。大家知道,自然界的一切物质都是由原子组成的。而原子又是由一个带正电的原子核与若干个带负电的电子所组成,电子分层围绕原子核作不停的旋转运动,其中内层电子受原子核的吸引力较大,外层电子受核吸引力小。

对于金属导体原子来说,外层电子受原子核束缚力最小,因此有大量电子能挣脱原子的束缚在原子间自由运动而成为自由电子,它们在外电场作用下作定向运动而形成电流,因而金属的导电性能良好。这些大量的自由电子就是金属导体内的运载电荷的载流子。

对于绝缘材料来说,因为外层电子受原子核的束缚力很大,很不容易挣脱出来,因此形成自由电子的机会非常小,故绝缘材料的导电性能很差。