

〈综述与评论〉

负电子亲和势光电阴极 50 年史话

常本康

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 本文是负电子亲和势光电阴极发现 50 周年的纪念文章, 简要回顾了过去的成绩, 现在的困难及今后的展望。经过近 30 年的努力, 我国 MOCVD 生长的反射式 GaAs 光电阴极的积分灵敏度已达到 3516 $\mu\text{A}/\text{lm}$, 目前存在的困难是光电阴极寿命问题, 寿命问题解决了, 高性能微光像增强器以及 EBAPS 数字器件可以缩短与西方的差距。如果高灵敏度长寿命的 GaAs:O-Cs 光电阴极真正取代了目前大科学装置中的铜阴极, 基于我国大科学装置的基础研究才会迎来真正的科学春天。

关键词: 光电阴极; 像增强器; 能带结构; 光源; EBAPS

中图分类号: O462.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2015)10-0801-06

Negative Electron Affinity Photocathode of Fifty Years

CHANG Ben-kang

(School of electronic engineering and optoelectronic technology,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: This article is the fifty year anniversary of the discovery photocathode of negative electron affinity, and a brief review of the past achievements, the present difficulties and future outlook. After nearly 30 years of efforts, the integral sensitivity of the MOCVD growth of GaAs reflection-mode photocathode in China has reached 3516 $\mu\text{A}/\text{lm}$. Existing difficulties is photocathode life problem, life problem resolved, LLL image intensifier and EBAPS digital device of high performance can shorten the gap with the West. If the GaAs:O-Cs photocathode of high sensitivity and long life truly replace the copper cathode in the current big scientific device, based on the basic research of China's big scientific device will usher in a real scientific spring.

Key words: photocathode, image intensifier, band structure, optical source, EBAPS

0 引言

2015 年是负电子亲和势 (NEA) 光电阴极 GaAs 发现 50 周年^[1], 在过去的 50 年中, 从 GaAs、GaN、GaAlAs 以及 GaAlN 都取得了长足的发展, 其中 MOCVD 生长的反射式 GaAs 光电阴极的积分灵敏度已达到 3516 $\mu\text{A}/\text{lm}$ ^[2]。

下面将介绍 NEA 光电阴极过去取得的成就、今天遇到的困难以及未来的展望, 重点讨论光电阴极寿命问题。

1 过去取得的成就

自 20 世纪 30 到 60 年代, 人们共发现了 6 种正电子亲和势 (PEA) 光电阴极, 即银-氧-铯 (Ag-O-Cs, 1930)^[3], 铯-铋 (Cs_3Sb , 1936), 铋-银-氧-铯 (Bi-Ag-O-Cs, 1938), 钠-钾-铋 (Na_2KSb , 1955), 钠-钾-铋-铯 ($\text{Na}_2\text{KSb}[\text{Cs}]$, 1955) 和钾-铯-铋 (K_2CsSb , 1963) 光电阴极^[4]。依据 W.E.Spicer 的光电发射“三步模型”理论, 如果材料的有效电子亲和势小于零, 则由光照激发产生的光电子只要能从阴极体内运行到表面, 就可以发射到真空而无需过剩的动能去克服材料表面的势垒, 这样光电子的逸出深度和几率都将大大增加, 发射效率将会大幅度提高^[5]。这一推测于 1965 年被 J.J.Scheer 和 J.Vanlaar 所证实, 他们首先在

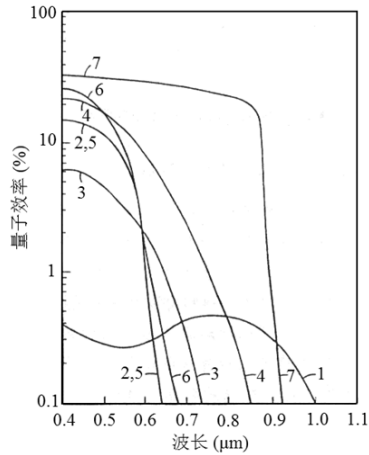
收稿日期: 2015-09-15; 修订日期: 2015-10-11

作者简介: 常本康 (1950-), 博士, 教授, 博导, 主要研究方向为微光夜视和多光谱图像融合技术。

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划培育项目, 编号: 91533108。

重掺杂 P 型 GaAs 基底上覆盖一层 Cs, 得到了一种具有高量子效率的新型光电阴极, 他们认为这种阴极具有零有效电子亲和势^[1]。3 年后 A.A.Turnbull 和 G.B.Evans 发现用 Cs、O 交替覆盖 GaAs 表面比单用 Cs 可以获得更负的有效电子亲和势和更高的光电发射。在光电阴极的发展史上, GaAs NEA 光电阴极的出现可以说是一个重要的里程碑, 因为它和以往“靠实验和运气”发现的光电阴极不同, 它是理论指导的产物, 标志着光电阴极的研究有了质的飞跃。

