

# 铝的高能二次电子发射系数的表达式

谢爱根, 李传起, 宋标, 裴元吉

南京信息工程大学数理学院, 南京 210044;

中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 合肥 230029

E-mail: [xagth@126.com](mailto:xagth@126.com)

2008-09-25 收稿, 2008-11-08 接受

南京信息工程大学科研基金(编号: QD65)资助项目

**摘要** 根据金属二次电子发射的主要物理过程和有效真二次电子发射系数的定义, 推导出高能原电子能量的三分之二次幂与铝的有效真二次电子发射系数的关系式. 根据高能原电子的有效真二次电子发射系数与二次电子发射系数的关系, 推导出高能原电子的能量的三分之二次幂与铝的二次电子发射系数之积为一常数, 并用实验数据计算出该常数, 然后推导了铝的高能二次电子发射系数表达式. 用推导出的表达式计算出一些铝的高能二次电子发射系数计算值, 与现有实验值较好地相符.

**关键词**  
二次电子  
高能  
铝  
二次电子发射系数

在具有一定能量的原电子轰击下, 从物体表面发射电子的现象称为二次电子发射. 通常把能量小于 50 eV 的二次电子定义为真二次电子, 通常把能量大于 50 eV 的二次电子定义为背散射二次电子<sup>[1]</sup>. 背散射二次电子数与原电子数之比定义为反射系数, 真二次电子数与原电子数之比定义为真二次电子发射系数. 真二次电子数与原电子中射入发射体内的原电子数(除去通过弹性散射或非弹性散射返回的原电子数)之比定义为有效真二次电子发射系数<sup>[2]</sup>. 随着电子技术的发展, 二次电子发射得到愈来愈广泛的应用, 因此二次电子发射现象引起了人们极大的兴趣, 人们对各种物质二次电子发射的特性、机理和应用进行了广泛而深入的研究, 其中有效真二次电子发射系数和二次电子发射系数是一个重要的研究内容. 二次电子发射系数是二次电子发射体的重要参量, 目前主要通过实验来测定, 但是测定高能二次电子发射系数又很困难, 因此需要推导出二次电子发射体的高能二次电子发射系数表达式. 到目前为止, 研究人员还没有推导出铝的高能二次电子发射系数的表达式, 根据金属的二次电子发射的主要物理过程, 推导了铝的高能二次电子发射系数表达式.

## 1 高能原电子入射能量与金属的有效真二次电子发射系数的关系

### 1.1 金属的二次电子发射的主要物理过程<sup>[3]</sup>

( ) 原电子射入发射体并激发产生内二次电子的过程. 原电子射入发射体后, 将激发发射体内部的电子, 原电子本身的能量将逐渐减小. 一个射入发射体内(没有通过弹性散射或非弹性散射返回)的原电子激发的内二次电子数与它在单位路程上损失的能量  $dW_p/dx$  成比例, 亦即

$$N(x, W_p) = -\frac{dW_p}{dx} \frac{1}{\varepsilon}, \quad (1)$$

式中  $\varepsilon$  为激发一个内二次电子所消耗的平均能量,  $W_p$  和  $x$  分别为高能原电子的能量和行程.

( ) 激发的内二次电子从激发地点向发射体表面运动并逸出表面的过程. 内二次电子向表面运动时损失能量, 内二次电子到达表面并逸出的几率可表示为

$$f(x) = Be^{-\alpha x}, \quad (2)$$

其中  $\alpha$  为吸收系数,  $\frac{1}{\alpha}$  为内二次电子发射系数的逸出深度,  $B$  为  $x=0$  时的几率.

### 1.2 高能原电子入射能量与铝的有效真二次电子发射系数的关系

若原电子在发射体中的总行程为 $L$ ,  $N(x, W_p)$ 是一个射入发射体内(没有通过弹性散射或非弹性散射返回)的原电子产生的内二次电子数, 那么有效真二次电子发射系数 $\delta_e$ 可以写成<sup>[2]</sup>

$$\delta_e = \int_0^L N(x, W_p) f(x) dx = -\frac{B}{\varepsilon} \int_0^L \frac{dW_p}{dx} e^{-\alpha x} dx. \quad (3)$$

对于铝发射体, 当原电子入射能量为 300 eV时<sup>[4]</sup>, 原电子的射程为一个逸出深度 $\frac{1}{\alpha}$ , 二次电子发射系数达到最大; 高能原电子(10 keV  $W_{p0}$  1 MeV)射入铝发射体内的深度明显大于三个逸出深度 $\frac{3}{\alpha}$ , 根据(2)

式可知, 在大于三个逸出深度 $\frac{3}{\alpha}$ 处所激发的内二次电子几乎不能逸出铝发射体而成为真二次电子, 所以对于高能原电子轰击铝发射体时, (3)式的定积分区间可以近似改成积分区间为 $\left[0, \frac{3}{\alpha}\right]$ 的定积分.

