

文章编号: 0253-2239(2006)09-1400-4

GaAs 光电阴极表面电子逸出概率与波长关系的研究*

邹继军^{1,2} 陈怀林¹ 常本康¹ 王世允¹

(¹ 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)
(² 东华理工学院电子工程系, 抚州 344000)

摘要: GaAs 光电阴极量子效率公式中用到的表面电子逸出概率, 在阴极工作波段范围内通常视为与入射光子波长无关的常数。应用该结论对反射式 GaAs 光电阴极激活实验结果进行了拟合分析。实验采用分子束外延 GaAs 材料, 外延发射层厚度为 1.6 μm , 掺杂浓度为 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 分析结果显示理论曲线与实验曲线存在偏差, 而在激活台内阴极灵敏度下降后的光谱响应曲线拟合结果偏差更大。这种偏差是由于表面电子逸出概率对入射光子波长的依赖关系造成的, 并非通常认为的与波长无关。经过光谱响应曲线的拟合分析得出, 反射式阴极表面电子逸出概率与入射光子波长之间近似满足指数关系, 两者通过表面势垒因子相联系。高、低温激活后阴极表面势垒因子分别为 3.53 和 1.36。

关键词: 光电子学; 指数函数; 光谱响应; 电子逸出概率; GaAs 光电阴极; 表面势垒因子

中图分类号: TN223 文献标识码: A

Study of Relation between Surface Electron Escape Probability of GaAs Photocathode and Incident Photon Wavelength

Zou Jijun^{1,2} Chen Huailin¹ Chang Benkang¹ Wang Shiyun¹

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

Abstract: Surface electron escape probability (P) in quantum efficiency formula of GaAs photocathode commonly is taken for a constant independent of incident photon wavelength (λ) within photocathode working wave band. Quantum efficiency formula is applied in data fitting of spectral response curves of reflection-mode GaAs photocathode grown by molecular beam epitaxy, in which the epitaxial layer thickness is 1.6 μm , and doping concentration is $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Data fitting results show that theoretical curves cannot tally with experimental curves completely, especially with declined spectral response curves of photocathode in activation chamber. This deviation is caused by the relation of P and λ , and P is not a constant independent of λ . Based on the data fitting analysis of spectral response curves, it is found that the relation of P and λ for reflection-mode photocathode approximately satisfies exponential function, and P connects with λ through surface potential barrier factor (k). Photocathode surface potential barrier factors after high- and low-temperature activation process are 3.53 and 1.36 respectively.

Key words: optoelectronics; exponential function; spectral response; electron escape probability; GaAs photocathode; surface potential barrier factor

1 引 言

砷化镓(GaAs)光电阴极与多碱光电阴极相比具有光谱响应曲线平坦、量子效率高、暗发射小的特点,在高性能微光像增强器等众多领域获得了广泛的应用^[1~3]。GaAs 光电阴极是在 W. E. Spicer 光电发射“三步模型”理论指导下发明的,它有理论推

导的量子效率公式^[4~6]。量子效率公式可在给定边界条件下通过求解非平衡载流子扩散方程得到,由于 GaAs 光电阴极是负电子亲和势阴极,公式中表面电子逸出概率通常看成一个与入射光子波长无关的常数。上述量子效率公式在用于分析反射式 GaAs 光电阴极光谱响应特性时,发现理论分析结

* 教育部高等学校博士点基金(20050288010)和国防科技重点预研(404050501D)资助课题。

作者简介: 邹继军(1973~),男,湖南人,华东理工大学副教授,南京理工大学博士研究生,主要从事 GaAs 光电阴极材料、器件与测试系统的研究。E-mail: jjzou@ecit.edu.cn

收稿日期: 2005-09-21; 收到修改稿日期: 2005-12-26

果与实验结果存在一定的偏差。本文从理论和实验数据拟合的角度,对反射式阴极表面电子逸出概率与入射光子能量的关系进行了探讨,得出了两者的函数关系,并对实验结果进行了拟合分析,得到了很好的一致性。