图 1 给出了 NEA 与其它 PEA 光电阴极的量子效率曲线, NEA GaAs[Cs-O]光电阴极在可见光和近红外区域具有更高的响应能力和更小的暗发射电流, 在微光夜视成像器件、真空电子源、电子束平面曝光、线性加速器及第四代光源等领域有着重要的应用。



1: Ag-O-Cs; 2: Cs₃Sb; 3: Bi-Ag-O-Cs; 4: [Cs]Na₂KSb;
5: Na₂KSb; 6: K₂CsSb; 7: GaAs[Cs-O]

图 1 NEA 与其它 PEA 光电阴极的量子效率曲线

Fig.1 Quantum efficiency curves of NEA and other PEA photocathodes

1995 年我们开始搭建光电阴极研究系统, 如图 2^[6]; 到 2000 年, 利用该系统在 P 型 GaAs 基片上获

得 1000 $\mu\text{A}/\text{lm}$ 左右的反射式积分灵敏度。2005 年利用 MBE 生长的变掺杂 GaAs 材料, 获得 1800 $\mu\text{A}/\text{lm}$ ^[7-8]。

2005 年以后, 我们将工作重心转移到反射式模拟透射式光电阴极研究^[9-13]。

2008 年, 利用 MBE 生长的透射式变掺杂 GaAs 光电阴极平均积分灵敏度达到 1350 $\mu\text{A}/\text{lm}$ ^[14-16], 2012 年, 利用 MOCVD 生长的透射式变掺杂 GaAs 光电阴极平均积分灵敏度达到 2000 $\mu\text{A}/\text{lm}$ 以上, 最高 2320 $\mu\text{A}/\text{lm}$, 与美国 ITT 公司当前报道的水平相当^[17-30]。制备的反射式光电阴极的光谱灵敏度与量子效率如图 3 所示。透射式光电阴极的结构与能带图见图 4, 并作为一种先进的透射模式梯度掺杂光电阴极被广泛应用^[31-35]。



1.显示器; 2.四极质谱仪控制箱; 3.主机; 4.微弱信号处理模块;
5.光谱响应电源; 6.磁力传输杆; 7.四极质谱仪; 8.超高真空激活腔室; 9.表面分析系统; 10.光栅单色仪; 11.Cs 源程控电流源; 12.O 源程控电流源; 13.汞灯电流源; 14.斩波器电源

图 2 GaAs 光电阴极制备与测控系统

Fig.2 GaAs photocathode preparation and measurement control system

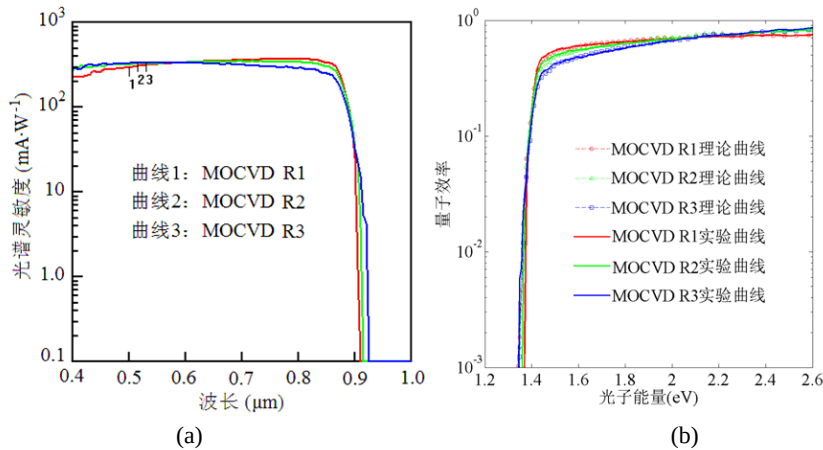


图 3 反射式变掺杂光电阴极的光谱灵敏度(a)与量子效率(b)

Fig.3 Spectral sensitivity (a) and quantum efficiency (b) of the reflection-mode varying doping photocathode

