

GaAs 光电阴极在不同强度光照下的稳定性^{*}

邹继军¹⁾²⁾ 常本康^{1)†} 杨智¹⁾ 高频¹⁾ 乔建良¹⁾ 曾一平³⁾

1) 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

2) 东华理工大学电子工程系, 抚州 344000)

3) 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

(2007 年 3 月 12 日收到, 2007 年 3 月 22 日收到修改稿)

利用多信息量测试系统分别测试了反射式 GaAs 光电阴极激活后在 (无光照) 33 和 100 lx 白光照射情况下阴极的光电流衰减变化曲线, 计算得到其寿命分别为 320, 160 和 75 min, 阴极稳定性随光照强度的增加而降低, 测试了只有光照 (100 lx) 而无光电流流过阴极时阴极的寿命为 100 min. 通过比较发现光照比光电流对阴极稳定性的影响更大. 还测试了阴极在 33 lx 光照下量子效率曲线随时间的衰减, 发现阴极低能光子的量子效率下降速度更快, 导致量子效率曲线形状不断发生变化. 基于修正后的反射式阴极量子效率公式对这种变化进行了理论分析, 发现与光电子的谷间散射和阴极衰减过程中表面势垒形状的变化有关.

关键词: GaAs 光电阴极, 稳定性, 量子效率, 表面势垒

PACC: 7960, 7280E, 7360L, 7320A

1. 引 言

具有高量子效率的负电子亲和势 (NEA) GaAs 光电阴极在微光夜视技术领域得到了广泛的应用, 至今仍是高性能微光像增强器主要采用的阴极^[1,2], 近年来随着自旋电子学和电子束平面曝光技术^[3]的发展, 对真空电子源提出了越来越高的要求, 而 GaAs 光电阴极由于具有发射电子自旋极化率高、能量与角度分布集中以及发射电流密度大的特点, 是一种性能优良电子源, 从而再次成为人们研究的热点^[4-8]. 然而, 在实际应用过程中, GaAs 光电阴极却面临着一个主要的技术难题——稳定性不是很好, 该难题几十年来一直吸引着人们研究的兴趣^[8-14]. Durek 等人^[9]研究了水蒸汽对 GaAs 阴极稳定性的影响, 并定量的分析了阴极寿命与水蒸气压之间的关系, 发现随着真空度的降低, 阴极寿命会显著减小. 徐江涛^[10]则比较了不同残余气体分压下阴极的稳定性, 并得出对阴极稳定性影响最严重的是 CO, CO₂, H₂O 和 H₂. 阴极所加偏压对 GaAs 光电阴极的稳定性也有影响^[11], 而在用俄歇电子能谱 (AES) 对 GaAs 阴极激活层进行的原位分析中, 发现

NEA 状态对 Cs/O 比非常敏感, 与最佳值有 2% 的偏离就足以使光电发射降为 0^[12]. Machuca 等人^[13,14]则研究了 III-V NEA 阴极衰减过程中量子效率和电子能谱的变化, 发现阴极激活后表面沉积过量的 Cs 可以提高阴极的稳定性, 而阴极的衰减则与 O₂ 在表面的吸附及其导致的激活层化学变化有关^[13,14].

尽管 GaAs 光电阴极的稳定性已经得到了广泛的研究, 然而关于光照强度和光电流对 GaAs 阴极稳定性的影响及其量子效率随时间的衰减变化规律却很少有报道. 光照及光照作用下的光电流是影响激活系统中阴极寿命的重要因素之一, 而量子效率曲线随时间的变化则揭示了阴极衰减的具体过程. 为了探索阴极在上述条件下的稳定性机理, 本文进行了反射式 GaAs 光电阴极的激活实验, 利用多信息量测试系统^[15]测试了刚激活后的阴极在不同光照强度下的光电流变化曲线及阴极衰减过程中的量子效率曲线, 并从表面模型和能带结构等角度对这些实验进行了分析.

2. 实 验

GaAs 光电阴极激活实验在超高真空激活系统

^{*} 国家自然科学基金 (批准号 60678043) 和高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号 20050288010) 资助的课题.

