

透射式蓝延伸 GaAs 光电阴极光学结构对比*

赵静¹⁾ 常本康^{1)†} 张益军¹⁾ 张俊举¹⁾ 石峰²⁾ 程宏昌²⁾ 崔东旭³⁾

1) (南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

2) (微光夜视技术实验室, 西安 710065)

3) (西安应用光学研究所, 西安 710065)

(2011 年 4 月 6 日收到; 2011 年 6 月 7 日收到修改稿)

用金属有机物化学气相沉积法外延制备了一个透射式蓝延伸 GaAs 光电阴极, 积分灵敏度达到 $1980 \mu\text{A}/\text{lm}$, 同时与美国 ITT 公司的一条蓝延伸阴极光谱响应曲线对比, 分别对两者进行了光学结构拟合. 结果表明, 国内阴极在 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 层厚度、Al 组分、电子扩散长度和后界面复合速率上与国外存在差距, 这导致国内阴极的蓝延伸性能不及国外. 国内蓝延伸阴极的表面电子逸出几率、发射层厚度与国外阴极拟合结果一致, 这使得两者长波响应性能差别远小于短波部分的差别. 另外响应波段全谱的吸收率小于国外阴极, 导致国内透射式蓝延伸 GaAs 光电阴极光谱响应、积分灵敏度尚不及国外.

关键词: GaAs 光电阴极, 蓝延伸, 光电发射, 光学结构

PACS: 78.40.Fy, 79.60.Dp, 78.67.Pt

1 引言

负电子亲和势 GaAs 光电阴极具有量子效率高、长波响应大的特点, 在微光像增强器中的应用极为广阔^[1-4]. 由于蓝光光谱响应的增强能够极大地增加像管对沙漠地形目标的探测、识别能力, 若将响应波长范围延伸到蓝绿光波段, 则得到的蓝延伸微光器件在泥土、沙漠等环境下的应用前景更为广泛^[5]. 近年来对标准 GaAs 光电阴极的研究很多, 国内外各研究机构主要致力于阴极灵敏度的提高. 对蓝延伸光电阴极的研究主要是从 GaN 紫外光电阴极的长波延伸方面来展开, 设计 AlGaIn/InGaIn 光电阴极, 通过控制发射层 In 组分实现响应光谱的蓝延伸特性^[6]. 然而经过国内外几十年的系统研究, GaAs 光电阴极的研究工作已经比较成熟, 在此基础上对阴极结构进行调整, 从 GaAs 光电阴极光谱响应曲线的短波部分来研究蓝延伸性能具有理论可行性和现实重要性.

GaAs 光电阴极的短波响应主要取决于 GaAs 发射层的厚度、 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 窗口层的 Al 组分和厚度等因素. Sinor 等^[5] 研究了禁带宽度随窗口层 Al 组分增加时的变化情况, 指出 Al 组分越高, 禁带能量越大, 即响应波长越小. Kenneth 等^[7] 设计出超薄的 AlGaAs/GaAs 光电阴极, 在 530 nm 处能获得 40% 的量子效率, 在 400 nm 处的光谱响应为 48 mA/W, 但此阴极窗口层和发射层都是纳米量级的超薄厚度, 在国产制备工艺上不易实现. Guo 等^[8] 提出了两种新的 GaAs 光电阴极结构得到短波光谱响应, 即在 GaAlAs 窗口层上生长变 Al 组分的 GaAlAs 保护层, 或是生长薄的 GaAs 保护层, 这种设计减小了光电阴极材料内部的晶格失配, 但是所得阴极在 400 nm 处的光谱响应比较低, 只有 2 mA/W.

本文通过设计透射式 GaAs 光电阴极光学结构参数, 制备蓝延伸阴极样品, 进行光谱响应测试. 同时与目前国际上报道的较好的蓝延伸阴极光谱

* 国家自然科学基金 (批准号: 61171042)、江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目 (项目编号: CX09B-096Z) 和南京理工大学自主科研专项计划 (项目编号: 2010ZYT032) 资助的课题.

