

GaAs 光电阴极激活后的表面势垒评估研究*

牛 军¹⁾²⁾ 张益军¹⁾ 常本康^{1)†} 熊雅娟¹⁾

1) (南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

2) (南阳理工学院电子与电气工程系, 南阳 473004)

(2010年6月19日收到; 2010年7月19日收到修改稿)

根据阴极制备过程中单独 Cs 激活和 Cs-O 交替激活两个阶段产生的光电流的峰值比, 结合对电子穿过表面单势垒和双势垒后能量分布的理论曲线, 提出了一种评估 NEA GaAs 光阴极表面势垒参数的新方法. 利用该方法研究的结果完全符合双偶极层模型理论, 并且和对实测阴极电子能量分布曲线拟合的结果非常一致. 该方法简单、有效, 在不增加测试手段的前提下, 丰富了对 NEA GaAs 光电阴极激活效果及表面特征评价的方法和途径.

关键词: GaAs, 光电阴极, 表面势垒, 能量分布

PACS: 42.70.Gi, 42.79.Pw, 71.55.Eq, 72.10.Bg

1. 引言

GaAs 光电阴极是第一种被发明的负电子亲和势 (NEA) 光电阴极, 也是应用最广和最具有代表性的 NEA 阴极. 随着研究工作的不断深入, 变掺杂 GaAs 光电阴极逐渐成为了当前的研究热点^[1-4]. 由于阴极表面电子亲和势为负, 到达阴极表面的光电子能够轻易地发射到真空中去. 对于 NEA 表面机理的研究, 目前虽有多种理论, 但双偶极层表面模型得到了更广泛的认同. 根据双偶极层模型, NEA 阴极的表面势垒是由两条斜率不同的近似直线段组成^[5-7], 如图 1 所示. 我们分别称其为 I 势垒和 II 势垒, I 势垒比较高且窄, II 势垒则比较低且宽.

表面 I, II 势垒的结构参数, 直接影响着光电子逸出表面的概率、电子的能量分布以及阴极的量子产额. 表面势垒的结构主要决定于 NEA 阴极制备效果的好坏, 因此, 对表面势垒参数的评估也是评价 NEA 阴极制备工艺水平的一项重要依据.

通过测量阴极逸出表面电子的能量分布曲线并进行拟合, 可以得到表面势垒参数, 文献[8]对此做了一些研究. 但这要求必须具备一定的测试条件. 本文研究发现, 在激活过程中, 阴极光电流的变化也充分反映了表面势垒结构的变化特征, 通过研

究阴极光电流曲线, 同样能够实现对表面势垒参数的评估. 利用本方法所得到的结果, 同文献[8]中的研究结果非常一致.

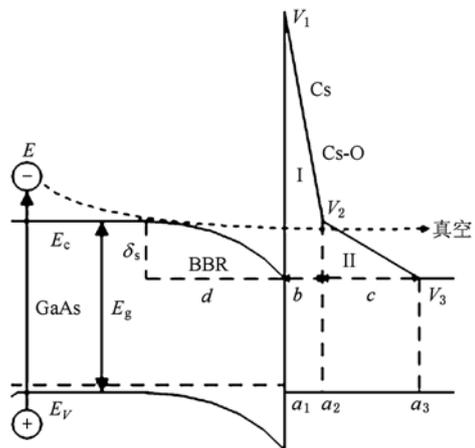


图 1 双偶极子表面模型示意图

2. 实验

我们利用分子束外延 (MBE) 技术生长了一透射式 GaAs 光电阴极样品, 发射层为 p 型 Be 重掺杂. 样品采用变掺杂结构, 表面层掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 厚度 $2 \mu\text{m}$. 先按照常规工艺对阴极片进

* 国家自然科学基金 (批准号: 60678043), 南京理工大学自主科研专项计划 (批准号: 2010ZYTS032) 资助的课题.

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

行表面清洗,接着进行阴极组件的制作,完成后送入真空室按照“高-低温两步激活”法进行激活实验.激活过程采用 Cs 源连续、O 源断续的控制方法,以反射式激活方式进行.激活时的系统真空度为 1×10^{-8} Pa. 实验过程中对阴极激活光电流曲线进行了记录,图 2,3 给出了样品在高、低温激活时的局部光电流曲线,其中(a)为首次 Cs 激活阶段的光电流曲线,(b)为 Cs-O 交替激活结束时的光电流曲线.

