

# 热阴极发射特性的微机化测量和分析\*

曾海山 杨凌云 叶毓林  
(中国科学院电子学研究所, 北京)

**摘要** 本文介绍了一套微机化热阴极发射特性测量系统。用它能快速自动地获取伏安特性数据,精度为0.05%(满标量程),一条曲线所需时间少于5s,用它还能获取 Schottky 外延零场发射、拐点发射、转折点发射、平均有效逸出功、Richardson 逸出功、工作温度下阴极表面的逸出功分布等反映阴极特性的重要信息。

对四种阴极的研究结果表明,本系统特别适合于用来研究阴极激活、老炼、中毒和寿命过程中活性的变化。通过对一种栅控行波管的测量,证明本系统可用来监测整管中阴极的活性。

**关键词** 热阴极;热发射特性测量,拐点发射,转折点发射,逸出功分布,微计算机应用。

## 一、引言

热阴极发射特性一般可用理想二极管的伏安特性曲线来评价。W. P. C. Mills 等最先研制出由计算机控制的测量系统<sup>[1]</sup>。与传统方法相比,该系统操作简便,快速准确且对阴极无损伤。1982年美国三军阴极座谈会强调了阴极质量标准的建立问题。1982, 1984年国际电子器件会议(IEDM)都有关于微机控制热阴极发射特性测量系统的报道<sup>[2-3]</sup>。近年来,在热发射伏安特性的理论研究方面也取得了重要进展<sup>[4-6]</sup>。特别是 J.C. Tonnerre<sup>[7]</sup>发展了一种方法,由微机控制测得高精度的伏安特性曲线,再对所测曲线二次求导,便可得出阴极表面的逸出功分布。

本文建立了一套用 TP-805 微机控制的热发射  $V/I$  特性测量系统,并编制了应用软件,对测量数据进行实时处理,求出了 Schottky 外延零场发射、拐点发射、转折点发射、平均有效逸出功、Richardson 逸出功、工作温度下逸出功分布等反映阴极特性的重要信息。

## 二、 $V/I$ 特性测量原理

从  $V/I$  特性求逸出功分布,要涉及到电流对电压的二阶微商,因而要求  $V/I$  特性数据的精度特别高。我们选用 12 位积分型 A/D 芯片组成数据采集电路,使系统能以 0.05%(满标量程, FSR) 的精度获取  $V/I$  特性数据。

### 1. 测量系统原理(硬件)

测量系统原理如图 1 所示。被测阴极装于平板二极管  $D$  中，其热子由直流稳压电源

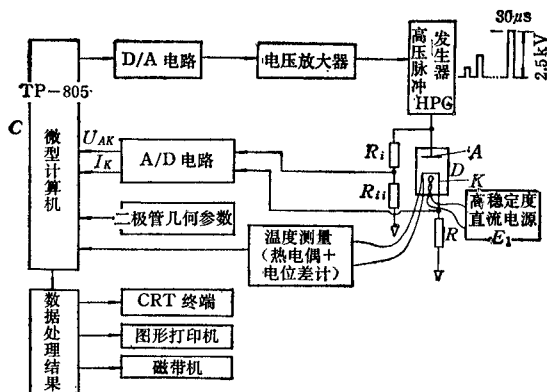


图 1 微机化热阴极伏安特性测量系统原理框图

测量系统原理如图 1 所示。被测阴极装于平板二极管  $D$  中，其热子由直流稳压电源  $E_1$  加热，阴极温度用 Mo-Ni 热电偶测量。微机  $C$  为 TP-805 型。系统的输出通道由 10 位 D/A 转换器、电压放大器

和高压脉冲发生器 (HPG) 组成。输出的脉宽为  $30\ \mu\text{s}$ ，间隔为  $25\ \text{ms}$ ，幅度为  $0\text{--}2500\text{V}$  的递增方脉冲序列加于被测管  $D$  上。系统的输入通道由双通道 12 位 A/D 转换器，电流取样电阻  $R$ ，分压电阻  $R_i$ ， $R_{ii}$  组成。可实现电压、电流同时采样(延迟只在纳秒量级)，消除了脉冲波形不稳定对测量的影响。经测试，本 A/D 电路的精度优于  $0.05\% \text{ FSR}$ 。数据处理结果(曲线和图表)通过 CRT 终端和打印机输出。原始数据还可储存在磁带上永久保存。

