

GaAs 光电阴极光谱响应曲线形状的变化

邹继军^{1,2}, 常本康^{1*}, 杜晓晴¹, 杨智¹

1. 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

2. 东华理工大学电子工程系, 江西 抚州 344000

摘要 利用光谱响应测试仪测试了反射式 GaAs 光电阴极在激活过程中以及激活后衰减过程中的光谱响应曲线, 测试结果显示在这两个过程中光谱响应曲线形状都在不断发生变化。在激活过程中随着 GaAs 表面双偶极层的形成, 阴极表面有效电子亲和势不断降低, 光谱响应则不断提高, 但长波响应提高得更快。在激活结束后, 位于激活室中受白光照射的 GaAs 光电阴极由于 Cs 的脱附影响了双偶极层结构, 阴极表面有效电子亲和势不断升高, 光谱响应则不断下降, 但长波响应下降得更快。上述现象无法用常用的反射式阴极量子效率公式进行解释, 它们与阴极高能光电子的逸出有关。由于反射式阴极发射电子能量分布随着入射光子能量的升高而向高能端偏移, 同时阴极表面势垒形状的变化对低能电子比对高能电子的影响更大, 从而导致了光谱响应曲线形状的变化。

关键词 GaAs 光电阴极; 光谱响应曲线; 电子能量分布; 表面势垒; 电子逸出概率

中图分类号: TN223 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0593(2007)08-1465-04

引言

通过 Cs 和 O 在 GaAs 表面交替吸附而制备的负电子亲和势 GaAs 光电阴极具有量子效率高、暗发射小和光谱响应曲线平坦等优点, 因而在高性能微光像增强器、自旋极化电子源等领域得到了广泛的应用^[1, 2]。这是 GaAs 光电阴极得到关注的原因之一。同时由于其所涉及的诸多科学问题^[3, 4], 几十年来一直吸引着人们研究的兴趣, 在其制备工艺、表面模型、激活机理等方面进行了大量的探索^[5-9], 但是对于 GaAs 光电阴极激活过程中以及激活后光谱响应曲线形状的变化及其机理方面的报道却很少。而光谱响应曲线及其形状的变化对于研究物质的结构组成及其性能具有重要的价值^[10-12]。我们在超高真空激活系统中进行了反射式 GaAs 光电阴极的激活实验, 利用在线光谱响应测试仪^[13-15]测试了阴极铯氧激活过程中以及激活后衰减过程中的光谱响应曲线, 并从 GaAs 光电阴极能带结构和量子效率理论的角度对造成这种变化的机理进行了分析。

1 实验

GaAs 光电阴极激活实验在超高真空激活系统中进行。

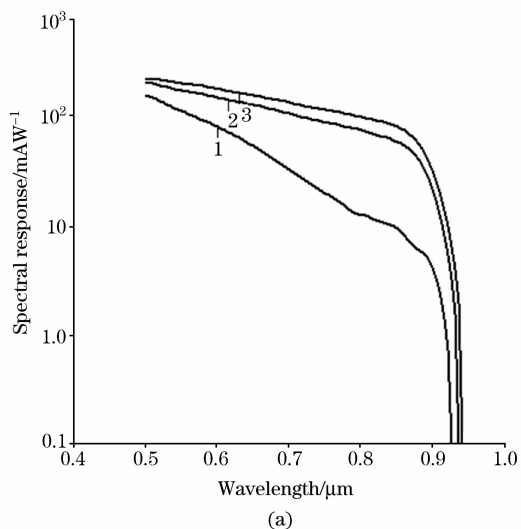
实验样品采用的是反射式 GaAs MBE 外延片, 在重掺杂 p 型 GaAs 衬底上外延一层 p 型 Be 掺杂的发射层, 掺杂浓度为 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、厚度为 $1.6 \mu\text{m}$ 。外延样品在激活前先进行化学清洗, 清洗后迅速将其送至激活系统的加热位置, 当超高真空系统的本底真空度不低于 $1 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ 时进行加热净化。阴极采用“高低温两步激活”法, 高、低温净化温度分别为 600 和 $410 \text{ }^\circ\text{C}$, 时间分别为 60 和 20 min , 净化过程中真空度不低于 $1 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 。加热净化结束, 待样品自然冷却到 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右开始激活, 此时真空度恢复到 $1 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ 以上。激活时, 用一个 $12 \text{ V}/50 \text{ W}$ 的卤钨灯照射阴极面, 通过观察阴极产生的光电流来决定 Cs, O 的进或停。激活采用 Cs 源连续, O 源断续的方法来进行。

