

光学法检测光阴极的研究*

高鲁山 刘力滨 王仲春

(北京理工大学,北京)

摘要 文中讨论了光学法检测光阴极的原理,介绍了所设计的监测装置及对多碱光阴极制作过程中光学信息的检测,提出了利用光学法监控光阴极制作的具体方案。

关键词 光阴极;多碱光阴极;光阴极检测技术;光学法检测光阴极

一、引言

光阴极检测技术的研究近年来受到国内外学者的普通重视,利用微机控制技术监控光阴极制作已成为热门研究课题,而实现光阴极制作计算机控制的关键在于对其控制信号的选择和提取。目前广泛采用的光电流监控方法,虽然简便易行,但由于作为控制信号的光电流本身,是表征光阴极光电子发射过程中最终发射能力的一个综合指标,它不能具体说明发射体的化学组分和结构状态。所以,用此方法不能达到精确控制光阴极制备工艺的目的。

半透明光阴极是一种光学薄膜,其产生光电子发射的原因在于它具有很强的光学吸收特性,有利于体内产生光电子激发并逸出体外。从光吸收到光电子发射的全部过程只与薄膜的成份、结晶状态和表层电子状态相关。代表膜层的成份和结构的物理量有光学折射率 n 和光衰减系数 k 等。通常将 n 和 k 称为阴极膜的光学常数。Dolizy^[1]首先提出监测光阴极膜形成过程的光学方法。我们曾对此种方法的原理进行过探讨^[2],并就监测技术和方法,以及监控装置等进行了实验研究。与传统的光阴极检测技术相比,光学法利用了与发射体成份和结构直接相关的光学信息控制工艺,因而更具有科学性。

二、光阴极的光学参量

文献[1]的基本出发点是将光阴极膜层的生长过程看成为多层膜的叠加,依此假定推导光学常数的数学表达形式。我们认为,在进行光阴极膜层光学性质的研究时,应将阴极薄膜视为均匀的各向同性体。以多碱光阴极为例,这种材料的组成有可能是均匀的 Na_2KSb 结晶体;也可能是 $\text{Na}_2\text{KSb} + \text{Na}_3\text{Sb}$, 或者是 $\text{Na}_2\text{KSb} + \text{K}_3\text{Sb}$ 的固溶体^[3]。实际上在膜层增长的过程中,当碱源蒸发速度和激活温度适当时,化学反应可在短时间内达到所希望的单一化合物或几种化合物的混合体。至于表面的铯处理层,由于是在较低温度

* 1987年5月20收到,1988年5月26日修改定稿。

下形成的一种新的异质结膜层,其厚度很薄,对透过的光能影响很小。基于上述的基本思想,可导出光阴极薄膜的各种光学参量。

1. 反射率和透射率与折射率的关系

为了方便起见,设光束垂直入射到阴极面上,得到的 Fresnel 反射和透射系数分别为:

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}, \quad t_1 = \frac{2n_0}{n_0 + n_1}.$$

式中 n_0 为衬底折射率, n_1 为光阴极膜层的折射率。为了能直接测量,应以光强度表示为宜。反射率 R 和透射率 T 分别表示反射光强和透射光强与入射光强之比。根据光强与振幅的平方比关系,可得下式

$$R = \frac{(n_0 - n_1)^2}{(n_0 + n_1)^2} \quad (1)$$

$$T = \frac{4n_0n_1}{(n_0 + n_1)^2} \quad (2)$$

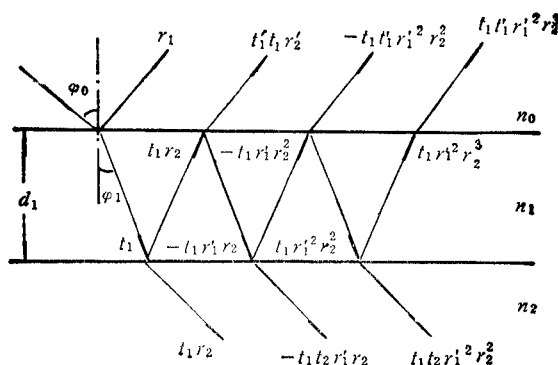


图 1 平行光射入阴极膜层的情况

图 1 是单位振幅的一束平行光,射入光阴极膜层后,除反射光外,还有部分光透过膜层进入真空 n_2 中。

由厚度为 d_1 的光阴极膜层引起的位相差为

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1 \cos \varphi_1 \quad (3)$$

