

# 用积分法推导 NEA 光电阴极的量子产额

宗志园 常本康

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

**摘 要** 以“三步发射模型”为基础, 采用积分的方法推导出反射式和透射式负电子亲和势(NEA)光电阴极的量子产额表达式, 其中反射式阴极的表达式和传统的求解扩散方程得出的表达式完全相同, 而根据透射式阴极的表达式绘出的量子产额理论曲线, 和求解扩散方程绘出的曲线基本重合, 与实验曲线也符合得很好。

**关键词** 负电子亲和势光电阴极, 量子产额, 光电子。

## 1 引 言

在光电阴极发展史上, 负电子亲和势光电阴极的出现可以说是个重要的里程碑, 这不仅是因为负电子亲和势光电阴极具有优良的性能, 而且因为它是由理论指导产生的, 不象其它光电阴极的发现大多靠经验与运气<sup>[1]</sup>。70 年代初就对其量子产额开展了理论研究<sup>[2-4]</sup>。推导负电子亲和势光电阴极量子产额的传统方法是求解扩散方程, 后来也有人用蒙特卡罗法模拟阴极的光电发射, 作了其量子产额曲线<sup>[6]</sup>。本文则给出了另一种推导方法, 即根据 Spicer<sup>[5]</sup>的“三步发射模型”, 写出光电发射过程中每一步的微分表达式, 再用积分的方法得出量子产额值。推导结果表明, 反射式阴极的量子产额表达式和传统的求解扩散方程得出的表达式完全相同, 而依照透射式阴极的表达式绘出的量子产额理论曲线, 和用传统方法求解的曲线基本重合, 与实测曲线也很吻合。

## 2 推导负电子亲和势光电阴极量子产额的传统方法简介

推导负电子亲和势光电阴极量子产额的传统方法是求解扩散方程<sup>[2-4, 7-10]</sup>:

$$d^2n/dx^2 - n/L_D^2 = -g(x)/D_n \quad (1)$$

式中  $n$  为半导体中多数载流子的浓度,  $L_D$  为载流子的扩散长度,  $D_n$  为载流子的扩散系数,  $g(x)$  为光电子产生函数。

对于反射式负电子亲和势光电阴极,

$$g(x) = (1 - R)I_0(\lambda)\alpha(\lambda)\exp[-\alpha(\lambda)x], \quad (2)$$

其中  $x$  为阴极内部某点到表面的距离(可参见图 1),  $I_0(\lambda)$  为入射单色光光强,  $R$  为阴极表面对入射光的反射率,  $\alpha(\lambda)$  为阴极对这种入射光的光吸收系数。边界条件取为:  $x = 0$  时,  $n =$

0;  $x = \infty$  时,  $n = 0$ 。通过求解(1)式得到量子产额为<sup>[4, 8]</sup>:

$$Y_r = \frac{P(1-R)}{1 + 1/\alpha(\lambda)L_D} \tag{3}$$

对于透射式负电子亲和势光电阴极, 为简单起见,  $g(x)$  也取与(2)式相同的形式, 其中  $x$  为阴极发射层中的某点距后界面的距离(可参见图 2), 其余参数的意义与反射式阴极相同。边界条件取:  $x = 0$  时,  $D_n dn/dx = nS$ ;  $x = d$  时,  $n = 0$ 。其中  $S$  为后界面复合速度, 它指的是透射式阴极的缓冲层与发射层交界面处的光电子复合速度,  $d$  为阴极发射层的厚度。将以