在 GaAs 光电阴极高温激活过程中, 用光谱响应测试仪原位测试其光谱响应曲线随激活时间的变化, 测试结果如图 1(a)所示, 曲线 1 是阴极首次进 Cs 后的光谱响应曲线, 曲线 2 和 3 分别是首次进 O 和高温激活结束后的光谱响应曲线。GaAs 光电阴极低温激活结束后在原位用白光照射, 照射过程中测试了其光谱响应曲线随照射时间的变化, 测试结果如图 1(b)所示, 曲线 1 是阴极低温刚激活后的光谱响应曲线, 曲线 2 和 3 分别是激活结束经过光照 1 和 2 h 后测试的光谱响应曲线, 曲线 4 是在测得曲线 3 之后再进行一次 Cs 阴极恢复到最高灵敏时测试的光谱响应曲线。

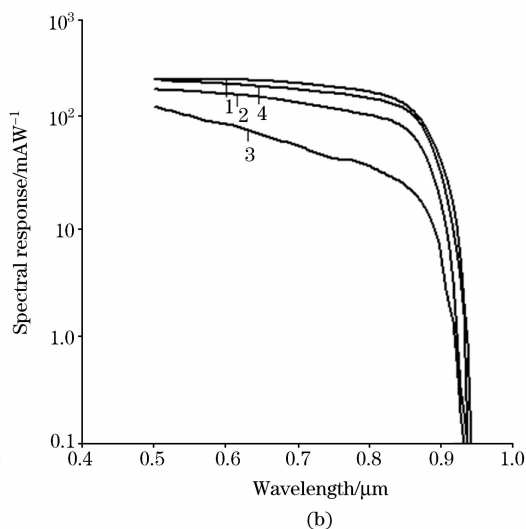
收稿日期: 2006-03-28, 修订日期: 2006-07-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(60678043)和教育部高等学校博士点基金项目(20050288010)资助

作者简介: 邹继军, 1973 年生, 南京理工大学电子工程与光电技术学院副教授 e-mail: jjzou@ecit.edu.cn * 通讯联系人



Curve 1: after the first exposure to Cs;
Curve 2: after the first exposure to O;
Curve 3: after activation



Curve 1: after activation;
Curve 2: one hour illumination;
Curve 3: two hours illumination;
Curve 4: after the exposure to Cs again

Fig. 1 Experimental spectral response curves of reflection-mode GaAs photocathodes

(a): High-temperature activation;
(b): Low-temperature

2 实验结果分析

从图 1 中可以看出,反射式阴极无论在激活过程中或激活后的衰减过程中光谱响应曲线形状都在不断发生变化。在高温激活过程中,随着表面 Cs—O 偶极子的形成,各波段的光谱响应不断上升,但长波段上升得更快,同时截止波长向长波移动。在低温激活后的衰减过程中光谱响应的变化则刚好相反,主要由于 Cs 的脱附,偶极子受到破坏,光谱响应不

断降低,但长波段下降更明显,截止波长不断向短波移动。高、低温刚激活后的光谱响应曲线形状也明显不同,低温激活后的曲线更加平坦,长波响应得到很大的提升,阴极积分灵敏度比高温时增长了 30% 以上。在低温阴极灵敏度衰减后再进行一次 Cs 时,光谱响应又可以基本恢复到刚激活后的水平,这也证明了在激活室中阴极灵敏度的降低主要是 Cs 的脱附造成的。