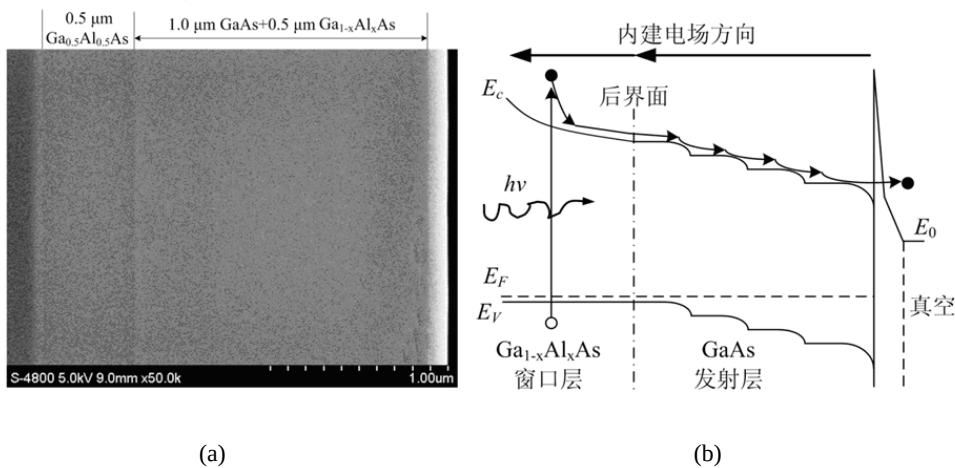


图4 透射式变掺杂光电阴极的结构(a)与能带图(b)

Fig.4 Structure (a) and energy band diagram (b) of the transmission-mode varying doping photocathode

2 今天遇到的困难

关于 NEA 光电阴极研究目前面临的困难，无非是寿命问题、高低温激活的原理问题、六角结构宽带响应光电阴极 Cs/O 交替光电流不升的问题、禁带宽度与热清洗温度的关系等问题，还可以列出许多，但我认为寿命问题解决了，才有利于其他问题的解决。

以 NEA 光电阴极为转换面的微光像增强器的寿命，2001 年以前欧美主要厂商，例如 ITT 报道的最小值是 10000 h，2001 年以后，在产品说明中再未见寿命的有关报道^[36]。至于利用 GaAs 光电阴极的 EBCCD、EBAPS 等新型器件，寿命更是一个秘而不宣的问题。对光源中应用的 GaAs:Cs 光电阴极，Cornell 报道的是 100 h^[37]，JLab FEL 是 30 h^[38]，KER/JAEA 是 20 h^[39-40]。由于在现代光源中 GaAs:Cs 光电阴极的寿命太短，各国又将研究重点转向多碱光电阴极。

关于 GaAs 光电阴极的寿命问题，各国学者进行了长期研究。Durek 等人研究了水蒸汽对 GaAs 阴极稳定性的影响，并定量地分析了阴极寿命与水蒸气分压强之间的关系，通过拟合得到了如下关系式^[41]：

$$\tau = \tau_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{-n} \tag{1}$$

式中： $n=1.01$ ， $\tau_0=7800\text{ s}$ ， $p_0=10^{-8}\text{ Pa}$ 。该式表明阴极寿命近似与水蒸气分压强 p 成反比。Grames 等人在将系统真空度提高到 10^{-10} Pa 的情况下，阴极寿命达到了 2~3 周^[42]。Wada 等人曾通过对阴极所在真空系统充入不同气压的 CO_2 、 CO 和 H_2O ，观察阴极的光电流随时间的衰减情况^[43]。Yee 等人认为光电流下降主要是由于 Cs 的脱附导致阴极表面的 Cs/O 比及表面层结构发生改变，从而破坏了阴极表面的最佳 NEA

状态^[44-46]。Machuca 等人则认为与氧在表面的吸附有关^[47-48]，Calabres 等人也认为导致 GaAs 光电阴灵敏度下降的主要原因是真空系统中的有害残余气体与阴极表面激活层作用的结果，而不是 Cs 的脱附^[49-50]。

在超高真空系统中，我们研究了不同光照强度时光电流变化，如图 5 所示^[51-52]；研究了真空系统中阴极灵敏度衰减后，通过重新活化后光电流的衰减变化曲线，如图 6 所示^[9]；研究了在不同 Cs 气氛下阴极光电流随时间的衰减，如图 7 和图 8 所示^[51-52]。

