

# 铯氧比对砷化镓光电阴极激活结果的影响\*

邹继军<sup>1,2</sup> 常本康<sup>1</sup> 杜晓晴<sup>1</sup> 陈怀林<sup>1</sup> 王 惠<sup>1</sup> 高 频<sup>1</sup>

(1 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

(2 东华理工学院电子工程系, 抚州 344000)

**摘 要** 实验和理论分析结果表明, 激活成功的砷化镓光电阴极的铯氧比存在一个最佳值. 砷化镓光电阴极铯氧比的控制可通过调节激活过程中铯源和氧源的加热电流大小来实现. 激活实验结果表明, 铯氧电流比适中的样品, 首次进氧时, 光电流上升速度最快, 激活后的阴极量子效率最高, 稳定性好. 当偏离这个比例, 过大或过小时, 光电流上升速度都会减慢, 激活结果也比前者差. 随着铯氧电流比的增大, 铯氧交替的总次数随之减少. 最佳铯氧电流比的调节应以首次进氧时光电流的上升速度最快为准, 一旦确定后在整个铯氧交替过程中保持不变.

**关键词** 砷化镓光电阴极; 铯氧比; 量子效率; 激活

**中图分类号** TN223 **文献标识码** A

## 0 引言

砷化镓(GaAs)光电阴极具有量子效率高, 暗发射小, 发射电子的能量分布及角分布集中等优点, 因此获得了广泛而深入的应用<sup>[1,2]</sup>. 但由于对制备条件极高的要求, GaAs 光电阴极的制备结果易于受到各种工艺条件的影响, 其中激活过程中铯氧(Cs/O)比的调节是影响制备结果的重要因素之一. 从激活后的 GaAs 光电阴极 Cs/O 比的原位表面分析, 发现 Cs/O 比存在一个最佳值<sup>[3,4]</sup>, 偏离这个最佳值, 过大或过小, 都不会得到高灵敏度且稳定性良好的阴极. X 射线光电子能谱(XPS)定量计算表明, 激活结束后阴极的 Cs/O 比接近 1.78<sup>[5]</sup>.

虽然激活成功的 GaAs 光电阴极存在一个最佳的 Cs/O 比, 但对于在激活过程中铯(Cesium)源和氧(Oxygen)源的大小对激活结果有何影响, 如何控制 Cs 源和 O 源的大小才能获得最佳 Cs/O 比, 并没有人对此进行过深入的研究, 提供可操作性的方法. 本文通过调节激活过程中 Cs 源和 O 源的加热电流大小来达到调节 GaAs 光电阴极 Cs/O 比的目的. 激活实验结果表明, Cs/O 电流比适中的样品, 激活效果最好.

## 1 实验

GaAs 光电阴极实验是在自行研制的 GaAs 光电阴极多信息量测试与评估系统<sup>[1,6]</sup>上进行的. 实验采用国内的反射式 GaAs 基片, p 型掺杂元素为 Zn, 掺杂浓度为  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . 用同样样品在相同

的化学清洗和加热净化工艺下共进行了三次实验. 首先用 3:1:1 的浓硫酸, 双氧水, 去离子水等进行化学清洗<sup>[7]</sup>, 清洗后将样品送至激活系统的加热位置, 当超高真空系统的本底真空度不低于  $1 \times 10^{-7} \text{ Pa}$  进行加热净化. 加热净化结束, 待样品自然冷却到 60℃ 左右开始激活, 此时真空度恢复到  $1 \times 10^{-7} \text{ Pa}$  以上. 激活采用 Cs 源连续, O 源断续的方法来进行. (Cs, O) 激活所用的 Cs 源、O 源均为固态分子源, 两者均可通过调节外接加热电流的大小, 来精确控制 Cs 源和 O 源通电放气量的大小, 加热电流越大, 放气量也越大. 在制备结束后, 用原位在线光谱响应测试仪对 GaAs 光电阴极的光谱响应特性进行了在线测试.

## 2 实验结果与分析

### 2.1 GaAs 光电阴极(Cs, O)激活工艺分析

(Cs, O) 激活采用传统“yo-yo”工艺<sup>[8,9]</sup>, (Cs, O) 交替时, 保持 O 源电流不变, 通过调节 Cs 源电流的大小来改变进 Cs 量, 从而改变 GaAs 光电阴极的 Cs/O 比例. 图 1 给出了三个样品在不同 Cs/O 电流比下的激活光电流曲线, 表 1 给出了三个样品激活过程中的对比参量. 可以看到, Cs/O 电流比适中的样品 2,  $I_{Cs}/I_O = 1.62/1.52$ , 首次进 O 时, 光电流上升速度最快, 斜率达到  $3.8 \mu\text{A}/\text{min}$ , 当偏离这个比例, 过大或过小时, 上升速度都减慢. 随着 Cs/O 电流比的增大, Cs/O 循环所需的总交替次数也随之减少.

