

# 热阴极脉冲拐点发射的快速测量\*

杨凌云 王书绅  
(中国科学院电子学研究所)

## 提 要

本文介绍了一种借助线路技术快速测定热阴极的脉冲拐点发射的方法。这一方法可避免测试对阴极的损伤,可提高测量的准确性,可用于比较不同热阴极的发射水平和监测寿命试验过程中阴极活性的变化。本文还叙述了热阴极脉冲拐点发射快速测量的原理,实现了拐点在伏安特性曲线上的自动显示,给出了鉴定拐点真实性的方法,并讨论了仪器的测量误差。通过对各种实用热阴极的大量测试表明,该仪器是有实用意义的。

## 一、引 言

热阴极性能的测试问题一直受到阴极工作者的重视。我们在研制阴极过程中,也深切体会到建立阴极发射的快速测试方法是非常必要的,因为它是客观地评价每种阴极的发射水平所必需。

热阴极的发射性能一般用测得的理想二极管伏安特性曲线来估价<sup>[1,2]</sup>。二极管的伏安特性曲线上通常有两个重要区域:一个是发射受阴极温度限制的区域(图1 A区);另一个是发射受空间电荷限制的区域(图1 B区)。这两个区域可分别用两个特征发射电流来表征。图1上a点对应的电流称弯曲点发射电流,它近似地表征温度限制的发射电流。该点的特征是位于二极管伏安特性曲线上曲率半径最小处,位于上凸曲线上二阶微分具有负的最大值处。弯曲点的位置可用斜率交叉点法或正切法近似地确定。

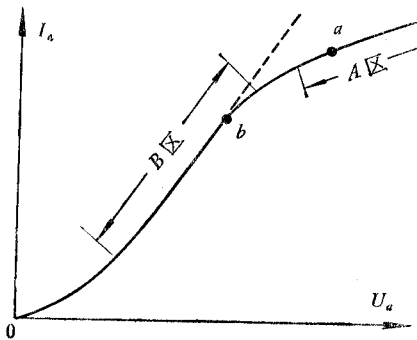


图1 理想二极管特性  
Fig. 1 Ideal diode characteristics

从热阴极在实际器件中应用的角度出发,我们关心的是发射在何时偏离空间电荷限制区域。为此在 $3/2$ 次方纸上或在双对数纸上作出二极管的伏安特性曲线,曲线开始偏离直线就是发射电流开始偏离空间电荷限制区域的起始点。我们定义此点为偏离点,该点的电流值为偏离点发射电流。偏离点发射电流对二极管的结构比较敏感。阴极涂层电阻、阳极膜电阻和测量电阻均会影响偏离点发射电流的测量值。对

\*1980年12月29日收到

小间距二极管，这种影响则更加明显。而在线路技术上还要把电流值经过 3/2 次方或对数的函数变换，这更易造成较大的误差。

图 1 上 *b* 点为曲线的拐点。该点的电流值称做拐点发射电流，此电流值可近似地表征阴极发射的最大空间电荷限制电流值<sup>[3]</sup>。该点的特征是位于伏安特性曲线由下凹向上凸的转变处，曲线上该点的二阶微分等于零，即

$$\frac{d^2I_a}{dU_a^2} = 0. \tag{1}$$

然而，在空间电荷区我们知道

$$I_a = KU_a^{3/2}, \tag{2}$$

$$\frac{dI_a}{dU_a} = \frac{3}{2} KU_a^{1/2}, \tag{3}$$

$$\frac{d^2I_a}{dU_a^2} = \frac{3}{4} KU_a^{-1/2}. \tag{4}$$

这就是说，二阶微分值虽随  $U_a$  升高而降低，但永不为零，即偏离点与拐点永远不会重合。因此拐点发射电流一定高于偏离点发射电流，但可很接近，所以拐点值只是空间电荷限制电流的近似量度。

借助线路技术<sup>[4-6]</sup>，可迅速自动地测出上述两特征点在伏安特性曲线上的位置，以确定相应的电流值。此时曲线无需测到饱和，从而避免了测试对阴极的损伤。这种自动测量方法便于进行大量测试，并且由于避免了人工工作图导致的随意性误差，提高了测量的准确性，因此适于用来客观地比较不同热阴极的发射水平，特别适于用来监测寿命试验过程中阴极活性的变化。我们在文献[4]的基础上增添了三阶微分器，提高了检测拐点的精度。

