

文章编号: 1001-4322(2004)08-1059-04

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*

谢爱根, 裴元吉, 孙红兵, 王 荣

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029)

摘 要: 提出有效真二次电子发射系数的概念, 并从理论上论述了高能原电子的能量与金属的有效真二次电子发射系数的关系, 然后用实验数据证明了该理论的正确性, 最后对结果进行了讨论。得到了如下结论: 不同入射能量的高能原电子轰击同一个金属发射体时, 它们的有效真二次电子发射系数与高能原电子入射能量之积近似为一个常量, 有效真二次电子发射系数与高能原电子入射能量成反比。

关键词: 二次电子; 入射能量; 金属; 有效真二次电子发射系数

中图分类号: O346.1 文献标识码: A

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 50eV 的二次电子定义为真二次电子, 把能量大于 50eV 的二次电子定义为背散射二次电子, 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。本文将论述高能原电子的入射能量与金属的有效真二次电子发射系数的关系。

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^[1]

1.1.1 原电子射入发射体并激发产生内二次电子的过程

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

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

式中: α 是激发一个内二次电子所消耗的平均能量; W_p 和 x 分别是高能原电子的能量和行程。

1.1.2 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用公式

$$f(x) = B e^{-\mu x} \quad (2)$$

表示。式中: μ 为吸收系数; B 是当 $x=0$ 时的几率。

1.2 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

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 α_{eff} 可以写成^[1]

$$\alpha_{\text{eff}} = \int_0^L N(x, W_p) f(x) dx = - \frac{B}{\alpha} \int_0^L \frac{dW_p}{dx} e^{-\mu x} dx \quad (3)$$

对于一般金属发射体, 当原电子入射能量为几百 eV 时, 二次电子发射系数达到最大。高能原电子(能量大于 10keV)射入金属发射体内的深度明显大于逸出深度 $1/\mu$, 在大于逸出深度 $1/\mu$ 处所激发的内二次电子几乎不能逸出金属发射体而成为真二次电子, 所以对于高能原电子轰击金属发射体时, (3) 式的定积分区间可以近似改成积分区间为 $[0, 1/\mu]$ 的定积分。

经实验证明高能原电子在金属发射体内沿程能量损失规律为惠丁顿定律^[2]

* 收稿日期: 2003-12-04; 修订日期: 2004-02-09

基金项目: 国家创新工程资助课题

作者简介: 谢爱根(1975—), 男, 安徽芜湖人, 博士研究生, 研究方向为二次电子发射材料; 合肥 6022 信箱; E-mail: xag@mail.ustc.edu.cn.

$$\frac{dW_p}{dx} = -W_p^{-1} \tag{4}$$

高能原电子射入金属发射体内时,它的行程比一个逸出深度 $1/\lambda$ 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,所以它在离表面一个逸出深度 $1/\lambda$ 范围内,它的能量损失相对于它的原能量很小,高能原电子在入射表面一个逸出深度 $1/\lambda$ 范围内沿程能量损失规律可近似表示为

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

式中:G是一个比例常数,决定于发射体的物质密度^[2]。综上所述,高能原电子射入金属发射体内时,有效真二次电子发射系数 δ_{eff} 可以近似写成

$$\delta_{\text{eff}} = \int_0^{1/\lambda} \frac{G}{W_{p0}} e^{-x/\lambda} dx = \frac{BG(e^{-1} - 1)}{eW_{p0}} \tag{6}$$

$$eW_{p0} \delta_{\text{eff}} = BG(e^{-1} - 1) \tag{7}$$

由于 $BG(e^{-1} - 1)/e$ 是一个常量,所以对于入射能量分别为 W_{p01} 和 W_{p02} (它们的有效真二次电子发射系数分别为 δ_{eff1} 和 δ_{eff2}) 时,金属发射体的有效真二次电子发射系数之比可以写成

$$\delta_{\text{eff1}} / \delta_{\text{eff2}} = W_{p02} / W_{p01} \tag{8}$$

$$\delta_{\text{eff1}} W_{p01} / (\delta_{\text{eff2}} W_{p02}) = 1 \tag{9}$$

方程(8)和(9)表示:不同入射能量的高能原电子轰击同一个金属发射体时,它们的有效真二次电子发射系数与高能原电子入射能量之积近似为一个常量,有效真二次电子发射系数与高能原电子入射能量成反比。