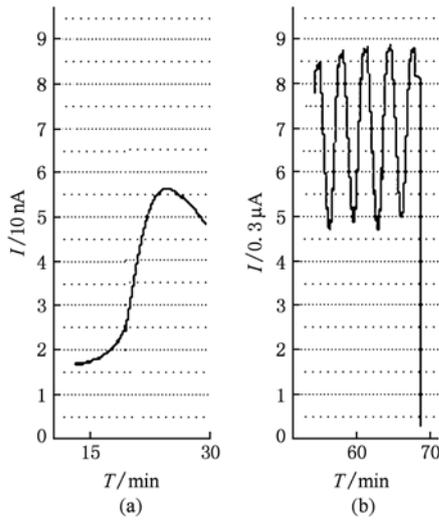


图 2 高温激活过程中的光电流曲线 (a)首次 Cs 激活阶段; (b)Cs-O 交替激活结束时

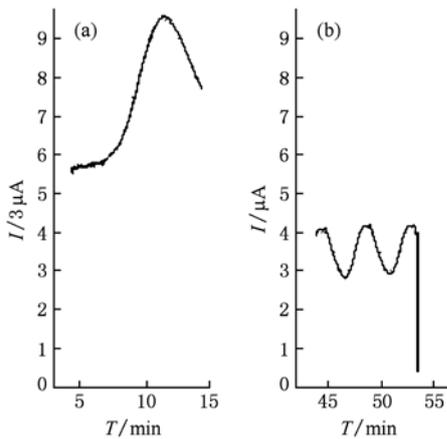


图 3 低温激活过程中的光电流曲线 (a)首次 Cs 激活阶段; (b)Cs-O 交替激活结束时

观察图 2,3 中曲线可发现,在首次 Cs 激活阶段和 Cs-O 交替激活结束时,光电流都分别达到了一个最大值,具体值如表 1 所示.

表 1 阴极激活各阶段的光电流峰值(nA)

	首次 Cs 激活阶段 I_{Cs}	Cs-O 交替激活结束时 I_{Cs-O}	I_{Cs-O}/I_{Cs}
高温	55	2400	44
低温	28.4	3860	136

在首次 Cs 激活阶段,随着光电流从无到有不断上升,第一个偶极层正逐渐形成,当光电流达到峰值时,表面 I 势垒结构达到最佳;同样,在 Cs-O 交替激活阶段,第二个偶极层也慢慢形成,表面势垒形状不断变化,当激活结束光电流达到最大时,表面的 I + II 势垒结构也达到了最佳状态.从表 1 数据可以看出,在高温激活中,Cs-O 交替激活结束时的光电流最大值 I_{Cs-O} 是首次 Cs 激活阶段光电流最大值 I_{Cs} 的 44 倍,而在低温激活中则达到了 136 倍.这些数据表明

- 1) 表面 I, II 势垒的结构参数间符合一定的关系;
- 2) 低温激活后的表面势垒参数同高温激活后有很大差别.

3. 表面势垒参数评估

依据到达表面光电子的能量分布,研究分别越过表面 I 势垒和 I + II 势垒后的光电子数量,再结合实验所得到的两种情况下光电流比值,便可以通过拟合计算,实现对表面势垒参数的评估.

3.1. 到达表面的光电子能量分布

当电子输运到表面能带弯曲区时,对于透射式阴极,高能电子主要在后界面处产生,经过较长的距离输运到能带弯曲区时,绝大部分都已在 Γ 能谷导带底热化.电子的能量分布可认为符合玻尔兹曼分布^[9, 10]

$$n_d(\Delta E) \propto \Delta E^{1/2} \cdot \exp(-\Delta E/kT), \quad (1)$$

式中 k 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度, ΔE 为热化电子的能量相对于导带底的值.

