

# 透射式多碱光阴极厚度的研究\*

高 鲁 山  
(北京工业学院)

## 提 要

透射式光阴极的厚度,直接影响光阴极的光电子发射效率和光谱响应。本文讨论了光学吸收和光电子逸出深度与多碱光阴极厚度的关系;从理论上分析了透射式多碱光阴极的最佳厚度。并提出了确定最佳厚度的监测和计算方法。最后给出了多碱光阴极在几个给定工作波长的最佳厚度。

## 一、引 言

在摄像管、象增强器和光电倍增管等光电器件中,大多采用多碱光阴极。所以,器件的制造者对透射式多碱光阴极的制备工艺都极为关心,特别是光阴极的厚度,并力图能够控制。这是因为多碱光阴极的厚薄对光阴极的光电子发射性能影响极大。然而,多数理论研究者对此问题并不重视,尽管某些文献[1]中也给出过关于光阴极厚度的论述以及参考数据,但给出的往往只是粗略的范围,因而制造者难以用作依据。

光阴极材料本身的性质与光阴极厚度是没有关系的。因此,对于反射式光阴极,除了要求其厚度应厚于吸收深度外,并不涉及厚度对发射性能的影响问题。而对于透射式光阴极,由于光是由衬底一侧射入,光电子则是由真空一侧射出,如图1所示。所以对于这种光阴极,用的衬底材料必须对阴极工作波段的光是透明的。而光阴极本身的厚度则应合适,以便使光电子发射效率最高,光谱响应最好。这就是说,存在一个对发射最有利的最佳厚度。

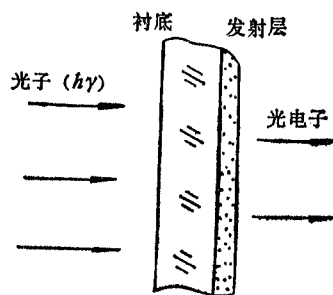


图1 透射式光阴极的结构

## 二、光阴极厚度对光学吸收的影响

光阴极发射光电子的全过程包括光学吸收、产生被激光电子、光电子向发射面运动和光电子克服表面位垒逸入真空。

\* 1984年3月21日收到,1985年5月21日修改定稿。

入射光进入光阴极体内后,光子被吸收的形式有:(1)晶格吸收,它把光子的能量直接转换为晶格的振动,这种光吸收所需能量很小。(2)带内自由载流子的光吸收,它的几率和光吸收所需的能量也都较小。以上两种光吸收的波长均在  $10\mu\text{m}$  以上,可以不予考虑。(3)光电阴极中杂质离子或中性原子的光吸收,它是施主能级上的电子吸收了光子后跃迁入导带,或者是受主能级上的空穴吸收了光子后跃迁入价带的光吸收,这种光吸收所需的能量都小于禁带宽度  $E_g$ 。通常在光阴极光谱响应曲线的阈值附近总会受到杂质引起的这种吸收所产生的影响。(4)本征吸收,它是能量大于  $E_g$  的光子被价带中的电子吸收并把它激发成为光电子,进入导带变为自由电子的一种光吸收。它对光电子发射起主要作用。图 2 中曲线的 AB 部分即为本征吸收,  $\lambda_0$  为本征吸收限。因为半导体中处于价带的电子浓度很大,所以本征吸收很强。由这种光吸收产生的光电子是带际跃迁。因此,能否产生此种吸收,取决于入射光能量  $h\nu$  和禁带宽度  $E_g$  的大小。

