

多碱阴极光吸收系数的研究

常本康 刘元震 谷文胜

(华东工学院光电技术系, 南京 210014)

提 要

本文给出了多碱阴极 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 光吸收系数经验公式。公式计算的吸收系数和实验曲线在可见光和近红外范围基本吻合。并根据量子力学处理, 导出了吸收限附近的光吸收系数。从而解释了 S-20 和 LEP* 光阴极量子产额曲线的差别。

关键词: 多碱阴极, 光吸收系数。

一、前 言

在常规碱金属铯化物光电阴极中, 多碱阴极 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 具有最高的量子产额, 并且光谱响应延伸到近红外, 在科学技术领域得到广泛应用。多碱阴极是厚度为 25~150 nm 的半导体多晶薄膜, 自 50 年代发明到现在, 其特殊性质一直没有得到很好理解。

图 1 给出了六条有代表性的多碱阴极实验光谱响应曲线。其对应的量子产额谱尽管有人作了研究^[2], 但由于理论和实验之间存在较大误差, 很难解释实验曲线的性质。本文是在研究多碱阴极量子产额谱的基础上^[3], 求得了光吸收系数 $\alpha_T(h\nu)$ 的经验公式。并根据量子力学处理, 导出了吸收限附近的光吸收系数 $\alpha_P(h\nu)$, 从而解释了 S-20 和 LEP* 光阴极量子产额曲线的差别。

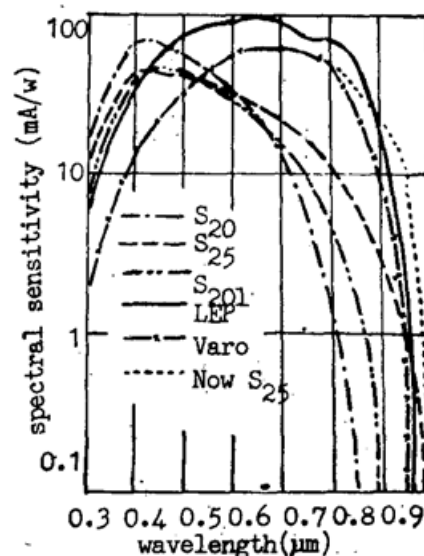


Fig. 1 Experimental spectral response curves of multi-alkali photocathodes.^[1]

二、多碱阴极光吸收系数经验公式

Spicer^[4]测量了双碱阴极 Na_2KSb 和多碱阴极 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 的光吸收, 他发现在测量精度内, Na_2KSb 的吸收对光谱的依赖关系与 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 相同。Kondrashov 和 Shefov^[5]对 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 的所有的光学常数作了详细研究, 图 2 给出了吸收系数对光子能量的关系曲线。为了推导多碱阴极量子产额表达式, 必须求出吸收系数的解析式。对此, 作者进行了计算机拟合, 得到多碱阴极光吸收系数经验公式:

$$\alpha_T(h\nu) = [3.7503 - 10.7481 h\nu + 11.1741(h\nu)^2 - 4.9060(h\nu)^3 + 0.8346(h\nu)^4] \times 10^5, \quad (\text{cm}^{-1}) \quad (1)$$

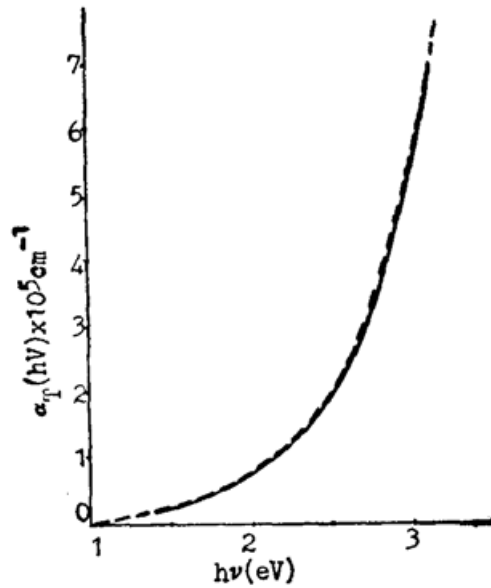


Fig. 2 The absorption coefficient of multialkali photocathodes^[6]

式中 $h\nu$ 为光子能量。由公式(1)可知, $\alpha_T(h\nu)$ 正比于 $(h\nu)$ 到 $(h\nu)^4$ 项, 应包括吸收和散射两种情况。但从量子理论, 尚不清楚(1)式的真正物理含义。根据经典理论, 似乎可以合理地认为括号内的前四项贡献给吸收, 而 $(h\nu)^4$ 项贡献给散射。

