

## GaAs 真空电子源衰减模型研究\*

邹继军<sup>1)2)</sup> 张益军<sup>1)</sup> 杨智<sup>1)</sup> 常本康<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)(核技术应用教育部工程研究中心(东华理工大学), 南昌 330013)

(2010年2月10日收到;2010年4月25日收到修改稿)

利用 X 射线光电子能谱(XPS)仪对激活后的 GaAs 真空电子源进行了随时间衰减变化的 XPS 分析,分析发现了电子源阴极表面各元素百分含量随时间的变化,揭示了杂质气体吸附造成的偶极矩方向的改变是电子源灵敏度显著下降的主要原因.基于上述结论,通过分析真空系统中杂质气体的吸附过程,推导并得到了 GaAs 电子源衰减模型.该模型从理论上揭示了 GaAs 电子源的指数衰减规律以及寿命与真空度的反比关系,与实验现象完全一致.

**关键词:** 电子源, X 射线光电子能谱, 衰减模型, 真空度

**PACS:** 79.60.-i, 29.25.Bx, 72.80.Ey, 47.45.-n

## 1. 引言

基于 GaAs 材料的负电子亲和势(NEA)光阴极由于量子效率高、发射电子能量与角度分布集中、自旋极化率高、发射电流密度大、发射电子束脉冲宽度可调且可实现均匀平面电子发射等众多优点,非常适合作为新一代电子加速器、自旋极化电子碰撞谱仪和电子束平面曝光装置的真空电子源<sup>[1-5]</sup>.这是 GaAs 光阴极除广泛应用于微光夜视技术<sup>[6]</sup>之外的又一重要潜在应用领域.目前阻碍 GaAs 光阴极作为电子源广泛应用的主要因素是处于真空系统中的 GaAs 光阴极衰减较快.为了提高 GaAs 真空电子源的稳定性,探索其衰减机理,近年来人们开展了大量的实验研究工作<sup>[7-16]</sup>.

Durec 等人研究了水蒸气对 GaAs 光阴极电子源稳定性的影响,并测试了阴极寿命与水蒸气分压强之间的关系,通过拟合得到了如下经验公式<sup>[7]</sup>:

$$\tau = \tau_0 \left( \frac{p}{p_0} \right)^{-n}, \quad (1)$$

式中  $n = 1.01$ ,  $\tau_0 = 7800$  s,  $p_0 = 10^{-8}$  Pa.

(1)式表明阴极寿命近似与水蒸气分压强  $p$  成反比.该经验公式虽然是在水蒸气压下得出的,但能基本反映阴极寿命与真空度的一般关系,即只要

真空度高,阴极的寿命就会成倍的增长.这种真空度对阴极寿命的影响在 GaN 光阴极中也同样存在<sup>[18]</sup>.这也是人们努力提高系统真空度以延长 NEA 电子源寿命的重要原因<sup>[9,10]</sup>,Grames 等人在将系统真空度提高到  $10^{-10}$  Pa 的情况下, GaAs 电子源寿命达到了 2—3 周<sup>[10]</sup>.当然,真空系统中的不同气体成分对阴极的稳定性影响是不同的, Wada 等人曾通过对阴极所在真空系统充入不同气压的  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  和  $\text{H}_2\text{O}$ , 观察阴极的光电流随时间的衰减情况<sup>[11]</sup>.我们发现光照强度对阴极稳定性同样具有影响,光照越强,阴极寿命越短,且阴极灵敏度随时间按指数规律衰减<sup>[12]</sup>.至于导致阴极灵敏度下降的原因,一般认为是真空系统中的有害残余气体与阴极表面激活层作用的结果,而不是由于 Cs 的脱附<sup>[13-16]</sup>.本文的实验结果也证实了这一点,而且发现少量的有害气体就可能使 GaAs 电子源灵敏度完全丧失.

尽管在 GaAs 真空电子源衰减方面已经进行了大量的实验研究,揭示了 GaAs 电子源的一些衰减规律,如电子源灵敏度随时间的指数下降、寿命与真空度的反比关系和杂质气体对灵敏度的影响等,但还没有人从理论上去探索上述规律.本文基于 GaAs 电子源衰减过程中的 X 射线光电子能谱(XPS)分析,理论推导并得到了 GaAs 电子源衰减模型,很好地解释了上述实验规律.

