

浸渍钨酸盐钨钨阴极的次级发射特性的研究*

毛独立 杨凌云 王书绅

(中国科学院电子学研究所, 北京)

摘要 本文利用扫描电子束探针法,研究了渍制钨酸盐钨钨阴极在室温下的次级发射特性,观察了激活程度对该阴极的次级发射特性、次级发射图象和次级发射面分布的影响. 激活最佳时,可获 $\delta_m = 3.56 (E_{pm} = 700V)$. 在温度高于 1100°C 下激活,对 δ 的影响较大. 该阴极表面 δ 的分布是不均匀的. 面分布曲线的峰值半高宽度为 0.4. 本文结合国内外对该阴极表面分析研究的结果,对实验现象进行了讨论. 从理论上推导出的二项式面分布曲线能与实验结果较好地符合.

关键词 热阴极;次级发射特性;扫描电子束探针法;激活;二项式面分布曲线

一、引言

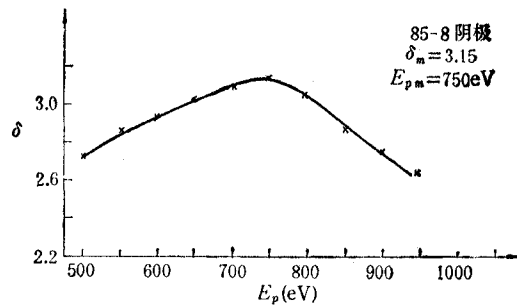
我所研制的浸渍钨酸盐钨钨阴极^[1] (简称钨酸盐阴极)已成功地用于迴旋管等大功率毫米波器件. 而用于交叉场器件时,由于这类器件对阴极的次级发射性能有特殊要求,故要对该阴极的次级发射性能进行研究. 在这一方面,国内外只报道过对钨酸盐钨钨阴极的研究结果^[2-6]. 我们利用自己设计的扫描电子束探针测量系统^[7],研究了钨酸盐阴极在室温下的 $\delta-E_p$ 曲线;仔细观察了激活程度对次级发射性能的影响,并结合国内外对钨钨阴极表面分析研究的结果,对实验现象进行了讨论. 从理论上导出了钨酸盐阴极的 δ 面分布曲线的表达式.

二、钨酸盐阴极在室温下的 $\delta-E_p$ 曲线

表 1 给出了七个样品的 δ_m 和 E_{pm} 值. 典型的 $\delta-E_p$ 曲线如图 1 所示. 由表可见,

表 1 七个钨酸盐阴极的 δ_m 和 E_{pm} 值

δ_m 和 E_{pm} 值	样品号						
	84-4	84-5	84-6	85-4	85-6	85-7	85-8
δ_m	3.33	3.56	2.30	2.86	2.46	3.14	3.15
$E_{pm}(\text{eV})$	680	680	680	700	700	700	700

图1 钨酸盐阴极在室温下的 δ - E_p 曲线

样品间的 δ_m 值有些差别, 一般情况下 δ_m 可以达到 2.3 以上, 一般讲比铝酸盐钨钨阴极的大(表 2)。

表 2 L 阴极、铝酸盐钨钨阴极和钨酸盐阴极的 δ_m 和 E_{pm} 值的比较

阴极种类	成份比	孔度	δ_m	$E_{pm}(eV)$	文献
L-阴极		25%	1.6	800	[2]
		45%	1.45	800	
铝酸盐钨钨阴极	3- $\frac{1}{2}$ -1	25%	2.15	800	[2]
		45%	2.8	800	
		33%	2.4—2.8	700	[3]
	5-3-2		2.2—2.5		[4]
	4-1-1		2.3		
	3.5-1-1		2.3—2.6		
	4-1-1(快激活)		3.6—3.7		
		2.8-0.72-2	28%	2.6	650
		10%	2.3	650	
	5-3-2		2.4—3.0		[6]
	4-1-1		3.0	800	[1]
钨酸盐 阴极		28%	3.5	750	[1]
			最佳 3.56	700	本文