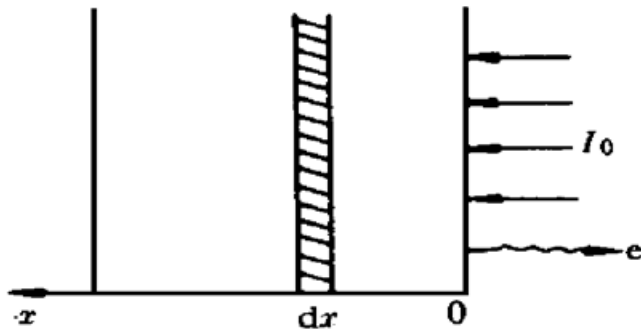


Fig. 1 The schematic of reflection-mode NEA photocathode

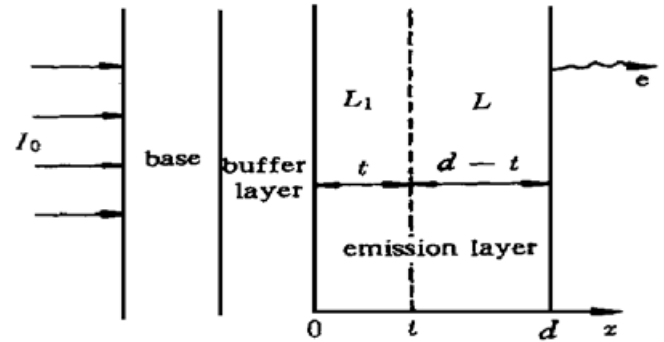


Fig. 2 The schematic of transmission-mode NEA photocathode

上边界条件代入(1)式, 求解可得量子产额为<sup>[7]</sup>:

$$Y_t = \frac{P(1-R)\alpha(\lambda)L_D}{\alpha(\lambda)^2 L_D^2 - 1} \times \left\{ \frac{[\alpha(\lambda)D_n + S] - \exp[-\alpha(\lambda)d][S \cosh(d/L_D) + \frac{D}{L_D} \sinh(d/L_D)]}{(D_n/L_D) \cosh(d/L_D) + S \sinh(d/L_D)} - \alpha(\lambda)L_D \exp[-\alpha(\lambda)d] \right\} \tag{4}$$

在上式中, 通过直接代入并稍作变换, 可以得到  $S = 0$  和  $S = \infty$  两种极限情况下的量子产额。

值得一提的是, 在求解(1)式的过程中可以发现, 对于透射式负电子亲和势光电阴极, 如果  $\alpha(\lambda)L_D = 1$ , 则方程无解。但实际中  $\alpha(\lambda)L_D = 1$  的情况是有可能出现的, 此时的阴极也一定有量子产额值, 而要求出此值, 用求解扩散方程的方法显然是无能为力的。

### 3 用积分法推导负电子亲和势光电阴极的量子产额

在阴极的光电发射理论中, Spicer 的“三步发射模型”已被普遍接受, 它将光电发射过程分为三步描述: 1) 阴极内部电子受入射光子的激发成为光电子; 2) 受激光电子从阴极内部向表面运动; 3) 到达阴极表面的光电子克服表面势垒进入真空<sup>[5]</sup>。下面就以这一理论为基础, 推导负电子亲和势光电阴极的量子产额。

#### 3.1 反射式负电子亲和势光电阴极

如图 1 所示, 设入射单色光光强为  $I_0(\lambda)$ , 阴极表面对入射光的反射率为  $R$ , 阴极对这种入射光的光吸收系数为  $\alpha(\lambda)$ , 则在入射光的激发下, 距阴极表面  $x$  处的  $dx$  薄层中将产生

$$(1-R)I_0(\lambda)\alpha(\lambda)\exp[-\alpha(\lambda)x]dx$$

个光电子。这些光电子在向阴极表面运动的过程中由于各种原因而产生数量上的衰减, 假设其按  $\exp(-x/L)$  的指数规律衰减<sup>[5]</sup>, 其中  $L$  是个长度量, 可称其为光电子的衰减长度。设它和阴极的扩散长度  $L_D$  之间的关系为:

$$L = \beta L_D \quad (5)$$

式中的  $\beta$  是个无量纲的系数, 它的取值将在下面讨论。于是, 由上述假设可知,  $dx$  薄层中产生的光电子运动到表面时还剩下

$$(1 - R) I_0(\lambda) \alpha(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda)x] \exp(-x/L) dx$$