(Cs, O) 交替过程中最佳 Cs/O 电流比的调节应以光电流的上升速度最快为准. 在首次进 O 后尽快确定, 一旦确定后在整个 (Cs, O) 交替过程中都应保持不变, 以使 Cs/O 比始终保持一个最佳值. 对于 Cs/O 电流比, 一定的 GaAs 材料、一定的激活系

\*教育部博士点基金(20050288010)资助

Tel: 025-84303305 Email: jjzou@ecit.edu.cn

收稿日期: 2005-07-05

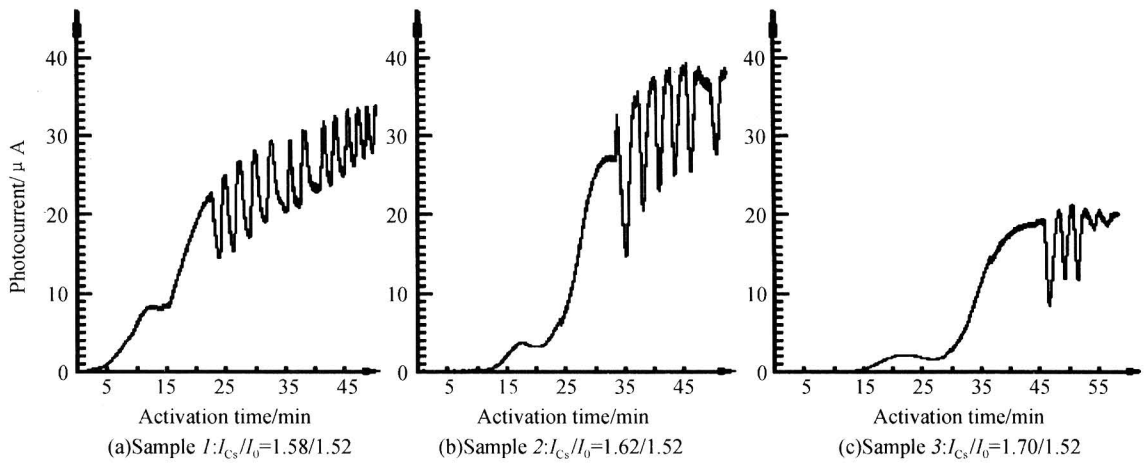


图 1 三个样品在不同 Cs/O 电流比下的激活光电流曲线

Fig. 1 Photocurrent curves of 3 samples activated at different Cs/O current ratio

表 1 三个样品的激活过程参量对比

样品序号	Cs/O 电流比 $I_{Cs}/I_O$ (A/A)	首次给 O 光电流上升斜率 ( $\mu A/min$ )	交替次数	最终光电流/ $\mu A$
1	1.58/1.52	2.4	12	34
2	1.62/1.52	3.8	6	39
3	1.70/1.52	2.0	4	20

统都有一个经验值,可以在经验值附近采用固定 O 源,微调 Cs 源的办法确定.

### 2.2 GaAs 光电阴极光谱响应测试结果分析

对激活结束后的样品 1、2 和 3 进行了光谱响应测试,结果如图 2. 三个样品的光谱响应曲线对应的性能参量如表 2. 可以看到,Cs/O 电流比适中的样品 2,获得的灵敏度最高,为  $1487 \mu A/lm$ ,其次是 Cs/O 电流比较小的样品 1,而灵敏度最低的是 Cs/O 电流比较大的样品 3.

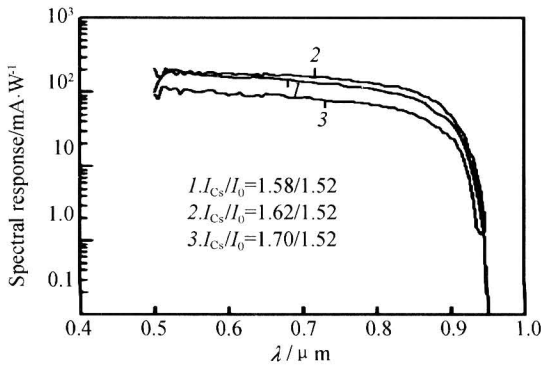


图 2 激活结束后三个样品的光谱响应曲线

Fig. 2 Spectral response curves of 3 samples after activation

表 2 光谱响应曲线性能参量拟合结果

样品序号	Cs/O 电流比 $I_{Cs}/I_O$ (A/A)	电子逸出几率 (P)	电子扩散长度 ( $L_D/\mu m$ )	积分灵敏度 ( $\mu A/lm$ )
1	1.58/1.52	0.41	1.0	1265
2	1.62/1.52	0.46	1.1	1487
3	1.70/1.52	0.28	1.0	766

从表 2 中也可以看到,样品 2 的表面电子逸出几率比样品 1 和样品 3 的都要大,这说明 Cs/O 电

流比适中的工艺有助于获得一个较高的表面电子逸出几率.