三、激活程度对钨酸盐阴极次级发射特性的影响

我们研究了钨酸盐阴极在激活前后的次级发射特性, 包括 δ - E_p 曲线、次级发射图象和 δ 面分布曲线, 取得了下列结果:

(1) 激活初期次级发射随热发射增大而增大。图 2 为 84-3 号阴极在激活初期的 δ - E_p 曲线。曲线 1 是在 950°C 下激活 10min 后测得的, 此时, 阴极活性很差(仅可支取 1mA/cm² 的电流密度), $\delta_m = 1.88$ ($E_{pm} = 780eV$)。曲线 2 是对阴极进行电流激活后

测得的. 此时热发射增大到 $50\text{mA}/\text{cm}^2$ (空间电荷限制电流), $\delta_m = 2.14$ ($E_{pm} = 680\text{eV}$). 这表明, 次级发射和表面逸出功对阴极表面状态和表面各元素组份的要求, 至少在激活初期是一致的. 钨酸盐阴极的 δ 大可能与表面逸出功低有关.

(2) 按获得较好热发射确定的激活规范激活阴极, 不一定就能获得最佳的次级发射. 图 3 为一只分解后已具有较高 δ 的阴极 ($\delta_m > 3.2$), 高温激活 (1150°C , 10 分) 后, 可使 δ 出现瞬时最佳值, $\delta_m = 3.97$ (见曲线 2); 但若按原规范再升高温度至 1200°C , δ 将明显下降 (见曲线 3), $\delta_m = 3.56$; 随后, 即使长期老炼, 亦无助于 δ 的提高, 最终 $\delta_m = 3.33$ (见曲线 4). 由该阴极的面分布曲线随激活过程的变化 (图 4) 亦可看出, 曲线向低 δ 端移动, 长期老炼后, 曲线也不再右移过来.

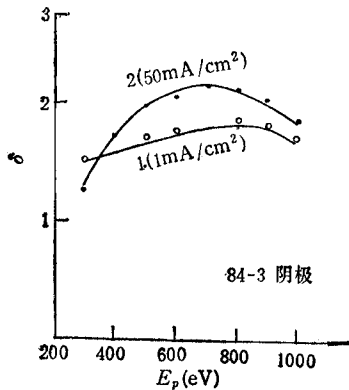


图 2 84-3 号管在激活初期的 $\delta-E_p$ 曲线的变化

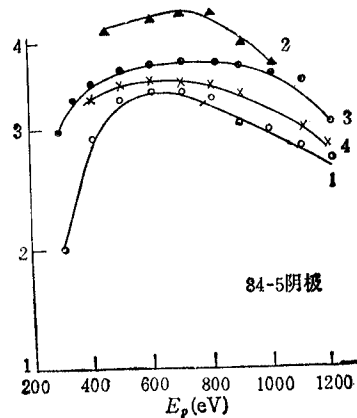


图 3 分解后 δ 较高的阴极在激活老炼过程中的 $\delta-E_p$ 曲线

1— 850°C 30min, 2— 1150°C 10min
3— 1200°C 5min, 4— 1050°C 10h

(3) 控制激活温度低于 1100°C , 再加上长时间的老炼 (1050°C , 160min) 有助于 δ_m 的提高. 由图 5 可看出: 84-4 号阴极经老炼后, δ_m 由 2.45 上升至 3.33.

由上述三个实验结果看出: 要兼顾热发射和次级发射, 必须严格控制激活温度和激活时间. Thomas 对钨酸盐钨钨阴极的实验也发现, 在激活过程中热发射和次级发射不能同时到达最大; 在 1000°C 或 1100°C 下激活, 就会使 δ 下降. 与他的阴极相比, 钨酸盐阴极在 1150°C 下激活, δ 还可上升; 直到超过 1200°C , δ 才会显著下降.