个。如果到达阴极表面的光电子均以逸出几率  $P$  逸入真空, 那么上述光电子中可以发射出去的个数为:

$$P(1 - R) I_0(\lambda) \alpha(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda)x] \exp(-x/L) dx$$

相应地, 整个阴极发射的电子数为:

$$n = \int_0^{\infty} P(1 - R) I_0(\lambda) \alpha(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda)x] \exp(-x/L) dx \quad (6)$$

所以阴极的量子产额为:

$$Y_r = \frac{n}{I_0(\lambda)} = \frac{\int_0^{\infty} P(1 - R) I_0(\lambda) \alpha(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda)x] \exp(-x/L) dx}{I_0(\lambda)} = \frac{P(1 - R)}{1 + 1/\alpha(\lambda)L} \quad (7)$$

对于反射式负电子亲和势光电阴极, 取  $\beta = 1$ , 即光电子的衰减长度  $L$  等于其扩散长度  $L_D$ , 则表达式(7)和(3)式完全一样, 当然用积分的方法比求解扩散方程要简单得多。

### 3.2 透射式负电子亲和势光电阴极

透射式负电子亲和势光电阴极结构如图 2 所示。对于透射式负电子亲和势光电阴极, 后界面复合速度  $S$  是表征其光电发射性能的重要参量之一。按照半导体理论,  $S$  表示的是近交界面处的光电子以多大的速度流到交界面处以补充复合掉的光电子<sup>[11]</sup>。所以可以设想在阴极发射层中靠近交界面处产生的光电子, 由于受到界面复合速度的影响, 在向表面扩散的同时, 还以  $S$  的速度流向交界面补充复合的电子, 因此光电子在这一范围内的衰减速度将大大增加, 相应的衰减长度大大减小。设这一范围的长度为  $t$ , 光电子在其中的衰减长度为  $L_1$ , 在  $t \sim d$  范围内的衰减长度为  $L$  ( $d$  为阴极发射层的厚度), 则  $L_1 \ll L$ , 且是  $S$  的函数, 它们之间的关系可借用文献[12]中的表达式:

$$\frac{1}{L_1} = \sqrt{\left(\frac{S}{D_n} + \frac{qE}{2kT}\right)^2 - \left(\frac{qE}{2kT}\right)^2} \quad (8)$$

式中的  $S$  为界面复合速度,  $D_n$  为载流子的扩散系数,  $q$  为电子所带电荷量,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为热力学温度,  $E$  为交界面处两种半导体材料形成的异质结的导带能量梯度, 对于负电子亲和势光电阴极  $E$  为几个电子伏特每微米数量级<sup>[12]</sup>。 $t$  的值通常在  $d/20$  到  $d/10$  之间, 一般可取为  $d/15$ 。 $L$  的值仍根据(5)式来定, 但式中的系数  $\beta$  不取定值, 它受  $S$ 、 $d$  和  $L_D$  的影响, 需要根据具体阴极而定。实际上,  $\beta$  的大小反映了  $S$ 、 $d$ 、 $L_D$  对衰减长度  $L$  的综合影响, 它的值一般在 0.5~2.5 之间变化。

在下面的推导过程中, 简单地设阴极基层和缓冲层对入射光综合的反射率为  $R$ , 其它参数的意义同反射式阴极。由于光电子在阴极发射层中不同深度处的衰减长度不同, 故而透射式阴极的积分应分为两部分, 第一部分是  $0 \sim t$  范围内可发射的光电子数:

$$n_1 = \int_0^t P(1 - R) I_0(\lambda) \alpha(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda)x] \exp[-(t-x)/L_1] \exp[-(d-t)/L] dx =$$

$$P(1-R)I_0(\lambda) \exp[-(d-t)/L] \exp(-t/L_1) \frac{1}{1/\alpha(\lambda)L_1 - 1} \times \{\exp[1/L_1 - \alpha(\lambda)]t - 1\} \quad (9)$$

