

均匀掺杂 GaAs 光阴极表面势垒特性研究

张连东^{1,2}, 冯 刘^{1,2}, 刘 晖^{1,2}, 程宏昌^{1,2}, 高 翔^{1,2}, 苗 壮^{1,2}

- (1. 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065;
2. 北方夜视科技集团股份有限公司, 云南 昆明 650223)

摘 要: 根据激活过程中光电流变化规律及原位光谱响应测试, 模拟了 GaAs 光阴极表面势垒的形成过程, 在光阴极表面双偶极子模型的基础上作了修正, 建立了三偶极子模型。新模型认为, 光阴极表面势垒由三个偶极层套构而成, 第一偶极层由 GaAs(Zn)⁻-Cs⁺偶极子组成, 第二偶极层由 Cs₂O 偶极子组成, 第三偶极层由 GaAs-O-Cs 偶极子组成, 第二、三偶极层嵌入第一偶极层中。根据隧道效应与量子效率测试结果, 确立了势垒中分段均匀的电势分布, 计算得出势垒宽度为 1.65 nm, 有效电子亲和势为 -0.44 eV。新模型的建立对理解光电阴极表面发射机理具有重要意义。

关键词: GaAs 光阴极; 三偶极子模型; 表面势垒; 电势分布

中图分类号: TN223 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)08-2181-05

Characteristic of surface barrier of epuably-doped GaAs photocathode

Zhang Liandong^{1,2}, Feng Liu^{1,2}, Liu Hui^{1,2}, Cheng Hongchang^{1,2}, Gao Xiang^{1,2}, Miao Zhuang^{1,2}

- (1. Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China;
2. North Night Vision Technology Group Co., Ltd, Kunming 650223, China)

Abstract: The photocathode surface barrier formation process of the GaAs photocathode was simulated according to the variation of the photocurrent while the photocathode was activating and in situ tests of spectra response, the two-dipole model was amended to establish a three dipole model. It was considered from the new model that the photocathode surface barrier formed by three kind of dipole layers, the first dipole layer was composed of GaAs(Zn)⁻-Cs⁺ dipole, the second dipole layer was composed of Cs₂O dipole and the third dipole layer was composed of GaAs-O-Cs dipole, the second and third dipole layer embedded in the first dipole layer. The barrier potential distribution which was piecewise uniform was established according to tunnel effect and results of quantum efficiency tests, it was calculated that the width of the barrier is 1.65 nm, and the effective electron affinity energy is -0.44 eV. The establishment of the new model is of great significance to further understand the photocathode surface emission mechanism.

Key words: GaAs photocathode; three dipole model; surface barrier; potential distribution

收稿日期: 2012-12-03; 修订日期: 2013-01-10

基金项目: 微光夜视技术重点实验室基金(J20110102)

作者简介: 张连东(1981-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事 III-V 族半导体光阴极方面的研究。Email: qf963@sohu.com

0 引言

负电子亲和势 GaAs 光电阴极具有量子效率高、暗发射小、发射电子能量级角度分布集中等特点^[1],在微光夜视、高能物理等领域获得了广泛的应用,从发明至今,一直受到人们的关注。目前 GaAs 光阴极的高低温两步激活工艺^[2]已十分成熟,然而,对铯、氧在光阴极表面的存在状态及光阴极表面光电发射机理仍缺乏明确统一的认识。已经提出的表面模型主要有异质结模型、双偶极子模型、弱核力场模型等^[3-6],以上模型各有其合理之处,同时各有相应的缺陷。其中双偶极子模型由于其能解释表面势垒的存在并形象化地给出了势垒的形状及定量计算结果,对探索光阴极表面光电发射机理十分有利,因而广为接受。近年来,人们陆续利用双偶极子模型定量研究了光阴极表面电子逸出几率、光阴极量子效率等问题,通过拟合得到了光阴极的一些重要参数^[7-10]。然而,对光阴极表面势垒中偶极子的种类、组成及偶极层的相互关系认识比较模糊,也很少有人关注光谱响应中长波段量子效率的边界问题。文中试结合光阴极激活过程中光电流变化曲线与原位光谱响应测试,模拟表面偶极层的构建过程及相互关系,根据量子效率曲线中长波边界的突变结果,确立势垒形状,并计算势垒的相关参数。

