

“超 I 代像增强器” 光电阴极成分控制原理研究

常本康

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210014)

摘 要 本文研究了用光电阴极反射率预测和确定多碱阴极的厚度和成分, 并用反射率和光谱响应对其进行控制. 如果用 520 nm 单色光源来测量反射率和光谱响应, 则“超 I 代像增强器”的光电阴极的厚度应在 120 nm 左右, 即峰值 R_M 出现后, S/S_{max} 约为 60% 时. 根据 (R_{M_1}, R_M) 和 (R_M, R_{M_2}) 确定 n, k 值以及光电流在光谱响应峰值前的稳定上升和峰值后的近似线性下降规律通过调节铯、钾、钠源蒸发速率控制阴极成分.

关键词 多碱阴极, 光吸收系数, 光反射系数, 光透过系数.

1 引 言

一般来讲, 折射率 n , 衰减系数 k 和阴极厚度 d 可以显示阴极制备过程中的阴极成分的变化. 例如, 在 60 nm 内, Na_2KSb 由钠置换钾形成 Na_3Sb , 则反射率降低; 而在 60 nm 外, 则反射率增加^[1]. 对于光学薄膜, 可以通过测量膜层的前反射率, 背反射率和透过率确定 n, k 和 d . 通过解联立方程组或图解法得到. Dolizy 采用此法使光电阴极的积分灵敏度达 705 $\mu\text{A}/\text{Lm}$ ^[2]. Dupuy 等人利用 Dolizy 的研究成果, 制造了“超 I 代像增强器”. 最低积分灵敏度 500 $\mu\text{A}/\text{Lm}$, 典型值 650 $\mu\text{A}/\text{Lm}$ ^[3].

对于一个实际的器件, 例如 I 代倒像管, I 代薄片管等, 在阴极制备过程中不能得到背反射率和透过率的信息. 这就给用光学方法研究光电阴极的成分带来一定的困难. 本文提出用反射率 R 预测并确定多碱阴极的厚度和成分, 并用光电阴极反射率 R 和光谱响应 S 来控制多碱阴极厚度和成分的变化.

2 用反射率确定光电阴极成分

2.1 反射率表示式

如图 1 所示, 如果设基底的折射率为 n_0 , 光电阴极的折射率 $N = n_1 - ik_1$, 其中 n_1 为光电阴极的折射率, k_1 为光电阴极的消光系数; 真空的折射率为 n_2 , 则得到光电阴极的反射率为:

$$R = \frac{1}{Q} [(a_1^2 + b_1^2) e^{2a_1} + (a_2^2 + b_2^2) e^{-2a_1} + A \cos(2\delta_1) + B \sin(2\delta_1)] \quad (1)$$

其中

$$Q = e^{2a_1} + (a_1^2 + b_1^2)(a_2^2 + b_2^2) e^{-2a_1} + C \cos(2\delta_1) + D \sin(2\delta_1)$$

$$a_1 = \frac{n_0^2 - n_1^2 - k_1^2}{(n_0 + n_1)^2 + k_1^2}; \quad a_2 = \frac{n_1^2 - n_2^2 + k_1^2}{(n_1 + n_2)^2 + k_1^2}; \quad \alpha_1 = 2\pi k_1 \frac{d}{\lambda};$$

$$b_1 = \frac{2n_0 k_1}{(n_0 + n_1)^2 + k_1^2}; \quad b_2 = -\frac{2n_2 k_1}{(n_1 + n_2)^2 + k_1^2}; \quad \delta_1 = 2\pi n_1 \frac{d}{\lambda};$$

$$A = 2(a_1 a_2 + b_1 b_2); \quad B = 2(a_1 b_2 - a_2 b_1)$$

$$C = 2(a_1 a_2 - b_1 b_2); \quad D = 2(a_1 b_2 + a_2 b_1).$$

取多碱阴极的折射率 n_1 为 3.3, 消光系数 k_1 为 0.7, 并且用 520 nm 的单色光控制, 理论计算的光学反射率与膜层厚度的关系如图 2 所示. 其最大值出现在 R_M , R_{M_3} 处, 最小值则分别出现在 R_{M_1} 和 R_{M_2} 处, 阴极对应的厚度为 150 nm 左右.