第二部分是  $t \sim d$  范围内可发射的光电子数:

$$n_2 = \int_t^d P(1-R)I_0(\lambda) \alpha(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda)x] \exp[-(d-x)/L] dx = P(1-R)I_0(\lambda) \exp(-d/L) \frac{1}{1/\alpha(\lambda)L - 1} \{\exp[(1/L - \alpha(\lambda)]d - \exp[1/L - \alpha(\lambda)]t\} \quad (10)$$

所以量子产额为:

$$Y_1 = \frac{n_1 + n_2}{I_0(\lambda)} = P(1-R) \exp(-d/L) \left[ \frac{\exp[(1/L - 1/L_1)t]}{1/\alpha(\lambda)L_1 - 1} \{\exp[(1/L_1 - \alpha(\lambda)]t - 1\} + \frac{\exp[1/L - \alpha(\lambda)]d - \exp[1/L - \alpha(\lambda)]t}{1/\alpha(\lambda)L - 1} \right] \quad (10)$$

在以上推导中, 如果  $S = 0$ , 表明没有界面复合速度的影响, 则光电子在整个  $d$  范围内的衰减长度都为  $L$ , 所以积分时直接取  $t = 0$  即可; 如果  $S = \infty$ , 表明界面复合速度极大, 它将导致  $0 \sim t$  范围内的光电子不断流向界面处复合, 从而不能逸出, 只有  $t \sim d$  范围内产生的光电子才对光电发射有效, 所以取  $L_1 = 0$ , 这样  $n_1$  的积分为 0, 只需对  $n_2$  积分即可。

另外需要指出的是, 如果积分中出现  $\alpha L_1 = 1$ , 或  $\alpha L = 1$  的情况, 则  $n_1$  或  $n_2$  积分式中的  $e$  指数项经过合并将转化为常数项, 仍然可以积分, 不会出现(6)式或(7)式分母为零的无意义情况。

### 3.3 图形结果

图 3~ 图 5 是用计算机绘出的透射式负电子亲和势光电阴极量子产额理论曲线, 图中曲线 a 是根据积分方法绘出的, 曲线 b 是根据传统的求解扩散方程的方法绘出的, 曲线所对应的主要的阴极参数都已标注在图上。图 6 是对应于图 5 的实测曲线。计算中所采用的光吸收

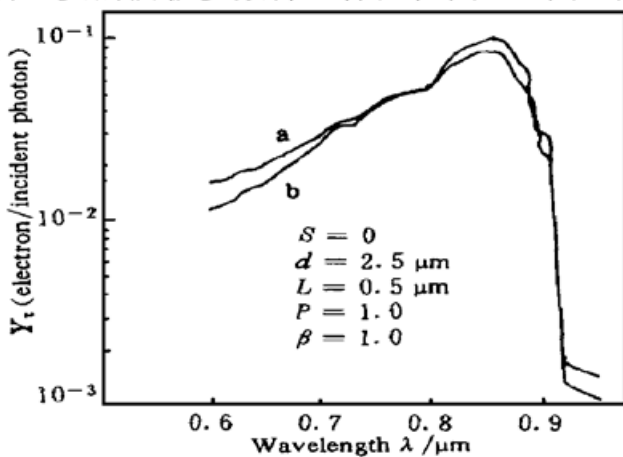


Fig. 3 The theoretical quantum yield curve of transmission-mode NEA photocathode<sup>[2]</sup>. (a: integral, b: traditional)

