

实用热阴极的电子初速分布的研究*

汪胜宁 王书绅 杨凌云

(中国科学院电子学研究所)

提 要

本文利用先加速后减速的拒斥场法研究了两种实用热阴极的电子初速分布。并用动态表面发射中心理论解释了氧化物阴极电子初速分布在脉冲强场下分成谱的现象。

一、引 言

热阴极的电子初速分布是阴极研究的主要课题之一。实际应用中对阴极的电子初速分布提出了一定要求。例如,对于迴旋管就要求电子注中电子的横向速度的零散小,管子的效率才高^[1],又如现代的三束(电子束、离子束和分子束)设备中,弱流电子枪发射源的电子速度零散越小,设备的分辨率就越高。有的设备,如发射式电镜和电子束曝光机,甚至要求电子束是单色的^[2]。再则,研究热阴极发射电子的初速分布也是揭示阴极发射机理的一种手段。

研究热阴极的电子初速分布的方法有多种,如电子光学法^[3]、磁场法^[4]和拒斥场法^[5],其中以拒斥场法最简单,该方法的原理已被应用于许多现代表面分析仪器(如 AES、XPS、LEER、SLEEP),与此同时,该方法的精度也得到了很大提高。

我们采用平板三电极系统的拒斥场法对氧化物阴极和钨酸盐钨钨阴极的电子初速分布进行了研究,并作了对比。

二、实验装置

(一) 实验管 图1为实验管的结构示意图。图2为实物照片。阴极4,直径3mm,端面发射,外有护环5。镍制加速极3高为10mm,外径12mm的圆筒,中心有直径1mm的小孔。为了保证各电极相互平行并对中,阴极护环和加速极被嵌封在三根玻璃柱上,构成组件。镍制收集极1为一法拉第圆筒,引线用玻璃包封,以减小漏电流。镍制屏蔽极2将收集极包住,以减少外界电磁场对收集极电流的影响。此外它还可以减小收集极和加速极间的电容,以防止此电容与线路电阻构成微分电路而影响收集极的脉冲电流波形。阴极温度则是用焊在阴极套筒上靠近涂层处的铂-铂铑热偶测量的。

*1982年9月23日收到,1983年7月6日修改定稿。

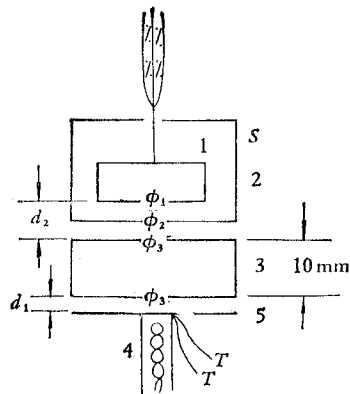


图1 实验管结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental tube structure

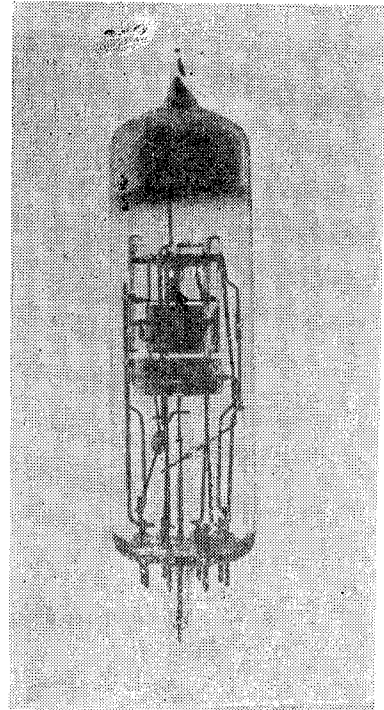


图2 实验管实物照片

Fig. 2 The photograph of experimental tube

(二) 实验用阴极 氧化物阴极：基金属是 Ni-Zr-Mg 合金，涂层是三元盐，克分子比是 Ba: Sr: Ca = 50:45:5，喷涂法涂覆，涂层密度约为 0.71g/cm^3 ，厚为 $50\text{--}70\mu\text{m}$ ，孔度为 $70\text{--}82.3\%$ 。钨酸盐钨钨阴极^[6]：浸渍型，即把钨酸盐粉加粘结剂涂覆在钨海绵基体上，然后在氢中高温浸渍制成的。此类阴极发射物质与海绵体的接触面积大，导电性能较好。