\* 国家自然科学基金(批准号: 60801036, 61067001), 江西省青年科学家(井冈之星)培养对象计划(批准号: 2009DQ01700), 中国博士后科学基金(批准号: 200904501098, 201003589589), 江苏省博士后科研资助计划(批准号: 0901040C)和江苏省普通高校研究生科研创新计划(批准号: CX09B\_096Z)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: bkchang@mail.njust.edu.cn

## 2. 真空系统中 GaAs 电子源的衰减

GaAs 光阴极电子源激活实验采用反射式 GaAs (100) MBE 外延片样品,在重掺杂 p 型 GaAs 衬底上外延一层厚度为 2.6  $\mu\text{m}$  的 p 型 Be 掺杂发射层,掺杂浓度为  $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ [12]. 外延样品在激活前用 HF 酸等进行化学清洗,清洗后迅速送入激活系统的加热位置进行加热处理. 加热结束,待样品自然冷却到 60  $^{\circ}\text{C}$  左右开始激活.

GaAs 光阴极电子源铯氧激活后在原位利用多信息量测试系统测试了其衰减特性,在测试过程中,系统真空度始终保持在  $5 \times 10^{-8} \text{Pa}$  左右. 在电子源衰减时没有光照,因而也没有光电流流过阴极,只在测试时才短暂打开白光光源采集光电流. 采集的光电流随时间的衰减变化曲线如图 1 所示. 从图中可以看出,光电流的变化先有一个短暂上升的阶段,这与刚激活后的阴极表面 Cs 稍微有些过量有关,光电流上升到峰值后近似按指数规律衰减,当光电流采用对数坐标时则近似成一条直线,其变化规律可用下式来描述[12]:

$$I(t) = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (2)$$

式中  $I(t)$  为随时间变化的光电流,  $I_0$  为阴极峰值光电流,  $\tau$  为光电流衰减时间常数.

由于光电流是在白光照射情况下采集的,白光光电流可以反映阴极积分灵敏度的变化,因而  $\tau$  实际上是电子源的寿命. 按(2)的定义,从图 1 中可计算得到电子源激活后在无光照时寿命为 320 min. 若衰减过程中有光照,则随着光照强度的增加,阴极寿命会随之下降[12].

## 3. 杂质气体对 GaAs 电子源灵敏度的影响

造成 GaAs 电子源衰减的主要原因是阴极表面吸附了系统中残余的杂质气体[13-16],但电子源衰减过程中杂质气体是如何吸附的,阴极表面层中各元素百分含量随时间发生了怎样的改变? 为了探索这些问题,我们对激活后的 GaAs 电子源进行了随时间衰减变化的 XPS 分析.

GaAs 电子源样品采用上述相同的反射式 GaAs (100) MBE 外延片,并在同样的超高真空系统中采用相同的工艺进行激活. 电子源激活后立即从激活

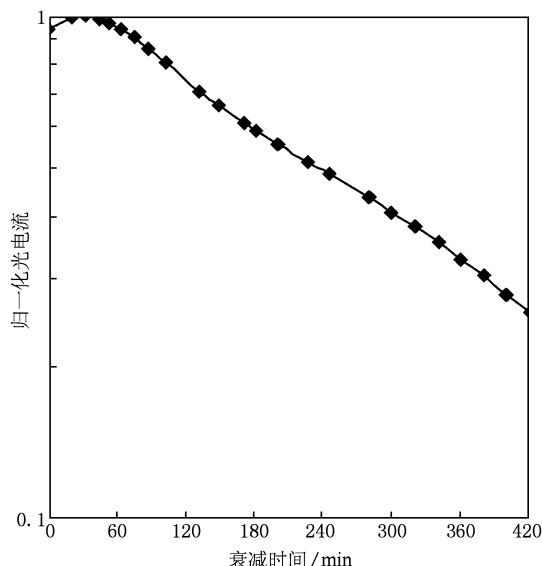


图 1 无光照情况下电子源光电流随时间的衰减变化[12]

系统中送入 XPS 分析室(样品传递时间约 0.5 h),分析了电子源衰减过程中阴极表面的  $\text{As}2p_{3/2}$ ,  $\text{Ga}2p_{3/2}$ ,  $\text{Cs}3d$  和  $\text{O}1s$  谱随时间的变化,测试结果如图 2 所示. 依据测试结果计算的阴极表面各元素的百分含量列于表 1 中. XPS 测试采用 Al 靶,掠射角  $45^{\circ}$ . 测试时 XPS 分析室真空度在  $(2-3) \times 10^{-7} \text{Pa}$ ,远低于激活系统中电子源衰减时的  $5 \times 10^{-8} \text{Pa}$ ,因而寿命更短. 在经过 4 h 的 XPS 分析后,再测试阴极的光谱响应,发现灵敏度几乎为 0.