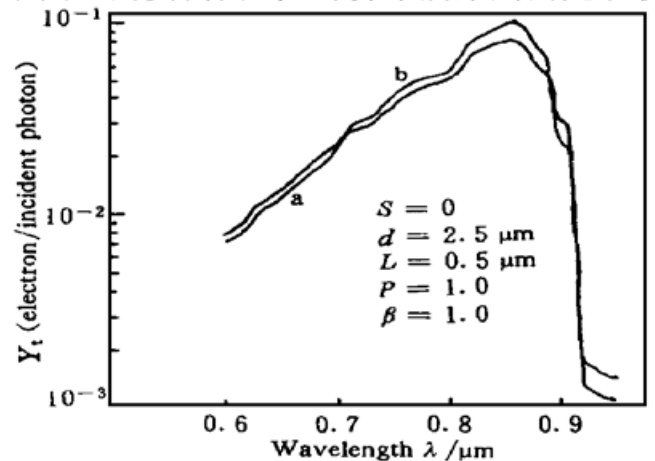


Fig. 4 The theoretical quantum yield curve of transmission-mode NEA photocathode<sup>[2]</sup>. (a: integral, b: traditional)

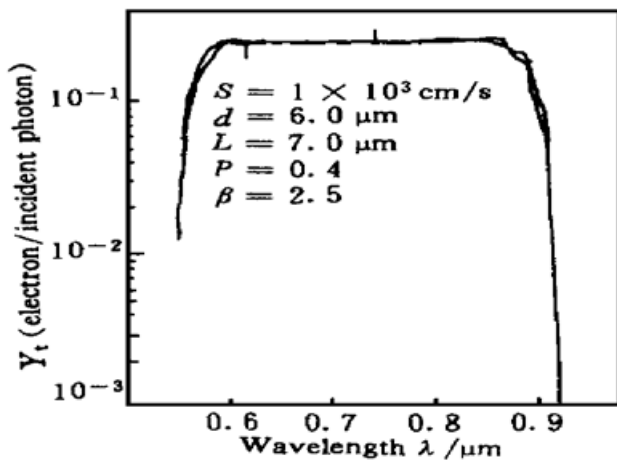


Fig.5 The theoretical quantum yield curve of transmission-mode NEA photocathode<sup>[7]</sup>. (a: integral, b: traditional)

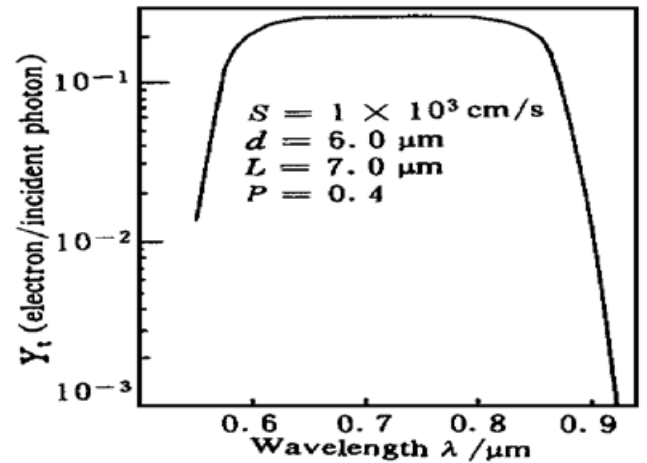


Fig.6 The experimental quantum yield curve of transmission-mode NEA photocathode<sup>[7]</sup>

系数取自文献[13]和[14]。从以上图形可以看出, 曲线 a 和曲线 b 基本重合, 它们和实测曲线也都很符合, 这从一个侧面证明用积分方法推导负电子亲和势光电阴极的量子产额是基本可行的。

**结 论** 用积分方法推导负电子亲和势光电阴极的量子产额有以下优点:

- 1) 它的推导比较简便, 易于理解, 且反射式阴极的量子产额表达式和传统的求解扩散方程得出的表达式完全相同, 而依照透射式阴极的量子产额表达式绘出的量子产额理论曲线, 和传统曲线、实测曲线都很符合;
- 2) 对于透射式阴极, 若积分中出现  $\alpha L_1 = 1$ , 或  $\alpha L = 1$  的情况, 不存在无解的问题;
- 3) 在量子产额求解问题上, 它将负电子亲和势及正电子亲和势阴极统一起来, 即它们都可以用积分方法求解, 只是所取参数稍有差异。积分方法的不足在于: 在透射式负电子亲和势光电阴极的推导中, 多引进了一个待定系数  $\beta$ , 且  $\beta$  和  $S$ 、 $d$  及  $L_D$  之间没有精确的理论表达式, 它们之间的关系有待进一步研究。