## 二、测量拐点发射电流的原理

测量原理图如图 2 所示。

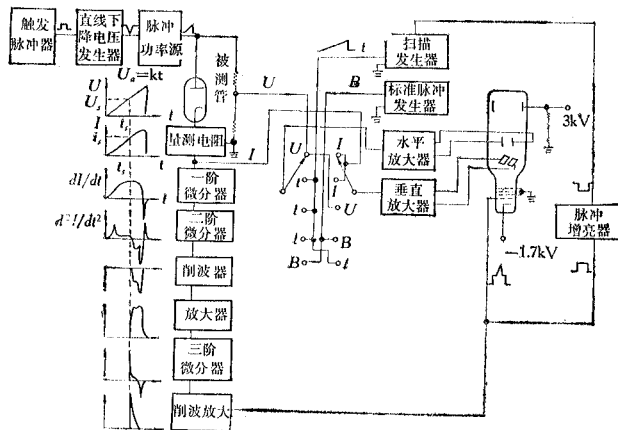


图 2 快速测量线路原理图

Fig. 2 Block diagram of rapid-measurement scheme

1. 伏安特性曲线的一次显示

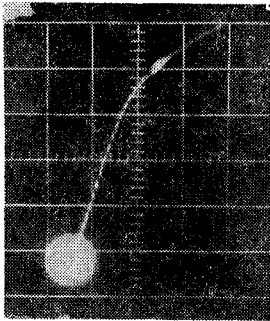


图3 伏安特性和伏安特性上显示的拐点的示波图

Fig. 3 Oscillograph displays of waveforms observed in rapid-measurement, I-U characteristic and inflection point on the I-U curve

借助一个线性下降电压来触发脉冲功率源,产生一个直线上升的脉冲电压并把它加在被测管上。脉冲电压经分压后,再经过水平放大器加在示波管的水平偏转板上。从串接于被测管的测量电阻上取出的与电流成正比的信号,经垂直放大器加于示波管的垂直偏转板上。另有一个与扫描脉冲的宽度相同的增亮脉冲加于示波管的栅极。这样在示波器的屏幕上就显示出全伏安特性(图3)。

2. 拐点的自动显示

在伏安特性曲线上拐点电流  $i_s$  与某一特定电压  $U_s$  相对应。由于加在被测管上的是线性上升电压  $U_a = Kt$ , 从而拐点电流  $i_s$  将与某一特定时间  $t_s$  相对应(见图2)。因此设法在此时,在示波管的栅极上加一信号,调制电子束的强度,在伏安特性曲线的拐点处将出现一个增亮光点,从而可方便而迅速地自动定出拐点的位置(图3)。拐点电流值由示波器屏幕上的格数直接读出。

示波器灵敏度由标准脉冲发生器产生的 +10V 标准脉冲不断校准,保持为 2V/cm。

在时间  $t_s$  时加于示波管栅极以调制亮度的信号可用下列方法产生。

根据上述可知,在伏安特性拐点处  $\frac{d^2I}{dU^2} = 0$ ,

若

$$U_a = Kt, \tag{5}$$

则

$$\left. \frac{d^2I}{dt^2} \right|_{t=t_s} = 0; \tag{6}$$

当  $t > t_s$  时

$$\left. \frac{d^2I}{dt^2} \right|_{t>t_s} < 0. \tag{7}$$

现将从测量电阻上取出的电流信号  $I(t)$ , 经过一个两阶微分器,使成  $\frac{d^2I}{dt^2}$  信号。 $\frac{d^2I}{dt^2}$  信号在  $t = t_s$  时,由正值向负值过渡。此信号通过削波器将正向部份削去,剩下的负向部份再通过高增益放大器放大。这样,一旦  $\frac{d^2I}{dt^2}$  信号出现负值,高增益放大器立即检出这一微弱的负向信号,并输出一个窄脉冲信号。将此信号加于示波管栅极以调制亮度,于是在伏安特性曲线上就有一增亮点。该点处的电流值即拐点发射电流。为了消除线性上升脉冲陡峭后沿的微分