从图 2 和表 1 中可以看出,电子源衰减过程中 Ga 和 Cs 的含量和谱形几乎没有变化,As 的含量随时间略有减小,而且到 4 h 已有少量 As 氧化物存在, O 有少量的增加. 这印证了真空系统中阴极衰减主要不是由于 Cs 的脱附,而是 O 或含有 O 的杂质(如  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  等)的吸附造成的,然而少量 O 的增加,为何会使阴极灵敏度几乎衰减到 0 呢? 我们可以基于双偶极子模型对该现象进行讨论[17]. 双偶极子模型如图 3 所示,模型中激活层主要由  $\text{Cs}_2\text{O}_2$  和  $\text{CsO}_2$  构成,氧以分子态存在,分子形态的氧因其半径大更有利于稳定,而且  $\text{Cs}_2\text{O}_2$  和  $\text{CsO}_2$  本身也比  $\text{Cs}_2\text{O}$  要稳定[18].

图 3 中的 A 是  $\text{Cs-O}_2\text{-Cs}$  ( $\text{Cs}_2\text{O}_2$ ) 偶极子,偶极矩向外,有利于电子逸出, B 为  $\text{Cs-O}_2$  结合,偶极矩平行于阴极面,这种结合对电子亲和势的下降不但没有贡献,甚至还会阻碍电子的逸出. 如图 4 所示,电子源衰减过程中,真空系统中的氧会吸附在激活层表面,使  $\text{Cs}_2\text{O}_2$  转变为  $\text{CsO}_2$ ,即原先为 A 的区域

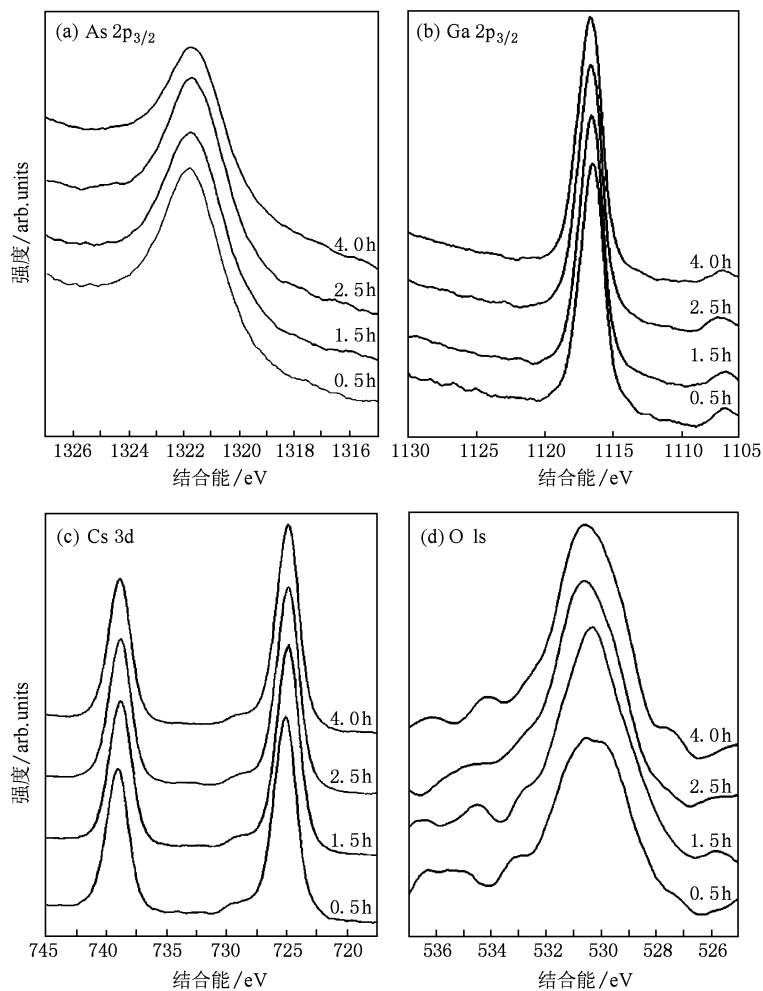


图2 激活后电子源衰减过程中 As2p<sub>3/2</sub>, Ga2p<sub>3/2</sub>, Cs3d 和 O1s 谱

表1 衰减过程中电子源在掠射角 45° 时阴极表面不同元素百分含量

元素	激活后 0.5 h 含量/%	激活后 1.5 h 含量/%	激活后 2.5 h 含量/%	激活后 4.0 h 含量/%
As	28	27	26	25
Ga	33	32	32	32
Cs	17	17	17	17
O	22	24	25	26