(4) 钨酸盐阴极激活后, 表面 δ 的分布是不均匀的. 在图 4 中已给出了钨酸盐阴极的 δ 面分布曲线的形状. 图 6 是 84-6 号样品在实验管烘烤后和在 800°C 加热 30min 后的次级发射图象. 由照片可看出, 分解前中心有大片亮区 (低 δ 区), 平均 $\delta = 1.9$. 在 800°C 加热 30min 后, 暗区面积增加, 平均 $\delta = 2.9$, 且均匀性有改善. 用定点法测出阴极面上许多任选点的 $\delta-E_p$ 曲线 (激活前和激活后), 获得其 δ_m 和 E_{pm} ; 再从 δ_m 的最大值 $\delta_{m(\max)}$ 和最小值 $\delta_{m(\min)}$, 求出 $\delta_{m(\max)} - \delta_{m(\min)}$ (用以表征 δ 的不均匀性). 表 3 列出了五个样品在激活前后的这些测量结果. 由表可见: 钨酸盐阴极激活后 $\delta_{m(\max)} \leq 3.15$, $\delta_{m(\min)} > 2.3$; $\delta_{m(\max)} - \delta_{m(\min)}$ 由 0.43 下降为 0.16 (五个样品的平均值), 表明均匀性有了改善.

在束扫描管的行、场偏转线圈上,加慢扫描锯齿电压,可测出靶面上 1500—2000 个点的

δ , 然后再统计求出 δ 的面分布曲线. 图 7 为 84-5 号阴极在激活前后的 $f(\delta)$ 曲线. 由图求出占表面积最多的 δ , 即最可几次级发射系数 δ_0 ; δ_0 的表面占有率 f_0 , 以及 $\delta_{max} - \delta_{min}$ 和分布半高宽度 $\Delta\delta_0$. 表 4 为激活前后从 $f(\delta)$ 曲线得到的上述各特征量的变化. 由表可见激活后, δ 面分布曲线呈现对称性; $\delta_0 = 3.85$, $\Delta\delta_0 = 0.35$, 均匀性略有改善. 下节我们将讨论造成 δ 分布不均匀的原因和影响 $\Delta\delta$ 的各种因素.