(三) 实验线路和装置 实验线路如图 3 所示。直流运用时，开关 $A \rightarrow \textcircled{2}$ ，开关 $B \rightarrow \textcircled{2}$ 。加速极电源为 400V 直流稳压电源。收集极拒斥电源为 YJ32-1 型直流稳压电源。为了避免测试过程中阴极状态变化产生的影响，拒斥曲线由 $x\text{-}y$ 记录仪快速记录。脉冲运用时，开关 $A \rightarrow \textcircled{1}$ ，开关 $B \rightarrow \textcircled{1}$ 。加速极电源为本室自制的脉冲功率源，输出脉冲电压为 $100\text{--}3500\text{V}$ ，输出脉冲电流为 $0\text{--}5\text{A}$ ，最大工作比为 0.1 。实验中加速极 A 与阴极 K 之间加正极性脉冲电压，重复频率 f 为 50Hz ，幅度为 $142\text{--}3000\text{V}$ 。屏蔽极的电平比收集极高 $30\text{--}45\text{V}$ ，用乙电池供给，通过变阻器调压。加速极脉冲电压和电流的幅度由校准过灵敏度的 MS-6 示波器测量，电压分压比为 $50:1$ 。脉冲电流的取样电阻为 100Ω 。测脉冲电压时，开关 $C \rightarrow \textcircled{1}$ ；测脉冲电流时， $C \rightarrow \textcircled{2}$ 。示波器偏转板灵敏度为 2.84V/mm 。

收集极电流采用测量脉冲电流的直流分量的方法测量，其高次谐波用大容量电容 ($4\mu\text{F}$) 短路到地，平均电流亦由 $x\text{-}y$ 记录仪记录。记录仪的 x 输入端接收极电压（也可用慢扫描锯齿形电压），由 DS-26 型数字电压表校准。

加速极电压、电流和收集极电流的波形照片分别如图 4(a) (b) (c) 所示。

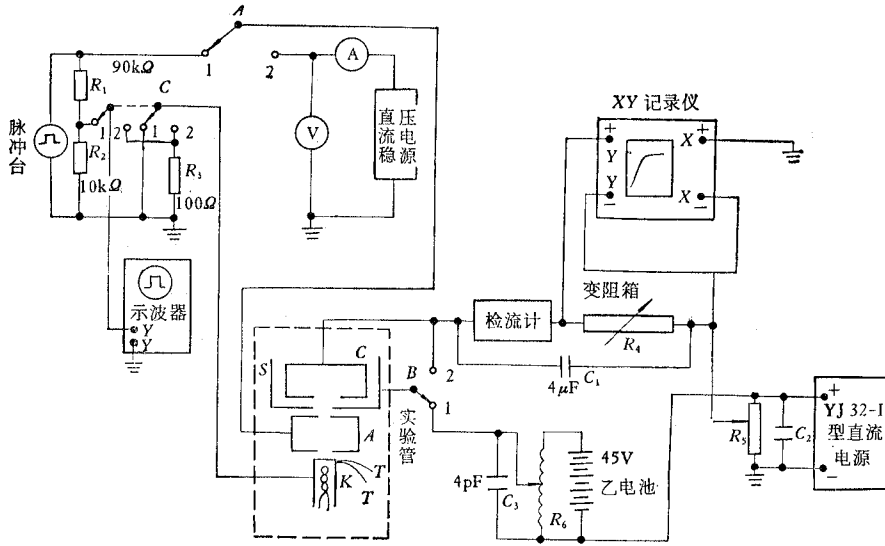


图3 直流和脉冲拒斥曲线测量装置方框图

Fig. 3 Block diagram of the set-up for electron initial velocity distribution measurement