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

中进行. 实验采用反射式 GaAs(100) 分子束外延 (MBE) 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 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. 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 $1 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ 时进行加热处理, 加热温度为 640°C , 加热时间为 20 min , 加热过程中要保持系统真空度不低于 $1 \times 10^{-6} \text{ Pa}$, 以免降温时样品受到真空残气的二次污染. 加热结束, 待样品自然冷却到 60°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 $12 \text{ V}/50 \text{ W}$ 的卤钨灯照射阴极面, 激活采用 Cs 源持续、 O 源断续的工艺进行^[8]. 阴极激活结束后, 在原位用多信息量测试系统分别测试了阴极在不同强度白光照射下光电流随时间的变化曲线, 以及阴极衰减过程中的量子效率曲线. 在进行上述测试过程中, 系统真空度保持在 $5 \times 10^{-8} \text{ Pa}$ 附近.

3. 实验结果分析与讨论

处于激活系统中的 GaAs 光电阴极, 其稳定性 (寿命) 主要与系统真空度、真空残气、光照或光电流作用等因素有关. 由于超高真空激活系统是一个动态平衡的系统, 与像增强器中阴极所处的完全封闭的真空环境是不同的, 前者由于离子泵在一直工作, 从阴极表面脱附的 Cs 会被抽走, 同时残余的 O 等杂质气体会又吸附在阴极表面而毒害阴极, 完全封闭的系统则不同, 阴极能处于一个相对平衡的 Cs 气氛中, 因而像增强器中阴极的寿命会远大于激活系统中阴极的寿命. 而 GaAs 光电阴极作真空电子源应用时, 一般都是处于一个动态平衡的真空系统中.

Durek 等人^[9]的研究结果表明激活系统中阴极寿命与真空度密切相关, 所以在本文进行的多次阴极稳定性测试实验中, 激活系统真空度始终保持在 $5 \times 10^{-8} \text{ Pa}$ 附近, 同时由于同一个激活系统的真空残气也相对稳定, 因而在分析阴极寿命时可以排除真空度和真空残气的影响, 而只考虑光照强度和光电流的作用.

阴极光电流在白光照射情况下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曲线近似成

一条直线, 其变化规律可用下式描述:

$$I(t) = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (1)$$

式中 $I(t)$ 为随时间变化的光电流, I_0 为阴极峰值光电流, τ 为光电流衰减时间常数. 由于阴极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 τ 实际上是阴极的寿命, 即阴极灵敏度衰减到其峰值的 $1/e$ 时所需要的时间.

按上述定义, 从图 1 中可计算得到阴极激活后在 (无光照), 33 和 100 lx 白光照射情况下阴极的寿命分别为 320, 160 和 75 min . 在 0 lx 情况下, 由于无光照, 因而衰减时没有光电流流过阴极, 只在测试时才短暂打开光源采集光电流, 其他两种情况下阴极都始终有光电流流过. 在无光照时, 阴极的寿命最长, 随着光照强度的增加, 阴极寿命则随之下降. 然而在阴极衰减过程中, 是光照还是光电流起了主导作用这个问题可以结合图 2 来进行分析. 图 2 为

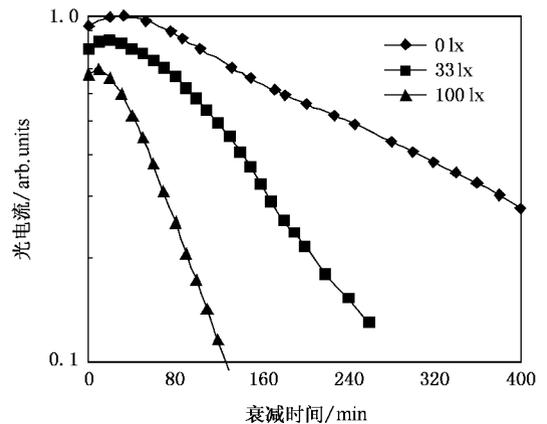


图 1 阴极在不同强度光照情况下光电流衰减变化曲线

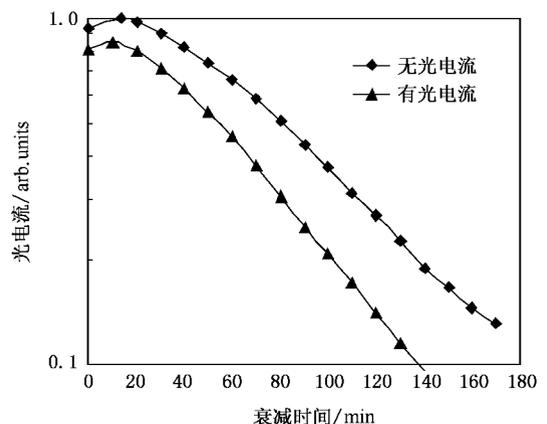


图 2 阴极在有或无光电流流过时的衰减变化曲线

100 lx 光照下阴极在有光电流或无光电流流过时的衰减变化情况,在阴极只有光照而无光电流(关闭收集阴极电子的高压)时,阴极寿命为 100 min,相当于无光照时寿命的 31%,而有光照又有光电流时寿命相当于无光照时的 23%,两者相差并不是很大,因而造成阴极衰减的主要因素是光照的作用。