高能原电子(10 keV  $W_{p0}$  1 MeV)在铝发射体内沿程能量损失规律为<sup>[4]</sup>

$$\frac{dW_p}{dx} \sim -W_p^{-2/3}. \quad (4)$$

高能原电子射入铝发射体内时, 它的行程比三个逸出深度 $\frac{3}{\alpha}$ 大得多, 而且高能原电子能量损失的“重心”在原电子行程的后部, 所以在离表面三个逸出深度 $\frac{3}{\alpha}$ 范围内, 它的能量损失相对于它的原能量很小, 所以高能原电子在入射表面三个逸出深度 $\frac{3}{\alpha}$ 范围内沿程能量损失规律可近似表示为

$$\frac{dW_p}{dx} = -\frac{G}{W_{p0}^{2/3}} \quad (x=0 \text{ 时}, W_p=W_{p0}), \quad (5)$$

式中 $G$ 为比例常数, 决定于发射体的物质密度<sup>[5]</sup>. 综上所述, 高能原电子射入铝发射体内时, 有效真二次电子发射系数 $\delta_e$ 可以近似写成

$$\delta_e = \frac{B}{\varepsilon} \int_0^{\frac{3}{\alpha}} \frac{G}{W_{p0}^{2/3}} e^{-\alpha x} dx = \frac{BG(e^3 - 1)}{\varepsilon \alpha e^3 W_{p0}^{2/3}}. \quad (6)$$

由于 $\frac{BG(e^3 - 1)}{\varepsilon \alpha e^3}$ 是一个常量, 设为 $A$ , 故

$$\delta_e = \frac{A}{W_{p0}^{2/3}}. \quad (7)$$

### 2 高能原电子入射能量与金属二次电子发射系数的关系

二次电子发射系数由系数 $\delta_{PE}$ (原电子激发产生的二次电子数与原电子数之比)和系数 $\delta_{RE}$ (反射电子激发产生的二次电子数与原电子数之比)组成<sup>[1]</sup>, 即

$$\delta = \delta_{PE} + \delta_{RE} = \delta_{PE}(1 + \beta\eta), \quad (8)$$

式中 $\eta$ 是反射系数,  $\beta = \frac{\delta_{RE}}{\eta\delta_{PE}}$ 是单位反射电子产生的二次电子数与原电子产生的二次电子数之比. 根据有效真二次电子发射系数的概念, 有效真二次电子发射系数表示为<sup>[2]</sup>

$$\delta_e = \frac{\delta_{PE}}{1 - \eta}. \quad (9)$$

根据(7)~(9)式, 铝的高能二次电子发射系数 $\delta$ 可以写成

$$\delta = \frac{(1 - \eta)(1 + \beta\eta)A}{W_{p0}^{2/3}}. \quad (10)$$

高能原电子轰击铝发射体时,  $\eta$ 近似为常数且 $\eta \approx 0.2$ <sup>[6,7]</sup>,  $\beta \approx 2$ <sup>[8]</sup>, 因此 $(1 - \eta)(1 + \beta\eta)A = C$ 为常数, (10)式变为

$$\delta = \frac{C}{W_{p0}^{2/3}}, \quad (11)$$

即

$$C = \delta W_{p0}^{2/3}. \quad (12)$$

### 3 常数 $C$ 的计算和铝的高能二次电子发射系数的表达式

当原电子能量为 9.3, 11.0, 13.4 和 17.3 keV时, 铝的二次电子发射系数分别为 0.2800<sup>[21]</sup>, 0.2460<sup>[21]</sup>, 0.1920<sup>[21]</sup>和 0.1667<sup>[21]</sup>, 根据(12)式, 分别计算出原电子能量为 9.3, 11.0, 13.4 和 17.3 keV时的常数 $C$ 分别为  $C_{9.3} = 1.2384(\text{keV})^{2/3}$ ,  $C_{11.0} = 1.2168(\text{keV})^{2/3}$ ,  $C_{13.4} = 1.0833(\text{keV})^{2/3}$ ,  $C_{17.3} = 1.1152(\text{keV})^{2/3}$ , 因此, 原电子能量为 9.3, 11.0, 13.4 和 17.3 keV时的常数 $C$ 的平均值为  $\bar{C} = \frac{C_{9.3} + C_{11.0} + C_{13.4} + C_{17.3}}{4} = 1.1634(\text{keV})^{2/3}$ . 把常数 $C$ 的平均值代入(12)式, 得

$$\delta = \frac{1.1634(\text{keV})^{2/3}}{W_{p0}^{2/3}}. \quad (13)$$

(13)式为铝的高能二次电子发射系数的表达式。

#### 4 结果与讨论

文献[4]认为(4)式对任何金属都近似适用,但是到目前为止,(4)式只对铝的近似适用性得到实验证明[4]。因此,推导(13)式的方法对铝适用,对其他金属的近似适用性有待实验证明。

