

# 金属的有效真二次电子 发射系数与高能原电子入射角的关系\*

谢爱根<sup>1)</sup> 裴元吉 王荣 孙红兵

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

**摘要** 推导出高能原电子斜入射时的金属的有效真二次电子发射系数的表达式,它与入射角的余弦近似成反比,并对结果进行了讨论.

**关键词** 入射角度 金属 有效真二次电子发射系数

## 1 引言

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.二次电子数与原电子数之比定义为二次电子发射系数.通常把能量小于 50eV 的二次电子定义为真二次电子,通常把能量大于 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.以前科学家已经给出了二次电子发射系数与原电子入射角之间的关系.本文论述高能原电子的入射角  $\theta$  与金属的有效真二次电子发射系数的关系.这里将入射能量大于  $10\text{keV}/\cos\theta$  的原电子称为高能原电子.

## 2 金属的二次电子发射的主要物理过程<sup>[1]</sup>

### 2.1 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  $dW_p/ds$  成比例,亦即

$$N(s, W_p) = -\frac{dW_p}{ds} \frac{1}{\epsilon}. \quad (1)$$

式中,  $\epsilon$  是激发一个内二次电子所消耗的平均能量,  $W_p$  和  $s$  分别是高能原电子的能量和行程变量.

### 2.2 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

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

表示,其中  $\alpha$  为吸收系数;  $B$  是当  $x=0$  时的几率;  $x$  是内二次电子到发射体表面的距离.当高能原电子斜入射时,从原电子的入射点到其射入发射体内的轨迹上任意一点的距离  $s$  等于该点到发射体表面的距离  $x$  的  $\frac{1}{\cos\theta}$  倍,如图 1 所示,因此(2)式可以表示为

$$f(x) = B e^{-\alpha x} = B e^{-\alpha s \cos\theta}, \quad (3)$$

上式中  $\theta$  是原电子入射角.

2004-09-09 收稿

\* 国家创新工程基金资助

1) E-mail: xag@mail.ustc.edu.cn

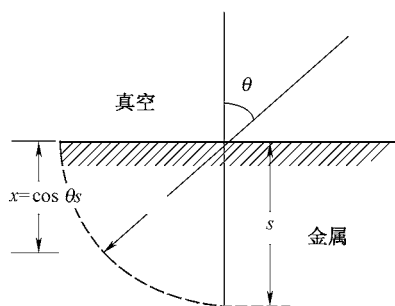


图 1 原电子行程与内二次电子到表面距离示意图

### 3 金属的有效真二次电子发射系数与高能原电子入射角的关系

若原电子在发射体中的总行程为  $L$ ,  $N(s, W_p)$  是在一个斜射入发射体内(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  $\delta_{e\theta}$  可以写成<sup>[1]</sup>

$$\delta_{e\theta} = \int_0^L N(s, W_p) f(x) ds = - \frac{B}{\epsilon} \int_0^L \frac{dW_p}{ds} e^{-as \cos\theta} ds. \quad (4)$$

从图 1 可知:当高能原电子(入射能量大于  $\frac{10\text{keV}}{\cos\theta}$ )斜射入金属发射体内的行程大于  $\frac{1}{\alpha \cos\theta}$  时,就有些内二次电子离发射体表面距离大于逸出深度  $\frac{1}{\alpha}$ ;而离发射体表面距离大于逸出深度  $\frac{1}{\alpha}$  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斜轰击金属发射体时,(4)式的定积分区间可以近似改成积分区间为  $[0, \frac{1}{\alpha \cos\theta}]$  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<sup>[2]</sup>

$$\frac{dW_p}{ds} \sim - W_p^{-1}, \quad (5)$$

高能原电子斜射入金属发射体内时,它的行程比  $\frac{1}{\alpha \cos\theta}$  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,所以它在行程  $\frac{1}{\alpha \cos\theta}$  范围内,它的能量损失相对于它的原能量很小,所以根据(5)

式可知,高能原电子在它的行程  $\frac{1}{\alpha \cos\theta}$  范围内沿程能量损失规律可近似表示为

$$\frac{dW_p}{ds} = - \frac{G}{W_{p0}} \quad (s=0 \text{ 时}, W_p = W_{p0}), \quad (6)$$