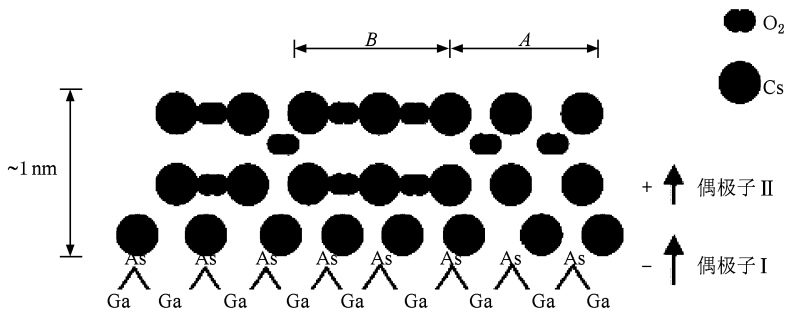


图3 GaAs 光阴极电子源表面模型<sup>[17]</sup>

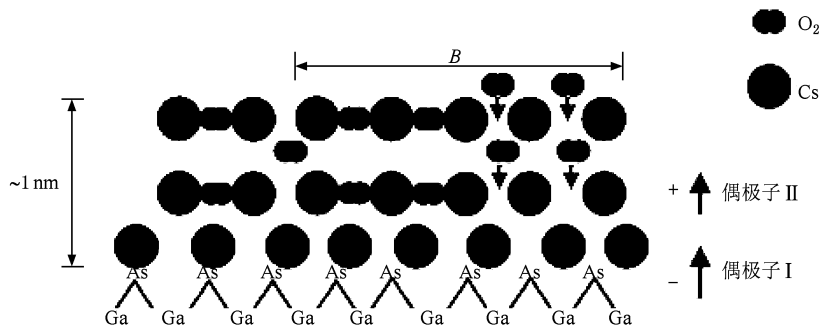


图4 GaAs 光阴极电子源表面吸附氧后的变化

转变为  $B$ , 第二偶极矩方向由垂直向外改变为平行于阴极面, 同时氧的吸附还会促使内层的氧进一步往内运动, 影响到第一偶极子, 甚至和 As 结合形成 As 的氧化物. 这种转变在测试的 XPS 谱中也得到了体现. 如图 2(d) 所示, 不仅  $O1s$  峰的总面积随时间在增加,  $O1s$  峰也在往高结合能端偏移, 这是由于结合能高的  $O_2^{-1}$  ( $CsO_2$ ) 峰增强而结合能低的  $O_2^{-2}$  ( $Cs_2O_2$ ) 峰减弱所致. 而图 2(a) 中  $As2p_{3/2}$  峰的减弱和少量 As 氧化物的出现也反映了氧的吸附对阴极表面激活层造成的影响. 同时, 图 4 中的作用过程不仅影响到吸附杂质本身的偶极矩, 还影响到周边的其他偶极矩, 这种改变将显著抬高阴极发射面的真空能级, 从而对电子源的光电发射性能造成极大影响. 这就能解释为何氧增加不多而灵敏度却显著下降.

#### 4. GaAs 电子源衰减模型

经过 GaAs 电子源衰减过程中的 XPS 分析, 我们已经了解到杂质气体是如何影响电子源发射性能的, 但为了从理论上解释电子源灵敏度随时间的指数下降和寿命与真空度的反比关系, 下面提出了 GaAs 电子源衰减模型. 通过上述分析, 该理论模型可基于以下假设:

1) 电子源的衰减是由有害杂质气体在阴极表面的吸附造成的.

2) 电子源阴极激活层由许多的活性区域构成, 活性区域的面积远大于单个 Cs-O 偶极子的面积, 一旦某个活性区域吸附一个有害杂质气体分子, 该区域就将丧失电子发射能力. 活性区域的假设基于 Whitman 等人的研究成果<sup>[19]</sup>, 同时也得到了我们 XPS 分析的证实.

3) 电子源阴极激活层单位面积上共有  $n$  个活

性区域, 真空度为  $p$  时的单位面积单位时间杂质气体分子碰撞阴极表面的次数为  $kp$ ,  $k$  设为碰撞系数, 杂质气体与阴极碰撞后的黏附概率(系数)为  $A$ .