† E-mail: bkchang@mail.njust.edu.cn

响应曲线进行对比研究,找出国内外蓝延伸阴极光学结构上的差距,对国产蓝延伸 GaAs 光电阴极的进一步理论研究与实验制备具有指导意义.

2 实验

透射式蓝延伸 GaAs 光电阴极仍然可以看成是由玻璃基底、 Si_3N_4 增透层、 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 窗口层、GaAs 发射层组成的四层膜系结构,如图 1 所示. 与标准 GaAs 光电阴极不同之处是发射层和窗口层的参数取值,包括光学厚度与 Al 组分.

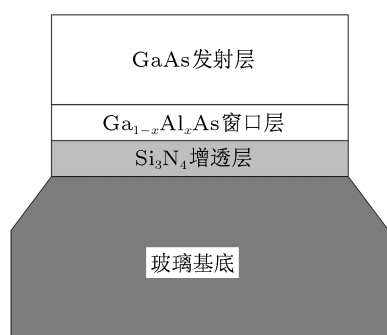


图 1 透射式蓝延伸 GaAs 光电阴极结构

前期研究结果表明, GaAs 光电阴极发射层参数影响光谱响应曲线的长波部分性能,窗口层参数影响光谱响应曲线的短波部分性能^[9]. 蓝延伸光电阴极主要是在短波蓝光部分有较大响应,因此结构上应尽可能减小窗口层厚度,同时提高 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 材料禁带宽度,提高短波响应. 根据带宽与 Al 组分 x 值的关系^[10],如 (1) 式,应增大 Al 组分值.

$$E_j(x) = 1.424 + 1.594x + x(1-x)(0.127 - 1.310x). \quad (1)$$

设计玻璃基底厚 5 mm, Si_3N_4 层厚 0.1 μm , $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 层与 GaAs 层的总厚度为 1.5 μm , Al 组分值近似为 0.8. 实验中,用金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 外延制备得到了透射式蓝延伸 GaAs 光电阴极,将样品切割成直径为 18 mm 的圆片,以达到透射式阴极组件的尺寸标准要求. 激活前先将样品的 GaAs 保护层腐蚀掉,然后在 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 窗口层上镀一层 Si_3N_4 增透膜,再在 Si_3N_4 膜上热粘接玻璃,最后通过选择性腐蚀的方法依次腐蚀掉 GaAs 衬底和 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 阻挡层,制备成如图 1 所示四层结构的透射式阴极组件.

利用紫外 - 可见 - 近红外分光光度计 UV-3600 测试组件反射率、透射率的实验曲线,结果如图 2(a) 所示. 在完成对阴极组件的化学清洗和热净化后,将阴极组件放入超高真空激活室激活 (本底真空度不低于 10^{-9} Pa),阴极激活采用“高低温两步激活”法,并都采用 Cs 源连续、O 源断续的优化激活工艺. 激活结束后,对阴极样品钢封成管,利用在线光谱响应测试仪测试得到样品的光谱响应实验曲线,如图 2(b) 所示,短波响应能延伸到 400 nm. 图 2(b) 中同时给出美国 ITT 公司一条较好的蓝延伸 GaAs 光电阴极实验曲线进行对比^[11].