(13)式适用能区为  $10 \text{ keV} < W_{p0} < 1 \text{ MeV}$ ,若原电子能量更高(大于  $1 \text{ MeV}$ )或更低(如几百电子伏特到  $10 \text{ keV}$ ), (13)式将不能用,如当原电子能量更高(大于  $1 \text{ MeV}$ )时,原电子( $W_{p0} > 1 \text{ MeV}$ )在铝发射体内沿程能量损失规律为  $\frac{dW_p}{dx} \sim W_p^{-1}$  [4], 而不是  $\frac{dW_p}{dx} \sim -W_p^{-2/3}$ ; 当原电子能量更低(如  $2 \sim 10 \text{ keV}$ )时,原电子( $2 \text{ keV} < W_{p0} < 10 \text{ keV}$ )在铝发射体内沿程能量损失规律为  $\frac{dW_p}{dx} \sim W_p^{-1/2}$  [4], 而不是  $\frac{dW_p}{dx} \sim -W_p^{-2/3}$ ; 因此,若原电子能量更高(大于  $1 \text{ MeV}$ )或更低(如几百电子伏特到  $10 \text{ keV}$ )时,铝的二次电子发射系数表达式将与(13)式有较大区别。

根据(13)式,计算出铝的高能二次电子发射系数

的计算值(图 1),并把计算出的高能二次电子发射系数的计算值与以前研究人员测量的铝的高能二次电子发射系数进行了比较(图 1)。从图 1 可以看出,根据(13)式计算出铝的高能二次电子发射系数的计算值与以前研究人员测量的铝的高能二次电子发射系数比较一致,这说明我们推导出的铝的高能二次电子发射系数的表达式((13)式)对实验研究具有一定的指导意义。

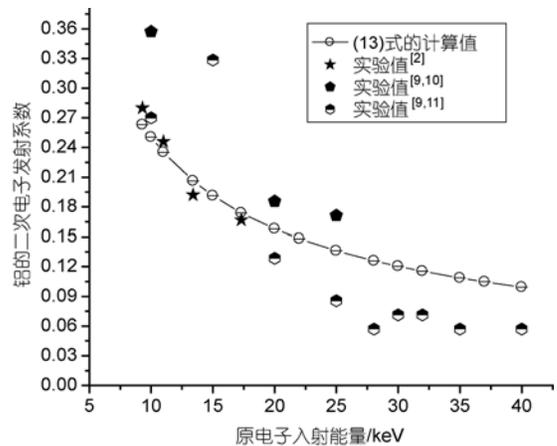


图 1 铝的高能二次电子发射系数的计算值与实验值的比较

#### 参考文献

- 1 Reimer L, Drescher H. Secondary electron emission of 10—100 keV electrons from transparent films of Al and Au. J Phys D: Appl Phys, 1977, 10: 805—815[doi]
- 2 谢爱根, 裴元吉, 孙红兵, 等. 高能原电子能量与金属的有效真二次电子发射系数的关系. 强激光与粒子束, 2004, 16(8): 1059—1062
- 3 Seiler H. Secondary electron emission in the scanning electron microscope. J Appl Phys, 1983, 54(11): R1—R18
- 4 Kanaya K, Kawakatsu H. Secondary electron emission due to primary and backscattered electrons. J Phys D: Appl Phys, 1972, 5: 1727—1741[doi]
- 5 刘学恣. 阴极电子学. 北京: 科学出版社, 1980. 417—419
- 6 Nishimura K, Kawata J, Ohya K. Comparative study of secondary electron emission from solids under positron and electron impacts. Nucl Instr Meth Phys Res B, 2000, 164-165: 903—904[doi]
- 7 Ono S, Kanaya K. The energy dependence of secondary emission based on the range-energy retardation power formula. J Phys D, 1979, 12: 619—632[doi]
- 8 Drescher H, Reimer L, Seidel H. Rückstreuoeffizient und Sekundärelektronen-Ausbeute von 10-100 keV-Elektronen und Beziehungen zur Raster-Elektronenmikroskopie. Z Angew Phys, 1970, 29: 331—336
- 9 http://www.mc-set.com/bse/13.htm
- 10 Moncrieff D A, Barker P R. Secondary electron emission in the scanning electron microscope. Scanning, 1976, 1: 195—197
- 11 Czaja W. Response of Si and GaP p-n junctions to a 5- to 40-keV electron beam. J Appl Phys, 1966, 37: 4236—4248[doi]