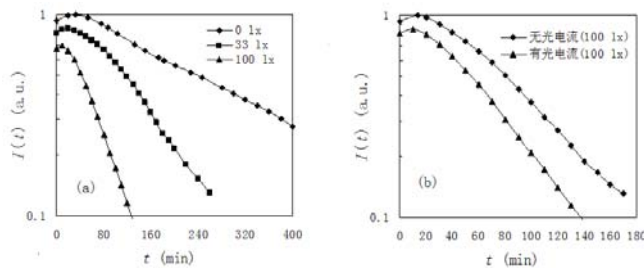


图 5 (a)在不同强度光照时阴极光电流和(b)有无光电流流过时阴极光电流

Fig.5 The cathode current (a) in different intensities of light the cathode current and (b) there is no light current flowing through

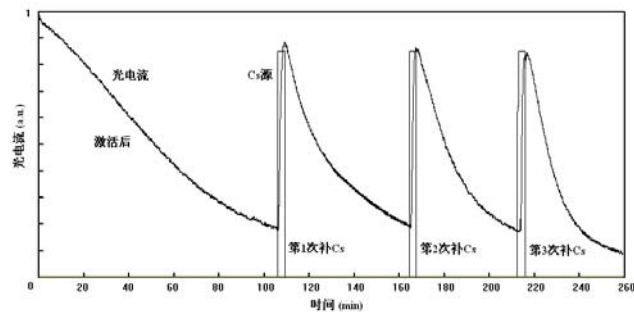


图 6 阴极激活和重新活化后光电流衰减

Fig.6 The cathode activation and recesium photocurrent decay

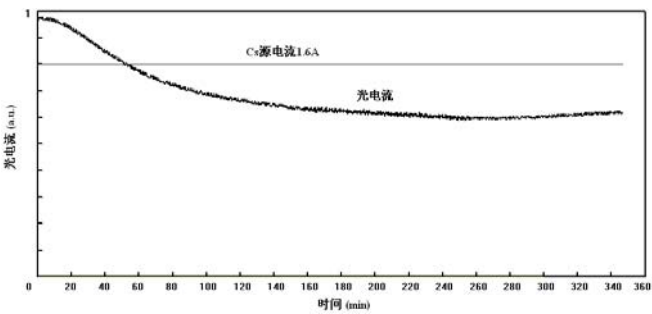


图7 阴极激活后在一定Cs源电流下强光照阴极光电流衰减
Fig.7 The attenuation of photocurrent at a certain Cs source, current after the cathode activation

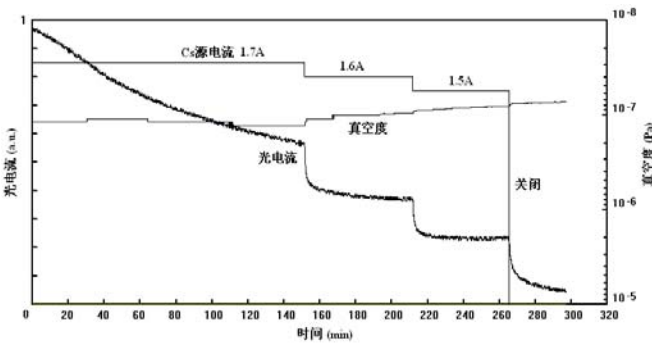


图8 阴极激活后变化Cs源电流下强光照阴极的光电流衰减
Fig.8 The attenuation of photocurrent at varying Cs source current after the cathode activation

为了研究超高真空系统中GaAs光电阴极光电流衰减,阴极激活后测试了衰减过程中的As 2p_{3/2}、Ga 2p_{3/2}和O 1s谱随时间的变化,并计算了阴极表面各元素的百分含量,测试结果如图9所示,百分含量列于表1中,可知,在4h以后,阴极表面Ga和Cs不变,O含量增加,As含量减少。

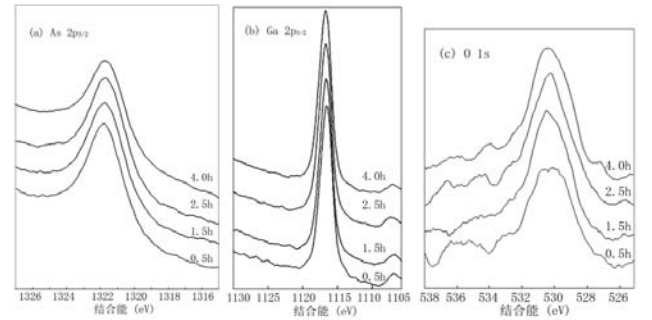


图9 激活后阴极衰减过程中As2p_{3/2}、Ga2p_{3/2}和O1s谱
Fig.9 Ga2p_{3/2}, O1s and As2p_{3/2} spectra after the cathode activation the attenuation of photocurrent