2 表面电子逸出概率与量子效率公式

表面电子逸出概率 P 是指运动到阴极表面的光电子越过表面势垒进入真空的概率,由该定义可知, P 的大小是由到达阴极表面的电子能量分布和电子越过表面势垒的透过率共同决定。在推导量子效率公式时一般认为,阴极发射层中被光子从价带激发到导带高能级的热电子,由于运动时受到声子散射作用而损失能量,很快落到导带底几个 kT 的范围内,运行到能带弯曲区时的能量分布符合费米-狄拉克分布。当电子经过能带弯曲区运行到阴极表面时,其能量分布由 D. J. Bartelink 等^[7~9]进行了计算。当体内光电子到达阴极表面时,由于表面势垒的存在,只能以一定的透射率透过表面势垒^[10],不同能量电子的透射率 $p(E)$ 可通过求解电子波函数得到^[9]。如果已知电子到达阴极表面的能量分布 $n(E)$,又知道具有一定能量 E 的电子越过表面势垒的透射率 $p(E)$,则表面电子逸出概率就是每种能量的电子越过表面势垒透射率的平均值^[9]。

从上面的分析可以得出,由于热电子很快落到导带底几个 kT 的范围内,因而不同能量入射光子激发的电子到达阴极面时的能量分布基本相同,即

$n(E)$ 是与入射光子能量无关的量,因此 P 的大小在阴极工作波长范围内也与入射光子能量无关,而只与表面势垒有关。基于上述观点,通过求解扩散方程得到的反射式 GaAs 光电阴极量子效率公式为^[4,5,11]:

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

(1)式中 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。

3 光谱响应测试结果分析

反射式 GaAs 光电阴极激活实验采用的是分子束外延片,在重掺杂 p 型 GaAs 衬底上外延一层厚度为 $1.6 \mu\text{m}$ 、掺杂浓度为 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的发射层。外延样品首先进行化学清洗和加热净化,然后进行高、低温(Cs,O)激活实验。

激活成功后,用在线光谱响应测试仪^[12]对激活台内的阴极光谱响应特性进行了测试,测试的高、低温激活结果如图 1 所示,其中曲线 3、4 分别是低温激活结束 1 h 和 2 h 后的测试结果。可以看出,阴极灵敏度与刚激活后的曲线 2 相比有了明显下降,这主要是由于在激活台内阴极表面 Cs 的不断脱附造成的。但各波段的下降速度并不相同,长波下降快,短波下降慢,这说明各波段 P 的下降速度是不相同的,这与前面描述的 P 在阴极工作波长范围内与入射光子能量无关相矛盾。

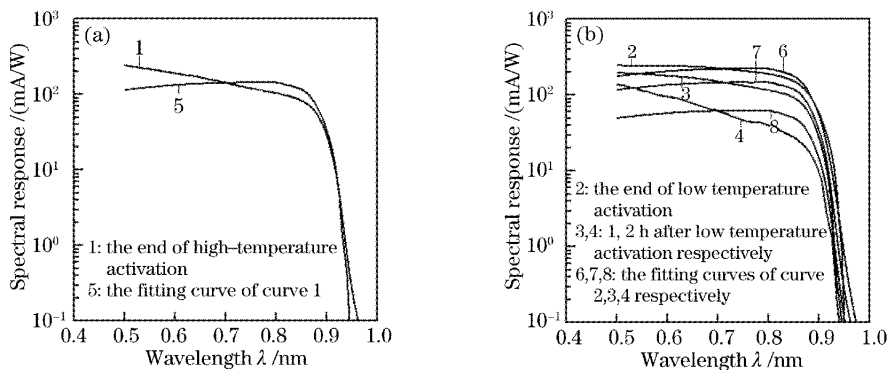


图 1 高(a)、低(b)温光谱响应实验曲线与拟合理论曲线

Fig. 1 Experimental spectral response curves and data fitting curves after two-step activation. (a) High temperature, (b) low temperature

依据量子效率公式可对阴极激活后的光谱响应曲线进行数据拟合,分析阴极的光谱响应特性^[13]。拟合时先确定阴极的电子扩散长度 L_D ,以曲线在 $800 \sim 880 \text{ nm}$ 间的拟合值为准。4 条曲线的拟合结