1 实验

实验分为光阴极激活与光谱响应测试两部分。激活在压强低于 1×10^{-8} Pa 的极高真空腔室中进行,激活前对 GaAs 光阴极进行高温加热处理,清除光阴极表面的污染,获取原子级洁净表面,随后采用一直给 Cs,交替给 O 的方式进行,文中光电流达到第五 Cs 峰值时激活完毕。激活过程中随时监控光电流变化,每到光电流达到 Cs 峰值,就利用光谱响应测试仪对光阴极进行原位光谱响应测试。

2 结果与讨论

2.1 激活过程中光电流变化规律与表面势垒的关系

激活过程中光电流不断变化,由于激活时采用稳定的单色光源,单位时间内激发的光电子数目及输运到阴极发射面的待发射光电子数目为定值,因

此光电流的变化可归结为待发射光电子从光阴极体内隧穿至真空的几率变化,而隧穿几率与表面势垒的形状、尺寸密切相关,下面试从表面势垒的构建过程入手,分析光电流变化规律。激活过程中光电流-时间关系如图 1 所示。

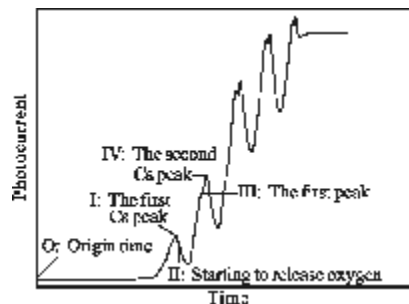


图 1 激活过程中光电流与时间关系曲线

Fig.1 Relation between photocurrent and time during the photocathode was activating

激活开始后,Cs 源释放出的 Cs 原子到达光阴极表面,并立即释放一个电子给 GaAs 表面态或与近表面处的空穴复合,成为 Cs⁺,为形成稳定、低能的结构,该 Cs⁺将迅速滚动到一个平衡位置,与 GaAs 近表面处的负电中心 GaAs(Zn)形成第一层偶极子。当偶极子达到一定量时,就在 GaAs 表面形成了一个由外向内的电场,表面能带随之向下弯曲。随着激活时间的延长,第一层偶极子一直增多,表面电场持续增强,表面能带不断向下弯曲,这时开始检测到光电流。继续沉积 Cs,偶极子进一步增多,表面能带继续向下弯曲,导带底电子对应的势垒宽度不断减小,则光电子隧穿几率不断增大,因此光电流也不断增大。当弯曲量使得 GaAs 导带底电子能级与 Cs⁺外表面真空能级平齐时,就在 GaAs 光阴极表面形成“零电子亲和势”,理论上,本征光吸收激发到导带底的光电子可以一定几率向真空中隧穿,当第一偶极层构建完毕,势垒宽度降至极小,光电流达到一个极大值。以上过程对应图 1 中 O-I。

继续沉积 Cs,则由于表面偶极层电场的阻挡,Cs 难以释放电子给 GaAs,而以原子形态覆盖在光阴极表面。由于 Cs 原子很大,最外层电子受到原子核束缚较弱,因此具有一定极性。最外层电子在 GaAs 体内的感应出镜像电荷,形成与偶极层方向相反的新电场。一方面,Cs 原子增加了势垒宽度;另一方面,新电场削弱了原电场,造成表面能带向上移

动,导致导带底电子势垒变宽。这两个因素均会降低电子隧穿几率,从而降低光电流。当光电流降到一定程度时,开始给氧。以上过程对应图 1 中 I - II。

首先,一部分氧与尚未到达阴极面的铯反应生成 Cs₂O 偶极子,这些偶极子会陆续降落到阴极表面;另一部分氧直接到达阴极表面,与阴极表面原子态的 Cs 反应生成 Cs₂O 偶极子,这些偶极子构成第二偶极层。另外,部分氧进入 GaAs 层与 GaAs、Cs 生成 GaAs-O-Cs 偶极子,构成第三偶极层。由于材料表面会发生重构,光阴极表面将产生一系列的台和坑^[1],Cs₂O 偶极子 Cs 和 O 分别落入台、坑,与第三偶极层共同嵌入第一偶极层。