根据 Bartelink 等人的计算^[11,12],若 $\Delta E = 0$, 则电子经过能带弯曲区后的能量分布为

$$n_0(E_p) \propto \left[\left(\frac{\delta_s}{E_p} \right)^2 - \frac{\delta_s}{E_p} \right] \times \exp\left(-\frac{\delta_s^2}{4E_w E_p} \right), \quad E_s \gg \frac{1}{2}E_w, \quad (2)$$

$$n_0(E_p) \propto \left[\left(\frac{\delta_s}{E_p} \right)^2 - 1 \right] \times \exp \left(- \frac{\delta_s^3}{4E_w E_p} - \frac{\delta_s}{2E_w} + \frac{3E_p}{4E_w} \right),$$

$$E_s \ll E_w. \quad (3)$$

上式中 $E_s = \delta_s - E_p$, E_s 是电子到达阴极表面时还剩下的能量, δ_s 是表面能带弯曲量, E_p 是电子经过能带弯曲区时所损失的总能量, E_s 和 E_p 均是相对能带弯曲区的最低点而言的. $E_w = \frac{(F \cdot L_p)^2}{3 \cdot \Delta E_p}$, 其中 L_p 是电子散射平均自由程; ΔE_p 是电子在每次碰撞散射中所损失的平均能量; F 是能带弯曲区中的电场强度, 因该区域比较窄, 通常认为其中的电场为匀强电场, 即 $F = \delta_s/d$; d 可通过下式计算得到^[9]:

$$d = \left(\frac{2\delta_s \epsilon_0 \epsilon}{n_A e} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

式中 ϵ_0 和 ϵ 分别是真空介电常数和 GaAs 的相对介电常数, n_A 是阴极的受主掺杂浓度, e 是电子的电荷量.

由(2)或(3)式可推知, 若 $\Delta E \neq 0$, 则电子越过表面能带弯曲区后的能量分布为^[8]

$$n(E) = \sum_i n_d(\Delta E_i) \cdot n_0(\Delta E_i + E_g - E), \quad (5)$$

式中 ΔE_i 与(1)式中 ΔE 含义相同.

根据表达式(1)–(5)可计算得到 NEA GaAs 光电阴极中热化的 Γ 能谷电子到达阴极表面时的能量分布, 结果如图 4 中的曲线 2 所示. 曲线 1 为电子到达能带弯曲区时的能量分布, 曲线 1 和 2 都做了归一化处理. 计算中各参数的取值为^[12,14]: $E_g = 1.42 \text{ eV}$, $L_p = 40 \text{ \AA}$, $\Delta E_p = 35 \text{ meV}$, $\delta_s \approx E_g/3$, $\epsilon = 13.2$, $n_A = 1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$.

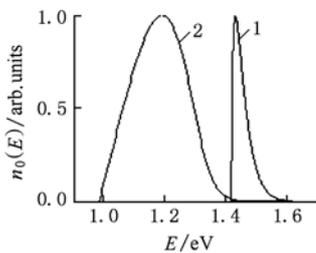


图 4 阴极体内电子能量分布曲线

从图 4 可以看出, 由于在能带弯曲区输运时受到各种散射作用, 电子在通过能带弯曲区后能量明显展宽, 电子能量分布峰值往低能端偏移, 低能电子数目大量增加.

3.2. 表面单、双势垒下的电子透射系数

GaAs 光电阴极表面势垒如图 1 所示, 由两个近似的三角形势垒(I 势垒和 II 势垒)构成. 利用基于 Airy 函数的传递矩阵法, 能够求解任意分段线性的多势垒结构, 准确方便地给出一维定态薛定谔方程的解^[15,16]. 利用该方法求解 GaAs 光电阴极表面势垒透射系数的过程, 在文献[15]和[17]中均有详细的介绍, 本文就不再赘述. 得到的表面在 I 势垒情况下和 I + II 势垒情况下的透射系数分别为

$$T_1 = \frac{k_2}{k_0} \left| \frac{1}{M_{11}} \right|^2, \quad (6)$$

$$T_2 = \frac{k_3}{k_0} \left| \frac{1}{M'_{11}} \right|^2, \quad (7)$$

上式中, $k_0 = \sqrt{2mE}/\hbar$, $k_2 = \sqrt{2m(E - V_2)}/\hbar$, $k_3 = \sqrt{2m(E - V_3)}/\hbar$, m 是电子质量, E 是入射电子能量, M_{11} , M'_{11} 分别是两种情况下传递矩阵 M 的第 1 行第 1 列的值. 由上式可知, 阴极表面的透射系数 T 是入射电子能量、势垒高度和宽度的函数.