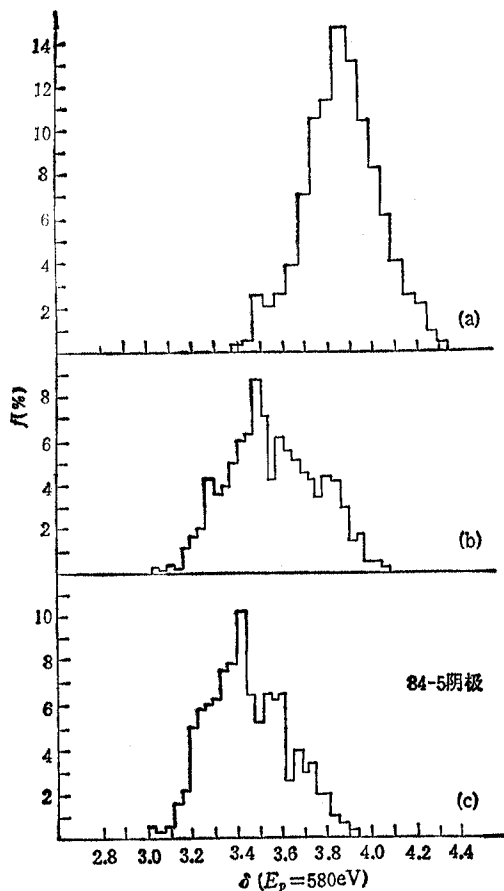


图 4 高温激活对 $f(\delta)$ 曲线的影响

- (a) 1150°C 10min,
- (b) 1200°C 5min,
- (c) 1050°C 10h

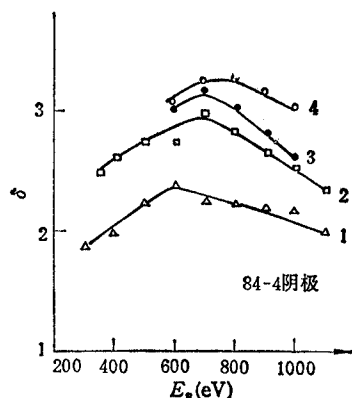


图 5 1050°C 下老炼过程的 $\delta-E_p$ 曲线

- 1—960°C, 30min, $\delta_m = 2.45$, $E_{pm} = 580\text{eV}$;
- 2—1050°C, 20min, $\delta_m = 3.04$, $E_{pm} = 680\text{eV}$;
- 3—1050°C, 60min, $\delta_m = 3.21$, $E_{pm} = 680\text{eV}$;
- 4—1050°C, 160min, $\delta_m = 3.33$, $E_{pm} = 680\text{eV}$

表 3 五个样品在激活前后的 $\delta_{m(max)}$, $\delta_{m(min)}$ 和 $\Delta\delta$ ¹⁾ 值.

样品号	$\delta_{m(max)} > \delta_{m(min)} > \Delta\delta$			激活后		
	激活前					
	$\delta_{m(max)}$	$\delta_{m(min)}$	$\Delta\delta$	$\delta_{m(max)}$	$\delta_{m(min)}$	$\Delta\delta$
84-3	1.69	1.37	0.32	—	—	—
84-4	1.37	1.16	0.21	2.86	2.75	0.11
84-5	2.22	1.84	0.38	—	—	—
84-6	2.06	1.16	0.90	2.46	2.29	0.17
85-8	2.18	1.83	0.35	3.15	2.96	0.19
平均值	≤ 2.22	≥ 1.16	0.43	≤ 3.15	> 2.3	0.16

1) $\Delta\delta = \delta_{m(max)} - \delta_{m(min)}$

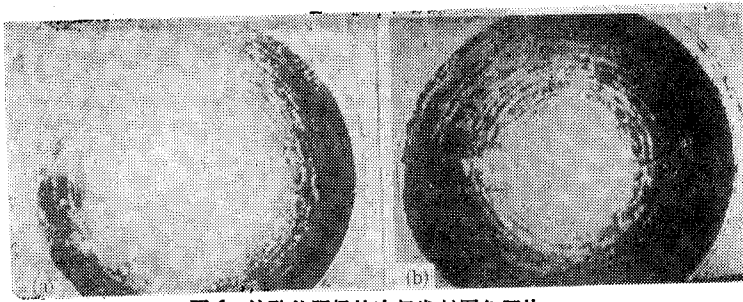


图 6 钨酸盐阴极的次级发射图象照片
(a) 烘烤后, (b) 800°C 加热 30min 后

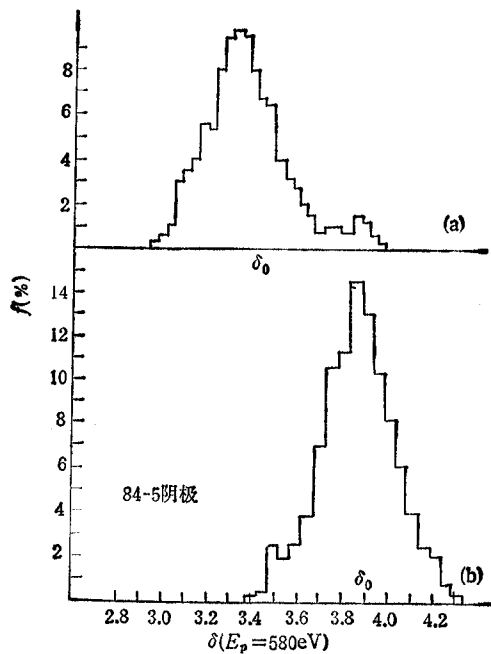


图 7 钨酸盐阴极激活前后的 $f(\delta)$ 曲线 ($E_p = 580\text{eV}$)
(a) 激活前, (b) 1150°C 下激活 10min 后