第二、三偶极层的电场与第一偶极层方向相同,三者叠加,形成了分段均匀的电场,使表面能带进一步弯曲,形成了负电子亲和势。给氧一段时间后,原子态的铯被耗尽,全部与 O 反应生成 Cs₂O 偶极子及 GaAs-O-Cs 偶极子,这时,开始有过量的氧以 O₂ 态到达光阴极表面,与 GaAs 发生氧化反应生成 AS₂O₃、Ga₂O₅ 等绝缘体,使阴极表面钝化。从能带观点看,钝化层会使表面能带向上弯曲,从而削弱甚至抵消偶极层使能带向下弯曲的量,使表面真空能级升至导带底以上,对导带底电子来说,表面势垒变得无限宽,则电子隧穿几率将迅速降低直到不可测量。因此,当氧与铯反应至光电流达到极值时(以上过程对应 II - III),应立即停止给氧,使铯与过量的氧反应生成 Cs₂O 及 GaAs-O-Cs 偶极子,继续增强表面电场,增加表面能带弯曲量。停止给氧后,多余的氧会很快耗尽,全部生成了 Cs₂O 及 GaAs-O-Cs 偶极子,光电流再次达到极大(以上过程对应 III - IV)。这时 Cs 开始过量,GaAs 光阴极表面出现原子态的铯。

此后表面势垒及光电流变化重复过程 I - IV,直到光电流达到最大,表面有效电子亲和势降到最低,第二、三偶极层构建完成,激活完毕。

2.2 表面势垒的计算

光电流达到各个 Cs 峰值时的量子效率曲线如图 2、图 3 所示。对于短波激发的高能电子,由于 GaAlAs 窗口层对短波的吸收、存在较高的后界面复合速率及在 GaAs 体内输运过程中很快落入导带底,当这些光电子到达阴极发射面时,面对着同样的势垒,其逸出几率可视为常数。对低能电子则不然,由长波边界峰值响应(835 nm)至响应消失(930 nm),只

有大约 0.15 eV 的能量范围,在这么小的范围内,光吸收系数的变化可以忽略不计,因此,量子效率的降低可归因于电子逸出几率的降低。

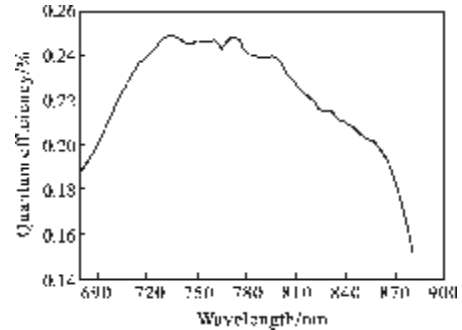


图 2 光电流达到第一个 Cs 峰值时的量子效率曲线

Fig.2 Quantum efficiency curve when the photocurrent reached the first Cs peak

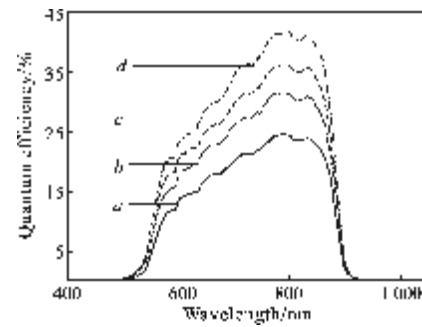


图 3 光电流达到第 2(a)、3(b)、4(c)、5(d)峰值时的量子效率曲线
Fig.3 Quantum efficiency curves when the photocurrent reached the second(a), third(b), fourth(c), fifth(d) Cs peaks

由上文的分析可知,光电流达到第一个峰值时,表面形成零电子亲和势,第一偶极层构建完毕。由图 2 中可看出,此时量子效率很低,只有百分之零点几,说明光电子面对的势垒宽度很大。由于此时只有一种偶极层,因此势垒中电场是均匀分布的。表面势垒示意图如图 4 所示。

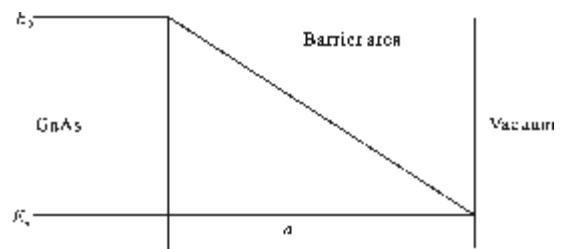


图 4 光电流达到第一峰值时的表面势垒示意图

Fig.4 Sketch map of surface barrier when the photocurrent reached the first Cs peak

由图 3 可以得出,随着氧的沉积,即第二、三偶极层的建立,量子效率迅速增大,直至激活完毕,第二、三偶极层构建完成。随着激活时间的延长,量子效率在全波段都有所增长。对能量确定的电子而言,由于势垒高度不变,则量子效率的增加意味着势垒宽度变小,这说明第一偶极层的电场与第二、三偶极层电场并非彼此独立,这也从另一个侧面证明了第二、三偶极层与第一偶极层在空间中并非首尾相连,而是交叠在一起。二、三偶极层在建立过程中,其电场与第一偶极层电场逐渐叠加,势垒区电场不断增强,电势越来越陡峭,则对于一定能量的电子而言,意味着势垒宽度不断减小。在长波响应边界 835 nm 处,量子效率开始急剧降低,说明低能电子逸出几率降低,对应的势垒宽度急剧增加,因此,势垒电场在此处发生转折,由十分陡峭变得平缓。