### 2. 系统可靠性的检验

为了检验系统的可靠性，首先对一只假负载(无感电阻)的  $V/I$  特性进行了测量。结果为一直线(图 2)。从 203 个采集到的数据中抽样 72 个数据[取间隔  $\geq 50 \text{ LSB}$  (最低有效位)]，用最小二乘法求得电阻阻值为  $R = 648.561 \pm 0.075\ \Omega$ ， $R$  的精度为  $0.012\%$ ，接近在只考虑量化误差时 12 位 A/D 的分辨极限  $\frac{1}{2}/2^{12} = 0.012\%$ 。图 3 是在相同温度下，用本系统测得的一只钨酸盐钡钨阴极的  $V/I$  特性曲线与人工逐点测试结果的对照，可以看出两者十分靠近，而计算机测得的曲线光滑得多。

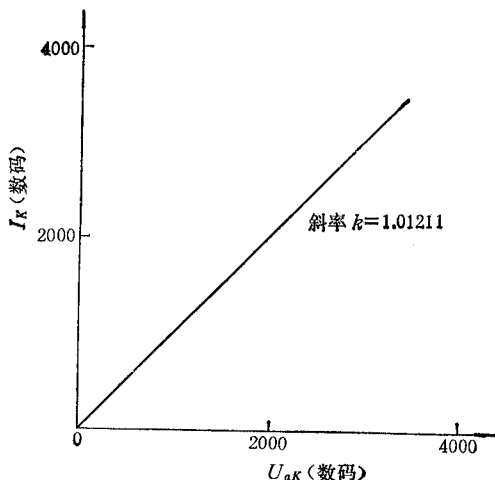


图 2 用本系统测得纯电阻的  $V/I$  特性

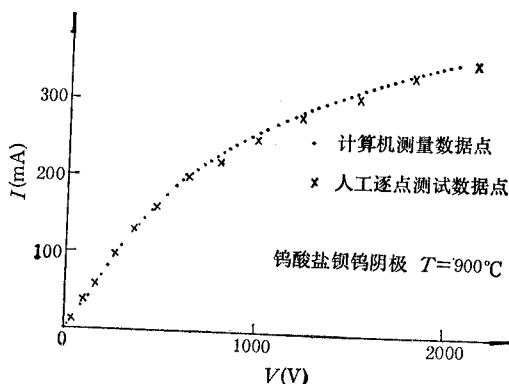


图 3 钨酸盐钡钨阴极伏安特性曲线

### 3. 误差分析

为了分析系统的误差，对一只钨酸盐钡钨阴极在  $T = 900\text{ }^\circ\text{C}$  下进行了四次重复测量，

结果重复性很好。表 1 为对应这四次测量数据求得的拐点电流 ( $I_{inf}$ ) 与拐点电压 ( $V_{inf}$ )。由计算得:  $\bar{I}_{inf} = 76.5 \text{ mA}$ ,  $\bar{I}_{inf}$  的标准偏差为 1.9 mA, 由此百分误差为 2.5% 左右。

表 1 一只钨酸盐钡钨阴极在  $T = 900^\circ\text{C}$  下拐点电流和电压

测量次数	1	2	3	4	平均值
$I_{in} \text{ (mA)}$	75.6	72.4	76.6	81.5	76.5
$V_{inf} \text{ (V)}$	214	206	217	229	216

为了减少测量系统的误差, 从硬件和软件两方面采取了下列措施: (1) 用高稳定度直流电源加热阴极; (2) 选用 12 位积分型高精度 A/D 芯片; (3) 用两路 A/D 来采集同一时刻的  $V/I$  信号, 以消除 HPG 输出增益的随机变化 (或者说脉冲波形的不稳定) 对测量精度的影响; (4) 软件上通过数据压缩, 使实际使用的  $V/I$  数据在 5 秒内获取, 减小了阴极表面温度瞬变的影响。采用这些措施后, 估计  $\Delta I$  和  $\Delta V$  (相邻数据点电流、电压差) 的均方误差  $\delta(\Delta I) = \delta(\Delta V) = 1\text{LSB}$ , 而数据压缩后  $\Delta V \approx 50\text{LSB}$ 。表 1 情形  $V/I$  曲线拐点处  $\frac{\Delta I}{\Delta V} \geq 2$ , 因而  $\Delta I \approx 100\text{LSB}$ , 故差商的相对误差:

$$\frac{\delta\left(\frac{\Delta I}{\Delta V}\right)}{\frac{\Delta I}{\Delta V}} \approx \frac{1}{100} + \frac{1}{50} = 3\%$$