与文献[5]比较, 公式(1)有如下特点:

(1) 在 1.4~3.1 eV 范围, $\alpha_T(h\nu)$ 精确表达了实验曲线, 误差在 3% 以内。

(2) 为了分析多碱阴极的紫外和近红外波段的量子产额, 在 1~1.4 eV 和 3.1~4.4 eV 公式(1)与实验曲线有较好的一致性。特别在紫外范围, 多碱阴极 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 具有很高的量子产额^[6], 从而间接证明了公式(1)的正确性。

三、直接跃迁吸收系数 $\alpha_P(h\nu)$

Ghosh^[7]用光电子能谱研究了多碱阴极 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 的内部能带跃迁, 证明了其跃迁属直接跃迁类型。根据 Mostovskii 等^[7]人的膺势位计算获得的 Na_2KSb 的能带结构, 以及 Galan 和 Elizalde^[8]的工作, 我们用球形等能面近似求多碱阴极的吸收系数。

根据基本吸收限的量子力学处理, 跃迁速率 R 可表示为

$$R = \frac{\pi e^2 A_0^2 \omega}{4m_0} f_{vc} J_{vc}(w), \quad (2)$$

因为

$$\alpha \hbar w = \frac{\mu_0 c}{n} 2\hbar^2 R / A_0^2, \quad (3)$$

可得吸收系数。

$$\alpha = \frac{\mu_0 c \pi e^2 \hbar}{2m_0 n} f_{vc} J_{vc}(w), \quad (4)$$

式中 n 为材料的折射率, 因子 $\mu_0 c \pi e^2 \hbar / 2m_0 = 1.098 \times 10^{-11} \text{ eV cm}^{-2}$; f_{vc} 称为跃迁的无量纲振子强度; $J_{vc}(w)$ 为联合状态密度, 量纲为 $\text{eV}^{-1} \text{ cm}^{-3}$ 。

在 $k=0$, 多碱阴极的联合状态密度可表为

$$J_{\infty} = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_r}{\hbar^2} \right) (\hbar\omega - \varepsilon_G)^{1/2}, \quad (5)$$

α 对 $(\hbar\omega - \varepsilon_G)^{1/2}$ 的依赖关系就是观察到的直接跃迁对频率的依赖关系。式中 $m_r = (m_n^{-1} + m_k^{-1})^{-1}$ 是折合有效质量。从 J_{∞} 的值, 最后得到 α 为

$$\alpha = \frac{2.7 \times 10^5}{n} (2m_r/m_0)^{3/2} f_{\infty} (\hbar\omega - \varepsilon_G)^{1/2}. \quad (\text{cm}^{-1}) \quad (6)$$

对多碱阴极, 可以假设 $m_r = m_0/2$, 取折射率 $n=3$, 考虑到 $\alpha_T(h\nu)$ 的量级, 设 $f_{\infty} = 1/3$, 得

$$\alpha_P(h\nu) = 3 \times 10^4 (h\nu - E_G)^{1/2}. \quad (\text{cm}^{-1}) \quad (7)$$

(7)式即为所求吸收系数, 并认为主要贡献给光电发射。与公式(1)相比, 其比值 $\alpha_P(h\nu)/\alpha_T(h\nu)$ 如图3中曲线1所示。当 $h\nu$ 在长波处时, 比值较小, 随 $h\nu$ 增加, 比值到峰值后迅速下降。

以上讨论, 认为电子的直接跃迁对于任何 k 值都允许。但在有些情况下, $k=0$ 的跃迁不满足量子力学的选择定律。但对 $k \neq 0$, 直接跃迁是允许的, 而且跃迁几率正比于 $(h\nu - E_G)$, 根据文献[9]的讨论, 这种吸收系数 $\alpha(h\nu) \propto (h\nu - E_G)^{3/2}/h\nu$, 由于分母的变化比分子的变化慢, 可近似给出

$$\alpha_P(h\nu) = 1.3 \times 10^4 (h\nu - E_G)^{3/2}. \quad (\text{cm}^{-1}) \quad (8)$$

利用吸收系数计算多碱阴极量子产额谱的结果表明^[3], 公式(7)适合于厚阴极 NewS-25, Varo 和 LEP*, 公式(8)适合于薄阴极 S-20, S-20R 和 S-2S。说明较厚的阴极具有较大的晶粒尺寸和较小的晶界面积, 从而有可能构成电学上的连续膜, 有利于电子发射。