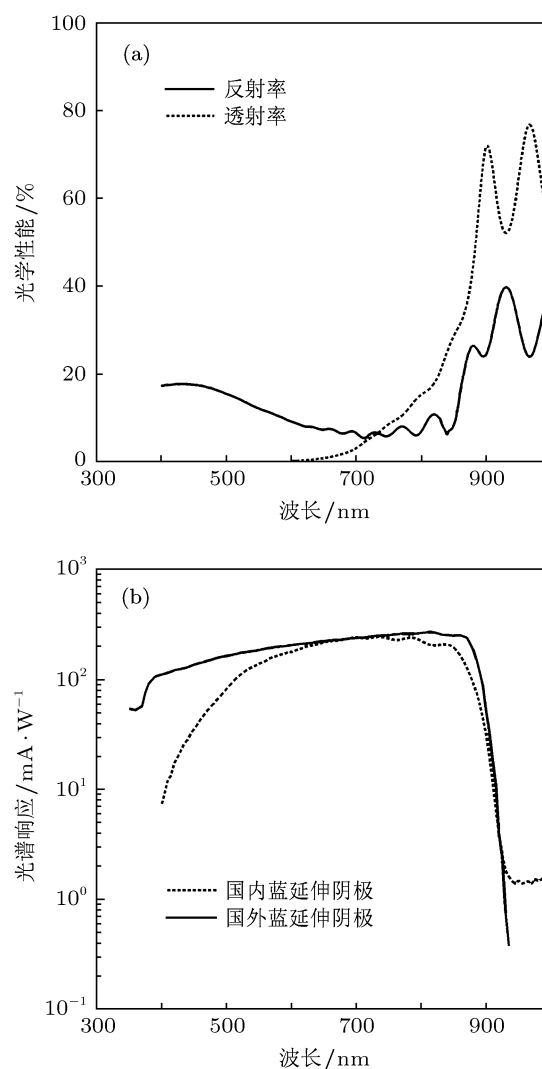


图 2 透射式蓝延伸 GaAs 光电阴极实验曲线 (a) 国内阴极光学性能曲线; (b) 国内外阴极光谱响应曲线

3 结果与讨论

从图 2(b) 中可以看出国外蓝延伸阴极光谱响

应在整个宽光谱内比国内的都要好一些,特别是长短波截止更为明显,这与光电阴极的材料性能和制备工艺都有关系. 两条实验曲线的光谱响应参数对比如表 1 所示. 可以看出国内蓝延伸 GaAs 光电阴

极起始波长不及国外阴极的短, 峰值响应较低, 但峰值波长要比国外的更偏向短波部分, 量子效率峰值两者相差不多, 都达到了 42%, 计算表明国内光电阴极积分灵敏度比国外的要低 17%.

表 1 国内外透射式蓝延伸 GaAs 光电阴极光谱响应参数对比

曲线	起始波长/nm	截止波长/nm	峰值响应/mA·W ⁻¹	峰值波长/nm	量子效率峰值/%	积分灵敏度/μA·lm ⁻¹
国内	400	925	242.0	735	42.4	1980
国外	350	925	265.9	810	42.2	2392

为了进一步研究两个阴极的光学结构, 需要对两者的光谱响应曲线进行拟合分析. 对均匀掺杂透射式 GaAs 光电阴极, 设定边界条件后求解扩散方程可以得到量子效率公式^[12]. 考虑到光电阴极结

构中 Ga_{1-x}Al_xAs 窗口层对入射光子的截止影响, 对已有公式进行 Ga_{1-x}Al_xAs 层的吸收修正, 另外将光电阴极组件的光学性能影响考虑进去^[9,13], 得到修正后的量子效率公式如下:

$$Y_T(h\nu) = \frac{P \cdot (1 - R_{h\nu}) \cdot \exp(-\beta_{h\nu} T_w) \cdot \alpha_{h\nu} L_D}{\alpha_{h\nu}^2 L_D^2 - 1} \times \left\{ \frac{\alpha_{h\nu} D_n + S_v}{(D_n/L_D) \cdot \cosh(T_e/L_D) + S_v \cdot \sinh(T_e/L_D)} - \frac{\exp(-\alpha_{h\nu} T_e) \cdot [S_v \cdot \cosh(T_e/L_D) + (D_n/L_D) \cdot \sinh(T_e/L_D)]}{(D_n/L_D) \cdot \cosh(T_e/L_D) + S_v \cdot \sinh(T_e/L_D)} - \alpha_{h\nu} L_D \cdot \exp(-\alpha_{h\nu} T_e) \right\}, \quad (2)$$

式中 P 是表面电子逸出几率, $R_{h\nu}$ 是光电阴极的反射率, 利用薄膜光学矩阵公式计算为波长的函数^[9,14], T_w 是光电阴极窗口层的厚度, $\beta_{h\nu}$ 是 Ga_{1-x}Al_xAs 材料的吸收系数, S_v 是后界面复合速率, L_D 是阴极材料电子扩散长度, D_n 是电子扩散系数, T_e 是阴极发射层的厚度, $\alpha_{h\nu}$ 是 GaAs 材料的吸收系数.