3.3. 表面势垒参数拟合计算

已知了到达阴极表面电子的能量分布 $n_0(E)$, 再乘以表面势垒透射系数 T , 便可以求出逸出表面电子的能量分布 $n_v(E)$, 即

$$n_v(E) = n_0(E) \cdot T, \quad (8)$$

文献[4]利用(8)式对实验测得的电子能量分布曲线进行了拟合, 拟合曲线同实验曲线符合得非常好, 证实了该理论方法的正确性. 该方法还可得到不同势垒参数下, 电子穿过表面 I 势垒和 II 势垒后的能量分布. 我们针对图 4 中曲线 2 所示的电子能量分布, 按设定的势垒参数进行了求解, 结果如图 5 所示. 曲线 1 为单独穿过 I 势垒后电子的能量分布, 曲线 2 为穿过两个势垒后电子的能量分布.

已知了电子能量分布函数 $n_0(E)$ 和 $n_v(E)$, 对它们求积分, 便可以分别得到逸出表面势垒前、后

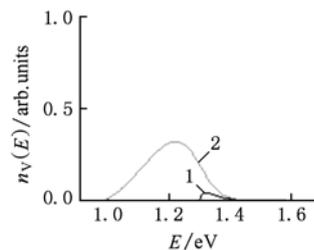


图 5 电子穿过表面 I, II 势垒后的能量分布

电子的总数量. 逸出表面电子数量的多少决定着光电流的大小. 因此, 利用这个方法, 在设定好势垒参数后, 分别求出单独穿过表面 I 势垒和穿过 I + II 势垒后的电子数量, 相除就可得到该表面势垒下两个光电流的比值. 反之, 已经知道了光电流的比值, 也可以通过拟合的方法计算出表面势垒的参数.

利用上述方法, 我们对表 1 中的实验数据进行拟合计算, 设定 I 势垒高度 $V_1 = 4.9 \text{ eV}$, 得到的表面势垒参数如表 2 所示.

表 2 表面势垒参数拟合计算结果

$I_{\text{Cs-O}}/I_{\text{Cs}}$	单势垒结构		双势垒结构			
	$b/\text{\AA}$	V_2/eV	$b/\text{\AA}$	$c/\text{\AA}$	V_2/eV	V_3/eV
44(高温)	1.4	1.36	1.2	8.0	1.42	1.0
136(低温)	1.34	1.38	1.0	7.0	1.42	0.9

4. 讨 论

根据双偶极层模型理论, 阴极在首次 Cs 激活后形成的 I 势垒, 能够将真空能级从 4.9 eV 降到 1.4 eV 左右, 而后续 Cs-O 交替激活形成的 II 势垒, 能够将真空能级再次降到 0.9 eV 左右. 整个 I + II 势垒的宽度大约在 $7\text{--}10\text{\AA}$. 表 2 中的计算数据同理论模型完全一致. 观察表 2 中数据发现:

1) 利用该方法计算的结果, 同文献[4]中对实测阴极电子能量分布曲线拟合的结果相一致.

2) 在 Cs-O 交替激活后, 原来形成的 I 势垒会变窄, 同时高度也有所增加. 这是因为在第二个偶极层(Cs-O 偶极层)形成的过程中, 第一偶极层中部分

较弱的 Be-Cs 偶极子会断开, 其中的 Cs 离子将同 O 离子结合形成更强的 Cs-O 偶极子, 导致了第一偶极层变薄, 同时势场也随之变弱.

3) 低温激活同高温激活的结果不相同:

(1) 低温首次 Cs 激活阶段, I 势垒宽度要比高温时的小一些, 这与低温激活时的阴极是富 As 表面相符; 同时势垒高度会稍有增加, 这也和图 3, 图 4 中该阶段的低温光电流比高温时要小的现象完全符合.

(2) 经过 Cs-O 交替激活后, I 势垒和 II 势垒都比高温时要窄, 真空能级也降低的更多. 这是因为高温激活后再来一次低温处理, 能够使阴极表面结构更加合理, 使 Cs, O 在表面的排列更加有序, 这也正是低温激活后的阴极光谱灵敏度比高温时高的主要原因.