4)  $t$  时刻单位面积剩余活性区域数占总活性区域数之比  $\theta(t)$ , 设刚激活后电子源光电流最大时为光电流测试的起始时间, 此时  $\theta(0) = 1$ , 光电流为  $I_0$ .

依据上述假设, 可得  $t$  时刻的电子源光电流为

$$I(t) = I_0\theta(t). \quad (3)$$

$\theta(t)$  可递推得到,

$$\begin{aligned} \theta(1) &= 1 - \frac{Akp\theta(0)}{n} \\ &= 1 - \frac{Akp}{n}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \theta(2) &= \theta(1) - \frac{Akp\theta(1)}{n} \\ &= \theta(1) \left(1 - \frac{Akp}{n}\right) \\ &= [\theta(1)]^2. \end{aligned} \quad (5)$$

依此类推, 有

$$\begin{aligned} \theta(t) &= [\theta(1)]^t \\ &= \left(1 - \frac{Akp}{n}\right)^t \end{aligned} \quad (6)$$

$\theta(t)$  代入(3)式得

$$\begin{aligned} I(t) &= I_0\theta(t) \\ &= I_0 \left(1 - \frac{Akp}{n}\right)^t. \end{aligned} \quad (7)$$

(7) 式表明, 在系统真空度  $p$  一定的情况下, 电子源光电流随时间按指数规律衰减, 这与(2)式所拟合的实验结果是一致的. 按照电子源寿命的定义, 若令  $I(t) = I_0 \left(1 - \frac{Akp}{n}\right)^t = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$ , 则可计算得到 GaAs 电子源的寿命

$$\tau = -\frac{1}{\ln\left(1 - \frac{Akp}{n}\right)}. \quad (8)$$

当寿命  $\tau \gg 1$  s 时(一般 GaAs 电子源都满足), 即  $\frac{Akp}{n} \ll 1$ , 则有

$$\ln\left(1 - \frac{Akp}{n}\right) \approx -\frac{Akp}{n}. \quad (9)$$

代入(8)式,得

$$\tau \approx \frac{n}{Akp}. \quad (10)$$

(10)式表示电子源寿命近似与真空度  $p$  成反比,这与 Durec 等人以水蒸气为杂质气体时得出结论是一致的.但由于(10)式并不是在某一具体的杂质气体时得出的,因而电子源寿命与真空度的反比关系也适用于除水蒸气外的其它有害气体,只是不同有害气体的黏附概率(系数) $A$ 不同, $A$ 越大对电子源寿命的影响也就越大. $A$ 还与光照强度有关,光强越大, $A$ 越大,因而电子源寿命也就越短.

## 5. 结 论

为了探索并解决 GaAs 电子源在实际应用中面临的稳定性不够好的问题,人们开展了大量的研究工作,揭示了 GaAs 电子源的一些衰减规律,如电子源灵敏度随时间的指数下降、寿命与真空度的反比关系和杂质气体对灵敏度的影响等.本文从实验与理论上对上述规律进行了探讨,先通过 GaAs 电子源衰减过程中的 XPS 分析,解释了为何少量杂质气体能显著影响阴极灵敏度,然后通过理论推导得到了 GaAs 电子源衰减模型,该模型揭示了 GaAs 电子源的指数衰减规律以及寿命与真空度的反比关系,理论与实验现象完全一致.本文研究结果对于 GaAs 电子源的稳定性研究具有指导意义,而提出的电子源衰减模型对于研究真空系统中其他光电发射材料的衰减特性也具有参考价值.