这样,光束通过膜层后,总的 Fresnel 系数就可写成:

$$r = \frac{r_1 + r_2 e^{-2i\delta_1}}{1 + r_1 r_2 e^{-2i\delta_1}}, \quad t = \frac{t_1 t_2 e^{-2i\delta_1}}{1 + r_1 r_2 e^{-2i\delta_1}} \quad (4)$$

从而得到的反射率和透射率为:

$$R = \frac{r_1^2 + 2r_1 r_2 \cos 2\delta_1 + r_2^2}{1 + 2r_1 r_2 \cos 2\delta_1 + r_1^2 r_2^2} \quad (5)$$

$$T = \frac{t_1^2 t_2^2}{n_0(1 + 2r_1 r_2 \cos \delta_1 + r_1^2 r_2^2)} \quad (6)$$

考虑到光阴极是具有强光学吸收能力的薄膜,其折射率应为复数。即复折射率为:

$$N_1 = n_1 - ik \quad (7)$$

将 N_1 代入上述各式, 并设光束垂直入射时的 $\varphi_1 = 0$, 则:

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1 - i d_1 \frac{2\pi}{\lambda} \quad (8)$$

令

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \theta - i\alpha, & g_1 &= \frac{n_0^2 - n_1^2 - k^2}{(n_0 + n_1)^2 + k^2}, & g_2 &= \frac{n_1^2 + k^2 - 1}{(n_1 + 1)^2 + k^2} \\ h_1 &= \frac{2n_0 k}{(n_0 + n_1)^2 + k^2}, & h_2 &= \frac{-2k}{(n_1 + 1)^2 + k^2}, & A &= 2(g_1 g_2 + h_1 h_2) \\ B &= 2(g_1 h_2 - g_2 h_1), & C &= 2(g_1 g_2 - h_1 h_2), & D &= 2(g_1 h_2 + g_2 h_1) \end{aligned}$$

当光束从窗口衬底一侧射入时, 可得:

$$R_T = \frac{(g_1^2 + h_1^2)e^{2\alpha} + (g_2^2 + h_2^2)e^{-2\alpha} + A \cos 2\theta + B \sin 2\theta}{e^{2\alpha} + (g_1^2 + h_1^2)(g_2^2 + h_2^2)e^{-2\alpha} + C \cos 2\theta + D \sin 2\theta} \quad (9)$$

$$T = \frac{n_2[(1 + g_1)^2 + h_1^2][(1 + g_2)^2 + h_2^2]}{n_0[e^{2\alpha} + (g_1^2 + h_1^2)(g_2^2 + h_2^2)e^{-2\alpha} + C \cos 2\theta + D \sin 2\theta]} \quad (10)$$

当光束从真空一侧射入时,

$$R_R = \frac{(g_1^2 + h_1^2)e^{-2\alpha} + (g_2^2 + h_2^2)e^{2\alpha} + A \cos 2\theta + B \sin 2\theta}{e^{2\alpha} + (g_1^2 + h_1^2)(g_2^2 + h_2^2)e^{-2\alpha} + C \cos 2\theta + D \sin 2\theta} \quad (11)$$

当给定 n_0, n_2 和波长 λ 时, 通过(9), (10)和(11)式联立, 可求出 n_1, k 和 d 的值. 这项工作通常由计算机来完成.

不同结构和成分的光阴极膜, 对应着不同的 n_1 和 k 值. 在膜层增长过程中, n_1 和 k 的值并不随 d_1 的加厚而改变. 因此, 在光阴极制作过程中, 在阴极膜为均匀的各向同性的假定下, 可利用光学检测装置直接测得 R_T, R_R 和 T , 从而达到监控 n_1, k 值和监测 d_1 的目的.