在求拐点时(见后文), 采用了三次样条函数插值求微商, 其误差应比差商小, 所以这里的误差分析与上述实验结果 (2.5%) 相符合。

综上所述, 本系统测量伏安特性的精度达 0.05% FSR。确定拐点发射的精度为 3%, 比模拟线路技术法<sup>[8]</sup>的精度高。

## 二、 $V/I$ 特性数据的分析——原理和软件

二极管的伏安特性表征阴极的发射特性, 要正确地将伏安特性中的有用信息显示出来, 首先要有合适的物理模型, 然后要经过繁琐的数学运算。本系统在 TP-805 微机控制下, 无损伤地测得高精度的  $V/I$  特性, 然后通过按下述原理编号的分析发射特性软件的实时处理, 求出各种发射参数。

### 1. 分析发射特性的原理<sup>[9]</sup>

(1) 零场发射和平均有效逸出功 当阳极电压足够高时, 阴极发射服从 Schottky 定律:

$$J_V = J_{so} \exp(\alpha V^{1/2}) \quad (1)$$

$J_V$  为发射电流密度,  $J_{so}$  为零场发射,  $V$  为阳极电压,  $\alpha$  为一常数。在  $\ln J_V - V^{1/2}$  座标下,  $V/I$  特性曲线为一直线。用最小二乘程序求出此直线的斜率和截距, 即可获得 Schottky 外延零场发射  $J_{so}$  和 Schottky 斜率  $\alpha$ 。再由公式:

$$J_{s0} = 120 T^2 e^{-e\phi_E/kT} \tag{2}$$

可求出平均有效逸出功  $\phi_E^{[10]}$ ,

$$\phi_E = -\frac{kT}{e} \ln \frac{J_{s0}}{120 T^2} \tag{3}$$

在(1),(2)式中,  $T$ 为阴极温度,  $e$ 为电子电荷,  $k$ 为玻尔兹曼常数.

(2) 拐点发射和转折点发射<sup>[11]</sup> 拐点 (Inflection point) 定义为伏安特性曲线上二阶导数为零的点,由

$$\frac{d^2 J_V}{dV^2} = 0 \tag{4}$$

确定. 此点对应的电流密度叫拐点发射  $J_{inf}$ . 转折点 (flection point) 定义为伏安特性曲线上过渡区曲率半径最小的点. 曲率半径:

$$\rho = \left| \frac{\left[ 1 + \left( \frac{dJ_V}{dV} \right)^2 \right]^{3/2}}{\frac{d^2 J_V}{dV^2}} \right| \tag{5}$$

而一般  $\frac{dJ_V}{dV} \ll 1$  故而转折点也是“二阶微商负最大的点”. 转折点对应的电流密度称转折点发射  $J_{flect}$ .

(3) 逸出功温度系数, Richardson 发射常数, Richardson 逸出功 由(3)式求得的  $\phi_E$  作  $\phi_E-T$  图, 如果为直线, 则直线的斜率为逸出功温度系数  $\alpha_E$ , 直线在纵轴上的截距为 Richardson 逸出功  $\phi_R$ , 即:

$$\phi_E = \phi_R + \alpha_E T \tag{6}$$

Richardson 发射常数  $A_R$  由下式求出:

$$A_R = 120 \times 10^{-5040\alpha_E} \tag{7}$$

(4) 阴极表面逸出功分布 (WFD, Work Function Distribution) 按 J.C.Tonnerre 的方法<sup>[7]</sup>通过对伏安特性曲线二次求导得到 WFD. 其原理简述如下:

假设具有单一逸出功阴极的理想二极管的伏安特性从空间电荷限制区到饱和区是一尖锐的过渡, 即:

$$J_{V_i} = \text{Min}\{J_L, J_s\} \tag{8}$$

其中

$$J_L = P V^{3/2} \tag{9}$$

$$\left. \begin{aligned} J_s &= 120 T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_i}{kT}\right) f(V^{1/2}) \\ f(V^{1/2}) &= \exp(\alpha V^{1/2}) \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