果显示,拟合的 L_D 有很好的 consistency,均在 $2 \mu\text{m}$ 左右。在 L_D 等于 $2 \mu\text{m}$ 时,拟合结果如图 1 所示。可以看出,拟合光谱响应曲线与实验曲线并没有完全吻合,阴极灵敏度下降越多,偏差越大。这说明量子

效率公式的分析结果与实验结果存在着不一致性。

4 表面电子逸出概率与波长的关系

造成上述矛盾或不一致性的原因是原有量子效率公式中认为的 P 的大小在阴极工作波长范围内与入射光子能量无关的结论对于反射式阴极而言并不适用。在反射式阴极中,由于光子的入射和电子的发射在同一面,由光子激发到导带中高能级的热电子主要在阴极近表面产生,它们可能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。导带中热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纳米,因而在近表面激发的一部分高能级光电子可以热电子的形式逸出。另外,由于 GaAs 材料存在电子转移现象,部分能量高于 1.71 eV 的热电子会从 Γ 能谷散射到 L 能谷,并在 L 能谷导带底热化,然后逸出^[14,15]。随着入射光子能量的升高,反射式 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,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也证实了这一点^[14,15]。

如图2所示为 GaAs:Cs-O 光电阴极的能带结构图^[4,5,9],阴极的表面势垒是由两条斜率不同的近似直线段组成的,简称 I 势垒和 II 势垒,这一形状是根据双偶极层表面模型提出的^[16]。虚线模拟的是激活台内阴极灵敏度下降后表面势垒形状的变化,由于 Cs 的不断脱附和其它杂质的不断吸附,使得 I 势垒变宽,II 势垒抬高,真空能级也不断抬高。

不同光子能量入射下阴极表面电子能量分布的不同和表面电子势垒的存在,使得不同波段光电子通过隧道效应穿越表面势垒的宽度不同。激发的光电子到达阴极表面时,短波段激发的光电子的平均能量高,需要穿越的距离短,因而逸出概率高,长波

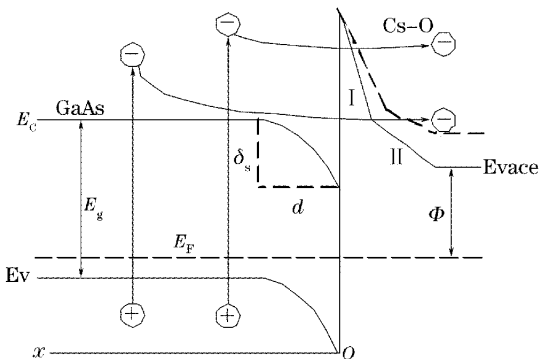


图2 GaAs:Cs-O 光电阴极的能带结构图

Fig. 2 Energy Band structure of GaAs:Cs-O photocathode

段激发的则相反,这说明 P 是入射光波长的函数。

在保持 L_D 等于 $2 \mu\text{m}$ 不变的情况下,可在 $\pm 10 \text{ nm}$ 小波段范围内应用量子效率公式拟合计算各波长处 P 的大小,计算所得曲线 1~3 的 P 与波长 λ 的关系如图 3 所示。从图上可以看出,由于 P 采用对数坐标, P 与 λ 近似满足指数关系,只是在长波段稍有偏离,从而可设 $P(\lambda)$ 具有式(2)的形式:

$$P(\lambda) = P_0 \exp[-k(\lambda - \lambda_0)], \quad (2)$$

(2) 式中 λ_0 为光谱响应曲线的起始波长, λ 为入射光波长, P_0 为入射光波长为 λ_0 时的光电子逸出概率,大小在 $0 \sim 1$ 之间, k 为表面势垒因子($k \geq 0$)。将反射式阴极量子效率公式中的 P 以 $P(\lambda)$ 形式代入,可得到修正后的量子效率公式:

$$Y_r = \frac{P_0 \exp[-k(\lambda - \lambda_0)](1 - R)}{1 + 1/aL}, \quad (3)$$

(3) 式中若 k 等于 0,则回到原量子效率公式。将(3)式用于光谱响应曲线的拟合,在 L_D 等于 $2 \mu\text{m}$ 的情况下,得到的拟合结果如图 4 所示,表 1 为拟合得到的有关阴极性能参量。

