

## 计算高能原电子能量损失率的方法

谢爱根<sup>1</sup>, 郭胜利<sup>1</sup>, 裴元吉<sup>2</sup>

(1. 南京信息工程大学 数理学院, 江苏 南京 210044;

2 中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029)

**摘要:** 提出了计算属于同一能区高能原电子在金属发射体内的沿程能量损失率的方法, 用实验数据分别计算出属于两个能区的高能原电子在金属金发射体内的沿程能量损失率, 并用实验数据计算出属于同一能区的高能原电子在金属铝发射体内的沿程能量损失率, 结果显示, 计算高能原电子在金属发射体内的沿程能量损失率的方法是可行的。

**关键词:** 能量损失率; 金属发射体; 高能原电子

**中图分类号:** O462.2   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1000-2022(2007)05-0720-03

## Method for Calculating Energy Loss Rate of High Energy Primary Electrons

XIE Aigen<sup>1</sup>, GUO Shengli<sup>1</sup>, PEI Yuanji<sup>2</sup>

(1. School of Mathematics and Physics NUIST, Nanjing 210044 China

(2. National Synchrotron Radiation Lab, USTC, Hefei 230029 China)

**Abstract** This paper presents the method for calculating the energy loss rate of high energy primary electrons which belong to the same energy band in metal emitter; then the energy loss rate of high energy primary electrons which belong to two energy bands in gold emitter is calculated with experimental results; the energy loss rate of high energy primary electrons which belong to the same energy band in aluminum is also calculated with experimental results. The results are discussed in this paper and the conclusion is drawn that the new calculating method of energy loss rate of high energy primary electrons in metal emitter is right.

**Key words** energy loss rate; metal emitter; high energy primary electron

### 0 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<sup>[1]</sup>。轰击物体的电子称为原电子, 从样品表面发射的电子称为二次电子, 二次电子与原电子之比定义为二次电子发射系数<sup>[2]</sup>; 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>[3]</sup>, 有效真二次电子发射系数与高能原电子的入射能量和入射角的余弦值成反比<sup>[3-4]</sup>; 二次电子发射过程是非常复杂的, 其中原电子在发射体内的沿程能量损失是一个重要研究内容。

到目前为止, 大部分二次电子发射研究者认为原电子射入金属发射体内的能量损失规律大致如下<sup>[5]</sup>: 能量较大的原电子进入物体内部后, 将引起物体内部电子的激发, 使后者的能量增加, 而原电子本身的能量将逐渐减小。在物体内部被激发的内二次电子的总数很显然是与原电子的能量成正比的, 也就是说在物体内部被激发的内二次电子的总数与原电子的能量损耗成正比。然而被激发的内二次电子在原电子的整个行程上的分布并不是均匀的。原电子在单位行程内激发的电子数目与原电子的能量有关。原电子的动能愈大, 由于它与原子相互作用的时间变短, 故激发的内二次电子反而变少。原电子的动能降到 100 eV 左右时, 在单位行程内激发的

收稿日期: 2006-04-10 改回日期: 2006-12-25

基金项目: 南京信息工程大学科研基金资助课题 (QD65)

作者简介: 谢爱根 (1971-), 男, 安徽芜湖人, 博士, 讲师, 研究方向: 二次电子发射材料, xag@nuist.edu.cn.

内二次电子数最多。当原电子的动能再继续下降时, 激发的内二次电子数迅速下降, 直到零。到目前为止, 二次电子发射研究者只能定性地了解原电子在金属发射体内的能量损失率。本文将定量地研究高能原电子在金属发射体内的沿程能量损失率。

二次电子发射系数的表达式为<sup>[6]</sup>

$$\delta = -\frac{B}{\varepsilon_0} \int_0^L \frac{dE}{dR} e^{-\alpha R} dR. \quad (1)$$