四、多碱阴极量子产额与吸收系数的关系

前面导出了多碱阴极总的吸收系数 $\alpha_T(h\nu)$, 贡献给光电发射的吸收系数 $\alpha_P(h\nu)$, 其与量子产额的关系如图4给出。由图4可知, 从光电发射阈到紫外范围, $Y(h\nu)$ 与 $\alpha_T(h\nu)$ 不成比例关系, 是 $\alpha_P(h\nu)$ 的慢变化函数。可能有两个形成原因:

(1) $\alpha_T(h\nu)$ 是光电阴极总的吸收系数, 它包括直接跃迁吸收, 间接跃迁吸收, 较高能带间跃迁吸收和阴极结构不均匀引起的散射等。在较高光子端, 光电阴极内激发的电子产生电子-空穴对的几率迅速增加, 导致逸出几率下降, 影响了量子产额。另外, 在较高光子端, 吸收系数中的散射成份增加, 也对量子产额有一定影响。

(2) $Y(h\nu)$ 是 $\alpha_P(h\nu)$ 的慢变化函数。如 Spicer 所述, 吸收系数可以分为贡献给光电发射的 $\alpha_P(h\nu)$ 和贡献给光电导的 $\alpha_0(h\nu)$ 。就 $\alpha_P(h\nu)$ 而言, 如果我们仅考虑带际激发的电子跃迁到导带之上, 则对应的阈能为禁带宽度所对应的能量。如果我们考虑激发的电子跃迁到真空能级以上, 则对应的能量为 $E_G + E_A$, 即禁带宽度和电子亲和势之和。在忽略隧道效应的

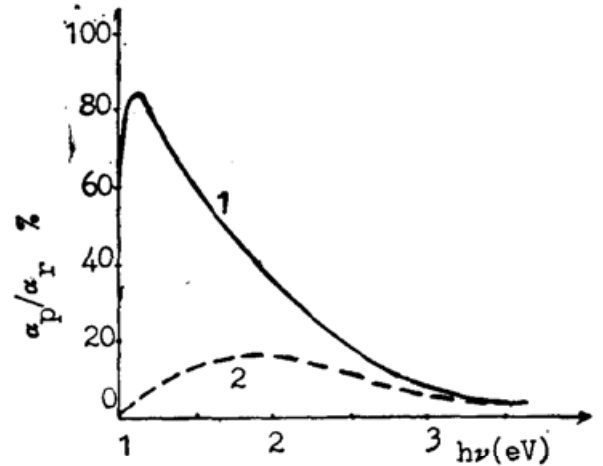


Fig. 3 Curves of $\alpha_P(h\nu)/\alpha_T(h\nu)$ as a function of $h\nu$.

1. $3 \times 10^4 (h\nu - E_G)^{1/2} / \alpha_T - (h\nu)$
2. $1.3 \times 10^4 (h\nu - E_G)^{3/2} / \alpha_T - (h\nu)$

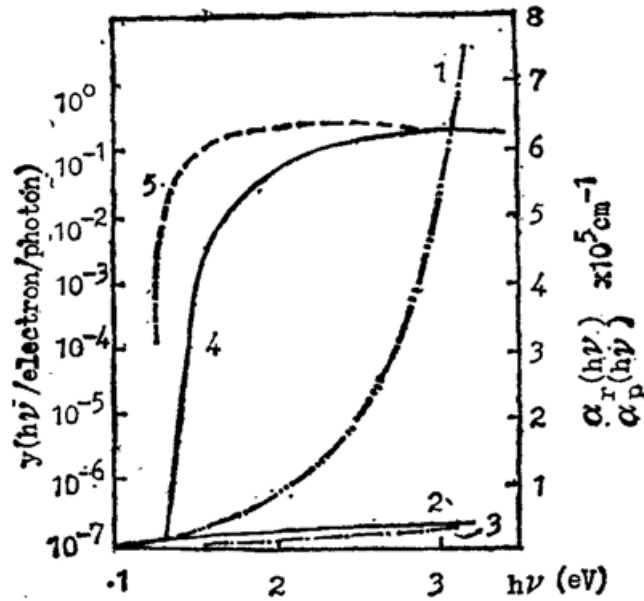


Fig. 4 Quantum yield and absorption coefficient of multialkali photocathodes

1. $\alpha_T(h\nu)$; 2. $\alpha_P(h\nu) = 3.0 \times 10^4 (h\nu - E_G)^{1/2}$; 3. $\alpha_P(h\nu) = 1.3 \times 10^4 (h\nu - E_G)^{3/2}$;
4. Quantum yield of S-20 photocathodes; 5. Quantum yield of LEP* photocathodes