感谢本教研室杨伟毅教授、汪贵华老师和钱芸生老师在本文撰写过程中所给予的大力支持与帮助。

### 参 考 文 献

- [1] Sommer A H. Brief history of photoemissive materials. *Proc. SPIE*, 1993, **2022**: 2~ 17
- [2] Liu Y Z, Moll J L, Spicer W E. Quantum yield of GaAs semitransparent photocathode. *Appl. Phys. Lett.*, 1970, **17**(2): 60~ 62
- [3] Allen G A. The performance of negative electron affinity photocathodes. *J. Phys. (D): Appl. Phys.*, 1971, **4**(1~ 6): 308~ 317
- [4] Antypas G A, James L W, Uebbing J J. Operation of III-V semiconductor photocathodes in the semitransparent mode. *J. Appl. Phys.*, 1970, **41**(7): 2888~ 2894
- [5] Spicer W E, Herrera-Gómez A. Modern theory and application of photocathodes. *Proc. SPIE*, 1993, **2022**: 18~ 33
- [6] Yang B, Xu Y L. Calculated photoelectron spectra of NEA photocathodes. *J. Phys. (D): Appl.*

- Phys.*, 1990, **23**(4) : 455~ 457
- [7] André J P, Guittard P, Hallais J *et al.*. GaAs photocathodes for low light level imaging. *J. Crystal Growth*, 1981, **55**(1) : 235~ 245
- [8] 刘元震, 王仲春, 董亚强. 电子发射与光电阴极. 北京: 北京理工大学出版社, 1995. 324~ 330
- [9] 方如章, 刘玉凤. 光电器件. 北京: 国防工业出版社, 1988. 160~ 162
- [10] 王君容, 薛召南. 光电子器件. 北京: 国防工业出版社, 1982. 126~ 129
- [11] 恽正中, 王恩信, 完利祥. 表面与界面物理. 成都: 电子科技大学出版社, 1993. 126~ 128
- [12] James L W. Calculation of the minority-carrier confinement properties of semiconductor heterojunctions (applied to transmission-mode photocathode). *J. Appl. Phys.*, 1974, **45**(3) : 1326~ 1335
- [13] Kudman I, Seidel T. Absorption edge in degenerate p-type GaAs. *J. Appl. Phys.*, 1962, **33**(3) : 771~ 773
- [14] Casey H C, Sell Jr D D, Wecht K W. Concentration dependence of the absorption coefficient for n- and p-type GaAs between 1.3 and 1.6 eV. *J. Appl. Phys.*, 1975, **46**(1) : 250~ 257

## Calculating the Quantum Yield of NEA Photocathode by Integral

Zong Zhiyuan      Chang Benkang

(*School of Electronics Engineering and Optoelectronics Technology,  
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094*)

(Received 3 March 1998; revised 12 August 1998)

**Abstract** A new way to calculate the quantum yield of negative electron affinity (NEA) photocathode is introduced. On the base of “three-step emission model”, the quantum yield of NEA photocathode is obtained by integral. The quantum yield formulas of reflection-mode and transmission-mode NEA photocathode are given. The formula of reflection-mode photocathode is the same with that derived from the diffusion equation. And, according to the formula of transmission-model NEA photocathode, theoretical quantum yield curve is drawn by computer, which is coincident with the curve drawn according to traditional formular and also identical with experimental curve.

**Key words** negative electron affinity photocathode, quantum yield, photoelectrons.