5. 结 论

阴极的 (Cs, O) 激活包括单独 Cs 激活和 Cs-O 交替激活两个阶段, 这两个阶段分别对应了表面 I 势垒和 II 势垒的形成过程. 根据这两个阶段产生的阴极光电流的峰值比, 再借助电子穿过 I 势垒和 I + II 势垒后的能量分布, 经过拟合计算, 能够求出阴极激活后的表面势垒参数, 从而实现对所制备 NEA GaAs 光电阴极表面势垒的评估. 该方法简单、合理, 不需要测量阴极的电子能量分布, 因此降低了对测试手段的要求, 为多方位进行 GaAs 光电阴极的性能评估提供了非常便捷、有效的技术途径.

- [1] 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]
- [2] Zhang Y J, Chang B K, Yang Z, Niu J, Zou J J 2009 *Chin. Phys. B* **18** 4541
- [3] 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]
- [4] Niu J, Yang Z, Chang B K, Qiao J L, Zhang Y J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5002 (in Chinese) [牛军、杨智、常本康、乔建良、张益军 2009 物理学报 **58** 5002]
- [5] Su C Y, Chye P W, Pianetta P, Lindau I, Spicer W E 1979 *Surface Scienc* **86** 894
- [6] Su C Y, Lindau I, Spicer W E 1982 *Chem. Phys. Lett.* **87** 523
- [7] Su C Y, Spicer W E, Lindau I 1983 *J. Appl. Phys.* **54** 1413
- [8] Zou J J 2007 *Theory and characterization techniques of GaAs photocathode* (Nanjing: Nanjing University of Science and Technology) p28 (in Chinese) [邹继军 2007 GaAs 光电阴极理论及其表征技术研究 (南京: 南京理工大学) 第 28 页]
- [9] Fisher D G, Enstrom R E, Escher J S, Williams B F 1972 *J. Appl. Phys.* **43** 3815
- [10] Vergara G, Herrera-Gómez A, Spicer W E 1999 *Surface Sciences* **436** 83
- [11] Bartelink D J, Moll J L, Meyer N L 1963 *Phys. Rev.* **130** 972
- [12] Williams B F, Simon R E 1967 *Phys. Rev. Lett.* **18** 85
- [13] Escher J S, Schade H 1973 *J. Appl. Phys.* **44** 5309
- [14] Herrera-Gómez A, Spicer W E 1993 *Proc. SPIE* **2022** 51
- [15] Wang H M, Zhang Y F 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2226 (in Chinese) [王洪梅、张亚非 2005 物理学报 **54** 2226]

[16] Lui W W, M Fukuma 1986 *J. Appl. Phys.* **60** 1555

Appl. Phys. **105** 013714

[17] Zou J J, Chang B K, Yang Z, Zhang Y J, Qiao J L 2009 *J.*

Evaluation of surface potential barriers after activation of GaAs photocathode*

Niu Jun¹⁾²⁾ Zhang Yi-Jun¹⁾ Chang Ben-Kang^{1)†} Xiong Ya-Juan¹⁾

1) (*School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China*)

2) (*Department of Electron and Electric, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China*)

(Received 19 June 2010; revised manuscript received 19 July 2010)

Abstract

According to the ratios of the peak-values of photocurrents arising separately during the single Cs activation and during the Cs-O activation for negative electron affinity (NEA) GaAs photocathode, and the theoretical energy distributions of the photoelectrons passing separately through the single and the double potential barriers, a new method of evaluating the surface potential barrier parameters of NEA GaAs photocathode is presented. The results obtained by this method accord well with the double-dipole model theory and are in agreement with the results by fitting the experimental electrons energy distribution curve. The method is simple and efficave, which enriches the approaches to the evaluation of activation effect and surface characteristic of NEA GaAs photocathodes without increasing other test means.

Keywords: GaAs, photocathode, surface potential barrier, energy distribution

PACS: 42.70.Gi, 42.79.Pw, 71.55.Eq, 72.10.Bg

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60678043), NUST Research Funding (Grant No. 2010ZYTS032).

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