光谱响应 $S(\lambda)$ 的计算可根据其与量子效率的相互关系得到:

$$Y_T(h\nu) = 1.24 S(\lambda)/\lambda, \quad (3)$$

式中 $S(\lambda)$ 单位取 mA/W, λ 是入射光子的波长, 以 nm 为单位. 利用实验或计算获得的光谱响应曲线积分可以计算光电阴极的积分灵敏度^[9].

利用均匀掺杂阴极的相关公式 (2) 和 (3) 对图 2(b) 中的两条光谱响应实验曲线分别进行拟合, 样品结构如图 1 所示. 对国内样品结构设计值已知,

但由于制备工艺的限制, 膜层真实值仍然会偏离设计值, 设定误差控制在 7% 以内拟合计算. 另外实验中样品发射层采用的是指数掺杂, 为了便于对比, 对掺杂浓度加权平均计算为等效的均匀掺杂, 所得拟合结果有少许偏差, 但仍有一定的参照意义. 由于国外光电阴极结构参数未知, 拟合时可以控制稍大的曲线误差, 设为 10%.

拟合计算得到了两个样品的结构、性能等参数结果, 列入表 2 中, 可以看出国内外蓝延伸 GaAs 光电阴极发射层厚度差别不大. 研究表明一定范围内发射层越薄, 长波部分响应越好, 这样每种结构光电阴极的发射层厚度都存在一个最佳值^[10]. 由于制备工艺限制了国产阴极膜层厚度的精确控制, 而国外光电阴极 Ga_{1-x}Al_xAs 窗口层更薄、Al 组分更大, 这导致了光谱响应曲线短波部分的差异, 从而国外光电阴极光谱响应的短波截止也更为明显.

表 2 国内外透射式蓝延伸 GaAs 光电阴极光谱响应曲线拟合结果

曲线	发射层厚度/μm	窗口层厚度/μm	Al 组分	表面逸出几率	电子扩散长度/μm	后界面复合速率/cm·s ⁻¹
国内	0.9—1.4	0.2	0.8	0.47—0.51	2.2—3.5	5×10 ⁴
国外	0.9—1.5	0.1	1.0	0.48—0.52	2.1—5.6	10 ⁰ —10 ⁴

在表面电子逸出几率上, 国内外阴极差距已不大, 对蓝延伸光电阴极都能达到 $0.5 \mu\text{m}$ 左右的水平, 表明采用 MOCVD 外延生长的阴极材料表面具有较少的缺陷, 对光电子发射效率影响不大. 此外电子扩散长度与材料及其制备工艺有关, 国内蓝延伸光电阴极至多达到 $3.5 \mu\text{m}$, 但对于实验中很薄的蓝延伸阴极样品来说, 这个范围已足够光电子输运到表面逸出; 而由于材料的优越性, 国外光电阴极电子扩散长度可以达到 $5 \mu\text{m}$ 以上. 在后界面复合速率方面, 国内光电阴极平均都在 $10^4\text{--}10^5 \text{ cm/s}$ 之间, 限制了蓝延伸阴极光谱响应的进一步提高; 而国外光电阴极后界面复合速率已能做到小于 10^4 cm/s , 此时阴极后界面对量子效率几乎没有影响, 即后界面复合效应已不影响光电子发射了.