式中:  $B$  为内二次电子到达发射体表面时的逸出几率;  $\varepsilon$  是激发一个内二次电子所消耗的平均能量;  $E$  为原电子能量;  $R$  为原电子的行程;  $L$  为原电子的总行程;  $\alpha$  为吸收系数。从 (1) 式可以看出, 如果能定量地研究高能原电子在金属发射体内的沿程能量损失率, 将有利于研究高能原电子的二次电子发射系数。

## 1 计算方法

原电子的射程可表示为<sup>[7]</sup>

$$R = AE^n. \quad (2)$$

式中:  $R$  是原电子的射程;  $A$  是与原电子的能量段和材料相关的常数;  $E$  是原电子的能量;  $n$  是原电子的能量幂次; 能量幂次  $n$  是与原电子的能量段和材料相关的常数。随着高能原电子能量的变化, 高能原电子的射程、常数  $A$  以及能量幂次都要随之改变, 当高能原电子的能量在同一个能量段范围内进行能量变化且高能原电子最高能量小于最低能量的两倍时, 可以近似地认为它的能量幂次为常数, 对 (1) 式两边微分得:

$$dR = E^n dA + nAE^{n-1} dE, \quad (3)$$

即

$$\frac{dE}{dR} = \frac{1}{nAE^{n-1}} - \frac{E}{nA} \frac{dA}{dR}, \quad (4)$$

(4) 式表示在同一个能量段内高能原电子在金属发射体内的沿程能量损失率的大小。当高能原电子能量分别为  $E_1$  和  $E_2$  ( $E_1$  和  $E_2$  在同一个能量段内且  $E_1$  大于  $E_2$ ) 时, 它们的常数  $A$  分别为  $A_1$  和  $A_2$ , 它们的原电子射程分别为  $R_1$  和  $R_2$ 。原电子能量由  $E_1$  变化到  $E_2$  时, 常数  $A$  的变化量为  $dA = A_1 - A_2$ , 原电子射程的变化量为  $dR = R_1 - R_2$ 。把高能原电子能量幂次  $n$ 、常数  $A_1$ 、常数  $A$  的变化量  $dA = A_1 - A_2$ 、原电子射程的变化量  $dR = R_1 - R_2$  和原电子能量  $E_1$  代入 (4) 式, 就可以计算出高能原电子在同一个能量段内的能量由  $E_1$  变化到  $E_2$  时的沿程能量损失率  $S_{1-2}$ 。通过上述方法可以计算出在同一个能量段内

的几组高能原电子能量之间的沿程能量损失率  $S_{2-3}$ ,  $S_{3-4}$ , ..., 然后计算出沿程能量损失率  $S_{1-2}$ ,  $S_{2-3}$ ,  $S_{3-4}$ ... 的平均值  $S_1$ , 该平均值就是高能原电子在该能量段的沿程能量损失率, 这样就能定量地研究高能原电子在金属发射体内的沿程能量损失率了。