激活完毕时的势垒示意图如图 5 所示。

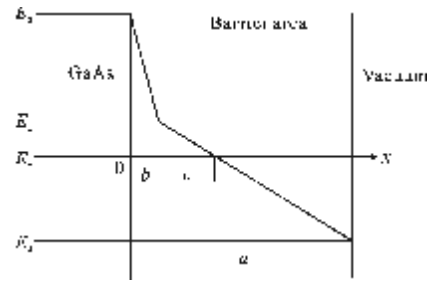


图 5 激活结束时 GaAs 光阴极表面势垒示意图

Fig.5 Surface barrier of GaAs photocathode when the activation was finished

为得出势垒宽度及最终有效电子亲和势,选取 835 nm(对应 E_1)及 880 nm(对应 E_c)处的量子效率进行计算。光电流达到第一 Cs 峰值时 E_c 电子的量子效率为 0.151%,激活结束时 E_c 电子、 E_1 电子的量子效率分别为 20.87%、41.1%。代入均匀掺杂透射式 GaAs 光阴极量子效率公式(1)^[11]:

$$Y_T(h\nu) = \frac{P \cdot (1-R) \cdot \alpha_{hv} L_D}{\alpha_{hv} L_D - 1} \times \left\{ \frac{\alpha_{hv} D_n + S_v}{(D_n/L_D) \cdot \cosh(T_e/L_D) + S_v \cdot \sinh(T_e/L_D)} - \frac{\exp(-\alpha_{hv} T_e) \cdot [S_v \cdot \cosh(T_e/L_D) + (D_n/L_D) \cdot \sinh(T_e/L_D)]}{(D_n/L_D) \cdot \cosh(T_e/L_D) + S_v \cdot \sinh(T_e/L_D)} - \alpha_{hv} L_D \cdot \exp(-\alpha_{hv} T_e) \right\} \quad (1)$$

式中: P 为阴极表面电子逸出几率; R 为阴极窗口层反射率; α_{hv} 是 GaAs 对入射能量为 $h\nu$ 的光子的吸收系数; L_D 为阴极材料电子扩散长度; S_v 为后界面复合速率; D_n 为电子扩散系数; T_e 为阴极发射层的厚度。计算时,取 $R=0.25$, $\alpha_{hv(880\text{ nm})}=0.411\ 818\ \mu\text{m}^{-1}$, $\alpha_{hv(835\text{ nm})}=1.140\ 677\ \mu\text{m}^{-1}$, $L_D=3.5\ \mu\text{m}$, $S_v=5 \times 10^5\ \text{cm/s}$, $D_n=120\ \text{cm}^2/\text{s}$, $T_e=1.62\ \mu\text{m}$, GaAs 价带顶为势能零点。经简化计算,得到光电流达到第一 Cs 峰值时 E_c 电子隧穿几率 P_0 , 激活结束时 E_1 电子、 E_c 电子隧穿几率 P_1 、 P_2 分别为:

$$P_0=0.002\ 8, P_1=0.709, P_2=0.685, \text{ 又}$$

$$P_0 = \exp \left\{ - \left(\frac{8\pi}{3} \right) \left(\frac{2m_n^*}{h^2} \right)^{\frac{1}{2}} (E_0 - E_c)^{\frac{1}{2}} a \right\} \quad (2)$$

$$P_1 = \exp \left\{ - \left(\frac{8\pi}{3} \right) \left(\frac{2m_n^*}{h^2} \right)^{\frac{1}{2}} (E_0 - E_c)^{\frac{1}{2}} b \right\} \quad (3)$$

$$P_2 = \exp \left\{ - \left(\frac{8\pi}{3} \right) \left(\frac{2m_n^*}{h^2} \right)^{\frac{1}{2}} [(E_0 - E_1)^{\frac{1}{2}} b + (E_1 - E_c)^{\frac{1}{2}} c] \right\} \quad (4)$$

式中: m_n^* 为 GaAs 导带底附近电子有效质量,其值为 $6.097 \times 10^{-32}\ \text{kg}$, h 为普朗克常量,值为 $6.63 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}$,

将 m_n^* 、 h 及 P_0 、 P_1 、 P_2 值代入公式(2),得 $a=1.65\ \text{nm}$, $b=0.097\ \text{nm}$, $c=0.23\ \text{nm}$ 。