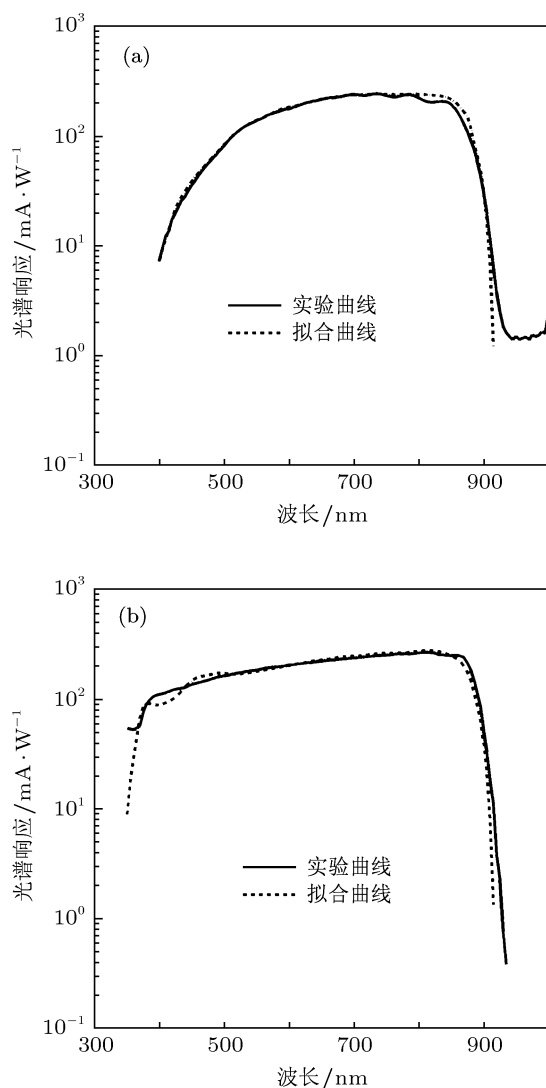


图3 透射式蓝延伸 GaAs 光电阴极光谱响应曲线拟合结果 (a) 国内阴极; (b) 国外阴极

在表 2 的拟合范围内选择合适的参数计算对

应最小相对拟合误差的曲线, 所得结果如图 3 所示. 图 3(a) 中, 对国内实验曲线短波部分拟合很一致, 长波部分 $800\text{--}900 \text{ nm}$ 波段上拟合值偏大, 使得拟合的光谱响应曲线积分灵敏度达到 $2082 \mu\text{A/lm}$, 但全谱内曲线拟合相对误差仅为 5.84% . 图 3(b) 中拟合的国外蓝延伸阴极光谱响应曲线积分灵敏度达到 $2387 \mu\text{A/lm}$, 与实验数据非常接近, 全谱内曲线拟合误差为 8.91% .