- [1] Maruyama T, Brachmann A, Clendenin J E, Desikan T, Garwin E L, Kirby R E, Luh, D A, Turner J, Prepost R 2002 *Nucl. Instr. and Meth. A* **492** 199
- [2] Du X Q, Chang B K 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8643 (in Chinese) [杜晓晴、常本康 2009 物理学报 **58** 8643]
- [3] Zou J J, Chang B K, Yang Z, Zhang Y J, Qiao J L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5842 (in Chinese) [邹继军、常本康、杨智、张益军、乔建良 2009 物理学报 **58** 5842]
- [4] Schneider J E, Sen P, Pickard D S, Winograd G I, McCord M A, Pease R F W, Spicer W E 1998 *J. Vac. Sci. Technol. B* **16** 3192
- [5] Li Q, Hao L, Pang W N 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 172 (in Chinese) [李倩、郝亮、庞文宁 2008 物理学报 **57** 172]
- [6] Zhang Y J, Chang B K, Yang Z, Niu J, Zou J J 2009 *Chin. Phys. B* **18** 4541
- [7] Durek D, Frommberger F, Reichelt T, Westermann M 1999 *Appl. Surf. Sci.* **143** 319
- [8] Calabrese R, Ciullo G, Guidi V 1994 *Rev. Sci. Instrum.* **65** 343
- [9] Alley A, Aoyagi H, Clendenin J, Frisch J, Garden C, Hoyt E, Kirby R, Klaisner L, Kulikov A, Miller R, Mulhollan G, Prescott C, Sáez P, Schultz D, Tang H, Turner J, Witte K, Woods M, Yerman A D, Zolotorev M 1995 *Nucl. Instr. and Meth. A* **365** 1
- [10] Grames J, Adderley P, Baylac M, Clark J, Day A, Hansknecht J, Poelker M, Stutzman M 2002 *Proceedings of the 15th International Spin Physics Symposium and Workshop on Polarized Electron Sources and Polarimeters* New York, 9—14 September, 2002, p1047
- [11] Wada T, Nitta T, Nomura T 1990 *Jpn. J. Appl. Phys.* **29** 2087
- [12] Zou J J, Chang B K, Yang Z, Gao P, Qiao J L, Zeng Y P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6109 (in Chinese) [邹继军、常本康、杨智、高频、乔建良、曾一平 2007 物理学报 **56** 6109]
- [13] Machuca F, Liu Z, Sun Y, Pianetta P, Spicer W E, Pearse R F W 2002 *J. Vac. Sci. Technol. B* **20** 2721
- [14] Machuca F, Liu Z, Sun Y, Pianetta P, Spicer W E, Pearse R F W 2003 *J. Vac. Sci. Technol. B* **21** 1863
- [15] Calabrese R, Guidi V, Lenisa P, Maciga B, Ciullo G, Mea G D, Egeni G P, Lamanna G, Rigato V, Rudello V, Yang B, Zandolin S, Tecchio L 1994 *Appl. Phys. Lett.* **65** 301
- [16] Qiao J L, Chang B K, Du X Q, Niu J, Zou J J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2855 (in Chinese) [乔建良、常本康、杜晓晴、牛军、邹继军 2010 物理学报 **59** 2855]
- [17] Liu Z 2005 *Ph. D. Dissertation* (Palo Alto: Stanford University)
- [18] Clark M G 1975 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **8** 535
- [19] Whitman L J, Stroschio J A, Dragose R A, Celotta R J 1991 *Phys. Rev. Lett.* **66** 1338

## Degradation model of GaAs vacuum electron sources<sup>\*</sup>

Zou Ji-Jun<sup>1)2)</sup> Zhang Yi-Jun<sup>1)</sup> Yang Zhi<sup>1)</sup> Chang Ben-Kang<sup>1)†</sup>

1) (*Institute of Electronic Engineering and Opto-electronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China*)

2) (*Engineering Research Center of Nuclear Technology Application (East China Institute of Technology),  
Ministry of Education, Nanchang 330013, China*)

(Received 10 February 2010; revised manuscript received 25 April 2010)

### Abstract

The degradation of activated GaAs vacuum electron source as a function of time has been investigated by using X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). We found that the cathode surface element content changes with time and the significant decrease in sensitivity of electron source is mainly due to the change of dipole direction caused by the adsorption of harmful gases on the cathode surface. Based on the above results, we deduced the degradation model of GaAs electron source through analyzing the adsorption process of harmful gases on the surface in vacuum system. The model reveals the exponential degradation rule of GaAs electron sources and the inverse relationship between lifetime and pressure. The theoretical results are in full agreement with the experimental fact.

**Keywords:** electron source, X-ray photoelectron spectroscopy, degradation model, pressure

**PACS:** 79.60.-i, 29.25.Bx, 72.80.Ey, 47.45.-n

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60801036, 61067001), the Young Scientist (Jinggang Star) Training Plan of Jiangxi Province, China (Grant No. 2009DQ01700), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant Nos. 200904501098, 201003589589), the Jiangsu Planned Projects for Postdoctoral Research Funds, China (Grant No. 0901040C) and the Innovation Plan for Graduate Students of Jiangsu Higher Education Institutions, China (Grant No. CX09B\_096Z).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: bkchang@mail.njust.edu.cn