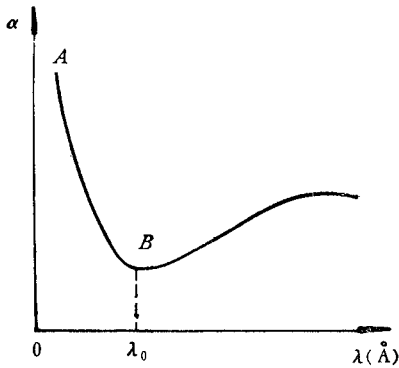


图 2 半导体光电发射体的光吸收曲线

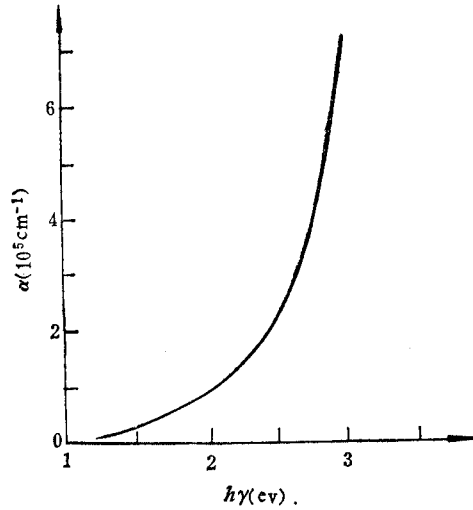


图 3 (Cs)Na<sub>2</sub>KSb 的光吸收曲线<sup>[4]</sup>

多碱光阴极的光学吸收过程是非常复杂的,同时并存着各种吸收形式。但由于价带中的电子浓度极大,吸收峰又正好处在可见光区域,所以本征吸收是主要的。当然,在本征吸收产生的跃迁中,也可能有属于三体碰撞的非竖直跃迁,总的来说,竖直跃迁的几率要高得多。吸收中心既然在价带,光学吸收系数就应与价带中的电子浓度成正比。

设透射式多碱光阴极的厚度为  $d$ , 入射光透过阴极后的光衰减可表示为

$$I(d, \lambda) = I_0(\lambda)e^{-\alpha(\lambda)d}, \tag{1}$$

式中  $I_0(\lambda)$  为射进光阴极体内的光能,  $I(d, \lambda)$  是经过厚度为  $d$  的光阴极后透过的光能,

表 1

波长 $\lambda(\text{\AA})$	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000
吸收系数 $\alpha$ ( $10^5/\text{cm}$ )	3.6	1.8	1.3	0.87	0.70	0.57	0.39	0.31

$\alpha$  是光阴极材料的吸收系数。测出光阴极  $[(Cs)Na_2KSb]$  的反射率和透射率, 便可计算出表 1 所列的  $\alpha$  值(参考数据)。

光阴极材料的光吸收系数是随着波长而变化的, 短波吸收很强, 而长波吸收就弱得多。从光阴极的量子产额来考虑, 首先要求应有足够大的光吸收。所以, 当光阴极材料确定后, 如果希望在几个不同工作波长获得同样的光吸收, 则所需光阴极的厚度应不相同, 见表 2 (以  $4500 \text{ \AA}$  为基准)。

表 2

波长 $\lambda(\text{\AA})$	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000
光阴极厚度比	1	2	2.8	4.2	5.2	6.8	9.2	11

由此可见, 单从光吸收对光电子发射的贡献来考虑, 要使光阴极对波长为  $7000 \text{ \AA}$  和  $4500 \text{ \AA}$  的入射光有等量的吸收效果, 前者的厚度就要比后者厚六倍以上。这就是通常所说的加厚光阴极以提高长波响应的道理。

### 三、光阴极厚度对逸出深度的影响

正电子亲和势多碱光阴极的光电子发射性能除了与光学吸收有关外, 还必须考虑吸收光子后被激发的光电子从产生区向真空界面的运动过程。同时还要考虑到达真空界面的光电子克服表面位垒逸入真空的几率。所以位于  $x$  深处的光电子逸出光阴极表面的几率为

$$P(x, \lambda) = B(\lambda)e^{-\beta(\lambda) \cdot x}, \quad (2)$$

式中的  $1/\beta(\lambda) = L$ , 为逸出深度, 它代表逸出几率衰减为  $1/e$  时的深度;  $B(\lambda)$  为  $x = 0$  时的表面逸出几率, 是与材料有关的一个常数。

由此可见, 直接影响到逸出深度的是光电子向表面运动过程中受到的各种散射。在多碱光阴极材料中可能发生的非弹性碰撞而引起能量损失的散射主要有以下几种: (1) 光电子与晶格点阵产生的非弹性碰撞, 它造成的能量损失相当于一个声子的能量, 约为  $0.02 \text{ eV}$ , 其自由程为  $100 \text{ \AA}$  左右, 但随着温度的升高碰撞几率增加很快。(2) 存在的杂质破坏晶格的周期场, 从而对光电子产生散射, 而光电子碰撞杂质原子可使之电离, 此时光电子损失的能量等于杂质原子的电离能, 数值大于前一种损失。发生这种碰撞的几率与温度无关, 只与杂质的浓度成正比。多碱光阴极中光电子的能量损失主要就是上述两种散射引起的。这些散射将使光电子的逸出几率下降、逸出深度变浅。