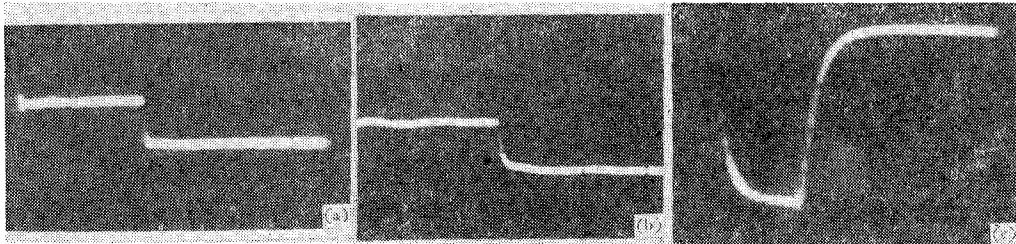


图4 加速极电压(a)、加速极电流(b)和收集极电流(c)的波形示波照片

Fig. 4 Oscillograph displays of waveforms

(a) Accelerator voltage, (b) Accelerator current, (c) Collector current

三、实验结果

(一) 直流加速电压的情况 氧化物阴极和渍制钽酸盐钡钨阴极在低温下,支取饱和和发射时的典型拒斥场特性曲线如图 5(a) 和 (b) 所示. 由图可见, 拒斥曲线均由一段倾斜直线和一段水平直线组成. 在不同加速极电压下, 倾斜直线的斜率均相同. 拒斥曲线随着加速极电压的升高向右平移. 由图可得出下列结果:

(1) 拒斥曲线具有一段倾斜直线的性质表明, 直流运用时, 氧化物阴极和渍制钽酸盐钡钨阴极的电子初速分布都服从麦克斯韦分布律.

(2) 若拒斥曲线偏离点对应的能量为 E_1 , 拒斥曲线上 $I_c = 3 \times 10^{-8}A$ 对应的能量为 E_2 , 则 $\Delta E = E_1 - E_2$ 定义为发射电子的初始能量分散. 对渍制钽酸盐钡钨阴极 $\Delta E_{Ba-w} = 0.5eV$ (当 $T_k = 737^\circ C$, $J_a = 90mA/cm^2$ 时). 对氧化物阴极的 $\Delta E_{oc} = 1.4eV$ (当 $T_k =$

601°C, $J_a = 70 \text{ mA/cm}^2$ 时)。可见钨酸盐钡钨阴极所发射电子的初始能量的分散小于氧化物阴极的。

(3) 通过拒斥曲线倾斜直线的斜率可求得电子温度

$$T_e = \frac{K}{e} \frac{d \lg J_c}{d V_c} \quad (1)$$

两种阴极的电子温度 T_e 普遍高于阴极温度 T_k 。图 6 所示为氧化物阴极的 $\Delta T (= T_e - T_k)$ 与 T_k 的关系曲线。由图看出, ΔT 随 T_k 单调上升。图 7 所示为三个钨酸盐钡钨阴极的 ΔT 与 T_k 的关系曲线。由图看出, 三条曲线都有一峰值, 峰值发生在 $T_k = 1120 - 1160^\circ\text{C}$ 之间。

(4) 用先加速后减速法求得的电子温度 T_e 普遍高于直接减速法求得的(图 6)。

(5) 由拒斥曲线随加速电压升高而右移的特性, 可求出氧化物阴极的电导率^[4]。图 8 为求得的电导率 σ 与温度 T_k 的关系 ($\lg \sigma - \frac{1}{T_k}$)。由图看出, 低温和高温下氧化物阴极的导电机构是不同的, 转折温度在 800K 左右, 电导率为 $3.1 \times 10^{-6} - 2.5 \times 10^{-7} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。钨酸盐钡钨阴极尽管不是厚涂层阴极, 但拒斥曲线随加速电压的升高也有右移的特性, 不过右移量较小。