表 4 84-5 阴极激活前后 $f(\delta)$ 曲线上各特征量的变化 ($E_p = 580\text{eV}$)

	δ_0	$f_0(\%)$	$\Delta\delta_0$	δ_{\max}	δ_{\min}	$\Delta\delta$
激活前	3.22	9.8	0.37	3.98	2.94	1.04
激活后	3.85	14.6	0.35	4.34	3.37	0.97

三、讨 论

现结合国内外对钨钨阴极表面分析研究的结果,对上述结果作如下讨论:

1. 钨酸盐阴极表面成份对 δ 的影响

图 8(a) 是用 AES 分析钨酸盐阴极表面元素百分比与激活温度的关系^[8],同图上方

还标出了各温度下的 δ 值。可以看到: 1150°C 激活后, 表面钡和氧原子浓度百分比降低, 钨和钨的原子浓度百分比增加。我们认为: 在激活过程中钨和钨对次级发射均有利, 钡减少则 δ 下降, 钨增加则 δ 上升。 δ 的平衡值是这两种过程共同作用的结果。1150°C 时, 钨作用占优势则 δ 上升, 1200°C 激活时, 钡减少成为主要因素则 δ 下降。图 8(b) 画出了 Thomas^[6] 对钨酸盐阴极得到的类似曲线, 由于该阴极高温激活时没有钨所起的补偿作用, 因此当激活温度高于 900°C 后, δ 就随表面氧化钡的减少而单调下降了。

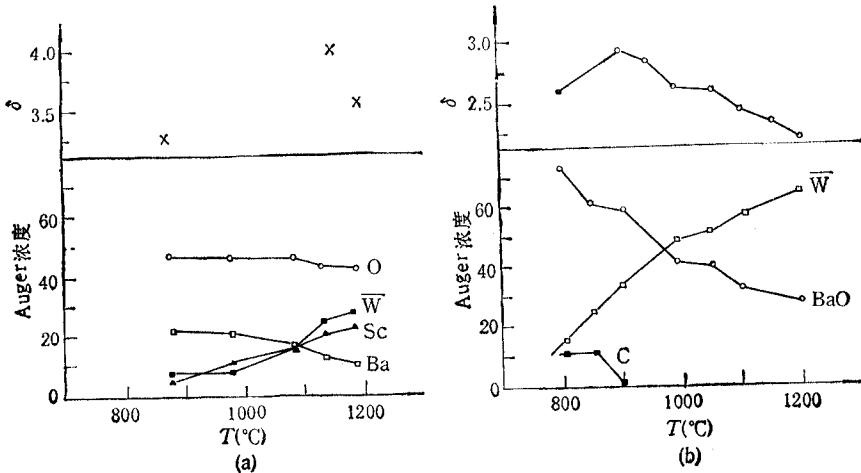


图 8 δ 和表面元素百分比与激活温度的关系
(a) 钨酸盐阴极 (b) 钨酸盐阴极

2. 钨酸盐阴极的 δ 面分布规律

Brodie^[2] 根据钨钨阴极的 δ 与孔度的关系提出: 表面不同部分对 δ 有不同的贡献。孔端浸渍物对 δ 贡献较大。Thomas^[6] 进一步将孔端浸渍物和周围激活钨表面的 δ 分别定为 5.3 和 2.2。对钨酸盐阴极的 AES 分析也表明^[8], 表面有两种区域, 一种区域其上钨原子浓度百分比小, 钡、氧、钨的原子浓度百分比大; 另一种区域正好与前者相反。两种区的尺度在 $10\mu\text{m}$ 量级。今假定阴极表面上两种区域对应的 δ 分别为 δ_1 和 δ_2 , 由于测量系统的分辨率约为 $50\text{--}100\mu\text{m}$, 所以实际测量点内包含许多这样的微区, 而每一微区的 δ 是高或是低是随机的。设任一微区呈现 δ_2 的几率为 p , 呈现 δ_1 的几率为 q , p 和 q 满足归一化条件: $p + q = 1$ 。

