

一种新型硬 X 射线光电阴极

石富文¹ 张工力² 高耀龙² 侯 洵²

(1 西北大学光子学与光子技术研究所, 陕西 西安 710069)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710068)

摘 要 分析了 X 射线光电效应的特点, 讨论了俄歇电子和二次电子的产生机制. 在原有的对软 X 射线具有较高光电发射量子效率的基础上, 我们通过改变材料的配比, 研究并优化了一种理想的复合光阴极, 它对能量在 30~50KeV 的硬 X 射线的量子效率最高可达到 1.5 电子/光子.

关键词 X 射线; 光阴极; 量子效率

0 引言

X 射线在天文学、材料科学、核物理、医学诊断、X 射线波谱学、无损探伤、内弹道与中间弹道研究等方面有着广泛的应用, 随着科学技术的日益发展, 对 X 射线的探测技术提出了更高的要求. 目前, 对软 X 射线光电阴极材料的光电发射特性 G. W. Fraser^{1,2} 等人对前人工作进行了综述并进行了深入的研究, 但关于硬 X 射线光阴极的研究很少, 本文简述了 X 射线光阴极的光电发射机制, 主要讨论了对硬 X 射线敏感的光阴极的量子效率.

1 X 射线光阴极的光电发射机制

1.1 X 射线引起的光电发射特点

X 射线引起的光电发射机制不同于一般的可见光和红外线引起的光电发射. X 射线光子能量较大, 在阴极中首先产生光电子和俄歇电子, 在他们的作用下, 还会激发大量的二次电子. 在 X 射线光阴极发射的电子中, 二次电子占有很大的比例, 因此一个入射 X 光子可以产生多个光电子, 而可见光阴极的量子效率不会大于一.

1.2 俄歇电子发射

当原子受到高能光子或电子的激发时, 它的内壳层电子(如 k 壳层电子)电离后形成一个空穴, 外壳层电子(如 l_1 亚壳层电子)填补 k 能级的

空穴, 同时释放出能量. 能量释放有 2 种形式: 该能量可能产生标识 X 射线辐射, 光子能量为 $h\nu = E_{k l_1}$; 也可能被另一个外层电子吸收(如 l_2 亚壳层电子)导致该电子逃逸, 该电子逸出后能量近似为 $E = E_k - E_{l_1} - E'_{l_2}$ (这个电子便称为俄歇电子其能量与入射光子能量无关, 而带有原子特征). 其中 E_k 和 E_{l_1} 是中性原子 k 壳层和 l_1 亚壳层的结合能; E'_{l_2} 是 l 壳层有单位个空穴离子的 l_2 亚壳层的结合能. 俄歇电子的产额可表示为 $Y_A = 1/(1 + \beta Z^4)$, 式中 Z 为原子序数. 当 $Z < 33$ 时, 俄歇发射占优势, 对于 k 型跃迁, 元素钾 ($Z = 19$) 以前的俄歇产额大于 90%.

1.3 二次电子增益

X 射线与阴极作用产生的初级电子(光电子及俄歇电子)中的一部分在逸出过程中能量损失很少能够直接逸出阴极的表面. 另一部分初级电子, 在运动过程中与阴极相互作用激发出大量的二次电子, 这些二次电子向阴极表面运动, 其中有一部分二次电子克服阴极表面势垒的作用, 能够逸出阴极表面, 形成电子发射的二次电子增益.

实际上, 不同性质材料的 X 射线光阴极产生二次电子的机制不同, 对于金属光阴极(如 Au , Al), 由于金属中的自由电子多, 光电子主要与自

由电子相互作用,电子-电子散射占主要地位;而在介质光阴极(如 CsI)中,电子主要与价带电子相互作用,即将价带电子激发到导带. 当前已经有许多研究小组对 X 射线在介质中的二次电子激发、传输、逃逸进行了详细的研究. 设 ϵ 为激发一个内层二次电子所需的能

$$\epsilon=E_B+E_s(z)$$

式中 $E_s(Z)$ 是在阴极内部引起的能量损失(主要是声子散射),对于介质材料, E_B 表示禁带宽度 E_G 和电子亲和势 E_A 之和,由于在介质材料中每次碰撞过程中的能量损失很小,可以忽略不计 E_s ,所以认为 ϵ 是一个物质常量,其值为 $\epsilon=E_A+E_G$.