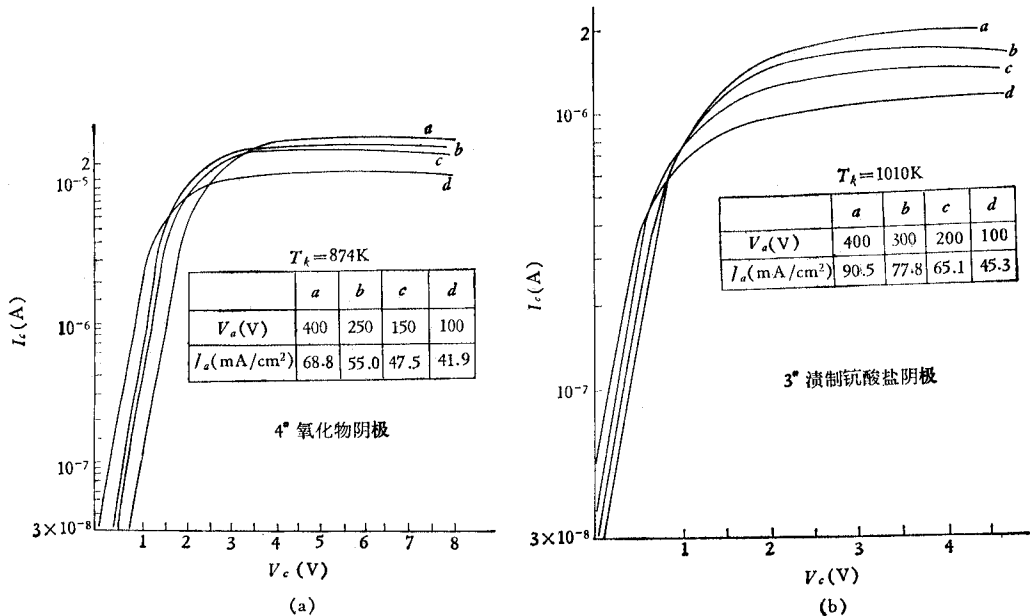


图 5 不同直流加速电压下的拒斥曲线
(a) 氧化物阴极 (b) 渍制钨酸盐钡钨阴极

Fig. 5 Retarding field current as a function of accelerator voltage
(a) Oxide-coated cathode (b) Impregnated scandate Ba-W cathode

(二) 脉冲加速电压情况 在较低的温度范围内, 三元氧化物阴极的脉冲拒斥曲线和直流拒斥曲线相同(图 9 曲线 d、e)。但当温度超过 1000K 以后 ($J_a = 1.2 \text{ A/cm}^2$), 脉冲拒斥曲线就出现不止一个平坦区, 阴极发射电子的初速分为高、低两组电子(图 9 曲线 a、b、

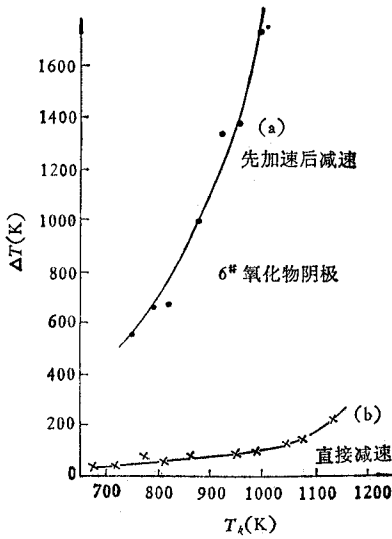


图6 氧化物阴极(6#)的 ΔT 与 T_k 的关系曲线(先加速后减速)