若某测量点的微区数为 N , 而测量点内 n 个微区的次级发射系数为 δ_2 , $N - n$ 个微区的次级发射系数为 δ_1 的几率为 $f(n)$, 则有:

$$f(n) = \frac{N!}{n!(N-n)!} p^n q^{N-n} \quad (1)$$

当 n 很大时, $f(n)$ 仅在某一极大值附近不为零。 $f(n)$ 可在这一极大值附近展开^[9], 得到。

$$f(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi Npq}} \exp \frac{-(n - Np)^2}{2Npq} \quad (2)$$

对应此 n 值, δ 应为

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{1}{N} [n\delta_2 + (N-n)\delta_1] \\ &= \delta_1 + \frac{n}{N} S, \quad (\text{其中 } S = \delta_2 - \delta_1)\end{aligned}\quad (3)$$

$$n = N \frac{\delta - \delta_1}{S} \quad (4)$$

将(4)式代入(2)式后得

$$f(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi pq S^2/N}} \exp \frac{-(\delta - \delta_1 - pS)^2}{2(S^2/N)pq} \quad (5)$$

令

$$\bar{\delta} = \delta_1 + pS = (1-p)\delta_1 + p\delta_2 \quad (6)$$

$$d = S \sqrt{2pq/N} \quad (7)$$

则式(5)成为:

$$f(\delta) = \frac{1}{\sqrt{\pi d^2}} \exp \frac{-(\delta - \bar{\delta})^2}{d^2} \quad (8)$$

这就是高斯分布。式中 $\bar{\delta}$ 为平均次级发射系数， d 为分布半高宽度。由(7)式可看出， d 与阴极孔度 P 、高低 δ 的差 S 以及测量区的大小有关。

由第二节所述的实验结果知道，激活后的 $\bar{\delta} = 3.85$ ，半高宽度 d 为 0.4 左右。因此将 $d = 0.2$ ， $\delta_1 = 2.6$ ， $\delta_2 = 5.3$ ， $P = 28\%$ 代入(7)式，得到： $N \approx 70$ ，即每个测量点约有 70 个微区。测量区的大小为微区尺度 ($10\mu\text{m}$) 的 7 倍，约 $70\mu\text{m}$ ，这与测量系统的分辨率是相符的。这也说明，阴极表面次级发射不均匀的尺度在 $10\mu\text{m}$ 的量级。

若在(8)式中，以 $\bar{\delta} = 3.85$ ， $d = 0.18$ (见表 4)代入，作出高斯分布曲线如图 9 中的实线所示。因为高斯分布是对二项式分布取 $n \rightarrow \infty$ 的极限得出的，因此该曲线显得尖锐些。假如采用(1)式的二项式分布，取 $N = 35$ ， $p = 0.3$ ，而 n 通过(4)式与 δ 相联系，则得图 9 中虚线所示的较平坦曲线，与实验数据符合较好。

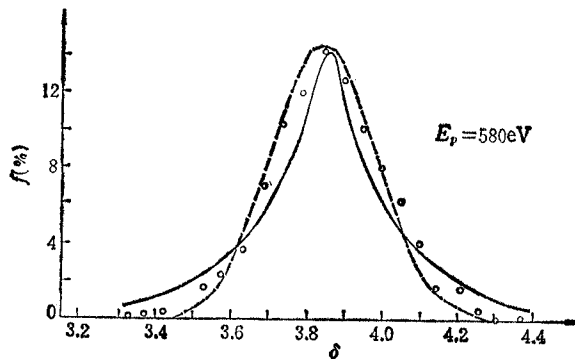


图 9 钨酸盐阴极的理论 $f(\delta)$ - δ 曲线与实验数据的比较
实线为高斯分布，虚线为 $N = 35$ 时的二项式分布，“O”为实验测得的数据

四、结 论

由上面的讨论得到以下几点结论:

(1) 适量的钪是钪酸盐阴极 δ 大的原因。在激活过程中, 存在一个合适的激活温度, 在此温度下, 表面钡的减少和钪的增多对 δ 的影响达到平衡, 此时可获得最大的 δ 。因此对热发射要求不高, 而对次级发射要求较高的场合, 应减少高温激活 (1200°C) 时间, 而增加老炼时间 (1050°C , 160min)。

(2) 钪酸盐阴极表面次级发射是不均匀的。不均匀的尺度在 $10\mu\text{m}$ 量级, 表面可分为两种区域, 一种区域钨的原子浓度百分比大, 钡、氧、钪的原子浓度百分比小; 另一种区域钨的原子浓度百分比小, 钡、氧、钪的原子浓度百分比大。这两种区域分别有不同的 δ 。含钡、氧、钪较多的区域的 δ 大。 δ 的面分布曲线服从二项式分布。至于含钡、氧、钪较多的区域是否就是表面孔端浸渍物所在的区域, 是否就是 Hass^[10] 用 AES 分析指出的富 Sc_2O_3 、低逸出功区域, 这还待进一步的实验来证实。但从富 Sc_2O_3 区所占面积为总面积的 $1/4$ 来看, 此值略比孔度 28% 小一些, 两者应存在一定的对应关系。我们准备更深入地研究该阴极热发射和次级发射之间的关系, 并与阴极表面结构和化学元素组份联系起来, 以进一步弄清钪酸盐阴极的次级发射机理。

本工作是在张思虬教授和刘学恣教授的指导下完成的。曾昭侯、白振纲、江定键同志提供了阴极, 束扫描枪由我所七室提供, 石文栋同志帮助封口, 张玉秀同志帮助装架, 在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] 白振纲等, 电子学通讯, **3**(1981), 191.
- [2] I. Brodie, R. O. Jenkins, *Brit. J. Appl. Phys.*, **8**(1957), 202.
- [3] V. A. Alekseyev, V. N. Lepeshinskays, *Radio Engineering and Electron Physis*, **10**(1965), 502.
- [4] L. Lesensky et al., 8th Conf. on Tube Techniques, New York, 1966, 236.
- [5] 陈隆华, 李洪武, 用正交试验法选择钡钨阴极制造方法, 第四届全国电真空学术年会论文, 上海, 1982 年。
- [6] R. E. Thomas, C. D. Morrill, *Appl. Sur. Sci.*, **16**(1983), 292.
- [7] 杨凌云, 毛独立, 电子科学学刊, **9**(1987), 359—363.
- [8] 苏熙春等, 钪酸盐阴极表面研究的进展, 第四届全国电真空学术年会论文, 上海, 1982 年。
- [9] F. Reig, *Statistical Physics*, McGraw-Hill, New York, pp. 398.
- [10] G. A. Hass, et al., *Surf Sci*, **4**(1966), 66.

AN INVESTIGATION ON SECONDARY EMISSION PROPERTIES OF IMPREGNATED BARIUM SCANDATE DISPENSER CATHODES

Mao Duoli Yong Lingyun Wang Shusheng

(Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing)

ABSTRACT A scanning electron probe is used to study the secondary emission property of the impregnated barium scandate dispenser cathode, the influence of the activation on the secondary emission property, the secondary emission image and the secondary emission distribution over the surface of the cathode. At optimal activity, $\delta_m = 3.56$, $E_{pm} = 700 \text{ eV}$. The activation has larger effect on the δ when the activation temperature is higher than 1100°C . The δ distribution over the surface of the cathode is non-uniform. The half-peak width of the distribution curve over the surface is 0.4. The experimental phenomena are discussed in relation to the surface analysis of the cathode, The theoretically derived binomial distribution curves over the surface are better fitted with the experimental results.

KEY WORDS Thermionic cathode; Secondary emission properties; Scanning electron probe method; Activity; Binomial distribution curve