2 实验数据对理论的验证

二次电子发射系数是由真二次电子发射系数和反射系数组成,其表达式为^[3]

$$\delta = \delta_{\text{PE}} + \delta_{\text{RE}} = \delta_{\text{PE}}(1 + \delta_{\text{RE}}) \tag{10}$$

式中: δ_{PE} 和 δ_{RE} 分别是真二次电子发射系数和反射系数; δ_{RE} 是反散射系数; δ_{PE} 是比例系数。图 1 和图 2 分别是铝膜和金膜的二次电子发射系数和反散射系数^[3]。由于铝膜和金膜的膜厚有限,为了得到较精确的二次电子发射系数和反散射系数,只能取部分值。由图 1 和图 2 可知,当原电子的入射能量分别为 9.3, 11.0, 13.4, 17.3, 25.2, 32.4keV 时,金膜的二次电子发射系数分别是 0.430 0, 0.370 0, 0.316 7, 0.256 7, 0.193 0, 0.150 0; 金膜的反散射系数 δ_{RE} 都是 0.512 5。当原电子的入射能量分别为 9.3, 11.0, 13.4, 17.3keV 时,铝膜的二次电子发射系数分别是 0.280 0, 0.246 0, 0.192 0, 0.166 7; 铝膜的反散射系数 δ_{RE} 分别是 0.190 0, 0.186 3, 0.182 5, 0.175 0。

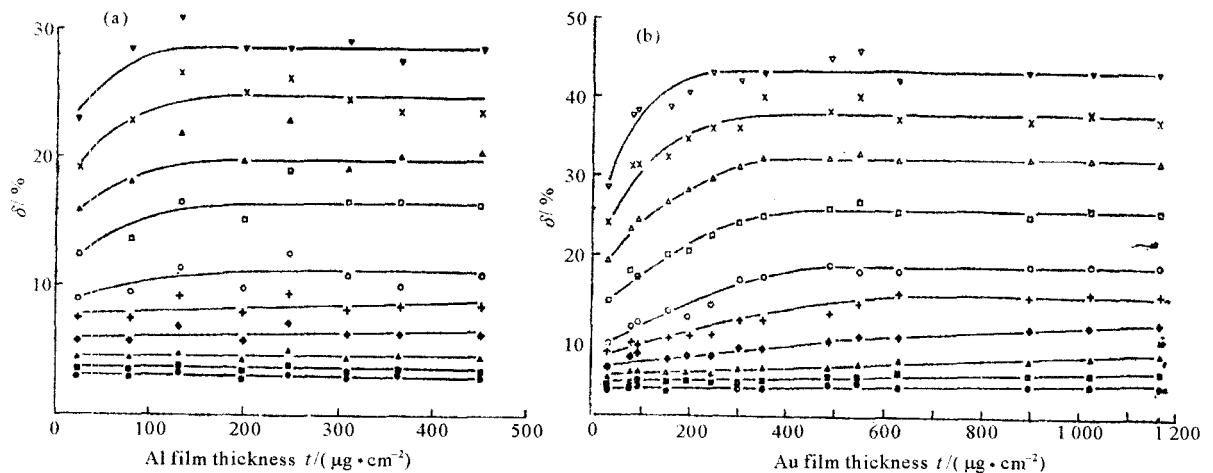


Fig. 1 Secondary electron yield δ as a function of the thickness t of (a) Al and (b) Au films for different energies W_{p0} of the incident electrons.

▽ 9.3keV; × 11.0keV; △ 13.4keV; □ 17.3keV; ○ 25.2 keV;
+ 32.4 keV; ● 41.5 keV; ◆ 62.1 keV; ▲ 81.8 keV; ■ 102 keV