在硬 X 射线能量低(当光子能量 $E_x < 1\text{MeV}$)时,没有电子对的产生,它的光电发射机制与软 X 射线相似. 根据 G. W. Fraser¹ 的关于软 X 射线光电发射理论, X 射线光阴极的量子效率可表示为初光电流 $(x_c)_x$ 与二次光电流 $(x_c)_s$ 之和,即

$$(x_c)_T=(x_c)_X+(x_c)_S \text{ 电子/光子} \tag{1}$$

$(x_c)_X$ 可表示为

$$(x_c)_X=[1-R(\alpha)]\int_0^{\mu T\cos\alpha'}e^{-y}\times(P_{ppe}+P_{Auger})\cdot dy \text{ 电子/光子} \tag{2}$$

$(x_c)_s$ 可表示为

$$(x_c)_s=[1-R(\alpha)]fP_s(0)E_x\epsilon^{-1}(1+\beta)^{-1}\cdot \tanh(T/2L_s) \text{ 电子/光子} \tag{3}$$

式中 $y=\mu\cos\alpha'z$, $\beta=(\mu\cos\alpha'\cdot L_s)^{-1}$, T 为阴极的厚度, $R(\alpha)$ 是能量为 E_x 的 X 射线的镜面反射系数, $P_s(0)$ 为光阴极表面的二次电子逸出几率, f 为初电子转换为二次电子的转换效率因子, P_{ppe} 和 P_{Auger} 分别为光电子及俄歇电子的产生几率.

2 一种新型硬 X 射线光电阴极

基于对 X 射线光电发射机制的这一理解,我们构造了一种新型 X 射线光电阴极,它是由光电

子发射层+俄歇电子发射层构成. 光电子发射层采用高原子系数、大的二次电子逃逸深度和小的 ϵ 的光电阴材料,俄歇电子发射层采用轻或超轻元素化合物. 光阴极制作工艺是在普通的真空蒸发台内进行,光电阴极的基底放在分别盛有光电阴极材料和俄歇电子发射材料的钼蒸发舟的上方一定距离的位置上,当系统达到高真空时,给系统充入氩气后,先蒸发光电子发射层(例如 CsI),然后再蒸发俄歇电子发射层,以得到低密度的结构. 经过反复地实验,得出了一种比较理想的对硬 X 射线有较高量子效率的复合光电阴极,它由 CsI 和 KCl 组成.

3 新型硬 X 射线光电阴极的特性

这种光电阴极的量子效率的实验结果^{3,4}如图 1 所示.

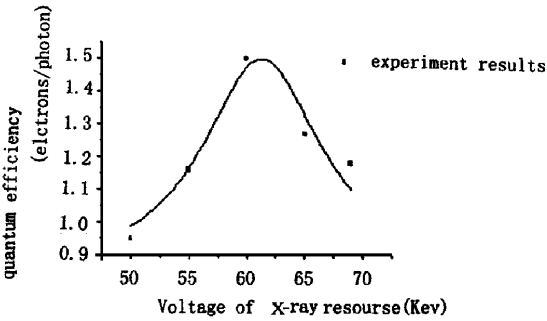


图 1 碘化铯、氯化钾复合阴极的量子效率

Fig. 1 The quantum efficiency of the multiple photocathode

由图可知在光子能量为 30~50KeV 的范围内,该光阴极的量子效率大于 1,且随着光子能量的增加呈线性增加,到某一能量达到最大值,最大可达 1.5;随着光子能量的增加,量子效率又开始减小,这可能是由于当光子能量增大到一定程度,阴极对 X 射线的吸收系数减小. 基于这种阴极的对硬 X 射线进行直接探测的象增强器,正在研制中.

参考文献

1 Fraser G W. The characterisation of X-ray photocathodes in the wavelength band 1-300 Å I. Lead glass, lithium fluoride and magnesium fluoride. Nuclear Instruments and Methods, 1983, 206(1,2): 215~263

2 Fraser G W. The characterisation of X-ray photocathodes in the wavelength band 1-300 Å II. Caesium iodide and other insulators of high photoelectric yield. Nuclear Instruments and Methods, 1983, 206(1,2): 265~279

3 赵小波. 关于硬 X 射线 ($E \leq 100\text{KeV}$) 透射式光电发射材料的研究[硕士学位论文]. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 1999: 30~35

4 康香宁 . 硬 X 射线 ($E \leq 100 \text{ keV}$) 光电阴极的研究 [硕士学位论文]. 西北大学, 2000: 36~41

A NEW-STYLE HARD X-RAY PHOTOCATHODES

Shi Fuwen¹, Zhang Gongli², Gao Yaolong², Hou Xun²

1 Northwest University Xi'an 710069

2 Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Academia of Science, Xi'an 710068

Received date: 2001-03-02

Abstract The mechanism of photo-Auger electrons and the secondary electron yield is discussed. Based on the known photocathode materials that have high quantum yield to soft X-rays, the new photocathodes have developed and optimized that we mixture some of these materials through changing their quantity ratio. The quantum efficiency of the multiple photocathode were measured 1.5 electrons per incident photon at maximum in the range 30~50~keV.

Keywords X-ray; Photocathode; Quantum efficiency



Shi Fuwen was born in 1975 in Shaanxi Province, China. He earned his B. S. in Physics Department of Northwest University in 1998. Since then, he has become a postgraduate in optics guided by reserch professor Hou Xun, Academician of the Academy of Sciences of China. Currently, he is studying towards M. S. at Institute of Photonics & Photon-technology, and Provinckal Key Laboratory of Photoelectronic Technology, Northwerst University. And his research field is photocathode.