阴极的衰减与阴极表面吸附系统中残余的 O 等杂质气体有密切关系,这些吸附会使阴极激活层偏离最佳 Cs/O 比,从而造成灵敏度的迅速下降,而在强光作用下,上述吸附可能更容易发生,同时造成阴极激活层内部发生化学变化^[14],因而阴极寿命更短。阴极在既有光照又有光电流流过时,其寿命会比只有光照时更低一些,这与光电流作用下(尤其是大的光电流)阴极表面 Cs 更容易脱附有关,这一点可从真空度的变化反映出来。当只有光照时,系统真空度与无光照时没有明显的变化,而当有光电流时,真空度则会适当下降,说明有电流时阴极表面吸附层更容易脱附,从而加剧 Cs/O 比的变化,但这种作用没有光照对阴极稳定性的影响大。

在阴极光电流不断衰减的过程中,阴极的量子效率也在不断下降,如图 3 所示为测试的阴极在 33 lx 光照下阴极量子效率曲线随时间的衰减变化情况。从图 3 中可以看出,在阴极量子效率下降过程中,低能端下降速度更快,从而造成量子效率曲线形状不断发生变化。这种变化与反射式 GaAs 光电阴极的能带结构和表面势垒有关,依据量子效率公式可对该现象进行具体的分析。

如图 4 所示,在 GaAs 光电阴极光电发射过程中,当光电子能量足够高时,将从 Γ 能谷散射到 L

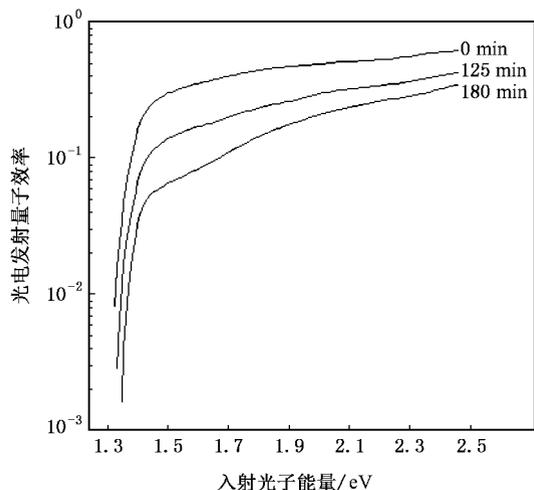


图 3 量子效率曲线随时间的衰减变化

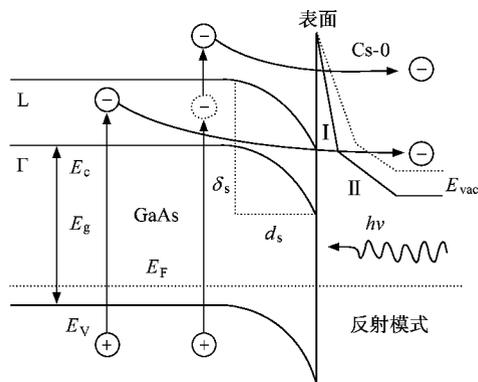


图 4 反射式 GaAs 光电阴极能带与表面势垒

或 X 能谷,这些电子中有一部分将从 L 或 X 能谷逸出^[16],而在靠近阴极发射表面激发的能量不够谷间散射但高于 Γ 能谷(导带底)的光电子则可能在导带底热化前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^[16]。到达阴极表面的光电子最后要穿越表面势垒逸入真空,因而表面电子逸出概率与如图 4 所示的阴极表面电子势垒^[17,18]形状密切相关。高能光子激发的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,低能光子激发的电子情况则相反。阴极衰减过程中表面势垒形状会发生如虚线所示的变化,该变化使低能电子比高能电子需要穿越的势垒厚度增加得更多,因而影响也更大。