前提下, 这样考虑是可取的。我们定义光电阴极光谱响应截止波长所对应的能量为 $E_j = E_G + E_A$ 。在 $h\nu > E_j$ 时, $Y(h\nu) > 0$; $h\nu \leq E_j$ 时, $Y(h\nu) = 0$ 。 $h\nu$ 在 E_j 附近, $\alpha_P(h\nu)$ 下降, $Y(h\nu)$ 陡峭下降。在近红外到紫外部分, $Y(h\nu)$ 变化较平坦, 主要原因在光电发射能量范围内 $\alpha_P(h\nu)$ 是缓慢变化函数。

LEP* 与 S-20 相比, 在 高能光子端, 它们具有相同的量子产额; 在可见和近红外范围, LEP* 的量子产额较高, 其主要原因是 LEP* 具有较大的有效吸收系数。由图 3 可知, LEP* 阴极的 $\alpha_P(h\nu)/\alpha_T(h\nu)$ 远远大于 S-20 阴极的, 而且高能光子端, 二者基本相同。

五、结 论

本文主要解决了如下几个问题:

(1) 求出了多碱阴极 $\alpha_T(h\nu)$ 的经验表达式, 在紫外到红外范围, 公式计算的结果与实验数据很好吻合, 这对理论分析和计算量子产额 $Y(h\nu)$ 是有利的。我们用吸收系数计算了 S-20 阴极的量子产额, 得到的结果与 Sommer^[10] 给出的最大量子产额基本吻合。

(2) 根据吸收限的量子力学处理, 求得了多碱阴极的直接跃迁吸收系数。对 $k=0$ 和 $k \neq 0$ 处的直接跃迁, $\alpha_P(h\nu)$ 分别由公式 (7) 和 (8) 描述。并认为 LEP* 和 S-20 量子产额之间的主要差别是与 $\alpha_P(h\nu)$ 有关。

(3) 解释了 $Y(h\nu)$ 和 $\alpha_T(h\nu)$ 、 $\alpha_P(h\nu)$ 之间的关系。在 高能光子端, $Y(h\nu)$ 与 $\alpha_T(h\nu)$ 不成比例, 主要是由于光电阴极中的被激电子产生电子-空穴对的几率迅速增加, 光电子逸出几率下降, 导致量子产额降低。由于产生电子-空穴对, 激发的电子与逸出到真空中的光电子在能量坐标下不具有——对应关系。 $Y(h\nu)$ 是 $\alpha_P(h\nu)$ 的缓变函数, 主要是由于 $\alpha_P(h\nu)$ 在感兴趣的波段是 $h\nu$ 的缓变函数。

参 考 文 献

- [1] P. Dolizy; *Vacuum*, 1980, **30**, No. 11/12, 489. K. A. Kopetzkg; «*Electro-Optical System Design Conference*», (Proceedings of the Technical Program, 1969), 4. H. Adrian Stahl; *J. Appl. Phys.*, 1972, **43**, No. 4,
- [2] W. E. Spicer; «*Optical Properties of Solids*» (North-Holland Company-Amsterdam, London, 1972), 755.
- [3] 常本康, 刘元震; «*真空科学与技术*», 1990, **10**, No. 3 (May/Jun), 112。
- [4] W. Esicer; *Phys. Rev.*, 1958, **114**, No. 1, 112.
- [5] V. Kondrashov, A. S. Shefov; *Bull Acad. Sci. USSR, Phys. Ser.*, 1964, **23**, 1394.
- [6] S. Stanley; *Appl. Opt.*, 1976, **15**, No. 10 (Oct), 2298.
- [7] C. Ghosh; *Phys. Rev. (B)*, 1980, **22**, No. 4 (15 Aug), 1972.
- [8] L. Galan, E. Elizalde; *Phys. Rev. (B)*, 1988, **37**, No. 8 (15 Mar), 4225.
- [9] 方俊鑫, 陆栋主编; «*固体物理学*»(下册)(上海科技出版社, 上海, 1981), 97。
- [10] A. H. 萨默; «*光电发射材料*», (科学出版社, 北京, 1979), 143。

Absorption coefficient of multialkali photocathodes

CHANG BENKANG, LIU YUANZHEN AND GU WENSHENG

(Department of Optical and Electrical Technology, East China Institute of Technology, Nanjing 210014)

(Received 2 July 1990; revised 19 March 1991)

Abstract

The absorption coefficient experience formula of multialkali photocathodes ($\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$) is given in this paper. The theoretical curves of coefficient calculated by the formula show good agreement with experimental results in the visible and near infrared regions. The absorption coefficient of multialkali photocathodes on near absorption edge is derived by quantum mechanics. Quantum yield difference between S-20 and LEP is explained.

Key words: multialkali photocathodes, absorption coefficient.