Fig. 6 $\Delta T-T_k$ curves of the oxide coated cathode 6#

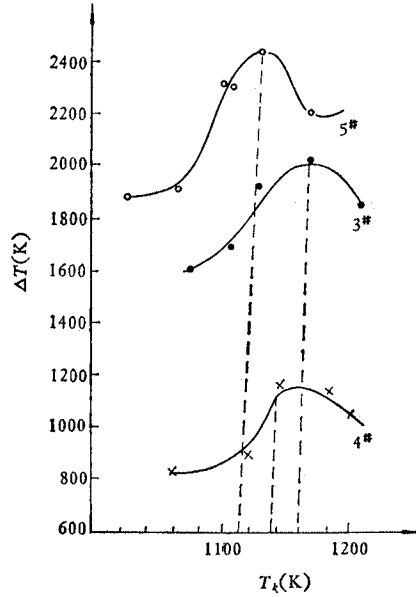


图7 三个钨酸盐钨钨阴极的 ΔT 与 T_k 的关系曲线(先加速后减速)(a)5# (b)3# (c)4#

Fig. 7 $\Delta T-T_k$ curves of three impregnated scandate Ba-W cathodes

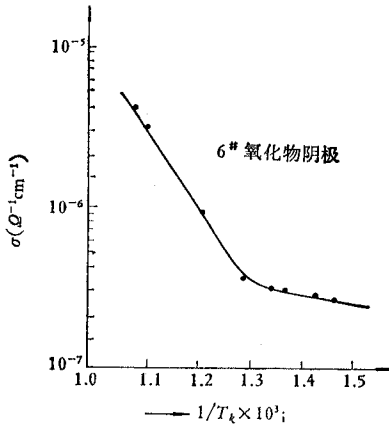


图8 氧化物阴极(6#)的 $\lg\sigma-1/T_k$ 曲线

Fig. 8 $\lg\sigma-1/T_k$ curves of oxide coated cathode

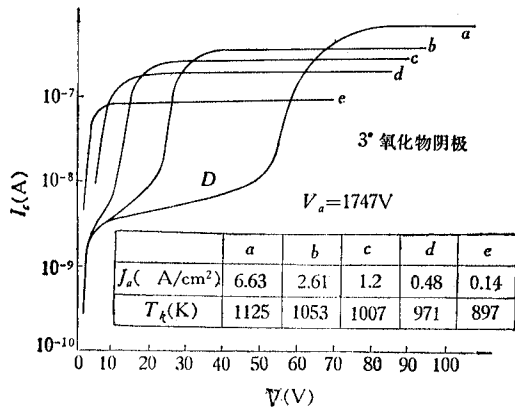


图9 相同脉冲加速电压下,氧化物阴极在不同温度下的脉冲拒斥曲线 ($V_a = 1747V$)3#管

Fig. 9 Pulse retarding field characteristics of the oxide-coated cathode at same pulse accelerating voltage ($V_a = 1747V$) of tube 3# under different cathode temperatures

c). 亦即发射电子的初速分布出现分成谱的现象,这种现象在文献[7]中亦观察到. 在相同脉冲加速电压下,随阴极温度的升高,高速和低速电子的能量差随之升高(见表1).

在相同温度下,随脉冲加速电压的升高,高低速电子间的能量差亦随之升高(见图10,表2),最大能量差可达50eV左右.

表 1 高低速两组电子的能量差与温度的关系

Tab. 1 Energy difference between high and low velocity electrons at different cathode temperatures

$T_k(K)$	1125	1053	1007	971	897
$V_i - V_0$ (eV)	55	22.5	10	0	0

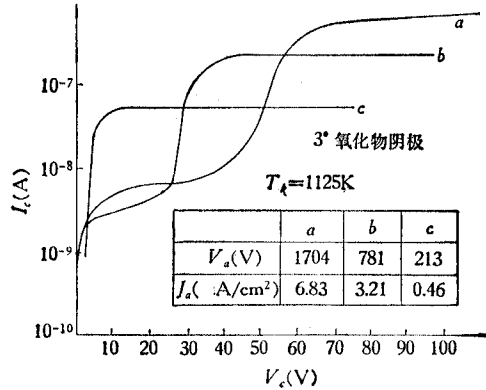


图 10 相同温度不同脉冲加速电压下氧化物阴极(3#)的脉冲拒斥曲线

Fig. 10 Pulse retarding field characteristics of the oxide-coated cathode for different pulse accelerating voltage at same cathode temperature

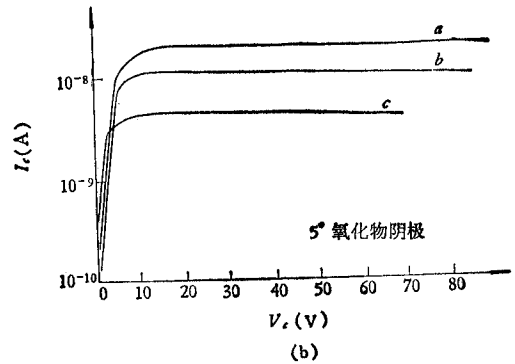
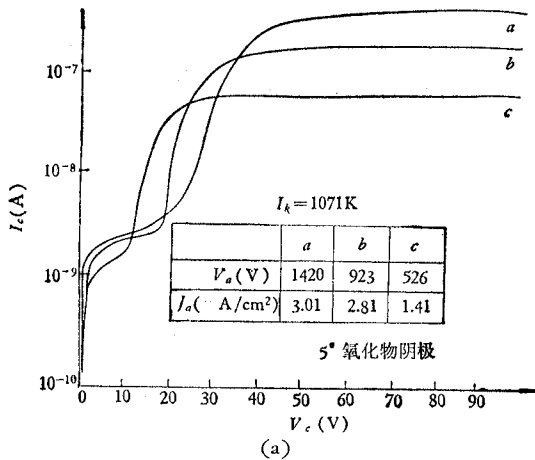