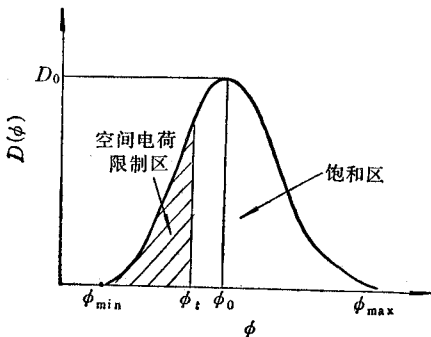


图 4 逸出功分布示意图

$P$ 为导流系数,  $J_L$ 为空间电荷限制区发射,  $J_s$ 为饱和区发射. 不考虑相邻微块的影响, 认为在一定的阳极电压下, 部分微块发射在空间电荷限制区, 部分微块发射在饱和区, 如图 4 所示. 其分界逸出功  $\phi_i$  由下式决定:

$$P V^{3/2} = 120 T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_t}{kT}\right) f(V^{1/2}) \quad (11)$$

于是阴极发射总电流可写为:

$$J_V = P V^{3/2} \int_{\phi_{\min}}^{\phi_t} D(\phi) d\phi + 120 T^2 f(V^{1/2}) \int_{\phi_t}^{\phi_{\max}} D(\phi) \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right) d\phi \quad (12)$$

其中  $D(\phi)$  是逸出功分布函数,  $\phi_{\min}$  和  $\phi_{\max}$  为阴极表面最小和最大逸出功。  
令

$$\int_{\phi_{\min}}^{\phi} D(\phi) d\phi = L(\phi) \quad (13)$$

$$\int_{\phi}^{\phi_{\max}} D(\phi) \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right) d\phi = S(\phi) \quad (14)$$

将 (12) 式对  $V^{1/2}$  求微商, 再结合 (11) 式可以解出:

$$L(\phi) = \frac{\alpha_V - \alpha}{3/V^{1/2} - \alpha} \cdot \frac{J_V}{P V^{3/2}} \quad (15)$$

$$S(\phi) = \frac{3/V^{1/2} - \alpha_V}{3/V^{1/2} - \alpha} \cdot \frac{J_V}{120 T^2 \exp(\alpha V^{1/2})} \quad (16)$$

式中  $\alpha_V = d \ln J_V / d V^{1/2}$ 。对  $L(\phi)$  求微商可得逸出功分布  $D(\phi)$ ,

$$D(\phi) = \frac{dL(\phi)}{d\phi} \quad (17)$$

## 2. 分析发射特性的软件

系统的软件由两部分组成: (1) 数据预处理软件包: 全用 Z-80 汇编语言编号, 用于对原始数据进行压缩, 迅速将  $V/I$  曲线和粗略拐点位置显示在荧光屏上, 为下一步用 BASIC 语言进行数据处理作好准备。(2) 发射特性分析软件包: 用 BASIC 语言和汇编语言混合编写; 包括数据交换、三次样条函数插值、最小二乘法等子程序和按上节原理编写的求各种发射特性 ( $J_{So}$ ,  $J_{inf}$ ,  $J_{flect}$ ,  $\phi_E$ ,  $\phi_R$ ,  $\alpha_E$ ,  $A_R$ , WFD 等) 的程序。图 5 是数据处理后在 CRT 终端显示的伏安特性曲线和逸出功分布曲线。

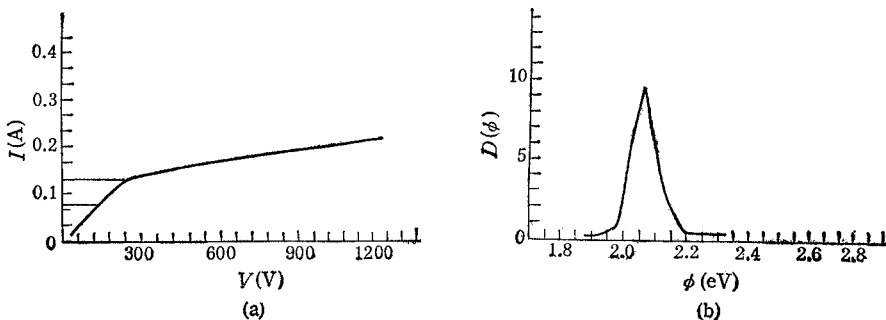


图 5 CRT 终端显示的伏安特性曲线 (a) 和逸出功分布曲线 (b)  
(伏安特性曲线中两横线分别对应转折点和拐点发射电流)