式(6)中,  $G$  是一个比例常数,决定于发射体的物质密度<sup>[2]</sup>.综上所述,高能原电子斜射入金属发射体内时,有效真二次电子发射系数  $\delta_{e\theta}$  可以近似写成

$$\delta_{e\theta} = \frac{B}{\epsilon} \int_0^{\frac{1}{\alpha \cos\theta}} \frac{G}{W_{p0}} e^{-as \cos\theta} ds = \frac{BG(e-1)}{\epsilon e W_{p0} \alpha \cos\theta}, \quad (7)$$

由(7)式可知,当高能原电子垂直入射时的金属的有效真二次电子发射系数可以表达为

$$\delta_{e0} = \frac{B}{\epsilon} \int_0^{\frac{1}{\alpha}} \frac{G}{W_{p0}} e^{-as} ds = \frac{BG(e-1)}{\epsilon e W_{p0} \alpha}, \quad (8)$$

由(7)式和(8)式可得

$$\delta_{e\theta} = \frac{\delta_{e0}}{\cos\theta}, \quad (9)$$

上式给出了金属的有效真二次电子发射系数与高能原电子入射角的关系.

### 4 分析讨论

由于在推导(9)式的过程中应用了近似理论并作了近似处理,例如应用的金属的二次电子发射理论和惠丁顿定律都是近似理论,再例如,在推导(9)式的过程中,根据高能原电子的行程明显大于  $\frac{1}{\alpha \cos\theta}$  的情况而把(4)式的不定积分区间近似改成积分区间为  $[0, \frac{1}{\alpha \cos\theta}]$  的定积分.所以为了使(9)式将来更好地符合实验结果,(9)式应该表示为

$$\delta_{e\theta} \approx \frac{\delta_{e0}}{\cos\theta}. \quad (10)$$

该式中的  $\delta_{e0}$  已经被证明了是正确的表达式且  $\delta_{e0}$  是与发射体材料和高能原电子能量相关的常数<sup>[3]</sup>;也就是说在表达金属的有效真二次电子发射系数与高能原电子入射角的关系中,只与一个参数  $\delta_{e0}$  与金属发射体材料和高能原电子能量相关,  $\delta_{e0}$  只是  $\delta_{e\theta}$  的一种特殊情况(高能原电子的入射角为零).从(10)式中我们还可以得出结论:相同能量的高能原电子射入同一个金属发射体上时,金属的有效真二次电子发射系数与高能原电子的入射角的余弦函数近似成反比.

**参考文献 (References)**

- 1 JIANG Jian-Ping, WENG Jia-Hui, YANG Pan-Tang et al. Cathode Electronics and Principle of Gas Discharge. Beijing: National Defense Industry Press, 1980. 213—214 (in Chinese)  
(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)
- 2 LUI Xue-Que. Cathode Electronics. Beijing: Science Press, 1980. 417—418 (in Chinese)  
(刘学懋. 阴极电子学[M]. 北京: 科学出版社, 1980, 417—418)
- 3 XIE Ai-Gen, PEI Yuan-Ji, SUN Hong-Bing et al. High Power Laser and Particle Beams, 2004, **16**(8): 1059—1062 (in Chinese)  
(谢爱根, 裴元吉, 孙红兵等. 强激光与粒子束. 2004, **16**(8): 1059—1062)

**Relation Between the Incident Angle of High Energy Primary Electron  
of Metal and the Real Efficient Emission  
Coefficient of Secondary Electron \***

XIE Ai-Gen<sup>1)</sup> PEI Yuan-Ji WANG Rong SUN Hong-Bing  
(University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

**Abstract** This paper derived the formulation for the real efficient emission coefficient of secondary electron under the condition that high energy primary electron incident on metal obliquely. It shows that the coefficient is reversely proportional to the cosine of the incident angle.

**Key words** incident angle, metal, real efficient emission coefficient of secondary electron

---

Received 9 September 2004

\* Supported by National Innovation Project Foundation of China

1) E-mail: xag@mail.ustc.edu.cn