此外, 由于制备光阴极时工艺控制不严, 造成晶体结构缺陷过多, 将在工作波段的短波区产生二次电子-空穴对, 使得  $L$  变小。再就是多碱光阴极本身是一种多晶材料, 如晶粒的生长或排列不好, 将使晶粒界面位垒增高, 也会使  $L$  变小。这两个因素也都会使逸出几率减小, 从而降低光电发射效率和积分灵敏度。

所以, 逸出深度  $L$  不仅与光阴极本身的性质有关, 还与入射光的波长和光阴极的制备工艺有关。

设光阴极总的光吸收系数为  $\alpha_t$ , 对光电子发射有贡献的部分为  $\alpha_p$ , 没有贡献的部分为  $\alpha_c$ , 则  $\alpha_t = \alpha_p + \alpha_c$ . 由此可以导出量子产额公式为:

$$\rho(\lambda) = \frac{\alpha_p(\lambda)}{\alpha_t(\lambda) - \beta(\lambda)} B(\lambda) [e^{-\beta(\lambda) \cdot d} - e^{-\alpha_t(\lambda) \cdot d}]. \quad (3)$$

由此可见, 光阴极材料一旦确定, 在给定波长下, 吸收系数逸出深度和  $B(\lambda)$  就均已确定. 所以, 选择实用光阴极的厚度既应考虑到对入射光子的充分吸收, 又应考虑到产生在深处的光电子的逸出几率不致过低. 这样, 取光阴极的厚度应为

$$L > d > \frac{1}{\alpha_t}. \quad (4)$$

这就是从理论上选取光阴极厚度的依据.

### 四、光阴极制备过程中最佳厚度的监测

由于光阴极的最佳厚度是随入射光波长的不同而改变的, 所以最佳厚度的确定不能以积分灵敏度为信息来监控. 有人曾测过不同厚度的 S-20 光阴极的灵敏度 (图 4)<sup>[2]</sup>. 由图 4 可见, 灵敏度高的光阴极的厚度要比较薄一些.

若能从理论上计算出不同工作波长的最佳厚度值, 就可以通过在制备过程中监控材料组份和厚度的方法来得到性能合乎要求的光阴极. 表 3 列出了几个波长的最佳厚度的参考数据, 它们与多利齐 (Dolizy) 等人<sup>[4]</sup>给出的数据很接近.

表 3

波长 $\lambda(\text{\AA})$	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000
最佳厚度 ( $\text{\AA}$ )	367	527	615	738	808	966	1015	1103

目前对光阴极厚度的监测还没有比较简便可靠的方法. 例如通常用的石英晶体监测器, 由于有温度效应, 不能连续进行测量; 而光学监测法又必须先测得光学常数, 然后用具有一定存储量的计算机进行复杂的运算. 我们通过一系列的实验, 认为下述两种方法较

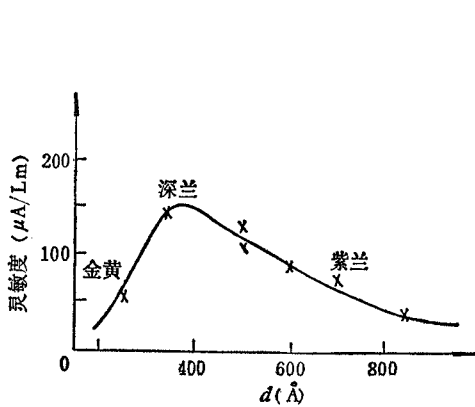


图 4 光阴极的灵敏度随着厚度的变化

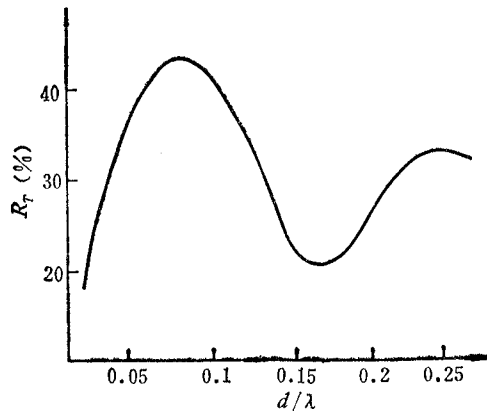


图 5 多碱光阴极反射率随厚度变化的曲线

为实用.

第一种方法是在制备光阴极过程中监测厚度增长引起的光反射率的变化. 如果能保证在光阴极形成过程中其成分基本上是  $\text{Na}_2\text{KSb}$ , 则在某一给定波长下阴极的折射率不变, 这样就可得到反射率随厚度变化的曲线. 如图 5 所示.