图 11 氧化物阴极(5#)打火前(a)和打火后(b)的脉冲拒斥曲线

Fig. 11 Pulse retarding field characteristics of oxide-coated cathode before and after sparking of tube (5#)

(a) Before sparking, (b) After sparking

当脉冲电压过大以致使涂层发生火花后,即使将脉冲电压降低到发生火花前的数值,也观察不到电子的初速分布分成谱的现象. 脉冲电流值也降低了, 拒斥曲线呈现与直流拒斥曲线相同的形状(图 11 所示). 图 11(a) 是发生火花前的脉冲拒斥曲线, 图 11(b) 是

表 2 高低速电子间的能量差与电流密度的关系($T_k = 1125\text{K}$)Tab. 2 Energy difference between high and low velocity electrons for different current densities ($T_k = 1125\text{K}$)

$V_a(\text{V})$	1704	781	213
$J_a(\text{A}/\text{cm}^2)$	6.83	3.21	0.46
$V_i - V_0$	51.5	27.5	0

发生火花后的曲线. 观察打火后的氧化物阴极的显微照片发现, 有些区域氧化物涂层已被打掉, 暴露出了基金属. 由此可见, 发射电子初速分布的成谱现象与阴极涂层直接有关.

四、讨 论

氧化物阴极在脉冲强场下的电子初速分布成谱现象过去有许多研究观察到, 但解释各不相同. 如 Jansen 等人^[3]认为是由于脉冲强场下, 支取大电流时, 涂层微孔中大量电子被强场拉出, 孔内电子气传导的平衡被破坏, 涂层表面晶粒发射电子后得不到补充, 晶粒便充电, 最后形成大的涂层位降. 这样从涂层不同部位发射出来的电子就有了不同的速度. 又如 Никонов^[8]则认为由于氧化物阴极涂层表面的微观粗糙性, 阴极本身结构的不均匀性和多孔性都会造成发射表面是非等位的. 这种非等位加大了发射电子的能量分散, 导致出现一群群不同能量的电子. 下面我们用动态表面发射中心的理论来解释氧化物阴极的电子初速分布成谱现象.

图 12 是氧化物阴极的剖面图, x 轴方向垂直于阴极表面; y 轴方向平行于阴极表面. 由动态表面发射中心理论知道, “氧化物阴极基金属表面薄层和涂层晶粒表面都可以形成发射中心, 都可以发射电子”^[9]. 因此, 当阴极表面有强电场时(脉冲加速电压情况), 由于涂层表面的粗糙性, 表面各处的场强极不均匀. 图 12 中 A 处凸起部分场强最强, 这样, 肖特基效应将使 A 处发射中心发射更多的电子. 另外, 电场的渗透作用将使 A 处下方涂层微孔中的电子大量被拉入真空, 微孔里空间电荷密度减弱, 使 A 处晶粒上发射电子后得不到足够电子补充而充电, 从而在涂层近表面层中形成高电位降. 由于近表面层很薄, 所以该层的孔隙里的电场极强. 这样, 由基金属表面薄层处发射中心发射的电子通过贯穿孔到达表面层时受到额外的加速, 其中一部分电子径直被拉入真空形成高速电子; 更多的电子因受涂层表面充正电的晶粒吸引, 以所携带的能量撞在这些晶粒上, 并打出二次电子, 如二次发射系数 $\delta > 1$, 则表面晶粒非但得不到电子的补充, 反而发射出更多的电子, 这将导致晶粒进一步充电. 这种“雪崩效应”可使 A 处涂层位降急剧增加. 如我们测到的可达 50eV . 文献 [10] 亦报道过涂层表面位降可高达 110eV . 这样, 从涂层外表面发射的电子(包括二次电子)的速度要比自微孔内直接飞往加速极的电子的速度要低得多. 这就是脉冲强场运用时, 发射电子初速分布成谱的主要原因.