GaAs材料经过高温热清洗后,我认为是富Ga表面,经Cs与O激活后其光电流如图10中1所示;该材料再经过低温热清洗后,是富As表面,激活后的光电流如图10中2所示;比较图10两条曲线,低温热清洗后形成的富As表面更有利于Cs与O激活,

以少量的时间和更少的激活次数获得了更好的光电效应。

表1 衰减过程中阴极表面不同元素百分含量随时间的变化
Table 1 The variation of different elements in the cathode surface during the process of photocurrent decay

元素	激活后 0.5 h 含量/%	激活后 1.5 h 含量/%	激活后 2.5 h 含量/%	激活后 4.0 h 含量/%
Ga	33	32	32	32
As	28	27	26	25
Cs	17	17	17	17
O	22	24	25	26

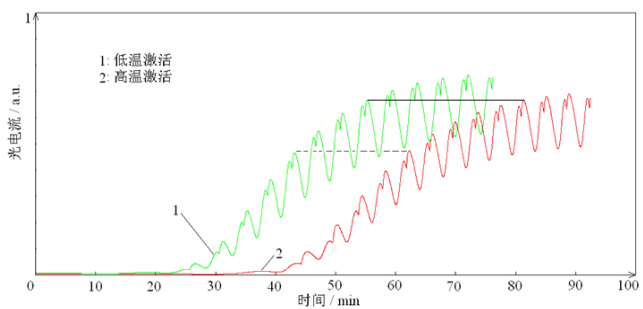


图10 高低温激活过程中的光电流
Fig.10 Light current during high and low temperature activation process

图10中无论是高温还是低温激活,都是在原子清洁表面获得双偶极子层。以Ga_{1-x}Al_xAs光电阴极为例,其原子密度为(4.42-0.17x)×10²²cm⁻³,p型原子掺杂量通常在10¹⁸~10¹⁹cm⁻³量级,可将掺杂浓度粗略估计为0.1%,并将Ga_{1-x}Al_xAs材料分割为1000个原子组成的立方体单元,长宽高均为14.1443nm,其中包含一个Zn掺杂原子,图11为材料表面掺杂原子分布俯视图。Cs、O激活后与掺杂原子形成[GaAs(Zn):Cs]:O-Cs双偶极子,附近功函数低于周围,光电子更容易从掺杂原子附近逸出,因此表面处光电流并不是均匀的,而是会在掺杂原子附近形成一个峰值,光电发射表现出如图12所示的碎鳞场效应^[52-62]。

对照图9与表1,光电流在衰减过程中As的减少与O的增加,是否可以简单归因于双偶极子[GaAs(Zn):Cs]:O-Cs的去极化,最终形成了[GaAs(Zn):X]:O-X,其中X是光电阴极吸附的未知的残余气体,如果我们假设用氢(H)取代X,则形成[GaAs(Zn):H]:H₂O,其对光电发射是有害的。按照此假设,在H取代Cs的过程中,由于Cs在表面的位移,掩盖了As,致使在XPS分析中As减少;同样由于Cs在表面的位移,凸显了O,致使在XPS分析中O增加。

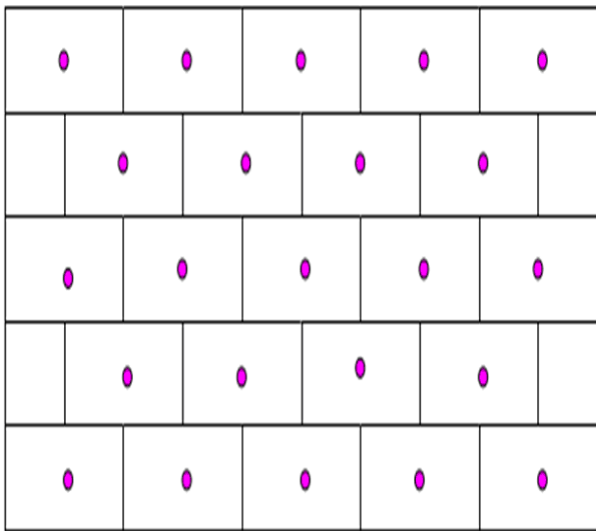


图 11 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 材料表面掺杂原子分布

Fig.11 Doping Atom distributed at the surface of the $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ material