## 2 计算结果

当原电子以能量分别以  $E_{11} = 11$  keV 和  $E_{9.3} = 9.3$  keV 轰击在金属金上时, 它们的常数分别为<sup>[8]</sup>  $A_{Au11} = 5.1693 \times 10^{-13} \text{ cm} \cdot \text{V}^{-2}$  和  $A_{Au9.3} = 5.4629 \times 10^{-13} \text{ cm} \cdot \text{V}^{-2}$ , 它们的射程分别为<sup>[9]</sup>  $R_{Au11} = 1.6046 \times 10^{-5} \text{ cm}$  和  $R_{Au9.3} = 1.2422 \times 10^{-5} \text{ cm}$ , 它们的常数的变化量为  $dA_{Au11-9.3} = 2.936 \times 10^{-14} \text{ cm} \cdot \text{V}^{-2}$ , 它们的原电子射程变化量为  $dR_{Au11-9.3} = 3.6231 \times 10^{-6} \text{ cm}$ ; 已算出能量段 (9.3~13.4 keV) 的能量幂次为  $n_{Au13.4-9.3} = 1.8538$ <sup>[10]</sup>, 在同一能量段 (9.3~13.4 keV) 的能量幂次相等, 即  $n_{Au11-9.3} = n_{Au13.4-11} = n_{Au13.4-9.3} = 1.8538$  把这些值 (入射能量为  $E_{11} = 11$  keV) 代入 (4) 式就可以计算出高能原电子能量由  $E_{11} = 11$  keV 变化到  $E_{9.3} = 9.3$  keV 时的沿程能量损失率  $S_{Au11-9.3} = 4.6279 \times 10^8 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。当原电子以能量为  $E_{13.4} = 13.4$  keV 轰击在金属金上时, 它的常数、射程、能量幂次分别为  $A_{Au13.4} = 4.7420 \times 10^{-13} \text{ cm} \cdot \text{V}^{-2}$ <sup>[8]</sup>,  $R_{Au13.4} = 2.1222 \times 10^{-5} \text{ cm}$ <sup>[9]</sup>,  $n_{Au13.4-9.3} = 1.8538$ <sup>[10]</sup>, 用上述方法和数据可以计算出高能原电子能量由  $E_{13.4} = 13.4$  keV 变化到  $E_{9.3} = 9.3$  keV 时的沿程能量损失率  $S_{Au13.4-9.3} = 4.6548 \times 10^8 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。用上述方法和数据还可以计算出高能原电子能量由  $E_{13.4} = 13.4$  keV 变化到  $E_{11} = 11$  keV 时的沿程能量损失率  $S_{Au13.4-11} = 4.6645 \times 10^8 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 高原电子在能量段 13.4~9.3 keV 的沿程能量损失率为上述 3 个沿程能量损失的平均值, 即  $\bar{S}_{Au13.4-9.3} = 4.6491 \times 10^8 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。当原电子以能量分别为  $E_{17.3} = 17.3$  keV,  $E_{25.2} = 25.2$  keV 和  $E_{32.4} = 32.4$  keV 轰击在金属金上时, 它们的常数分别为<sup>[8]</sup>  $A_{Au17.3} = 3.3738 \times 10^{-13} \text{ cm} \cdot \text{V}^{-2}$ ,  $A_{Au25.2} = 2.8439 \times 10^{-13} \text{ cm} \cdot \text{V}^{-2}$  和  $A_{Au32.4} = 2.5997 \times 10^{-13} \text{ cm} \cdot \text{V}^{-2}$ , 它们的射程分别为<sup>[9]</sup>  $R_{Au17.3} = 3.0021 \times 10^{-5} \text{ cm}$ ,  $R_{Au25.2} = 5.1242 \times 10^{-5} \text{ cm}$  和  $R_{Au32.4} = 7.5052 \times 10^{-5} \text{ cm}$ , 它们的能量幂次为  $n_{Au17.3-32.4} = 1.8757$ <sup>[10]</sup>。用上述方法和数据可以计算出高能原电子在能量段 17.3~32.4 keV 的沿

程能量损失率为  $\bar{S}_{Au32.4-17.3} = 3.1643 \times 10^8$   $V \cdot cm^{-1}$ 。

当原电子以能量分别为  $E_{13.4} = 13.4$  keV、 $E_{11} = 11$  keV 和  $E_{9.3} = 9.3$  keV 轰击在金属铝上时, 它们的常数<sup>[8]</sup>分别为  $A_{Al13.4} = 1.1250 \times 10^{-12} cm \cdot V^{-2}$ 、 $A_{Al11} = 1.2019 \times 10^{-12} cm \cdot V^{-2}$  和  $A_{Al9.3} = 1.3103 \times 10^{-12} cm \cdot V^{-2}$ , 它们的射程<sup>[9]</sup>分别为  $R_{Al13.4} = 1.5556 \times 10^{-4} cm$ 、 $R_{Al11} = 1.1259 \times 10^{-4} cm$  和  $R_{Al9.3} = 8.8148 \times 10^{-5} cm$ , 它们的能量幂次<sup>[10]</sup>为  $n_{Al9.3-13.4} = 1.9725$ 。用上述方法和数据可以计算出高能原电子在能量段 9.3~13.4 keV 的沿程能量损失率为  $\bar{S}_{Al9.3-13.4} = 5.8486 \times 10^7 V \cdot cm^{-1}$ 。