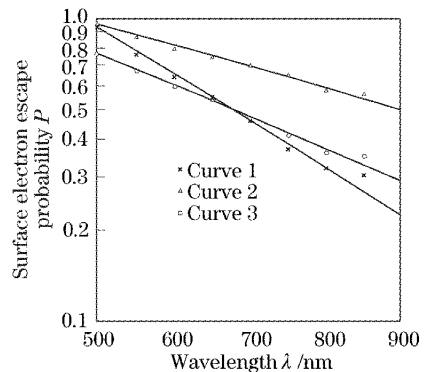


图3 P 与 λ 的关系曲线(P 为对数坐标)

Fig. 3 Relation curves of Log P versus λ

表 1 拟合光谱响应性能参量

Table 1 Fitting spectral response performance parameters

Curve	P_0	k	$L_D/\mu\text{m}$
1	0.89	3.53	2
2	0.88	1.36	2
3	0.75	2.36	2
4	0.52	4.95	2

从图 4 中可以看出,所有的实测曲线与理论拟合曲线都吻合得很好,只在长波段理论值稍有偏低,这与波长接近阈值有关。表 1 中的 k 是表面势垒因子,它有着丰富的物理内含,从直观上看,它反映的是光谱响应曲线的倾斜程度, k 越大越倾斜,表示长波响应越差,而从本质上讲,它反映的是表面势垒形状的不同。

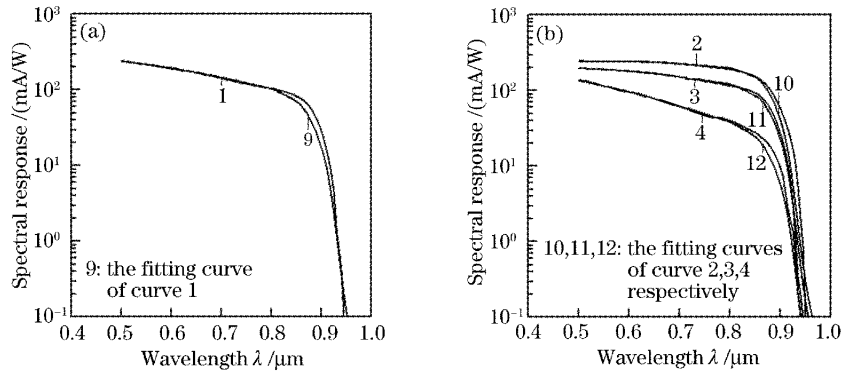


图 4 采用 $P(\lambda)$ 后的光谱响应曲线拟合结果。(a) 高温, (b) 低温

Fig. 4 Data fitting of spectral response curves after introducing $P(\lambda)$. (a) High temperature, (b) low temperature

从图 2 可以看出,当表面势垒形状发生变化时,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,因而表面势垒变化对低能电子的影响更大。低温激活后阴极性能之所以能得到提高,主要是由于(Cs,O)层结构的优化使表面势垒变窄变低,从而长波响应得到大幅提升所致,反映在 k 值的变化上就是低温激活后阴极的 k 值 1.36 远小于高温时的 3.53。低温激活后处于激活台内的阴极,由于 Cs 的脱附等原因灵敏度不断下降,表面势垒抬高变宽,使长波响应下降得更快,光谱响应曲线形状也越来越倾斜,体现在表面势垒的变化上就是 k 值越来越大,由 1.36 增加到 4.95。

5 结 论

反射式 GaAs 光电阴极量子效率公式在用来分析其光谱响应特性时,发现实验与理论拟合结果存在一定的偏差,经过理论分析发现 P 是波长的函数,并通过实验曲线拟合得出, P 与 λ 之间近似满足指数关系。该关系能更合理的解释反射式阴极光谱响应曲线形状的变化,并得到了作者所进行的大量实验结果的证实,但如何从理论上解释或推导 P 与 λ 之间的关系,仍有待进一步深入的研究。