由理论公式<sup>[3]</sup>可算出, 当  $\lambda = 5200 \text{ \AA}$  时,  $R_T-d$  曲线的第一极大值处, 厚度  $d = 405 \text{ \AA}$ ; 极小值处, 厚度  $d = 811 \text{ \AA}$ ; 第二极大值处, 厚度  $d = 1217 \text{ \AA}$ . 因此, 根据  $R_T-d$  曲线, 我们就可以利用光学信息测量装置监测反射率在整个制备过程中的变化, 来估计光阴极的厚度. 这种方法简便易行, 比较实用.

第二种方法是监测光谱灵敏度和量子产额来确定逸出深度, 从而确定在给定波长下的最佳厚度.

光谱灵敏度可表示为

$$S_\lambda = \frac{I_\lambda}{F_\lambda}, \quad (5)$$

式中  $I_\lambda$  为单色光的光电流;  $F_\lambda$  为单色辐射通量, 如果用标准光源, 则  $F_\lambda$  为常数. 用两个相同的光源在光阴极形成过程中监测光学信息, 从而可得透射光量子产额和反射光量子产额分别为

$$\rho_T = 12400 \frac{S_{\lambda_1}}{\lambda(\text{\AA})}, \quad (6)$$

$$\rho_R = 12400 \frac{S_{\lambda_2}}{\lambda(\text{\AA})}. \quad (7)$$

当光源和波长给定时, 则

$$\rho_R/\rho_T = I_{\lambda_2}/I_{\lambda_1}. \quad (8)$$

在  $\rho_R$  趋于定值, 而  $\rho_T$  达到极大值时, 此时光阴极的厚度正好达到最佳值.

式(8)也可写成如下形式<sup>[4]</sup>

$$\rho = \frac{\rho_R}{\rho_T} = \frac{\alpha_i - \frac{1}{L}}{\alpha_i + 1/L} \cdot \frac{1 - e^{-(\alpha_i + \frac{1}{L})d}}{e^{-d/L} - e^{-\alpha_i \cdot d}}. \quad (9)$$

由式(9)可见, 作为比例值  $\rho$ , 可以消除掉许多复杂的不定因素. 此式是这种监测方法的依据. 将  $\rho_T$  对  $d$  取极值

$$\frac{\partial \rho_T}{\partial d} = 0,$$

则可得

$$d = \frac{\ln \alpha_i L}{\alpha_i - 1/L}. \quad (10)$$

此处求得的  $d$ , 就是光阴极的最佳厚度. 它仅与发射体的光吸收和光电子逸出深度有关, 它就是在给定波长的入射光照射下, 获得最大光电子发射效率的阴极厚度.

这里讨论的厚度, 应是整个  $(\text{Cs})\text{Na}_2\text{KSb}$  光阴极的厚度, 而制备中实际上监测的是

Na<sub>2</sub>KSb 层的厚度。在利用光学方法监测厚度时证实,在用铯进行表面处理的过程中,光阴极的厚度基本上没有变化。正如通常所认为的,铯处理的表面层是很薄的,而且不宜过厚<sup>[5]</sup>。

## 五、结 束 语

本文讨论了透射式多碱光阴极的厚度与光吸收和光电子逸出深度的关系,从而引出了光阴极有一个最佳厚度的结论。进而探讨了影响光吸收和光电子逸出深度的种种因素,并提出了监测和计算光阴极最佳厚度的简单可靠的方法。

## 参 考 文 献

- [1] P. Dolizy, O. De Luca and M. Deloron, *Acta Electronica*, **20**(1977), 265.
- [2] R. Holtom, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **12**(1979), 1169.
- [3] 北京工业学院编,物理光学,国防工业出版社,(1979),91.
- [4] A. H. Sommer 著,侯询译,光电发射材料,科学出版社,(1979),135.
- [5] P. Dolizy, *Philips. Tech. Rev.*, **40**(1982), 19.

# ON THE THICKNESS OF TRANSMISSION-MODE MULTI-ALKALI PHOTOCATHODE

Gao Lushan

(Beijing Institute of Technology)

The thickness of transmission-mode photocathode affects directly its photoelectric efficiency and spectral response. In this paper, the relationships between the thickness and the optical absorption of photocathode and the escape depth of photoelectron are discussed. The optimum thickness of transmission-mode photocathode is analysed theoretically, and the methods for monitoring and determining the optimum thickness are proposed.