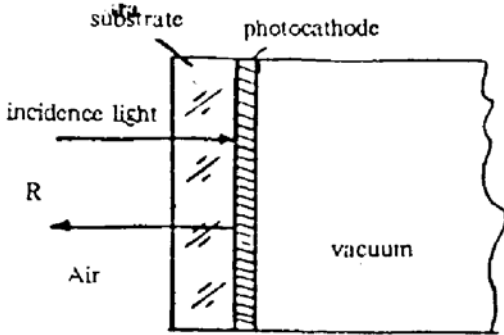


Fig. 1 Optical reflectance on photocathode

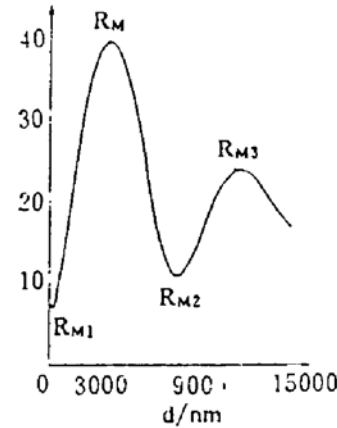


Fig. 2 Optical reflectance of Na_2kSb vs layer thickness

($\lambda = 520 \text{ nm}$, $n_1 = 3.3$, $k_1 = 0.7$)

2.2 用 n 、 k 值预测多碱阴极的成分

在图 2, 给出了 R_{M_1} 、 R_M 和 R_{M_2} , 其厚度分别对应于 d_1 , d_2 和 d_3 , 将上述值分别代入(1)式得:

$$R_{M_1} = \frac{(a_1^2 + b_1^2) e^{4\pi k_1 d_1/\lambda} + (a_2^2 + b_2^2) e^{-4\pi k_1 d_1/\lambda} + A \cos(4\pi n_1 d_1/\lambda) + \beta \sin(4\pi n_1 d_1/\lambda)}{e^{4\pi k_1 d_1/\lambda} + (a_1^2 + b_1^2)(a_2^2 + b_2^2) e^{-4\pi k_1 d_1/\lambda} + C \cos(4\pi n_1 d_1/\lambda) + D \sin(4\pi n_1 d_1/\lambda)} \quad (2)$$

$$R_M = \frac{(a_1^2 + b_1^2) e^{4\pi k_1 d_2/\lambda} + (a_2^2 + b_2^2) e^{-4\pi k_1 d_2/\lambda} + A \cos(4\pi n_1 d_2/\lambda) + \beta \sin(4\pi n_1 d_2/\lambda)}{e^{4\pi k_1 d_2/\lambda} + (a_1^2 + b_1^2)(a_2^2 + b_2^2) e^{-4\pi k_1 d_2/\lambda} + C \cos(4\pi n_1 d_2/\lambda) + D \sin(4\pi n_1 d_2/\lambda)} \quad (3)$$

$$R_{M_2} = \frac{(a_1^2 + b_1^2) e^{4\pi k_1 d_3/\lambda} + (a_2^2 + b_2^2) e^{-4\pi k_1 d_3/\lambda} + A \cos(4\pi n_1 d_3/\lambda) + \beta \sin(4\pi n_1 d_3/\lambda)}{e^{4\pi k_1 d_3/\lambda} + (a_1^2 + b_1^2)(a_2^2 + b_2^2) e^{-4\pi k_1 d_3/\lambda} + C \cos(4\pi n_1 d_3/\lambda) + D \sin(4\pi n_1 d_3/\lambda)} \quad (4)$$

式中 a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 、 A 、 B 、 C 、 D 等参数同(1)式, 由(2)、(3)和(4)式可知, 如果组合 (R_{M_1}, R_M) 和 (R_M, R_{M_2}) , 则由实测的 R_{M_1} 、 R_M 、 R_{M_2} 可以联立方程组, 从而求得 n 、 k 值. 具体求解可以借助于计算机, 在 (n, k) 平面上求得等反射率. 图 3 给出了 (n, k) 平面上的等反射率 R_M 和 R_{M_1} ; 图 4 给出了 (n, k) 平面上的等反射率 R_M 和 R_{M_2} . 可知, 如果整个阴极制备过程中成分不变, 则由实测的 R_{M_1} 、 R_M 和 R_{M_2} 求得 n 、 k 值, 在计算误差范围内它们是相同的. 如果由图 3 和图 4 得到

的 n, k 值不同, 则说明在阴极制备过程中碱铯比例不同, 阴极成分发生了变化.