2. 光吸收率 K 与膜层厚度 d 的关系

光吸收率 K 也是一个可测的光学参量. 当波长为 λ 的光束通过光阴极后, K, R 与 T 的关系为:

$$K = 1 - R - T \quad (12)$$

式中的 K, R 和 T 分别为阴极膜层的吸收光能 I_i , 反射光能 I_R 和透射光能 I_T 与入射光能 I_0 之比. 按照能量守恒定律, 有 $I_0 = I_i + I_R + I_T$. 当 I_0 通过厚度为 d_1 的光阴极后, 其光能衰减可表示为:

$$I_T = (I_0 - I_R)e^{-\alpha d_1} \quad (13)$$

其中的吸收系数 $\alpha = 2\pi k/\lambda$. 由式(13)可得:

$$d_1 = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{1}{k} \ln \left(\frac{1-R}{T} \right) \quad (14)$$

或

$$\alpha = \frac{1}{d_1} \ln \left(\frac{1-R}{T} \right) \quad (15)$$

由上两式可见, 若膜层的 k 已知, 通过测量 R, T 或 K , 就可监测膜层的厚度 d_1 ; 当然, 当

d_1 已知,也可得到光学吸收系数 α 。

三、光阴极光学信息的检测装置及检测方法

为了实现对光阴极光学信息的检测,并保证其准确性和精度的要求,本装置在设计原理和技术上采取了如下的措施:(1)从缩短有效光照距离,斩光器和滤光片的选择,以及在聚光效能等方面保证了光阴极面能接受到足够的光照强度;(2)利用两种调制光频、两个光接受器和四路高灵敏度选频放大器,可同时获得四种光信号;(3)在反射率和透射率的测量中,采用了取相对值的方法,避免了系统中各种复杂条件对测量精度的影响。从而实现了在允许精度范围内对多种光学信号的同时检测。

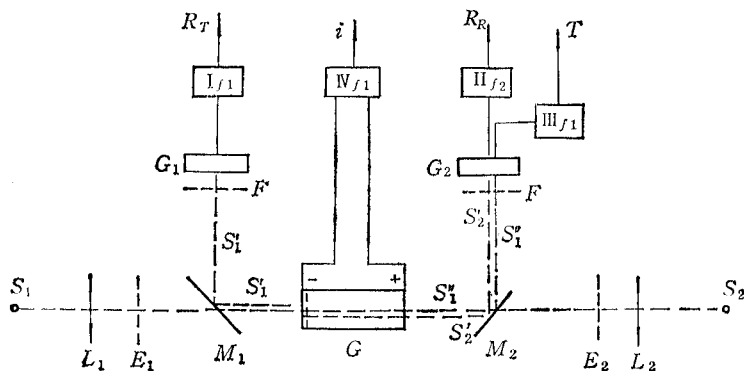


图2 光阴极光学信息检测装置示意图

按图2所示,由光源 S_1 和聚光镜 L_1 获得平行光束,经斩光器 E_1 调制成频率为 f_1 的脉冲光,垂直入射到光阴极面上。由膜层反射回来的光束 S_1' ,经半反镜 M_1 折转后,被光敏器件 G_1 接受,通过放大器 I_{f1} 可得到 R_T 。同时可获得 R_T-t 曲线,经处理后可作出随着膜厚增长的 R_T-d_1 曲线。

由光源 S_2 和聚光镜 L_2 ,经斩光器 E_2 获得的频率为 f_2 的平行光束,从另一侧垂直入射到光阴极面上,由膜层反射回来的光束 S_2' 经半反镜 M_2 ,由 G_2 接受。经放大器 II_{f2} 测得 R_R ,处理后可得到 R_R-d_1 曲线。

入射光束 S_1 透过阴极膜层的那部分 S_1'' ,经过 M_2 也由 G_2 接受,由选频放大器 III_{f1} 就可得到 T 和经过处理后的 $T-d_1$ 曲线。

上述三个被测的光信号均为单色光,即为 $R_T(\lambda)$, $R_R(\lambda)$ 和 $T(\lambda)$ 。所以 $n_1(\lambda)$ 和 $k(\lambda)$ 也都是波长 λ 的函数。

因为处于系统中的试验管光阴极可以接受单色光,也可以接受白光。所以能通过阴极-阳极回路测出白光照射下的光电流 i ,单色光照射下的光谱灵敏度。经放大器 IV_{f1} 可获得 $i-t$ 曲线和光谱响应曲线。