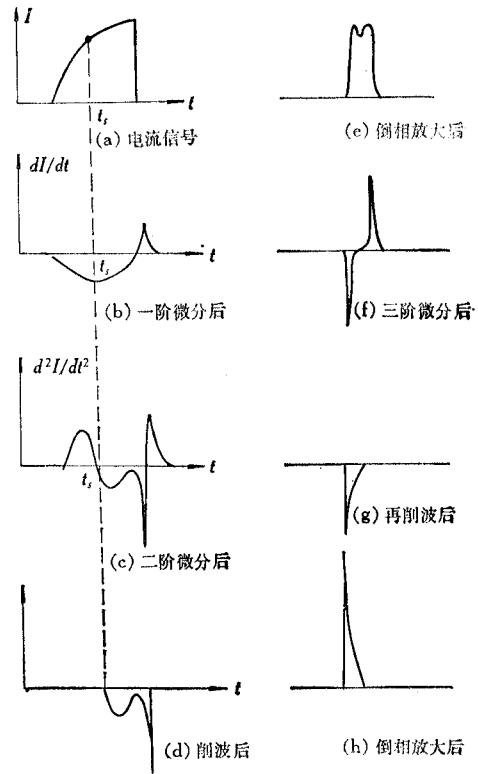


图4 增亮拐点的窄脉冲信号形成过程中各级波形图

Fig. 4 Waveforms of each stage observed during the time, in which sharp pulse brightening the inflection point is formed

信号,实际线路还装有一个三阶微分器,使输出脉冲的脉宽更窄,以减小亮点直径,提高检测精度. 增亮拐点的窄脉冲信号形成过程的各级波形见图 4.

### 三、拐点真实性的鉴定

热阴极伏安特性曲线上的增亮点是不是该曲线的真实拐点必须加以鉴定. 而微分器的校准是关键,大家都知道,微分器是电子计算机的线性运算器的一种<sup>[7-10]</sup>. 它的输出电压  $U_0$  正比于输入电压  $U_i$  对时间  $t$  的微分,即

$$U_0 \propto \frac{dU_i}{dt}. \quad (8)$$

最简单的微分器是无源阻容微分网络,当输入电压为线性变化,即  $U_i = Kt$  时,由理想微分四端网络传输系数运算式的分析可得,在电阻两端的输出电压为

$$U_0 = KRC(1 - e^{-t/RC}). \quad (9)$$

式(9)中  $R$  和  $C$  分别为阻容微分网络的电阻和电容. 从下面的分析可以看出,实际微分器很难有完全理想的微分性能,只能实现近似的微分. 要求该电路接近理想,则应缩短电路的时间常数. 电路的时间常数定义为电容充电到所加电压 63% 所需的时间. (9) 式中,当  $RC$  很大时  $t/RC \ll 1$ ,  $e^{-t/RC}$  项可展开成

$$e^{-t/RC} = 1 - t/RC + t^2/2(RC)^2 \quad (10)$$

忽略二次方以上的高次项,则式(9)可化简为

$$\begin{aligned} U_0 &= KRC(1 - 1 + t/RC), \\ U_0 &= Kt, \end{aligned} \quad (11)$$

即当  $RC$  很大时,得到与输入波形相同的输出波形,如图 5 曲线(a)所示.  $RC$  减小则输出幅度减小,中等的  $RC$  值下,在  $t_p = RC$  时,输出电压达到输入值的 60%,如图 5 曲线(b)所示. 在上述  $RC$  值下,电路均起不了微分作用. 进一步减小  $RC$ ,就可得到如图 5 曲线(c)所示的输出波形. 此时在  $t_i \geq 5RC$  时,输出电压波形由线性上升波转为平顶波,电路才起微分作用.  $RC$  越小,微分精度越高.