### 三、系统的初步应用

#### 1. 用平板二极管进行的测量和分析

利用这套测量系统,对装在平板二极管中的钨酸盐钡钨阴极、铈酸盐钡钨阴极、氧化物阴极的发射特性进行了测量和分析. 对一只掺  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  钡钨阴极激活老炼前后和氧中毒重激活后的活性变化进行了监测. 这些研究得到了如下重要结论:

(1) 将测得的所有  $J_{\text{inf}}$ ,  $J_{\text{flect}}$ ,  $J_{\text{SO}}$  数据进行相关分析,发现对上面几种阴极,  $J_{\text{inf}}$ ,  $J_{\text{flect}}$ ,  $J_{\text{SO}}$  间的相关系数在 0.911—1 之间,说明它们有较好的线性依赖关系. 这就为用  $J_{\text{inf}}$  与  $J_{\text{flect}}$  来比较阴极发射水平提供了新的依据. 经研究得出了拐点和转折点的物理意义<sup>[22]</sup>: 在拐点对应的阳极电压下,阴极表面大约有 80% 以上的区域发射在空间电荷限制区; 伏安特性曲线转折点与逸出功高斯分布曲线峰值点相对应. 转折点发射电流代表了阴极具有最可几逸出功时的发射水平.

(2)  $\phi_E$ - $T$  图有时不为直线,此时求不出一个统一的 Richardson 逸出功  $\phi_R$ . 图 6 是一只钨酸盐钡钨阴极的  $\phi_E$ - $T$  图. 图 7 是掺  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  钡钨阴极的  $\phi_E$ - $T$  图

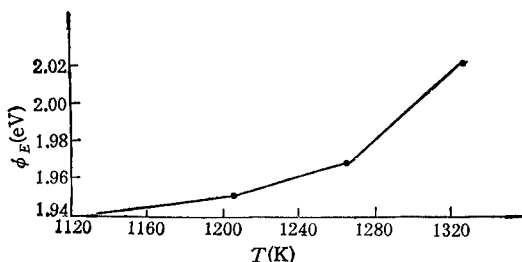


图 6 钨酸盐钡钨阴极的  $\phi_E$ - $T$  图

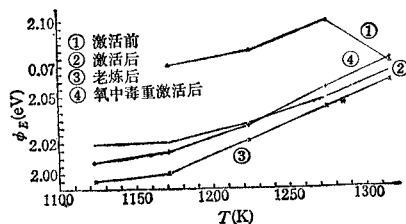


图 7 掺  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  钡钨阴极的  $\phi_E$ - $T$  图

(3) 在激活老炼前后和中毒后,用本系统求得的逸出功分布曲线有明显变化. 这说明本系统研究激活、老炼、中毒和寿命过程中阴极活性变化十分有效. 实验发现即使是激活好的阴极,其逸出功分布也随温度而变化,激活良好的阴极的逸出功分布是较为对称的钟型分布或者说近于高斯分布.

图 8、图 9 是激活好的钨酸盐钡钨阴极和铈酸盐钡钨阴极的逸出功分布图. 图 10 是在老炼过程中有漏气时,一只氧化物阴极的逸出功分布的变化. 图 11 是另一只氧化物阴极老炼前后的逸出功分布的变化. 图 12 是掺  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  钡钨阴极在激活前后和氧中毒重新激活后的逸出功分布的变化情况.

#### 2. 对一只栅控行波管的测量和分析

用本测量系统测量了一只栅控行波管. 文献 [12] 对测量中的两个实际问题,即阴极温度的估测和管子结构的影响进行了讨论,认为从行波管测得的逸出功分布曲线,其绝对值可能与实际有差别,但其分布形状反映了发射的不均匀性可用来判断阴极活性.