### 3 分析讨论

从上述计算结果可知: 在金属金发射体内, 高能原电子在较高能量段 17.3~32.4 keV 内的沿程能量损失率小于它在较低能量段 9.3~13.4 keV 内的沿程能量损失率。根据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  $\frac{dE}{dR}$  成正比<sup>[5]</sup>, 可以得出结论: 在金属金发射体内, 高能原电子在较高能量段 17.3~32.4 keV 内激发的内二次电子数小于它在较低能量段 9.3~13.4 keV 内激发的内二次电子数。这个结论符合以前科技工作者的结论: 原电子的动能愈大, 由于它与原子相互作用的时间变短, 故激发的内二次电子反而变少<sup>[5]</sup>。

实验已证明了高能原电子 ( $E > 10$  keV) 轰击在金属发射体上时<sup>[5]</sup>, 原电子沿程能量损失率符合惠丁顿定律, 惠丁顿定律可以近似表示为

$$\frac{dE}{dR} = - \frac{N e^4}{16\pi \epsilon_0^2 E} \quad (5)$$

式中:  $E$  为原电子能量;  $R$  为原电子的行程;  $N$  为单位体积内点阵电子数 (单位体积内点阵电子数与金属密度成线性关系)。从 (5) 式可以得出: 相同能量的高能原电子轰击在不同金属发射体上时, 原电子沿程能量损失率与金属发射体的密度近似成线性关

系 ((5) 式近似表达了原电子沿程能量损失率)。金的密度是铝的密度的 7.1481 倍 ( $\rho_{Au} = 19.3 \times 10^3 kg \cdot m^{-3}$ ,  $\rho_{Al} = 2.7 \times 10^3 kg \cdot m^{-3}$ ), 因此从 (5) 式可知: 相同能量的高能原电子轰击在金和铝上时, 原电子在金内沿程能量损失率是在铝内沿程能量损失率的 7.1481 倍左右。从上述计算结果可知: 在相同能量段 (13.4~9.3 keV) 内, 高能原电子在金内的沿程能量损失率是在铝内的沿程能量损失率的 7.9491 倍, 这一计算结果也和惠丁顿定律相符合。

根据以上的讨论可知: 本文所述的计算高能原电子在金属发射体内的沿程能量损失率的方法是正确的。

### 参考文献:

- [1] 承欢, 江剑平. 阴极电子学 [M]. 西安: 西北电讯工程出版社, 1986: 164
- [2] 薛增泉, 吴全德. 电子发射与电子能谱 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1993: 210-211
- [3] 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 [J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(8): 1059-1062
- [4] 谢爱根, 裴元吉, 孙红兵, 等. 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 [J]. 高能物理与核物理, 2005, 29(5): 530-532
- [5] 刘学惠. 阴极电子学 [M]. 北京: 科学出版社, 1980: 417-422
- [6] 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
- [7] Kanaya K, Kawakatsu H. Secondary Electron emission due to primary and backscattered electron [J]. J Phys D: Appl Phys 1972, 5: 1727-1741.
- [8] 谢爱根, 郭胜利, 裴元吉. 计算高能原电子对金属射程的常数的新方法 [J]. 安徽大学学报: 自然科学版, 2006, 30(2): 52-54
- [9] Reimer L, Drescher H. Secondary electron emission of 10-100 keV electrons from transparent films of Al and Au [J]. J Phys D: Appl Phys 1977, 10: 805-815.
- [10] 谢爱根. 二次电子发射的研究和二次电子发射系数的测量 [D]. 合肥: 中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 2005: 47-51