输入微分器的是脉宽  $\tau = 30 \mu\text{s}$  的递升函数波形脉冲. 当测试平板二极管间距为 1mm 左右,阴极直径为 3mm 时,大量测量实用热阴极发射的经验表明: 拐点电流对应的的时间  $t_{inf}$ , 最短的一般约出现在 1/10 脉宽处,即  $t_{inf} = 1/10 \times \tau = 3 \mu\text{s}$ . 可见,要使微分器给出正确微分,必须满足  $t \geq 5RC$  的条件,因此当  $5RC \leq t_{inf}$  时,则得一阶微分器的时间常数为  $RC \leq 0.6 \mu\text{s}$ . 二阶微分器的  $RC$  应更小,取为  $0.2 \mu\text{s}$ . 三阶微分器的  $RC$  则需取为  $0.01 \mu\text{s}$ . 实际上从第三阶微分器输出脉冲的宽度约  $1 \mu\text{s}$ , 后沿较长. 这样伏安特性曲线上的亮点直径约有

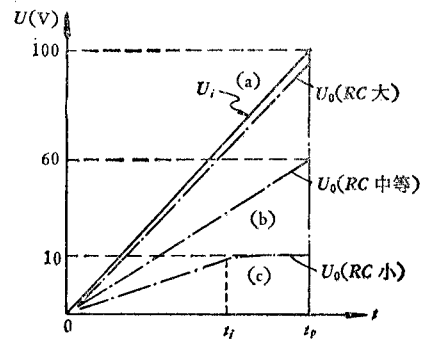


图 5 各种  $RC$  微分电路对所加锯齿形电压波形的影响

——输入电压  $U_i$     - - - - - 输出电压  $U_0$

Fig. 5 The influence of various  $RC$  circuit on the applied sawtooth voltage

1.5mm. 一般以开始增亮处读数为准. 实验亦证明: 在  $3\mu s$  后出现的拐点会随阴极温度的变动沿伏安特性曲线移动, 这是真实拐点.  $3\mu s$  前出现的增亮点不随阴极温度而变, 这不是真实拐点.

我们用四种输入波形输入二阶微分器及其后级的甄别器来鉴定拐点的真实性. 输入电压脉冲的幅值大于  $10V$ , 脉宽等于  $20\mu s$ , 极性为正. 当输入方波时, 输出的窄脉冲信号出现在  $t=0$  时 ( $t=\tau$  时出现的窄脉冲信号是脉冲后沿引起的微分脉冲输出). 输入为线性上升波时, 没有前一个窄脉冲输出. 输入为线性上升波转为平顶波时, 输出的前一个窄脉冲出现在发生转变时, 即  $t=t_{inf}$  时. 当输入为某一递升函数波时, 输出的前一个窄脉冲一定出现在递升函数波出现拐点时, 即  $t=t_{inf}$  时. 测试结果见图 6 (a)、(b)、(c)、(d).

用该仪器测量了各种热阴极在不同工作温度下的拐点发射电流, 图 3 是其示波图. 测量了 18 只储存式氧化物阴极的拐点发射电流 (见表 1), 并与偏离点发射电流进行了相关性比较, 结果如图 7 所示. 相关系数  $\gamma = 0.985^*$ . 因此我们认为脉冲拐点法是一种鉴定热阴极脉冲发射的可用方法.

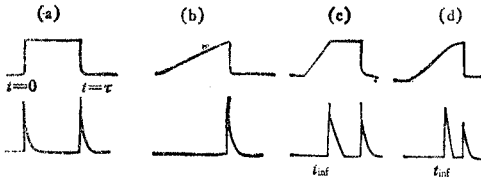


图 6 利用四种波形鉴定微分电路的真实性

Fig. 6 Verification of the correctness of the inflection point by the use of four different waveforms

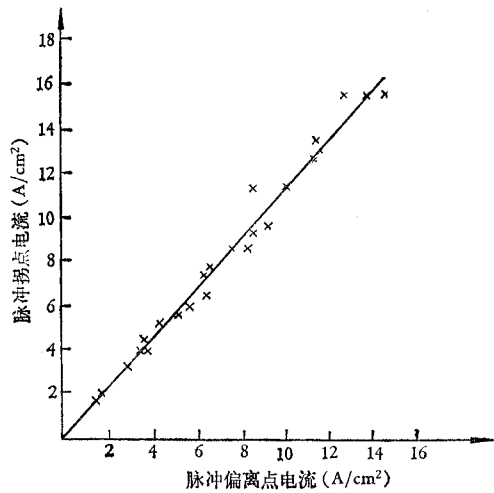


图 7 脉冲拐点电流与脉冲偏离点电流的关系 ( $T_K=750^\circ C$ )

Fig. 7 Pulse inflection point current as a function of pulse break-away point current ( $T_K=750^\circ C$ )