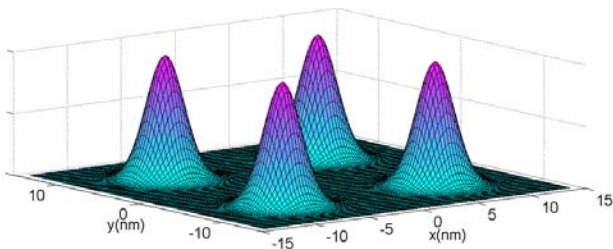


图 12 光电发射的碎鳞场效应

Fig.12 The discale field effect of the photoelectric emission

最好的解决方案是用第一性原理分析现有超高真空系统的残余气体与 $[\text{GaAs}(\text{Zn})\text{:Cs}]\text{:O-Cs}$ 的作用，然后利用现代表面分析方法去验证计算结果。

西方人通过提高超高真空系统的真空度延长了GaAs 光电阴极的寿命，目前我们尚无法获得可用的极高真空度的系统，延长光电阴极寿命只能另辟蹊径。

3 未来的展望

在西方，利用 NEA 光电阴极，完成了微光像增强器、EBCCD 及 EBAPS 等一系列探测器件的研制，已经陆续列装；在现代光源的应用中同样遇到寿命问题，其解决方法是用多碱阴极暂时取代GaAs:Cs 阴极，以避开寿命问题的困扰。

对于我们，NEA 光电阴极的寿命问题解决了，高性能微光像增强器以及 EBAPS 等探测器件可以缩短与西方的差距；如果高灵敏度长寿命的GaAs:Cs-O 阴极真正取代了目前大科学装置中的铜阴极，基于我国大科学装置的基础研究才会迎来真正的科学春天。

感谢国家自然科学基金重大研究计划培育项目（91533108）及其他面上项目的资助，感谢宗志圆等数十名博士的奉献。此文曾在微光夜视技术国防科技重点实验室学术年会上交流，发表时做了部分修改。

参考文献：

[1] Scheer J.J., Vanlaar J.. GaAs-Cs: a new type of photoemitter[J]. *Solid State Communications*, 1965(3): 189-193.

[2] 张益军. 变掺杂 GaAs 光电阴极研制及其特性评估[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.

[3] 薛增泉, 吴全德. 电子发射与电子能谱[M]. 北京: 北京大学出版社, 1993.

[4] Sommer A.H.. Brief history of photoemissive materials[C]//*Proc. SPIE*, 1993, **202**: 2-17.

[5] Spicer W.E.. Photoemissive, photoconductive, and absorption studies of alkali-antimony compounds[J]. *Physical review*, 1958, **112**(1): 114-122.

[6] 宗志圆. NEA 光电阴极性能评估与激活工艺研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2000.

[7] 杜晓晴. 高性能 GaAs 光电阴极研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2005.

[8] 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.

[9] 邹继军. GaAs 光电阴极理论及其表征技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.

[10] Zou Jijun, Chang Benkang. Gradient doping negative electron affinity GaAs photocathodes[J]. *Optical Engineering*, 2006, **45**(5): 054001-5.

[11] 邹继军, 常本康, 杨智. 指数掺杂 GaAs 光电阴极量子效率的理论计算[J]. *物理学报*, 2007, **56**(5): 2992-2997.

[12] ZOU Ji-Jun, CHANG Ben-Kang, YANG Zhi, et al. Evolution of photocurrent during coadsorption of Cs and O on GaAs (100)[J]. *Chinese Physics Letters*, 2007, **24**(6): 1731-1734.

[13] 邹继军, 常本康, 杜晓晴. MBE 梯度掺杂 GaAs 光电阴极实验研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2005, **25**(6): 401-404.

[14] 杨智. GaAs 光电阴极智能激活与结构设计研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.

[15] Yang Zhi, Chang Benkang, Zou Jijun, et al. Comparison between gradient-doping GaAs photocathode and uniform-doping GaAs photocathode[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(28): 7035-7039.

[16] 杨智, 邹继军, 常本康. 透射式指数掺杂 GaAs 光电阴极最佳厚度研究[J]. *物理学报*, 2010, **29**(6): 4290-4295.

[17] 张益军. 变掺杂 GaAs 光电阴极研制及其特性评估[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.

[18] Zhang Yijun, Chang Benkang, Niu Jun, et al. High-efficiency graded band-gap $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ photocathodes grown by metalorganic chemical vapor deposition[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **99**: 101104.

[19] 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.

[20] Zhang Yijun, Niu Jun, Zhao Jing, et al. Influence of exponential-doping structure on photoemission capability of transmission-mode GaAs photocathodes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, **108**: 093108.