反射式 GaAs 光电阴极光谱响应曲线形状为何会发生上述变化,我们可以从光谱响应理论的角度来分析。光电阴极的光谱响应特性,是阴极的光谱灵敏度随入射光谱的分布,在实际应用中,常用量子效率来表征阴极的光谱响应特性,即 GaAs 光电阴极的光谱响应特性可通过其量子效率公式来进行描述。GaAs 光电阴极量子效率公式可在 Spicer“三步模型”的基础上,通过求解扩散方程得到,反射式 GaAs 光电阴极的量子效率公式为^[7]

$$Y_r = \frac{P \cdot (1 - R)}{1 + 1/\alpha L_D} \quad (1)$$

式(1)中 P 是电子表面逸出概率, L_D 是发射层 GaAs 材料的电子扩散长度, R 是阴极表面对入射光反射率, α 是阴极对入射光的吸收系数。在推导上述量子效率公式时,只考虑了 Γ 能谷的光电发射,即假定光电子很快在导带底热化然后逸出,因而 P 的大小在阴极工作波长范围内与入射光子波长无关。

依据上述量子效率公式可对阴极光谱响应曲线进行数据拟合^[13-15],但拟合结果显示理论与实验光谱响应曲线并没有完全吻合,光谱响应灵敏度高的吻合得要好一些,灵敏度越低,则偏差越大。这说明只考虑 Γ 能谷光电发射的反射式阴极量子效率公式并不适合光谱响应曲线在全波段的拟合。因为在(1)式中 P 在阴极工作波长范围内与入射光子波长无关,而只与阴极表面势垒有关,当阴极表面吸附层发生改变时,表面势垒和 P 也会随之改变,而量子效率公式中其他参数则会保持不变,在该过程中光谱响应曲线应该是平行变化的,其形状应基本保持不变,而实际情况是形状在不断发生变化。

3 讨论

用上述量子效率公式显然无法很好地解释出现有的实验现象,这与该公式在推导时 P 的假定有关,它只适合于在接近阴极阈值的波长范围内使用,不能在阴极整个工作波段范围内使用,而造成反射式 GaAs 光电阴极光谱响应曲线形状的变化真正原因与高能光电子的逸出有关。

在 GaAs 光电阴极光电发射过程中,由光子激发到导带中高能级的部分热电子在落到导带底以前就已经逸出了,这个过程是通过两个途径来实现的。当光电子能量足够高时,从 Γ 到 L 或 X 能谷的谷间散射在能量弛豫机制中占主导作用,从 Γ 能谷散射到 L 或 X 能谷的速率是其反过程的 10 倍以上^[2],散射到这些能谷的电子会往阴极表面扩散,若在扩散到阴极表面时未重新散射到 Γ 能谷,则这些电子将从 L 或 X 能谷逸出^[4]。另外,能量不够谷间散射但高于 Γ 能谷(导

带底)的光电子经过带内弛豫会在导带底热化,但其热化长度一般在几十个 nm,因而在近表面激发的一部分高能光电子可以热电子的形式逸出。GaAs 光电阴极的上述现象会导致发射电子能量向高能端分布,对于反射式阴极而言,由于光照面与电子的发射面是同一面,高能光电子主要在发射的近表面处产生,发射要经过的距离短,这种分布就更加明显,如图 2 所示的实验测试的不同入射光子能量下对应的电子能量分布曲线证实了这一点^[4]。从图中可以看出与 Γ , L, X 能谷相对应的多个响应峰值,当入射光子能量升高时,从 L, X 能谷逸出的电子数目不断增加,而从 Γ 能谷逸出的电子数目则明显减少,从而导致发射电子的平均能量向高能端偏移。因此实际的阴极光电发射是 Γ , L, X 能谷光电发射和热电子光电发射的总和。