### 四、仪器的误差

表 1 储存式氧化物阴极在  $T_K = 750^\circ C$  下的偏离点电流和拐点发射电流

Tab. 1 Pulse inflection point current and pulse break-away point current of a storage type oxide cathode ( $T_K = 750^\circ C$ )

管号	L 001	L 002	L 003	L 004	L 005	L 008	L 009	L 010	L 011	L 012	L 014	L 015	L 019	L 020	I 001	I 004	I 005	I 006
拐点电流 ( $A/cm^2$ )	1.86	2.0	3.28	5.15	4.0	1.64	5.72	4.56	4.5	2.86	4.72	4.0	4.0	3.15	3.43	2.57	5.15	2.27
偏离点电流 ( $A/cm^2$ )	1.57	1.72	3.0	4.3	2.86	1.72	5.3	5.0	3.6	2.43	4.3	3.57	3.15	2.86	3.27	2.36	4.87	1.72

电压误差取决于分压器, 误差  $< 3.5\%$ . 电流误差决定于分流器; 用精密电桥测量电流所得各档误差见表 2.

$$* \text{ 相关系数 } \gamma = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})] / n}{\sigma_x \cdot \sigma_y}; \quad \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}, \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n}}.$$

表 2 分流器各档的误差

Tab. 2 The errors of each step of the shunt

电流 (A)	10	5	2.5	1.0	0.5	0.1
误差(%)	1	2.3	0.7	0	2.5	5

示波器灵敏度由 +10V 标准脉冲校准, 灵敏度为 2V/cm, 误差决定于脉冲电压表的精度. 示波器垂直放大器的灵敏度用交流电压表复校.

拐点位置的准确度决定于线性下降触发脉冲的线性、微分器的时间常数和示波管的聚焦性能. 本仪器的拐点位置有些延迟, 增亮点直径还不够小, 误差估计在 10% 以下.

## 五、结 束 语

本文介绍的方法对比较不同热阴极的发射水平和监测寿命过程中阴极性能的变化有一定实用价值.

本项工作的开始阶段, 叶毓林同志参加了工作.

## 参 考 文 献

- [ 1 ] *IRE Standards on Electron Tubes: Methods of Testing*, 1962.
- [ 2 ] *American Standard Associations Inc.* 1963, p. 10.
- [ 3 ] *IRE Standards on Electron Tubes: Definition of Terms*, 1957; *Proc. IRE*, **45**(1957), 983.
- [ 4 ] E. G. Hopkins, *Proc. IRE*, **43**(1955), 707.
- [ 5 ] 居往华, 海绵镍氧化物阴极长脉冲发射性能及其测试, 清华大学研究生毕业论文, 1966.
- [ 6 ] A. G. F. Dingwall. *Advances in Electron Tube Techniques, Proceedings of the Fifth U. S. National Conference*, 1961, p. 198.
- [ 7 ] R. Blitzer, *Basic Pulse Circuits, McGraw-Hill Book Company*, 1964, p. 110.
- [ 8 ] 徐功仁, 模拟电子计算机电路, 科学出版社, 1958年, 第 67 页.
- [ 9 ] 秦世才, 集成运算放大器应用原理, 天津人民出版社, 1978 年, 第 223 页.
- [ 10 ] 赖祖武, 核物理电子学方法, 上海科技出版社, 1961 年, 第 230 页.

## RAPID-MEASUREMENT OF PULSE EMISSION CURRENT AT THE INFLECTION POINT ON I-U CURVE OF THE THERMIONIC CATHODE

Yang Ling-yun, Wang Shu-shen

(*Institute of Electronics, Academia Sinica*)

Pulse emission current at the inflection point on I-U curve of a thermionic cathode can be measured rapidly by means of a circuitual technique. This method can prevent the cathode from suffering injury during the measurement. So that it can be used to compare the emission levels between different thermionic cathodes, and to monitor the changes of activation of cathodes during life test. The principle of the rapid-measurement of pulse emission current at the inflection point on I-U curve of the thermionic cathode is described. Autodisplay of the inflection point on the I-U characteristics is realized. The method of verification of its correctness is given. A great deal of measurements on various thermionic cathodes show that the instrument is of practical value. Finally the measuring error of the instrument is discussed.