必要时还可以检测光阴极面的前、后量子产额 ρ_T 和 ρ_R ,以及随着膜层变化的 ρ_R/ρ_T-d_1 曲线。

四、实验结果分析和讨论

作为实例,对厚三碱光阴极进行了实验研究。图2所示的试验管G是一只具有两平行端面的真空二极管。在做试验之前,首先将 S_1 和 S_2 两光源系统与试验管调到同一光轴, S_1 置于试管阴极端窗一侧。

按照预定的 $[\text{Cs}]\text{Na}_2\text{KSb}$ 阴极制备程序,利用光学信息监测装置进行实时监测,将测得 R_T , R_R 和 T ,以及白光光电流 i_{μ} 和光谱响应。采用计算机将上述数据运算处理后,可得到 n_1 , k , d_1 和 K 的值。

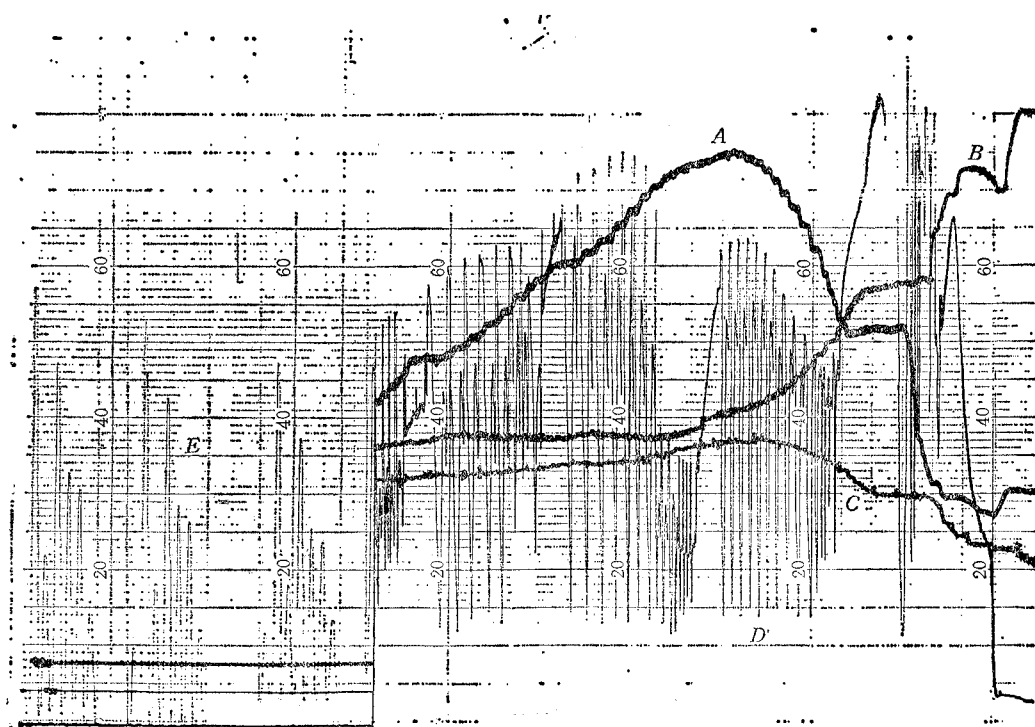


图3 实验记录曲线

图3示出的是制作 $[\text{Cs}]\text{Na}_2\text{KSb}$ 光阴极全过程的5种光信号随着膜层增长的变化曲线。图中的A是背反射率 R_T-d_1 (实际上为 R_T-t)曲线。首先,这是对工艺条件最敏感的一个信号,按照典型的 R_T-d_1 理论曲线可以控制阴极制备工艺;第二,利用实测的 R_T-d_1 (图4)可确定膜层的厚度,按公式(5)并设 $\varphi = 2\delta_1$,就可求出曲线上特定点的厚度。当 R_T 为极大值时, $\cos\varphi = -1$; R_T 为极小值时, $\cos\varphi = 1$ 。取 Na_2KSb 材料的 $n_1 = 3.2$,入射光波长为540 nm时,曲线上的第一个峰值a点的 $\varphi = \pi$, $d_{1a} = 42.1$ nm; b点的 $\varphi = 2\pi$, $d_{1b} = 84.2$ nm; c点的 $\varphi = 3\pi$, $d_{1c} = 124.6$ nm。不同材料的膜层, n_1 不相同,计算出的厚度值也不同。不同波长的光,特定点对应的波长也不同。即表示曲线的形状与 n_1 和 λ 是有关的。第三,在表面Cs处理过程中,由于厚度的变化很微小,所