从上面的分析可以得出,传统的反射式阴极量子效率公式中只考虑 Γ 能谷光电发射是不全面的,实际上其量子效率中要同时考虑 Γ 能谷、L 能谷光电发射和热电子发射,而 X 能谷的发射一般可忽略。James 等人^[16]对此进行了研究,提出了“两能谷扩散模型”,并推导了从 L 和 Γ 能谷逸出的光电子的量子效率公式。但由于 James 等人的公式中未能很好的考虑热电子发射的影响,因而在进行拟合分析时,发现理论量子效率曲线与实验曲线并不完全一致。通过拟合计算,本文发现 Γ 能谷光电子逸出概率与光子波长近似满足指数关系,依据该关系,我们修正了 L 和 Γ 能谷量子效率公式,分别为

$$Y_L(h\nu) = \frac{P_L F_L (1 - R)}{1 + 1/\alpha_w L_L} \quad (2)$$

$$Y_{\Gamma}(h\nu) = \frac{P_{\Gamma} \times \exp(k(1/1.42 - 1/h\nu)) (1 - R)}{1 + 1/\alpha_{h\nu} L_{\Gamma}} \times \left[F_{\Gamma} + \frac{F_L L_{\Gamma}}{\alpha_{h\nu} L_L (L_{\Gamma} + L_L) (1 + 1/\alpha_{h\nu} L_L)} \right], \quad (3)$$

其中, F_L 为能量高于 L 能谷的光电子占有所有光电子的比例, F_{Γ} 为能量介于 L 和 Γ 能谷之间的光电子所占的比例, P_L, P_{Γ} 分别为在 L 或 Γ 能谷光电子的逸出概率, L_L, L_{Γ} 分别为 L 或 Γ 能谷电子的扩散长度, $h\nu$ 为入射光子能量 ($h\nu > 1.42$ eV), k 为一系数, 定义为表面势垒因子 ($k \geq 0$), R 为阴极表面对入射光的反射率, $\alpha_{h\nu}$ 为阴极对入射能量为 $h\nu$ 的光子的吸收系数.

$Y_L(h\nu)$ 和 $Y_{\Gamma}(h\nu)$ 相加即为反射式阴极总的量子效率公式, 应用该公式拟合图 3 中的量子效率曲线, 拟合时 L_L 取 $0.04 \mu\text{m}^{[16]}$, R 取 0.3, 拟合的阴极性能参数见表 1, 拟合理论曲线如图 5 所示. 从图 5

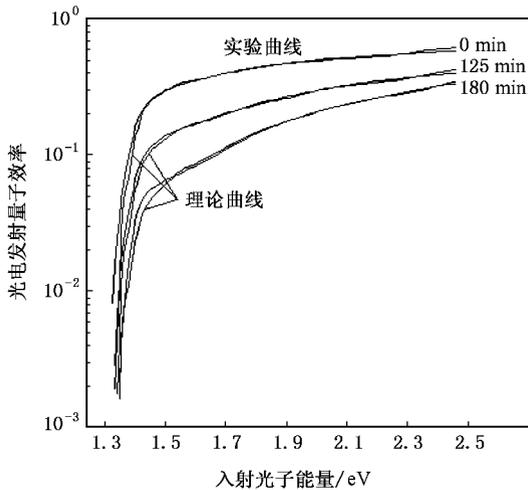


图 5 量子效率曲线随时间的衰减变化

中可以看出, 理论与实验结果吻合得很好. 随着阴极的衰减, 表 1 中拟合的 Γ 能谷电子逸出概率比 L 能谷的下降得更快, 而 k 在这个过程中则不断增大, 这两种变化都会导致低能光子的量子效率下降得更快, 从而引起量子效率曲线形状发生变化. 可见, 修正的量子效率公式能很好的分析和解释实验现象.

表 1 衰减不同时间后的阴极拟合性能参数

衰减时间/min	$L_{\Gamma}/\mu\text{m}$	P_{Γ}	P_L	k
0	2.9	0.55	0.68	1.8
125	2.9	0.23	0.54	3.4
180	2.8	0.10	0.43	5.6

4. 结 论

GaAs 光电阴极的稳定性主要与系统真空度、真空残气、光照或光电流作用等因素有关, 本文从光照和光电流作用的角度对激活系统中反射式 GaAs 光电阴极的稳定性进行了定量研究. 实验测试了刚激活后的阴极在不同强度光照下的光电流衰减变化曲线, 发现阴极寿命随光照强度的增加而减少, 而在造成阴极衰减的因素中, 光照比光电流对阴极的影响更大. 实验同时测试了阴极在光照下量子效率曲线随时间的衰减变化, 发现阴极低能端量子效率下降速度更快, 导致量子效率曲线形状不断变化. 该变化与反射式 GaAs 光电阴极能带结构和衰减过程中阴极表面势垒形状的变化有关, 并依据修正后的阴极量子效率公式对其进行了拟合分析, 理论与实验曲线具有很好的一致性. 本文的实验结果对于 GaAs 光电阴极的稳定性研究具有参考价值, 而修正的阴极量子效率公式也可用于 NEA 阴极电子输运特性的研究中.