[21] Zhang Yijun, Niu Jun, Zou Jijun, et al. Variation of spectral response for exponential-doped transmission-mode GaAs photocathodes in the preparation process[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(20): 3935-3940.

[22] Zhang Yijun, Chang Benkang, Yang Zhi, et al. Annealing study of carrier concentration in gradient-doped GaAs/GaAlAs epilayers grown by molecular beam epitaxy[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(9): 1715-1720.

[23] Zhang Yi-Jun, Niu Jun, Zhao Jing, et al. Improvement of photoemission

- performance of a gradient-doping transmission-mode GaAs photocathode[J]. *Chinese Physics B*, 2011, **20**(11): 118501.
- [24] 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**(6): 067301-6.
- [25] 赵静. 透射式 GaAs 光电阴极的光学与光电发射性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [26] Zhao Jing, Zhang Yijun, Chang Benkang, et al. Comparison of structure and performance between extended blue and standard transmission-mode GaAs photocathode modules[J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(32): 6140-6145.
- [27] Zhao Jing, Chang Benkang, Xiong Yajuan, et al. Influence of the antireflection, window, and active layers on optical properties of exponential-doping transmission-mode GaAs photocathode modules[J]. *Optics Communications*, 2012, **285**(5): 589-593.
- [28] Zhao Jing, Chang Benkang, Xiong Yajuan, et al. Spectral transmittance and module structure fitting for transmission-mode GaAs photocathode[J]. *Chinese Physics B*, 2011, **20**(4): 500-506.
- [29] 赵静, 张益军, 常本康, 等. 高性能透射式 GaAs 光电阴极量子效率拟合与结构研究[J]. *物理学报*, 2011, **60**(10): 107802-7.
- [30] 赵静, 常本康, 张益军, 等. 透射式蓝延伸 GaAs 光电阴极光学结构对比[J]. *物理学报*, 2012, **61**(3): 037803-6.
- [31] Schwede J. W., Sarmiento T., Narasimhan V. K., et al. Photon-enhanced thermionic emission from heterostructures with low interface recombination[J]. *NATURE COMMUNICATIONS*, 2013, **4**(3):67-88.
- [32] Siddharth K, Laurent B, Luca C, et al. Ultrabright and Ultrafast III-V Semiconductor Photocathodes[J]. *Physical Review Letters*, 2014, **112**(9): 219-233.
- [33] Chanlek N, Herbert J D, Jones R M, et al. The degradation of quantum efficiency in negative electron affinity GaAs photocathodes under gas exposure[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2014, **47**(5):133-140.
- [34] Rao T, Dowell D H. An Engineering Guide To Photoinjectors[J]. *Eprint Arxiv*, 2014.
- [35] Chen Z, Jiang X, Dong S, et al. Insight into the photoelectron angular dependent energy distribution of negative-electron-affinity InP photocathodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **104**(2): 021120 - 021120-4.
- [36] MX-11769(F9815 Series)[R/OL]. <http://www.ITT.com/>. 2001.
- [37] M. Tigner. A Possible Apparatus for Electron-Clashing Experiments[J]. *Nuovo Cimento*, 1965, **137**: 1228-1231.
- [38] Neil G R, Bohn C L, Benson S V, et al. Sustained Kilowatt Lasing in a Free-Electron Laser with Same Cell Energy Recovery[J]. *Phys. rev. lett*, 1999, **84**(4): 662-665.
- [39] M. Sawamura, Ryoichi Hajima, N Kikuzawa, et al. Status and Development for the JAERI ERL-FEL for High-Power and Long-Pulse operation[C]//*Proc. of EPAC*, 2004: 1723-1725.
- [40] Aleksandrovich V. N., Bolotin V.P., Aleksandrovich K. D. et al., Status of the Novosibirsk Terahertz FEL[C]//*Proc. of FEL*, 2004:226-228
- [41] D. Durek, F. Frommberger, T. Reichelt, et al. Degradation of a gallium-arsenide photoemitting NEA surface by water vapour[J]. *Applied Surface Science*, 1999, **143**: 319-322.
- [42] Grames J, Adderley P, Baylac M, et al. Status of the Jefferson Lab Polarized Beam Physics Program and Preparations for Upcoming Parity Experiments[C]//*Spin* 2002, Long Island, NY (US), 09/09/2002--09/14/2002, 2003:1047-1052.
- [43] T. Wada, T. Nitta, T. Nomura. Influence of exposure to CO, CO₂ and H₂O on the stability of GaAs photocathodes[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1990, **29**(10): 2087-2090.