图 1 不同入射能量的原电子的铝膜(a)和金膜(b)的二次电子发射系数

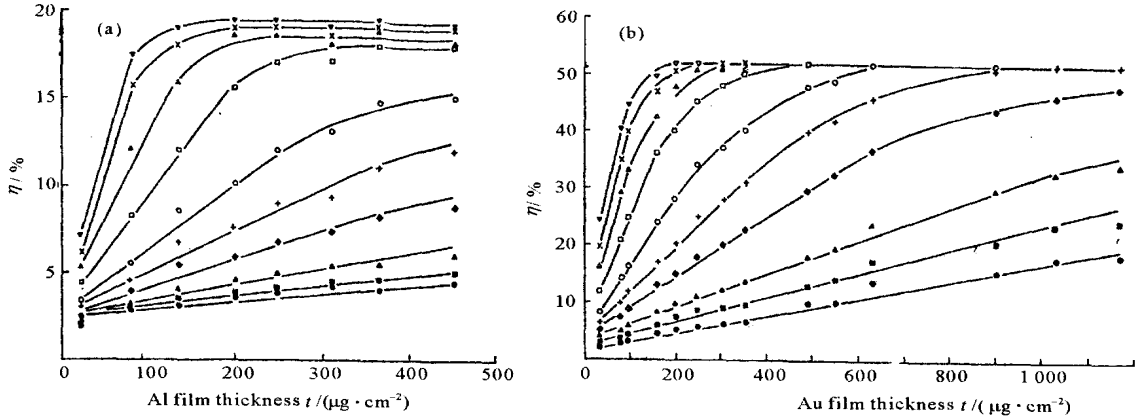


Fig. 2 Backscattering coefficient η as a function of the thickness t of (a) Al and (b) Au films for different energies W_{p0} of the incident electrons. W_{p0} values are given in the caption of figure 1.

Fig. 2 Backscattering coefficient η as a function of the thickness t of (a) Al and (b) Au films for different energies W_{p0} of the incident electrons. W_{p0} values are given in the caption of figure 1.

图 2 不同射入能量的铝膜(a)和金膜(b)的反散射系数

当原电子入射能量分别为 9.3, 11.0, 13.4, 17.3keV 时, 铝膜的比例系数 分别是 2.0, 2.5, 1.8, 2.8^[3]。当原电子入射能量分别为 9.3, 11.0, 13.4, 13.4, 17.3, 25.2, 32.4keV 时, 金膜的比例系数 分别是 1.9, 1.7, 1.6, 2.1, 2.9, 2.3^[3]。

由(10)式可得真二次电子发射系数 η_{PE} 为

$$\eta_{PE} = \eta / (1 + \eta) \tag{11}$$

由有效真二次电子发射系数定义和(10)式可知, 有效真二次电子发射系数 η_{eff} 可表示为

$$\eta_{eff} = [\eta / (1 + \eta)] / (1 - \eta) \tag{12}$$

根据上面给出的金膜和铝膜的二次电子发射系数、反散射系数、比例系数 和式(12), 我们可以算出入射能量不同时它们的有效真二次电子发射系数、有效真二次电子发射系数与高能原初电子能量之积等, 表 1 和表 2 分别列出了入射能量 W_{p0N} ($N = 1, 2, \dots, S$, 对于金膜和铝膜, S 分别取 6 和 4) 不同时, 金膜和铝膜的二次电子发射系数 η_N , 比例系数 η_N , 反散射系数 η_N , 有效真二次电子发射系数 η_{effN} , 有效真二次电子发射系数与高能原电子能量之积 $\eta_{effN} \times W_{p0N}$ 和 $\eta_{effN} \times W_{p0N}$ 与平均值之商 $[(\sum_{N=1}^S \eta_{effN} \times W_{p0N}) / (\sum_{N=1}^S \eta_{effN} \times W_{p0N})] / (\sum_{N=1}^S \eta_{effN} \times W_{p0N}) / S$ 是有效真二次电子发射系数与高能原电子能量之积的平均值, 对于金膜和铝膜, 其值分别为 4.385 3 和 2.328 2keV)。

表 1 入射能量不同时, 金膜的一些参数

Table 1 Some parameters of Au films under different incident energies

W_{p0N}/keV	N	η_N	η_N	η_N	η_{effN}	$(\sum_{N=1}^6 \eta_{effN} \times W_{p0N}) / \text{keV}$	$(\sum_{N=1}^6 \eta_{effN} \times W_{p0N}) / (\sum_{N=1}^6 \eta_{effN} \times W_{p0N})$
9.3	0.430 0	1.9	0.512 5	0.447 0	4.157 1	0.948 0	
11.0	0.370 0	1.7	0.512 5	0.405 5	4.460 5	1.017 1	
13.4	0.316 7	1.6	0.512 5	0.356 9	4.782 5	1.090 6	
17.3	0.256 7	2.1	0.512 5	0.253 5	4.385 6	1.000 0	
25.2	0.190 0	2.9	0.512 5	0.156 8	3.951 4	0.901 1	
32.4	0.150 0	2.3	0.512 5	0.141 2	4.574 9	1.043 2	