### 3 讨论

在 (Cs, O) 交替过程中, Cs/O 比例的控制关系到激活结果的好坏. 以往实验结果已经表明, Cs/O 比例存在一个最佳值,上述实验也验证了这一点. 同时实验中还发现,这种最佳的 Cs/O 比还有利于获得更好的稳定性.

可以从表面模型的角度对上述实验现象进行讨论和分析. Su C Y 等人提出的新双偶极层模型认为<sup>[10~12]</sup>,最先导入的 O 原子一部分会嵌入 Cs 覆盖层,与 GaAs 衬底表面直接反应,形成 GaAs-O-[Cs] 偶极层,另一部分与 Cs 结合,形成 [Cs<sup>+</sup>]-O<sup>-2</sup>-Cs<sup>+</sup> 偶极层. 激活结束后 GaAs 光电阴极的表面势垒如图 3. 图中 I 势垒为界面势垒,由 GaAs-O-[Cs] 偶极层组成,较薄,为半透明,电子可以通过隧穿效应穿过. II 势垒由 [Cs<sup>+</sup>]-O<sup>-2</sup>-Cs<sup>+</sup> 偶极层组成,它使得表面的真空能级进一步降低,达到负电子亲和势状态. II 势垒较厚,电子在逸出时将受到部分 Cs-O 层的散射.

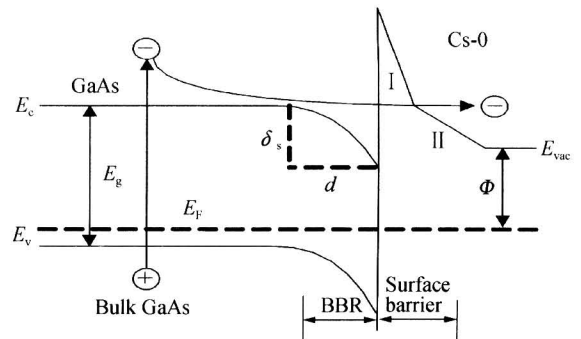


图 3 GaAs 光电阴极的表面电子势垒模型

Fig. 3 Surface barrier model of GaAs photocathodes (BBR: Band Bend Region)

由于阴极表面具有 GaAs-O-[Cs]界面势垒,这就导致了激活成功后的 Cs/O 比并不是 Cs 与 O 形成偶极子后的 2:1,而是还会有更多的 O 与 GaAs 反应,因此 Cs/O 比小于 2:1.定量 XPS 分析发现 Cs/O 比为 1.78<sup>[5]</sup>,与双偶极层模型预测的结果一致,并且 GaAs 表面有明显 Ga、As 氧化物,这说明 O 确实与 GaAs 表面发生了反应.

O 的这种衬底反应有利于形成第一个 GaAs-O-[Cs]偶极层,但 O 不能过量,也不能太少,形成第一个偶极层的 O 量一般在 0.5~1 个原子单层<sup>[12]</sup>.因此在激活工艺上,就需要严格控制(Cs,O)交替过程中的 Cs/O 比,使得进 O 量一方面要充分,保证首次进 O 时与 GaAs 充分结合形成 GaAs-O-[Cs]偶极层,交替过程中与 Cs 充分结合,在阴极表面形成一个排列均匀且结构紧凑的 $[Cs^+]-O^{2-}-Cs^+$ 偶极层.另一方面要防止过量,使偶极层的最佳 Cs/O 比发生偏离.如果 Cs/O 比偏小,即在实验中 Cs 电流太小,会容易导致 O 过量,且(Cs,O)层厚度较薄.如果 Cs/O 比偏大,即 Cs 电流太大,会导致每次(Cs,O)交替中 Cs 都处于过量状态,O 无法与之充分结合,因此表面逸出功的降低量较小,阴极灵敏度不高.同时由于 Cs、O 循环中 Cs 电流太大,还容易引起(Cs,O)层厚度过厚,增加电子在逸出过程中的散射,降低电子逸出几率.只有 Cs/O 电流比适中,才能在阴极表面形成最佳偶极子排列结构以及(Cs,O)层厚度,并保证没有过量的 O 与衬底反应,这样首次进 O 时光电流的提高才最为明显,最终光电流和阴极灵敏度才会最大.