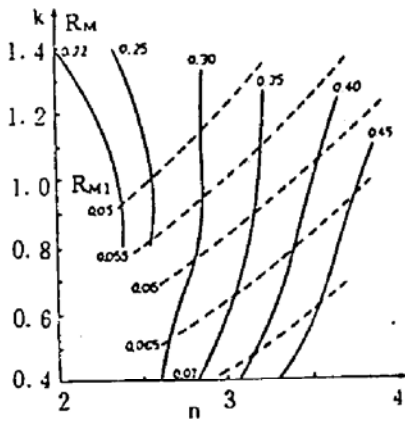


Fig. 3 Isoreflectances R_{M1} and R_M in the (n, k) plan

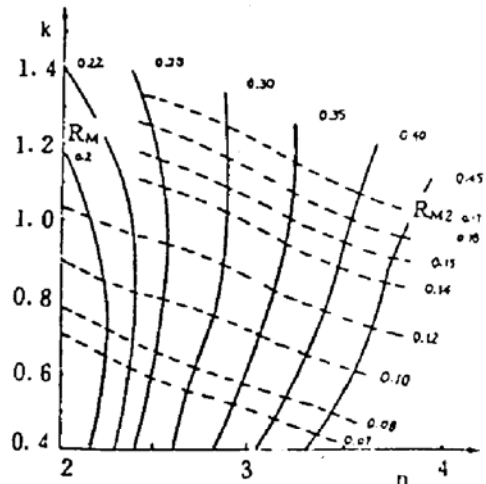


Fig. 4 Isoreflectances R_M and R_{M2} in the (n, k) plan

对超 I 代成像器件内的光电阴极, 正如文献[4]所预测的, 阴极厚度在 120~130 nm 之内, 而 100~130 nm 范围内的成分预测应用 R_{M2} 以及反射率曲线后面的峰值 R_{M3} 决定.

2.3 用 $R(t)$ 曲线确定多碱阴极成分

在阴极制备过程中, 由于不能确切知道某一时刻的阴极厚度 d , 因此很难得到 $R(d) \sim d$ 的实验曲线. 但是, 如果在阴极制备过程的追加反应中, 也即阴极加厚过程中, 铯、钾、钠源蒸发速率恒定, 则时间 t 里包含阴极厚度的信息, 从而得到 $R(t) \sim t$ 实验曲线, 如图 5 所示. 这样由 R_{M1}, R_M 值对照图 3, 得出一对 n, k 值, 可以确定阴极厚度在 d_1 内的成分, 从而确定阴极膜层中是 Na_3Sb 还是 K_3Sb 偏多, 并根据 n, k 值调节铯, 钾和钠的蒸发速率, 使阴极回到正常组分. 同样, 由 R_M 和 R_{M2} 的值对照图 4, 得到另一对 n, k 值, 从而确定 $d_1 \sim d_2$ 内的阴极组分, 通过微调铯、钾、钠三者比例, 使阴极继续加厚. 根据文献[4], 当反射率曲线出现新的极大值 R_{M3} 后结束铯、钾、钠交替, 其厚度约为 120 nm 左右. 因此, 对超 I 代成像器件, 用 $R(t)$ 控制光电阴极厚度, 必须在 R_{M3} 出现后才能结束中间层工艺, 这样经铯和铯交替后, 光谱响应峰值位置可移到 0.67 μm 附近.