表 2 是测得的该行波管阴极的发射数据. 可以看出该管阴极能支取  $2 \text{ A/cm}^2$  的发射电流. 图 13 是测得的该管的 WFD 曲线,其主峰对应的逸出功  $\phi_0$  在  $1.77$ — $1.81 \text{ eV}$  之

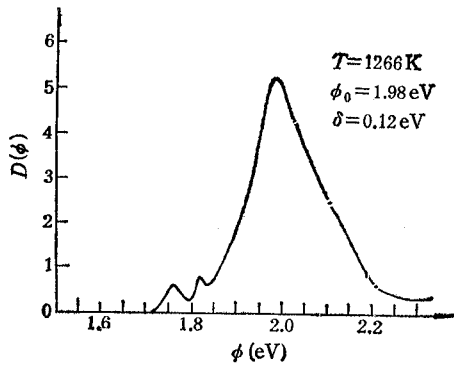


图 8 钨酸盐钡钨阴极的逸出功分布

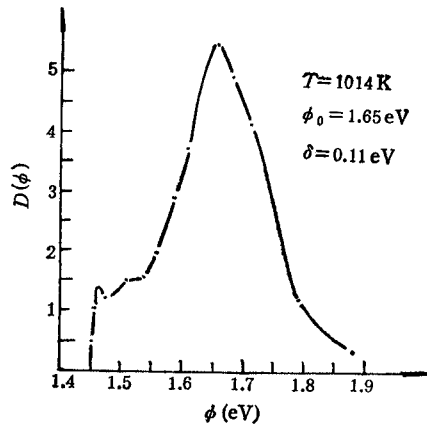


图 9 钨酸盐钡钨阴极的逸出功分布

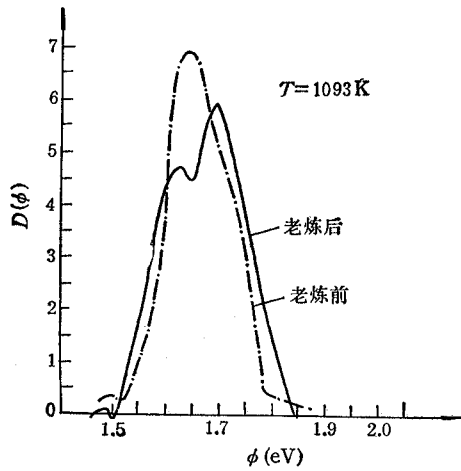


图 10 氧化物阴极的逸出功分布 (1# 管)

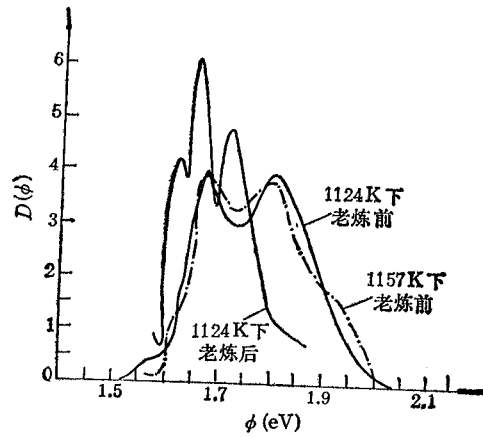


图 11 氧化物阴极的逸出功分布 (2# 管)