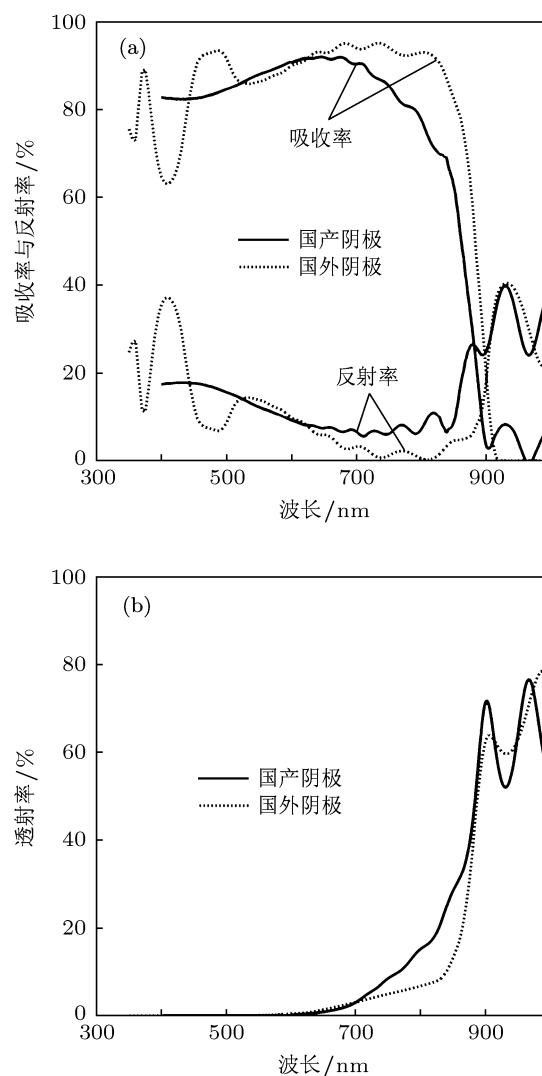


图4 国内外透射式蓝延伸 GaAs 光电阴极光学性能对比 (a) 吸收率与反射率; (b) 透射率

根据结构参数对国外光电阴极的光学性能曲线进行计算, 同时与国内阴极的实验曲线进行对比, 如图 4 所示. 分析光学性能对光谱响应的影响, 从图 4(a) 中可以看出, 短波部分国外阴极反射率曲线出现明显的凹凸变化, 这与 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ ($x = 1.0$) 材料的光学常数值有关, 导致了图 3(b) 中光谱响应拟合曲线在 400 nm 左右处也出现了明显的不平整;

而国内阴极在相应波段则要平滑得多. 另外在长波部分, 国内阴极反射率、透射率要大于国外阴极, 而吸收率要小于国外阴极, 反映在光谱曲线上就是两者长波段的响应差距.

用积分值定量表征全波段上光学性能整体效应^[15], 积分吸收率计算如下:

$$A_f = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} A(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

式中 λ_1, λ_2 为所研究波段的起止波长, $A(\lambda)$ 为薄膜光学矩阵理论计算得到的吸收光谱函数^[14]. 类似可计算积分反射率和积分透射率, 根据能量守恒三者之和为 $(\lambda_2 - \lambda_1)$. 这样计算得到了两个样品在 350—1000 nm 间的光学性能积分结果, 列入表 3 中.

表 3 国内外透射式蓝延伸 GaAs 光电阴极光学性能积分结果

曲线	积分吸收率/nm	积分反射率/nm	积分透射率/nm
国内	447.5	96.8	105.7
国外	468.9	85.9	95.2

从表 3 可以看出国内蓝延伸 GaAs 光电阴极在响应波段全谱上的总体反射率和透射率都要明显高于国外阴极, 集中体现为国内阴极吸收率低, 吸

收光子少, 导致阴极体内激发的光电子也少, 从而最终光谱响应、积分灵敏度都要比国外阴极低.

4 结 论

实验用 MOCVD 外延生长了透射式蓝延伸 GaAs 光电阴极样品, 并用光谱响应测试仪测试得到了其光谱响应曲线, 同时与美国 ITT 公司已报道的一条积分灵敏度达 2392 $\mu\text{A}/\text{lm}$ 的蓝延伸曲线进行了对比分析, 国产实验室水平的蓝延伸样品积分灵敏度达到 1980 $\mu\text{A}/\text{lm}$. 利用短波截止和光学性能修正后的均匀掺杂量子效率公式对两条实验曲线拟合并得到了样品结构参数. 结果表明, 由于制备工艺的限制, 国内阴极在 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 层厚度和 Al 组分上与国外存在差距, 而由于材料性能的限制, 国内阴极在电子扩散长度和后界面复合速率上比国外阴极稍差, 这导致国内阴极的蓝延伸性能不及国外阴极. 但国内阴极表面电子逸出几率能达到 0.5 左右, 与国外阴极一致, 设计的发射层厚度与国外拟合结果也是一致的, 这使得两者长波响应性能差别远小于短波部分的差别. 这些结论对改善国产透射式蓝延伸 GaAs 光电阴极的结构设计与制备工艺具有一定意义.