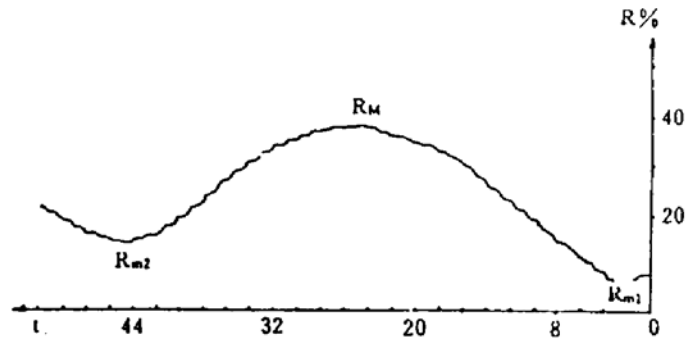


Fig. 5 Experimental optical reflectance of an Na_2KSb layer vs time of deposition

3 光电阴极成分控制原理研究

上面研究了多碱阴极的成分预测和确定, 但用 $R(t)$ 控制阴极成分实属勉强, 其主要原因是在 $R(t)$ 的极值点处才能确定阴极厚度和成分, 这显然是不够的. 这里研究用光谱响应并结合 $R(t)$ 来控制阴极成分.

3.1 双碱阴极 Na_2KSb 的光谱响应曲线

多碱阴极是由双碱阴极 Na_2KSb 加铯、铯敏化而得到的, 一般文献中给出了多碱阴极的

光谱响应. 但 Na_2KSb 的光谱响应很少提到. 在文献[5]中, 得到改进型多碱阴极的量子产额表达式:

$$Y(h\nu) = \frac{C(h\nu - E_j)^{1/2}}{h\nu[\alpha_T(h\nu) - \beta]} \cdot e^{p \cdot h\nu} [e^{-\beta \cdot d} - e^{-\alpha_T(h\nu) \cdot d}] \quad (6)$$

对超 I 代像增强器内的多碱阴极, 如果假设在未给铯, 进行铯铯敏化前, E_j 为 2 eV. β 为 1.82×10^5 , p 为 1.3, C 为 1.55×10^4 . 当用 520 nm 的单色光控制时, $\alpha(520) = 2.12 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$, 这样求得 Na_2KSb 随厚度 d 变化的光谱响应表达式为:

$$S(d) = 1.2383 \times 10^3 [e^{-1.82 \times 10^{-5} d} - e^{-2.12 \times 10^{-5} d}] \quad (\mu\text{A/W}) \quad (7)$$

如图 6 所示. Na_2KSb 在 50 nm 左右得到最大值 S_{max} , 在 120 nm 左右, $S(120)/S_{\text{max}}$ 约为 60%. 这样可从 Na_2KSb 光谱响应曲线的变化来判断工艺的正常与否.

3.2 用光电阴极反射率和光谱响应控制光电阴极成分

图 6 同时给出了光电阴极反射率和光谱响应随厚度变化的理论曲线. 当 $R(d)$ 在 d_2 达最大值 R_M 时, 可通过图 3 迅速求得 n, k 值, 并通过微调铯、钾、钠三者比例, 使光谱响应一直保持上升趋势. $S(d)$ 在 50 nm 左右达到最大值, 也就是说, 当光电子逸出深度和阴极厚度可以比拟时, 可得到 $S(d)$ 的最大值. 随着阴极加厚, $S(d)$ 线性下降. 当 $R(d)$ 达 R_{M_2} , 可根据图 4 迅速求得 n, k 值, 并调节蒸发源的蒸发速率, 使此时的 S/S_{max} 约为 90%. 当反射率曲线出现 R_{M_3} 时, 此时的阴极厚度约为 115 nm 左右, S/S_{max} 约为 67%. 如果 S/S_{max} 低于此值, 可根据 (R_{M_2}, R_{M_3}) 求得 n, k 值, 仔细微调钾、钠比例, 使 $R(d)$ 越过 R_{M_3} , 并使 S/S_{max} 约为 60% 左右, 可结束铯、钾、钠交替, 从而得到性能优越的 Na_2KSb 中间层.

从图 6 还可以看到, 在阴极制备过程中. 以膜层加工时间为函数的 $R(t)$ 和 $S(t)$ 应与 $R(d)$ 和 $S(d)$ 形似, $R(t)$ 的极值点对应于 R_{M_1}, R_M, R_{M_2} 和 R_{M_3} , 在交替过程中, 光电流最大值的包络线给出 $S(t)$, $S(t)$ 的极值对应于 S_{max} , 它们所对应的厚度应在预测的理论值附近.