则势垒中电势

$$V(x) = \begin{cases} \frac{E_0 - E_1}{qb} x & (0 \leq x \leq b) \\ \frac{E_1 - E_2}{q(a-b)} x & (a-b \leq x \leq a) \\ 4.12 \times 10^6 x & (0 \leq x \leq 9.7 \times 10^{-9}\ \text{cm}) \\ 3.32 \times 10^6 x & (9.7 \times 10^{-9}\ \text{cm} \leq x \leq 1.65 \times 10^{-7}\ \text{cm}) \end{cases} \quad (5)$$

由图 5 中还可得到:

$$\frac{E_c - E_2}{E_1 - E_c} = \frac{a - b - c}{c} \quad (6)$$

将 E_1 、 E_c 、 a 、 b 、 c 值代入公式(6),则最终有效电子亲和势 χ 为:

$$\chi = E_2 - E_c = -0.44\ \text{eV} \quad (7)$$

3 结论

根据 GaAs 光阴极激活过程中光电流变化规律模拟了表面势垒形成过程,提出了 Cs、O 在光阴极表面存在状态假设,认为表面势垒由 $\text{GaAs}(\text{Zn})^- - \text{Cs}^+$ 、 Cs_2O 、 $\text{GaAs} - \text{O} - \text{Cs}$ 三种偶极子组成,后两种偶极子

嵌入第一偶极层中,三者交叠在一起形成了分段均匀的电场,这些偶极子的精确分布及相互关系仍有待探索。利用量子效率曲线长波边界的突变,得出了势垒中电势近似分布,并计算了势垒宽度及有效电子亲和势。文中对深入理解 GaAs 光阴极激活及光电发射机理具有一定指导意义。

参考文献:

- [1] Liu Yuanzhen, Wang Zhongchun, Dong Yaqiang. Electron Emission and Photoelectricity Cathode [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995. (in Chinese)
刘元震,王仲春,董亚强. 电子发射与光电阴极[M]. 北京:北京理工大学出版社,1995.
- [2] Stocker B J. AES and LEED study of the activation of GaAs-Cs-O negative electron affinity surfaces [J]. Surface Science, 1975, 47: 501.
- [3] Uebbing J J, James L W. Behavior of cesium oxide as a low work-function coating [J]. Journal of Applied Physics, 1970, 41(11): 4505-4516.
- [4] Fisher D G, Enstrom R E, Escher J S, et al. Photoelectron surface escape probability of (Ga,In)As: Cs-O in the 0.9 to 1.6 eV [J]. Journal of Applied Physics, 1972, 43(9): 3815-3823.
- [5] Gao Huairong. Investigation of the mechanism of the activation of GaAs negative electron affinity photocathodes [J]. Journal of Vacuum Science Technology A, 1987, 5(4): 1295-1298.
- [6] Burt M G, Heine V J. The theory of the workfunction of caesium suboxides and caesium films[J]. Journal of Physics C: Solid State Physics, 1978, 11: 961-969.
- [7] Zou Jijun, Chang Benkang, Yang Zhi, et al. Variation of spectral response curves of GaAs photocathodes in activation chamber[C]//SPIE, 2006, 6352: 63523H-7.
- [8] Zong Zhiguo, Fu Rongguo, Qian Yunsheng, et al. Calculation of electron surface probability of GaAs:Cs-O NEA Photocathodes[J]. Infrared Technology, 2002, 24(3): 27-30. (in Chinese)
宗志国,富容国,钱芸生,等. GaAs:Cs-O NEA 光电阴极电子表面逸出几率计算[J]. 红外技术, 2002, 24(3): 27-30.
- [9] Zhang Yijun, Niu Jun, Zhao Jing, et al. Effect of exponential-doping structure on quantum yield of transmission-mode GaAs photocathodes [J]. Acta Phys Sin, 2011, 60: 067301. (in Chinese)
张益军,牛军,赵静,等. 指数掺杂结构对透射式 GaAs 光电阴极量子效率的影响研究[J]. 物理学报, 2011, 60: 067301.
- [10] Zhang Yijun, Zou Jijun, Niu Jun, et al. Photoemission characteristics of different-structure reflection-mode GaAs photocathodes [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110: 063113.
- [11] Benemanskaya G V, Daineka D V, Frank-Kamenetskaya G E. Changes in electronic and adsorption properties under Cs adsorption on GaAs (100) in the transition from As-rich to Ga-rich surface[J]. Surface Science, 2003, 523: 211-217.