## 4 结论

实验证实了激活成功的 GaAs 光电阴极的 Cs/O 比存在一个最佳值.激活实验中,Cs/O 电流比适中的样品,首次进 O 时,光电流上升速度最快,激活后的阴极量子效率最高,稳定性更好.这是因为阴极表面形成了最佳偶极子排列结构的原因,当偏离这个比例时,首次进 O 光电流上升速度会减慢,激活后的阴极量子效率低,稳定性差.同时发现 Cs/O 电流比偏大比 Cs/O 电流比偏小对阴极激活结果的影响更大.(Cs,O)激活时最佳 Cs/O 电流比的调节以首次进 O 时光电流的上升速度最快为准,可以在一个经验值附近采用固定 O 源,微调 Cs 源的办法确定.论文的研究结果对优化 GaAs 光电阴极的激活工艺和提高 GaAs 光电阴极的性能具有重要的参考价值.

## 参考文献

- 杜晓晴,宗志园,常本康. GaAs 光电阴极稳定性的光谱响应测试与分析. 光子学报, 2004, **33**(8):939~941  
Du X Q, Zong Z Y, Chang B K. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8):939~941
- 杜玉节,杜晓晴,常本康,等. 激活台内透射式 GaAs 光电阴极的光谱响应特性研究. 光子学报, 2005, **34**(12):1792~1794  
Du Y J, Du X Q, Chang B K, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12):1792~1794
- Rodway D C, Allenson M B. In situ surface study of the activating layer on GaAs(Cs,O) photocathodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1986, **19**(7):1353~1371
- Phillips C C, Hughes A E, Sibbett W. Quantitative XPS surfaces chemical analysis and direct measurement of the temporal response times of glass-bonded NEA GaAs transmission photocathodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1984, **17**(8):1713~1725
- Du X Q, Chang B K. Angle-dependent XPS study of the mechanisms of "high-low temperature" activation of GaAs photocathode. *Applied Surface Science*, 2005, **251**(1-4):267~272
- Chang B K, Du X Q, Liu L, et al. The automatic recording system of dynamic spectral response and its applications. *Proc of SPIE*, 2003, **5209**:209~218
- 杜晓晴,常本康,汪贵华,等. NEA 光电阴极的(Cs,O)激活工艺研究. 光子学报, 2003, **32**(7):826~829  
Du X Q, Chang B K, Wang G H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(7):826~829
- Turnbull A A, Evans G B. Photoemission from GaAs-Cs-O. *Journal of physics D: Applied Physics*, 1968, **1**(2):155~160
- Fisher D G. The effect of Cs-O activation temperature on the surface escape probability of NEA (In, Ga) As photocathodes. *IEEE Transaction on Electron Device*, 1974, **ED-21**(8):541~542
- Su C Y, Chye P W, Pianetta P, et al. Oxygen adsorption on Cs covered GaAs(110) surfaces. *Surface Science*, 1979, **86**(7):894~899
- Su C Y, Lindau I, Spicer W E. Photoemission studies of the oxidation of Cs identification of the multiple structures of oxygen species. *Chemical Physics Letters*, 1982, **87**(6):523~527
- Su C Y, Spicer W E, Lindau I. Photoelectron spectroscopic determination of the structure of (Cs,O) activated GaAs (110) surface. *Journal of Applied Physics*, 1983, **54**(3):1413~1422

## The Effect of Cs/O Activation Current Ratio on GaAs Photocathode

Zou Jijun<sup>1,2</sup>, Chang Benkang<sup>1</sup>, Du Xiaoqing<sup>1</sup>, Chen Huailin<sup>1</sup>, Wang Hui<sup>1</sup>, Gao Pin<sup>1</sup>

*1 Institute of Electronic Engineering & Opto-electronic Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094*

*2 Department of Electronic Engineering, East China Institute of Technology, Jiangxi Fuzhou 344000*

Received date:2005-07-05

**Abstract** Experimental and theoretical analysis results show that there is an optimal Cs/O ratio for GaAs photocathode to activate successfully. In order to change Cs/O ratio of GaAs photocathode, the method applied is to regulate the heat currents of Cs resource and O resource in experiment. Activation experiment results show that the samples activated on appropriate Cs/O current ratio can achieve the optimal results, their photocurrent ascent rate is the largest during the first addition of O, quantum efficiency is the highest and stability is also very well. When deviation the appropriate Cs/O current ratio, activation experiment results are not as good as the former. Along with the increase of Cs/O current ratio, the total times of (Cs,O) alteration decrease. The Cs/O current ratio during the first (Cs, O) alternation should be regulated well, the Cs/O current ratio which can achieve the largest ascent rate is the optimal Cs/O current ratio. When regulated well the ratio should be maintained during activation process.

**Keywords** GaAs photocathode, Cs/O ratio, Quantum efficiency, Activation



**Zou Jijun** was born in 1973, in Yueyang, Hunan Province. He received his B. S. degree from Nanchang Institute of Aeronautical Technology in 1995 and M. S. degree from East China Institute of Technology in 2001, respectively. He is currently a Ph. D candidate on Institute of Electronic Engineering & Opto-electronic Technology, Nanjing University of Science & Technology. His research interests include physical electronics and optoelectronics.