4 结 论

本文研究了用反射率 $R(d)$ 预测并确定 Na_2KSb 的光学常数, 用光谱响应 $S(t)$ 和反射率曲线 $R(t)$ 控制阴极成分, 得到如下结论:

1). 用于微光观察的超 I 代成像器件的光电阴极, 如果用 520 nm 波长作为检测光源, 则阴极应在 R_{M_1} 出现后结束中间层交替, 厚度约为 120 nm.

2). 同样, 用 520 nm 的光作为检测光源, S_{max} 对应的厚度在 R_M 后出现, 约为 50 nm. 在 60 nm 后 $s(d)$ 随厚度 d (或 $S(t)$ 随时间 t) 呈线性下降.

3). 在 $R(t)$ 或 $R(d)$ 的极值点处通过 $S(d)$ 或 $S(t)$ 的升降来调整蒸发速率, 使 n, k 值分别保持在 3.3 和 0.7 左右, 在结束中间层交替时, 使 S/S_{max} 保持 60% 左右.

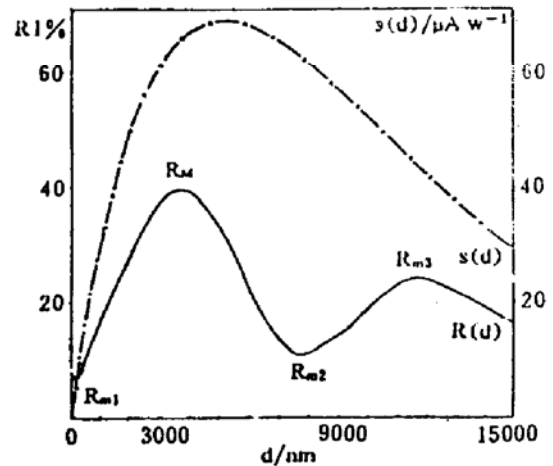


Fig. 6 Theoretical optical reflectance $R(d)$ and spectra response $S(d)$ vs thickness of an Na_2KSb

参 考 文 献

- [1] Pierre Dolizy, Olympio De Luca, Marie-Anne Deloron (高鲁山等译), 铋、钠、钾、铯型多碱铋化物的光电发射. 红外研究, 1985, 7(1): 50~53, (2): 42~48, (3): 61~64, (4): 58~63, (5): 49~58
- [2] Pierre Dolizy Optical method for investigating alkali antimonide photocathodes. *Vacuum*, 1980, 30(11/12): 489~495
- [3] Jacques Dupuy, Joost Schrijvers, Gerard Wolzak, XX 1610 the “super second generation” image intensifier. *Proc. SPIE*, Image Intensification, 1989, 1072: 13~18
- [4] B. K. Chang, Y. Z. Liu, D. G. Xu *et al.*, A theoretical study on the thickness of polycrystalline semiconductor multialkali photocathodes. *Proc. SPIE*, Photoelectronic Detection and Imaging' 93, 1993, 1982: 174~178
- [5] 常本康, 刘元震, 改进型多碱阴极量子产额谱的研究. 真空科学与技术. 1990, 10(3): 175~178

A Study of Control Principles on Photocathode Composition of the “Super Second Generation” Image Intensifier

Chang Benkang

(*School of Electronic Engineering and Opto-electric Technique,*
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210014)

(Received 7 May 1993)

Abstract The thickness and composition of multialkali photocathodes are studied with the aid of predication and definition of reflectance and control of spectral response and the reflectance on Na_2KSb in this paper. If the reflectance and the spectral response are measured by means of lamp source of 520 nm wavelength, the thickness of photocathodes of the “Super Second Generation” image intensifier must be 120 nm or so, namely after R_{M_3} on reflectance and about 60% S/S_{\max} value. On the basis of (R_{M_1}, R_M) and (R_M, R_{M_2}) predicating n and k value and photocurrent before peak (S_{\max}) of spectral response goes steadily up and that after S_{\max} goes linearly down, the photocathode composition is controlled by adjusting evaporation rate of Sb, K and Na evaporator source.

Key words multialkali photocathode, absorption coefficient, reflectance coefficient, transmissivity.