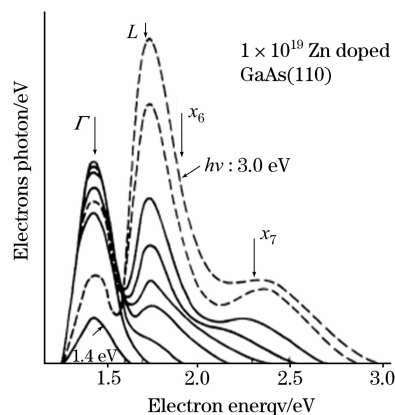


Fig. 2 Electron energy distribution curves vs. incident photon energies (after Ref. 4)

到达阴极表面的光电子最后要穿越表面势垒逸入真空,因而 P 的大小与表面电子势垒形状有密切关系。图 3 给出了 GaAs 光电阴极的能带结构示意图^[8, 9]。阴极的表面势垒是由两条斜率不同的近似直线段组成的,称为 I 势垒和 II 势垒,这一形状是根据双偶极层表面模型提出来的^[9]。图 3 中虚线显示的是阴极在不同情况下表面势垒形状的变化,首次进 Cs 后的阴极表面势垒仅由一条近似直线段组成,此时真空能级与导带底持平,达到零电子亲和势,进行 Cs, O 交替后,由于阴极表面双偶极层的形成, I 势垒变窄, II 势垒不断降低,真空能级也随之下降而最终形成实线所示的表面势垒,而阴极激活后用白光照射时,阴极表面的 Cs 会不断脱附而破坏双偶极子结构,导致表面势垒发生变化,变化过程

与激活时相反,当补充 Cs 后阴极又可以基本恢复到刚激活后的水平。

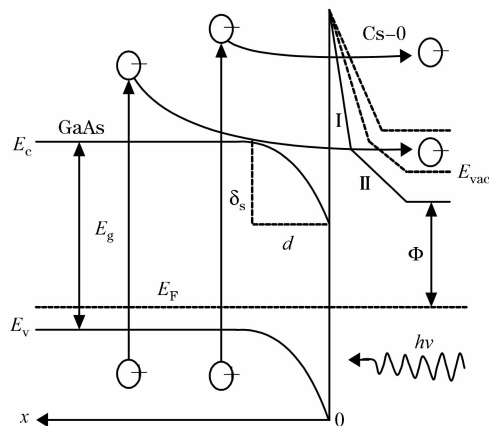


Fig. 3 Band structure of GaAs photocathode

阴极表面势垒对运动到阴极表面能量不同的电子的逸出影响是不同的,短波光激发电子运动到阴极表面时平均具有更高的能量,它们通过隧道效应穿越势垒的宽度窄,因而逸出概率高,长波光激发电子情况则相反,因而表面电子逸出概率 P 是入射光子波长的函数。阴极在激活或衰减过程中,阴极表面势垒形状在不断发生变化,这种变化使低能电子比高能电子需要穿越的势垒宽度增加或减少得更多,这一点可以从图 3 中看出,因而势垒变化对低能电子的影响比对高能电子的影响更大,越是靠近阈值附近影响越大,这是阴极在激活或衰减过程中长波响应变化大而短波响应变化小,光谱响应曲线形状不断发生变化的根本原因。

4 结论

反射式 GaAs 光电阴极激活过程中由于 Cs, O 的交替吸附和 GaAs 表面双偶极层的形成,阴极表面有效电子亲和势会不断降低,从而导致其光谱响应曲线形状不断发生变化,激活结束后,位于激活系统中的 GaAs 光电阴极由于 Cs 的脱附影响了双偶极层结构,阴极表面有效电子亲和势会不断升高,其光谱响应曲线形状也会不断发生变化。这种变化用通常的反射式阴极量子效率公式无法得到合理的解释,但从不同入射光子能量下阴极发射电子能量分布的不同以及阴极在不同阶段表面电子势垒形状的变化两方面综合考虑就能很好的得到解释。