以此时的 R_T-t 近似于水平线。

B 为 $T-d_1$ 曲线, C 为 R_R-d_1 曲线。利用同时采集到的三个光学信号 R_T , R_R 和 T , 通过运算可以得到在膜层形成过程中的实际材料之值 n_1 ; D 是光电流曲线; E 为光谱响应, 代表了在 450—750 nm 范围内七个波段的光谱灵敏度。

根据对光阴极膜层光学性质和可测参量的研究, 可以设计出几种监控光阴极制备工艺的方案。

(1) 通过监测 R_T , R_R 和 T , 将采集到的数据输入计算机进行实时处理以便确定 d_1 , 采用比较信号法控制蒸发源和激活温度, 修正 n_1 和 k 值, 以达到控制 Na_2KSb 化学组分和晶体结构的目的。

(2) 将由理论计算或在实验中得到的标准曲线 R_T-d_1 , 利用控制各种工艺条件的方法, 使其在制备过程的实测曲线 $R_T^*-d_1^*$ 逼近标准曲线。

(3) 仍以光电流为主控信号, 同时监测光学常数作为辅助控制手段。

上述三种方案各有其特点。究竟如何选择, 应根据各自的条件进行。本文所叙述的原理适用于所有的铯碱化合物光阴极, 它们均可利用光学法进行工艺监控。我们曾用此法对 Cs_3Sb , $[\text{Cs}]\text{Na}_2\text{KSb}$ 和 $[\text{Rb}, \text{Cs}]\text{Na}_2\text{KSb}$ 做过实验研究, 得到了满意的结果^[4,5]。

五、结 论

在假定光阴极是一个均匀的各向同性光学薄膜的条件下, 根据薄膜光学原理推导出光阴极的正、背反射率和透射率数学表达式。膜层的光学常数 n , k 和厚度 d 可由上述三方方程联立解出, 这就为在制备光阴极过程中, 实时检测光学信息的变化, 以达到监控光阴极制备工艺奠定了基础。

根据上述原理设计的光阴极光学信息监测装置, 具有同时采集多种光学信号, 灵敏度高, 抗干扰能力强和便于计算机控制等特点。利用它还可进行光阴极光学性能的研究。

对厚三碱光阴极的试验结果表明, 利用光学法监测阴极膜层增长过程中的光学信号的变化, 逼近典型规范曲线并辅助以传统的光电流监控法, 效果良好。它比目前通用的光电流监控工艺法更具有科学性。

感谢北京大学的吴全德教授和薛增泉副教授对本研究给予的指导和帮助。

参 考 文 献

- [1] P. Dolizy, *Phillips Tech. Rev.*, **40** (1982), 19—22.
- [2] 高鲁山, 王仲春, *工程光学*, 1982 年, 第 2 期, 第 71—81 页.
- [2] M. Beghin et al., *SPIE*, **491**(1984), 281—285.
- [4] 钱思远等, *中国光学学会年会论文选*, 上海, 1985 年, 第 213 页.
- [5] 高鲁山, 李朝木, *四碱光阴极的研究*, *电子学报*, 1986 年, 第 5 期, 第 27—37 页.

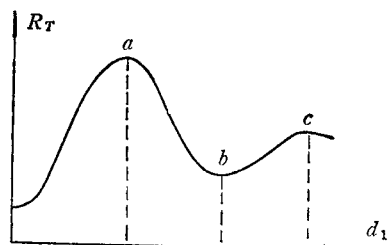


图 4 阴极膜的 R_T 随着 d_1 增长的变化曲线

RESEARCH ON OPTICAL METHOD OF MONITORING PHOTOCATHODE PROCESSES

Gao Lushan Liu Libin Wang Zhongchun

(Beijing Institute of Technology, Beijing)

Abstract Principle of optical method of photocathode process control, which is one of photocathode process monitoring techniques, is discussed. A monitoring apparatus is described and had applied to investigate the optical parameters of multialkali photoemitter during process. Some actual schemes using the method to monitor the preparation of photocathodes are suggested.

Key words Photocathode; Multialkali photocathode; Photocathode monitoring technique; Optical method for measuring photocathode parameters