- [1] Zhou L W, Li Y, Zhang Z Q, Monastyrski M A, Schelev M Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3591 (in Chinese) [周立伟、李元、张智、Monastyrski M A、Schelev M Y 2005 *物理学报* **54** 3591]
- [2] Zou J J, Chang B K, Yang Z 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2992 (in Chinese) [邹继军、常本康、杨智 2007 *物理学报* **56** 2992]
- [3] 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
- [4] Ding H B, Pang W N, Liu Y B, Shang R C 2007 *Chin. Phys.* **16** 51

- [5] Ding H B, Pang W N, Liu Y B, Shang R C 2005 *Chin. Phys.* **14** 2440
- [6] Ding H B, Pang W N, Liu Y B, Shang R C 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4097 (in Chinese) [丁海兵、庞文宁、刘义保、尚仁成 2005 *物理学报* **54** 4097]
- [7] Guo L J, Wüstenberg J P, Andreyev O, Michael B, Martin A 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3200 (in Chinese) [郭立俊、Wüstenberg J P, Andreyev O, Michael B, Martin A 2005 *物理学报* **54** 3200]
- [8] Ruan C J 2003 *Chin. Phys.* **12** 483

- [9] Durek D , Frommberger F , Reichelt T , Westermann M 1999 *Appl. Surf. Sci.* **143** 319
- [10] Xu J T 2003 *Appl. Opt.* **24** 13 (in Chinese) [徐江涛 2003 应用光学 **24** 13]
- [11] Elamrawi K A , Elsayed-Ali H E 1999 *J. Vac. Sci. Technol. A* **17** 823
- [12] Rodway D C , Allenson M B 1986 *J. Phys. D* **19** 1353
- [13] Machuca F , Liu Z , Sun Y , Pianetta P , Spicer W E , Pease R F W 2002 *J. Vac. Sci. Technol. B* **20** 2721
- [14] Machuca F , Liu Z , Sun Y , Pianetta P , Spicer W E , Pease R F W 2003 *J. Vac. Sci. Technol. B* **21** 1863
- [15] Zou J J , Qian Y S , Chang B K , Wang H , Wang S Y 2006 *Chin. J. Vac. Sci. Technol.* **26** 172 (in Chinese) [邹继军、钱芸生、常本康、王惠、王世允 2006 真空科学与技术学报 **26** 172]
- [16] James L W , Moll J L 1969 *Phys. Rev.* **183** 740
- [17] Su C Y , Lindau I , Spicer W E 1982 *Chem. Phys. Lett.* **87** 523
- [18] Su C Y , Spicer W E , Lindau I 1983 *J. Appl. Phys.* **54** 1413

Stability of GaAs photocathodes under different intensities of illumination^{*}

Zou Ji-Jun^{1,2)} Chang Ben-Kang^{1)†} Yang Zhi¹⁾ Gao Pin¹⁾ Qiao Jian-Liang¹⁾ Zeng Yi-Ping³⁾

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*

3) *Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*

(Received 12 March 2007 ; revised manuscript received 22 March 2007)

Abstract

The photocurrent curves of reflection-mode GaAs photocathodes as a function of time, when were illuminated by white light with an intensity of 0, 33 and 100 lx, respectively, were measured using a multi-information measurement system. The calculated lifetimes of cathodes are 320, 160 and 75 min, respectively, showing that the stability of cathodes degraded with the increase of light intensity. The lifetime of cathode, illuminated by white light with an intensity of 100 lx, while no photocurrent was being drawn during the illumination, was 100 min. Through comparison, we found that the influence of illumination on cathodes stability is greater than that of photocurrent. The quantum-yield curves of cathodes as a functions of time, when illuminated by white light with an intensity of 33 lx, were measured also. The measured results show that the shape of the yield curves changes with increasing illumination time due to the faster quantum-yield degradation rate of low energy photons. Based on the revised quantum-efficiency equations for the reflection-mode cathodes, the variation of yield curves are analyzed to be due to the intervalley diffusion of photoelectrons and the evolution of the surface potential barrier profile of the photocathodes during degradation process.

Keywords: GaAs photocathode, stability, quantum efficiency, surface potential barrier

PACC: 7960, 7280E, 7360L, 7320A

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60678043) and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20050288010).

[†] Corresponding author. E-mail: bkchang@mail.njust.edu.cn