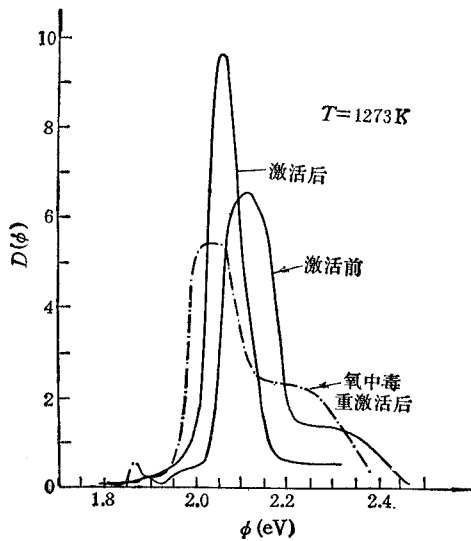


图 12 掺 Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 钨阴极的逸出功分布

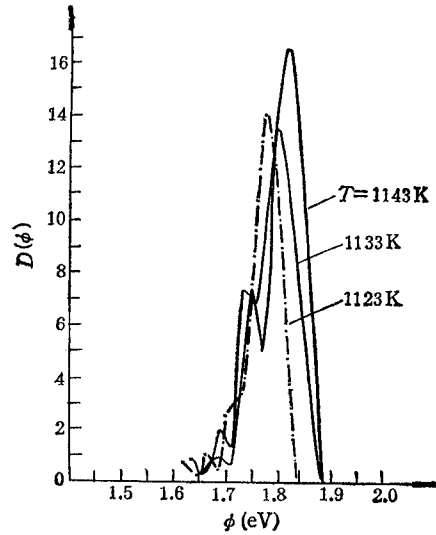


图 13 一只栅控行波管阴极的逸出功分布

表 2 一只栅控行波管中阴极的发射数据

$T(^{\circ}\text{K})$	1123	1133	1143
$J_{inf}(\text{A}/\text{cm}^2)$	1.78	1.90	2.11
$J_{flect}(\text{A}/\text{cm}^2)$	2.66	3.24	3.96
$J_{so}(\text{A}/\text{cm}^2)$	2.03	2.22	2.49

间. 分布曲线上有些小的伴峰, 但分布还是较窄的, 半宽  $\delta < 0.1 \text{ eV}$ , 所用阴极为氧化物阴极. 这些数据表明该阴极具有较好的活性.

#### 四、结 束 语

我们建立的这套微机控制的热阴极发射特性测量系统精度高 ( $V/I$  特性数据精度为 0.05% FSR, 拐点发射精度为 3%), 对阴极损伤小(脉冲系列的脉冲工作比  $fr = 1.2 \times 10^{-3}$ ), 测试分析速度快(测量一条伏安特性曲线只需 5 秒钟), 可望成为一种比较阴极质量的可靠标准.

用本系统测量阴极不需特殊制作样品, 仪器设备简单, 测试分析自动化程度高, 用来研究阴极激活、老炼、中毒和寿命过程中活性的变化. 它不仅能指导工艺的改进, 监测整管中的阴极活性, 而且为研究阴极的发射机理和失效机理提供了一种方便的手段.

本工作是在张恩虬教授和刘学恣教授的指导下完成的. 郭开周付教授提供了被测行波管, 六室的同志提供了被测阴极. 何良同志在测量系统的建立方面给予了帮助, 陆波、林技秀、王萍同志参加了部分线路的调试和软件编制工作. 在此一并表示感谢.

#### 参 考 文 献

- [1] W. P. C. Mills, et al., *Int. J. Electronics*, **31**(1971), 145.
- [2] M. J. Cattelino, G. V. Miram, W. R. Ayers, IEDM, San Francisco, 1982, p.36.
- [3] M. Feinleib, M. C. Green, IEDM, San Francisco, 1984, p.314.
- [4] A. H. Beck and De-an Wang, *Int. J Electronics*, **51**(1981), 717.
- [5] J. Hasker, *Application of Surface Science*, **16**(1983), 220.
- [6] C. E. Maloney, C. S. Fang, *Applied Surface Science*, **24**(1985), 407.
- [7] J. C. Tonnerre, D. Brion, P. Palluel, A. M. Shroff, *Application of Surface Science*, **16**(1983), 238.
- [8] 杨凌云, 王书绅, 电子学通讯, **4**(1982), 384.
- [9] 刘学恣, 阴极电子学, 科学出版社, 1980.
- [10] E. B. Hensley, *J. Appl. Phys.*, **32**(1961), 301.
- [11] American Standard Methods of Test Electron Tubes, American Standards Association Incorporated, 1963.
- [12] 曾海山, 热发射测量微机化与实用热阴极发射特性研究, 中国科学院电子学研究所硕士论文, 1986 年 9 月.



## MICROCOMPUTERIZED MEASUREMENT AND ANALYSIS OF ELECTRON EMISSION PROPERTIES OF THERMIONIC CATHODES

Zeng Haishan Yang Linyun Ye Yulin

*(Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing)*

**ABSTRACT** A microcomputerized measuring system is developed. This system automatically acquires an I-V characteristic curve in 5 seconds with an accuracy of 0.05% (full scale-range). The Schottky extrapolation field-free emission, the inflection point emission, the flexion point emission, the average effective work function, the Richardson work function, the work function distribution at the operation temperature and other important informations that reflect properties of cathode are obtained by this system. The results after analysing four type of cathodes demonstrate that this system is very suitable for measuring the property changes of the cathode in the processes of activation, ageing, poisoning and life test. It is proved that this system can also be used to monitor the property of the cathode in the assembled tube by measuring a grid controlled travelling-wave tube.

**KEY WORDS** Thermionic cathode; Measurement of thermionic emission properties; Work function distribution; Application of microcomputer