- [1] Guo L J, Wüstenberg J P, Oleksiy A, Bauer M, Aeschlimann M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3200 (in Chinese) [郭立俊, Wüstenberg J P, Oleksiy A, Bauer M, Aeschlimann M 2005 物理学报 **54** 3200]
- [2] Zhou L W, Li Y, Zhang Z Q, Monastyrski M A, Schelve M Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3591 (in Chinese) [周立伟, 李元, 张智谔, Monastyrski M A, Schelve M Y 2005 物理学报 **54** 3591]
- [3] Liu Z, Sun Y, Peterson S, Pianetta P 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 241107
- [4] Zhang Y J, Chang B K, Yang Z, Niu J, Zou J J 2009 *Chin. Phys. B* **18** 4541
- [5] Sinor T W, Estrera J P, Phillips D L, Rector M K 1997 *Proc. SPIE* **2551** 130
- [6] Leopold D J, Buckley J H, Rebillot P 2005 *J. Appl. Phys.* **98** 043525.
- [7] Kenneth A C, Verle W A, Hugh F M 1990 *Proc. SPIE* **1243** 99
- [8] Guo H, Feng N, Xiang S M 2005 *Proc. SPIE* **5644** 579
- [9] Zhao J, Zhang Y J, Chang B K, Xiong Y J, Zhang J J, Shi F, Cheng H C, Cui D X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 107802 (in Chinese) [赵静, 张益军, 常本康, 熊雅娟, 张俊举, 石峰, 程宏昌, 崔东旭 2011 物

理学报 **60** 107802]

- [10] Aspnes D E, Kelso S M, Logan R A, Bhat R 1986 *J. Appl. Phys.* **60** 754
- [11] Smith A, Passmore K, Sillmon R 2002 *New Developments in Photodetection 3rd Beaune Conference* Beaune, France, 17–21 June, 2002
- [12] Liu Y Z, Wang Z C, Dong Y Q 1995 *Electron Emission and Photocathode* (Beijing: Beijing University of Science and Technology Press) p327 (in Chinese) [刘元震, 王仲春, 董亚强 1995 电子发射与光电阴极 (北京: 北京理工大学出版社) 第 327 页]
- [13] Zhang Y J, Niu J, Zhao J, Zou J J, Chang B K, Shi F, Cheng H C 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 093108
- [14] Tang J F, Gu P F, Liu X, Li H F 2006 *Modern Optical Thin Film Technology* (Zhejiang: Zhejiang University Press) p20 (in Chinese) [唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 李海峰 2006 现代光学薄膜技术 (浙江: 浙江大学出版社) 第 20 页]
- [15] Zhao J, Chang B K, Xiong Y J, Zhang Y J 2011 *Chin. Phys. B* **20** 047801

Comparison between transmission-mode extended blue GaAs photocathodes in optical structure*

Zhao Jing¹⁾ Chang Ben-Kang^{1)†} Zhang Yi-Jun¹⁾ Zhang Jun-Ju¹⁾ Shi Feng²⁾
Cheng Hong-Chang²⁾ Cui Dong-Xu³⁾

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

2) (Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China)

3) (Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

(Received 6 April 2011; revised manuscript received 7 June 2011)

Abstract

One transmission-mode extended blue GaAs photocathode is prepared by MOCVD, whose integral sensitivity is $1980 \mu\text{A}/\text{lm}$. Its spectral curve is compared with the spectral curve of ITT photocathode for analyzing optical structure. The comparison indicates that the differences lie in the thickness and the Al mole value of the $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ window layer, electron diffusion length, and back-interface recombination velocity, which make the photocathode in this experiment inferior to that of ITT in extended blue performance. However our surface electron-escape probability and the thickness of the GaAs active layer are in accordance with those of ITT, which leads their difference in the long waveband part to be less than in the short one. In addition, our absorptivity in the whole response waveband is smaller than that of ITT photocathode, which leads the spectral response and integral sensitivity of the domestic transmission-mode extended blue GaAs photocathode to be inferior to the exotic one.

Keywords: GaAs photocathode, extended blue, photoelectric emission, optical structure

PACS: 78.40.Fy, 79.60.Dp, 78.67.Pt

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61171042), the Research and Innovation Plan for Graduate Students of Jiangsu Higher Education Institutions, China (Grant No. CX09B.096Z), and the Nanjing University of Science and Technology Researching Funding, China (Grant No. 2010ZYT032).

† E-mail: bkchang@mail.njust.edu.cn