同理, 在涂层低凹部位(图中 B 处), 上述过程同样在进行. 但由于该处场强较弱(与 A 处相比), 涂层表面发射中心发射的电子就较少, 从此处微晶孔隙中拉入真空的电子也较少. 这两个因素的共同作用使得低凹处表面晶粒充电较弱, 而它得到电子补充的机会

则较多,所以该处表面涂层位降较 A 处为低。这样,涂层表面沿 y 轴方向的位降是不均匀的。这将造成发射电子的初速分布成谱^[10]。我们在实验中只发现一组低速电子,可能是阴极表面较平滑或受限于测量仪器的分辨率。

从上面的讨论可知,如欲电子初速分布成谱,必须在无脉冲强场时,微晶孔隙内已有足够高的空间电荷密度,因此,一定的温度是速度分布成谱的必要条件。

综上所述,在一定温度下,氧化物阴极发射电子的初速分布成谱是涂层表面和基金属表面薄层上的发射中心发射电子的多少、晶粒充电形成的近表面层的高电位降、强场作用下的微孔导电性、涂层表面结构的粗糙性等的作用的结果。

直流运用下,不论温度高低,电子初速分布均服从麦克斯韦分布律,不出现成谱现象。这是由于直流加速电压不能加得太高,阴极表面不处在强场下,即使运用于高温,发射中心的发射大小,受涂层孔隙内空间电荷的限制,能支取的电流密度远不如脉冲强场时大,涂层表面充电不多,电位分布也较均匀,所以形成不了电子初速分布成谱的条件。

阴极打火后,电子初速分布成谱现象消失是由于涂层遭到局部破坏,成谱现象所需的必要条件也遭到破坏所致。

钨酸盐钨钨阴极即使在高温,强场、大脉冲电流密度下运用,也不出现电子初速分布成谱的现象,这主要应归因于阴极结构上的特点。钨海绵体和发射物质接触面积很大,阴极表面光滑,电场分布较均匀等使发射电子的初速分布成谱的条件不能形成,故只呈现麦克斯韦分布。

五、结 束 语

1. 钨酸盐钨钨阴极在任何条件下运用,电子初速分布都是连续的,服从麦克斯韦分布律。

2. 氧化物阴极在直流和低温脉冲下运用时 ($T_k < 900\text{K}$) 电子初速分布是连续的,服从麦克斯韦分布律。

3. 在一定温度下,加上强脉冲电场时,氧化物阴极发射电子的初速分布分裂成谱。主要原因是外加脉冲强场强制地拉走了电子,引起涂层表面某部分的晶粒充电,使从基金属表面出发的电子和从涂层表面出发的电子之间有很大的能量差。

本项工作是在张恩虬教授直接指导下进行的,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] A. B. Тапонов и др., *Изв. Вузov-Радиофизика*, **18** (1975), 280.
- [2] J. Kelly, AD AO 37094, (1977).
- [3] C. G. Jansen, et al., *Philips. Res. Rep.*, **9** (1954), 24.

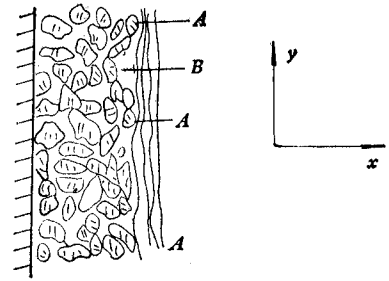


图 12 氧化物涂层的剖面图

Fig. 12 Cross-section view of the oxide coating

- [4] H. Shelton, *Phys. Rev.*, **107** (1957), 1553.
[5] L. Sparks et al., *J. Appl. Phys.*, **24** (1953), 453.
[6] 白振纲等, 电子学通讯, **3**(1981), 191.
[7] 刘学恂, 叶毓林, 电子学报, 1962年, 第2期, 第23页。
[8] Б. П. Никонов, Оксидный Катод, Издательство «Энергия», Москва, (1979), стр. 72.
[9] 张恩虬, 电子学通讯, 1977年, 第1—2期, 第1页。
[10] 清华大学无线电系, 阴极参考讲义, 1964年, 第3—15页。

RESEARCH ON ELECTRON INITIAL VELOCITY DISTRIBUTION OF PRACTICAL THERMIONIC CATHODES

Wang Shengning, Wang Shushen, Yang Lingyun

(*Institute of Electronics, Academia Sinica*)

Electron initial velocity distribution of two kinds of practical thermionic cathodes are studied with "pre-accelerating—post-decelerating type retarding field method. Based on the theory of dynamical surface emission centers, the phenomenon, i.e. the electron initial velocity distribution of the oxide-coated cathode splits into spectrums under strong pulse electric field, is explained.