参 考 文 献

- 1 Chang Benkang, Xu Denggao, Qian Yunsheng *et al.*. Peak value position shifting of spectral response of multialkali photocathodes [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(2): 233~237 (in Chinese)
常本康,徐登高,钱芸生等.多碱光电阴极光谱响应峰值位置移动技术研究[J]. *光学学报*, 1998, **18**(2): 233~237
- 2 Du Xiaoqing, Chang Benkang, Zou Jijun *et al.*. High quantum efficiency GaAs photocathode by gradient doping[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1411~1414 (in Chinese)
杜晓晴,常本康,邹继军等.利用梯度掺杂获得高量子效率的 GaAs 光电阴极[J]. *光学学报*, 2005, **25**(10): 1411~1414
- 3 Qian Yunsheng, Chang Benkang, Tong Moying *et al.*. Frequency spectral measurement of noise of image intensifiers

- [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 67~70 (in Chinese)
钱芸生,常本康,童默颖等.像增强器噪声频谱特性测试技术研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(1): 67~70
- 4 W. E. Spicer, A. Herrera-Gómez. Modern theory and application of photocathodes[C]. *Proc. SPIE*, 1993, **2022**: 18~33
- 5 Liu Yuanzheng, Wang Zhongchun, Dong Yaqiang. *Electron Emission and Photocathode* [M]. Beijing: Beijing University of Science and Technology Press, 1995. 308~327 (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. 308~327
- 6 Zong Zhiyuan, Chang Benkang. Calculating the quantum yield of NEA photocathode by integral[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(9): 1177~1182 (in Chinese)
宗志园,常本康.用积分法推导 NEA 光电阴极的量子产额[J]. *光学学报*, 1999, **19**(9): 1177~1182
- 7 D. J. Bartelink, J. L. Moll, N. I. Meyer. Hot-electron emission from shallow p-n junctions in silicon[J]. *Phys. Rev.*, 1963, **130**(3): 972~985
- 8 J. S. Escher, H. Schade. Calculated energy distribution of electrons emitted from negative electron affinity GaAs:Cs-O surfaces[J]. *J. Appl. Phys.*, 1973, **44**(12): 5309~5313
- 9 Zong Zhiyuan, Fu Rongguo, Qian Yunsheng *et al.*. Calculation of electron escape probability of GaAs:Cs-O NEA photocathodes [J]. *Infrared Technology*, 2002, **24**(3): 27~30 (in Chinese)
宗志园,富容国,钱芸生等. GaAs:Cs-O NEA 光电阴极电子表面逸出几率的计算[J]. *红外技术*, 2002, **24**(3): 27~30
- 10 D. G. Fisher, R. E. Enstrom, J. S. Escher *et al.*. Photoelectron surface escape probability of (Ga,In)As:Cs-O in the 0.9 to 1.6 μm [J]. *J. Appl. Phys.*, 1972, **43**(9): 3815~3823
- 11 Y. Z. Liu, J. L. Moll, W. E. Spicer. Quantum yield of GaAs semitransparent photocathodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1970, **17**(2): 60~62
- 12 Chang Benkang, Du Xiaoqing, Liu Lei *et al.*. The automatic recording system of dynamic spectral response and its applications [C]. *Proc. SPIE*, 2003, **5209**: 209~218
- 13 Qian Yunsheng, Zong Zhiyuan, Chang Benkang. Property evaluation of NEA photocathodes [J]. *Vacuum Science and Technology*, 2001, **21**(6): 445~448 (in Chinese)
钱芸生,宗志园,常本康.负电子亲和势光电阴极评估技术研究[J]. *真空科学与技术*, 2001, **21**(6): 445~448
- 14 R. C. Eden, J. L. Moll, W. E. Spicer. Experimental evidence for optical population of the X minima in GaAs[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1967, **18**(15): 597~599
- 15 D. E. Aspnes. GaAs lower conduction-band minima: Ordering and properties[J]. *Phys. Rev. B*, 1976, **14**(12): 5331~5343
- 16 C. Y. Su, W. E. Spicer, I. Lindau. Photoelectron spectroscopic determination of the structure of (Cs,O) activated GaAs (110) surface[J]. *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**(3): 1413~1422