表 2 入射能量不同时, 铝膜的一些参数

Table 2 Some parameters of Al films under different incident energies

W_{p0N}/keV	N	η_N	η_N	η_N	η_{effN}	$(\sum_{N=1}^4 \eta_{effN} \times W_{p0N}) / \text{keV}$	$(\sum_{N=1}^4 \eta_{effN} \times W_{p0N}) / (\sum_{N=1}^4 \eta_{effN} \times W_{p0N})$
9.3	0.280 0	2.0	0.190 0	0.250 5	2.329 7	1.000 6	
11.0	0.246 0	2.5	0.186 3	0.206 2	2.268 2	0.974 2	
13.4	0.192 0	1.8	0.182 5	0.176 8	2.369 1	1.017 6	
17.3	0.166 7	2.8	0.175 0	0.135 6	2.345 9	1.007 6	

3 分析讨论

同一发射体但高能原电子入射能量不同时,有效真二次电子发射系数与原电子入射能量之积稍微有差别有多种原因。首先金属的二次电子发射理论就是一个近似理论,例如,惠定顿定律是近似的理论。其次建立在金属的二次电子发射理论基础上的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的理论也是近似理论,例如,在该理论推导中,假定高能原电子在离表面一个逸出深度范围 $1/\lambda$ 内,其沿程单位距离能量损失为常量 $-G/W_{p0}$,这也是一个近似处理。根据(6)式可知,对于较高入射能量的高能原电子,它们在离表面一个逸出深度范围 $1/\lambda$ 内的能量损失较小,所以这种近似处理的近似程度较高,相反,对于较低入射能量的高能原电子,这种近似处理的近似程度较低;再例如,在该理论推导中,对于高能原电子轰击金属发射体时,(3)式的定积分区间近似改成积分区间为 $[0, 1/\lambda]$ 的定积分,这也是一个近似处理。当然多次运算也会带来误差。

4 结 论

不同入射能量的高能原电子轰击金膜和铝膜发射体时,它们的有效真二次电子发射系数与原电子入射能量之积的平均值分别约为 4.385 3 和 2.328 2keV,它们的有效真二次电子发射系数与原电子入射能量之积与其平均值的相对变化分别在 10%之内和 50%之内。因此可以得出:不同入射能量的高能原电子轰击同一个金属发射体时,它们的有效真二次电子发射系数与原电子入射能量之积近似为一个常量,有效真二次电子发射系数与原电子入射能量成反比。

参考文献:

- [1] 江剑平,翁甲辉,杨泮棠,等. 阴极电子学与气体放电原理[M]. 北京:国防工业出版社,1980. 213—214. (Jiang J P, Weng J H, Yang P T, et al. Cathode electronics and principle of gas discharge. Beijing: National Defense Industry Press, 1980. 213—214)
- [2] 刘学恂. 阴极电子学[M]. 北京:科学出版社,1980. 417—419. (Liu X Q. Cathode electronics. Beijing: Science Press, 1980. 417—418)
- [3] Reimer L, Drescher H. Secondary electron emission of 10—100keV electrons from transparent films of Al and Au[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 1977, **10**:805—815.

Relation of incident energy of high energy primary electron and real efficient secondary electron emission coefficient of metal emitter

XIE Ai-gen, PEI Yuan-ji, SUN Hong-bing, WANG Rong

(University of Science and Technology of China, P. O. Box 6022, Hefei 230029, China)

Abstract: At first, this paper gave the definition of real efficient secondary electron emission coefficient and discussed its relation the incident energy of high energy primary electron in metal in theory. When high energy primary electron of different incident energy collided with the same metal emitter. The product of their veal efficient secondary electron emission coefficient and the incident energy of primary electron is approximately constant. Then the theory was proved to be true by experimental date and we also discussed the reasons that the product of real efficient secondary electron emission and the incident energy of primary electron had same discrepancy because of different incident energy of primary electron.

Key words: Secondary electron; Incident energy; Metal; Real efficient secondary electron emission coefficient