- [44] E. M. Yee, D. A. Jackson. Photoyield decay characteristics of a cesiated GaAs[J]. *Solid-State Electronics*, 1972, **15**: 245-247
- [45] F. C. tang, M. S. Lubell, K. Rubin, et al. Operating experience with a GaAs photoemission electron source[J]. *Review of Scientific Instrument*, 1986, **57**(12): 3004-3011.
- [46] D. C. Rodway, M. B. Allenson, In situ surface study of the activating layer on GaAs(Cs,O) photocathodes[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1986, **19**: 1353-1371.
- [47] F. Machuca, Z. Liu, Y. Sun, et al. Role of oxygen in semiconductor negative electron affinity photocathodes[J]. *Journal of Vacuum Science and technology B*, 2002, **20**(6): 2721-2725.
- [48] F. Machuca, Z.Liu, Y.Sun, et al. Oxygen species in Cs/O activated gallium nitride (GaN) negative electron affinity photocathodes[J]. *Journal of Vacuum Science and technology B*, 2003, **21**(4): 1863-1869.
- [49] R.Calabres, V.Guidi, P.Lenisa, et al. Surface analysis of a GaAs electron source using Rutherford backscattering spectroscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 1994, **65**(3): 301-302.
- [50] R.Calabres, G.Ciullo, V.Guidi, et al. Long-lifetime high-intensity GaAs photosource[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1994, **65**(2): 343-348.
- [51] Zou Jijun, Chang Benkang, Chen Huailin, et al. Variation of quantum yield curves of GaAs photocathodes under illumination[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, **101**: 033126-6.
- [52] 邹继军, 常本康, 杨智, 等. GaAs 光电阴极在不同强度光照下的稳定性[J]. *物理学报*, 2007, **56**(10): 6109-6113.
- [53] 鱼晓华. NEA Ga_{1-x}Al_xAs 光电阴极中电子与原子结构研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [54] Xiaohua Yu, Yujie Du, Benkang Chang, et al. Study on the electron structure and optical properties of Ga_{0.5}Al_{0.5}As (100) $\beta_2(2 \times 4)$ reconstruction surface[J]. *Applied Surface Science*, 2013, **266**: 380-385.
- [55] Xiaohua Yu, Yujie Du, Benkang Chang, et al. The adsorption of Cs and residual gases on Ga_{0.5}Al_{0.5}As (001) $\beta_2(2 \times 4)$ surface: A first-principles research[J]. *Applied Surface Science*, 2014, **290**: 142-147.
- [56] Yu Xiaohua, Chang Benkang, Wang Honggang, et al. Geometric and electronic structure of Cs adsorbed Ga_{0.5}Al_{0.5}As (001) and (011) surfaces: a first principles research[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2014, **25**: 2595-2600.
- [57] Yu Xiaohua, Chang Benkang, Chen Xinlong, et al. Cs adsorption on Ga_{0.5}Al_{0.5}As(001) $\beta_2(2 \times 4)$ surface: A first-principles research[J]. *Computational Materials Science*, 2014, **84**: 226-231.
- [58] Yu Xiaohua, Ge Zhonghao, Chang Benkang, et al. Electronic structure of Zn doped Ga_{0.5}Al_{0.5}As photocathodes from first-principles[J]. *Solid State Communications*, 2013, **164**: 50-53.
- [59] Yu Xiaohua, Chang Benkang, Wang Honggang, et al. First principles research on electronic structure of Zn-doped Ga_{0.5}Al_{0.5}As(001) $\beta_2(2 \times 4)$ surface[J]. *Solid State Communications*, 2014, **187**: 13-17.
- [60] Yu Xiaohua, Ge Zhonghao, Chang Benkang, et al. First principles calculations of the electronic structure and optical properties of (001), (011) and (111) Ga_{0.5}Al_{0.5}As surfaces[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2013, **16**: 1813-1820.
- [61] Yu Xiaohua, Du Yujie, Chang Bengkang, et al. Study on the electronic structure and optical properties of different Al constituent Ga_{1-x}Al_xAs[J]. *OPTIK*, 2013, **124**: 4402-4405.
- [62] Yu Xiaohua, Ge Zhonghao, Chang Benkang, et al. First principles study on the influence of vacancy defects on electronic structure and optical properties of Ga_{0.5}Al_{0.5}As photocathodes[J]. *OPTIK*, 2014, **125**: 587-592.