参 考 文 献

- [1] Mulhollan G A, Subashiev A V, Clendenin J E, et al. *Phys. Lett. A*, 2001, 282: 309.
- [2] Drouhin H J, Hermann C, Lampel G. *Phys. Rev. B*, 1985, 31(6) : 3859.
- [3] Liu Zhi, Machuca Francisco, Pianetta Piero, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 85(9): 1541.
- [4] James L W, Moll J L. *Phys. Rev.*, 1969, 183(3): 740.
- [5] Gao Huai-rong. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 1987, 5(4): 1295.
- [6] Moré S, Tanaka S, Tanaka S, et al. *Surf. Sci.*, 2000, 454-456 (1-3): 161.
- [7] Spicer W E, Herrera-Gómez A. *Proc. SPIE*, 1993, 2022: 18.
- [8] Su C Y, Lindau I, Spicer W E. *Chem. Phys. Lett.*, 1982, 87(6): 523.
- [9] Su C Y, Spicer W E, Lindau I. *J. Appl. Phys.*, 1983, 54(3): 1413.
- [10] LU Yong-jun, CHEN Hua-cai, LÜ Jin, et al(芦永军, 陈华才, 吕进, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2005, 25(8): 1243.
- [11] TANG Ai-wei, TENG Feng, GAO Yin-hao, et al(唐爱伟, 滕枫, 高银浩, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2006, 26(12): 2169.
- [12] LIN Peng, LIANG Chun-jun, DENG Zhen-bo, et al(林鹏, 梁春军, 邓振波, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2005, 25(1):23.
- [13] Chang Benkang, Du Xiaoqing, Liu Lei, et al. *Proc. SPIE*, 2003, 5209: 209.
- [14] ZONG Zhi-yuan, QIAN Yun-sheng, CHANG Ben-kang. *Proc. SPIE*, 2001, 4580: 623.
- [15] QIAN Yun-sheng, ZONG Zhi-yuan, CHANG Ben-kang(钱芸生, 宗志园, 常本康). *Vacuum Science and Technology(真空科学与技术)*, 2000, 20(5): 305.

Variation of Spectral Response Curve Shape of GaAs Photocathodes

ZOU Ji-jun^{1, 2}, CHANG Ben-kang^{1*}, DU Xiao-qing¹, YANG Zhi¹

1. Institute of Electronic Engineering and Opto-electronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China
2. Department of Electronic Engineering, East China Institute of Technology, Fuzhou 344000, China

Abstract Using spectral response measuring instrument, the spectral response curves of reflection-mode GaAs photocathodes were obtained as a function of time during the process of activation and the process of illumination by white light after activation. The measured results show that the spectral response curve shape changes continuously during both processes. Due to the formation of double dipoles on the GaAs surface during the co-adsorption of cesium and oxygen, the surface electron affinity of photocathode decreases continuously, and spectral response increases continuously, but the spectral response of long wave increases faster. During the process of illumination by white light after activation, due to the double-dipole structure affected by the desorption of cesium, the surface electron affinity of photocathode increases continuously, and spectral response decreases continuously, but the spectral response of long wave decreases faster. Using traditional quantum efficiency formula of reflection-mode photocathodes, the above phenomena cannot be explained very well, and they have a relationship with the escape of high-energy electrons. Because the emitted electron energy-distribution of reflection-mode photocathodes shifts towards higher energies with the increase in photon energy, and the influence of the evolution of surface potential barrier profile on the low-energy electrons is greater, the spectral response curve shape changes during different processes.

Keywords GaAs photocathode; Spectral response curve; Electron energy distribution; Surface potential barrier; Electron escape probability

(Received Mar. 28, 2006; accepted Jul. 8, 2006)

* Corresponding author