

文章编号: 0253-2239(2010)s100103

透射式 GaN 紫外光电阴极的制备及光电发射性能

杜晓晴¹ 常本康² 钱芸生² 高频² 田 健¹ 王晓晖²

(¹ 重庆大学光电工程学院光电技术与系统教育部重点实验室, 重庆 400044)
(² 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要 设计了一种以蓝宝石为衬底、AlN 为缓冲层的 MOCVD 外延 P-GaN 样品作为透射式阴极材料, 并利用超高真空表面净化工艺与 (Cs, O) 激活工艺对其进行光电阴极制备。紫外光谱响应测试结果表明, 所制备的 GaN 紫外光电阴极在透射式工作模式下具有明显的“门”字响应, 最高量子效率 15%, 与反射式光谱响应曲线相比, 透射式阴极的总体响应幅度较低, 长波响应阈值向短波推移。最后从阴极材料结构、外延水平及阴极制备工艺方面分析了所得的实验结果。

关键词 紫外探测器; GaN 紫外光电阴极; 表面净化; (Cs, O) 激活工艺; 光谱响应测试

中图分类号 TN214 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201030.s100103

Preparation and Photoemission Performance of Transmission-Mode GaN Ultraviolet Photocathode

Du Xiaoqing¹ Chang Benkang² Qian Yunsheng² Gao Pin² Tian Jian¹ Wang Xiaohui²

¹Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education, College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China

²College of Electronic Engineering and Opto-Electric Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract As the photocathode practical application mode, transmission-type structure has important signification for the research. A MOCVD epitaxial p-type GaN, which has sapphire substrate and AlN buffer layer, was designed as transmission-type material. This material was prepared into GaN photocathode by ultra-high vacuum surface cleaning technique and (Cs, O) activation technique. The UV spectral response of prepared GaN photocathode was measured. The testing results showed that the photocathode had obvious gate-shaped response in the transmission mode, and the maximum quantum efficiency was close to 15%. Comparing to the reflection-mode spectral response curve, the overall responses of transmission-mode were lower and long-wave response threshold moved towards shortwave. The experiment results were analyzed from photocathode material structure, epitaxial level and photocathode preparation techniques.

Key words ultraviolet detector; GaN UV photocathode; surface cleaning; (Cs, O) activation technique; spectral response measurement

OCIS codes 040.7190, 160.1890, 230.0040

1 引 言

GaN 紫外光电阴极是近年发展起来的一种新型真空紫外探测器件。在 p 型掺杂的 GaN 材料表面吸附一定的 Cs 或 Cs/O, 可以将 GaN 材料表面的有效电子亲和势降低为负值, 从而形成负电子亲和

势 (NEA) GaN 光电阴极^[1~5]。与传统正电子亲和势紫外光阴极以及固体紫外探测器件相比, GaN 紫外光电阴极显示了量子效率高、暗发射小、紫外可见光抑制比高、稳定性好和发射电子能量分布集中等众多优点, 因此在紫外探测及真空电子源领域具有

收稿日期: 2010-06-30; 收到修改稿日期: 2010-08-06

基金项目: 国家自然科学基金(60701013)资助课题。

作者简介: 杜晓晴(1978—), 女, 博士, 副教授, 主要从事光学探测材料及器件等方面的研究。E-mail: duxq@cqu.edu.cn

极大的应用潜力。

目前,制备出高量子效率的透射式 GaN 光电阴极是该阴极走向实用化需要解决的主要问题。透射式紫外光电阴极结合电子倍增器件可构成紫外光电倍增管、紫外像增强器等,从而实现了对极微弱紫外辐射的定点探测和实时跟踪^[1~5]。与反射式光电阴极的“衬底—光电发射层”的简单结构相比,透射式光电阴极一般为“透明衬底材料—界面缓冲层—光电发射层”的三层结构,并要求缓冲层的晶格常数和发射层相近,且足够厚,以尽量降低不同生长材料之间的晶格失配对阴极光电发射效率的影响。因此,透射式阴极在结构与制备上更为复杂,其光电发射效率会受到阴极材料结构、外延水平及阴极制备工艺等众多因素的影响。

在考察透射式阴极材料设计思想及前期 GaN 光电阴极的研究基础之上^[6~8],设计了一种以蓝宝石为衬底、AlN 为缓冲层的金属有机物化学气相沉积(MOCVD)外延 P 型 GaN 样品作为透射式阴极材料,利用优化的超高真空表面净化工艺与(Cs,O)激活工艺对其进行了光电阴极制备,并利用自行研制的紫外光谱响应测试仪对其光电发射性能进行了表征与评估。

2 透射式 GaN 阴极材料结构

透射式 GaN 阴极材料结构如图 1 所示。其中阴极材料的生长衬底为双面抛光的 c 面蓝宝石,其紫外光透射率高于 85%;非掺杂 AlN 作为缓冲层,厚度约 20 nm。AlN 和 GaN 的晶格常数分别为 0.4982 nm 和 0.5186 nm^[9],因此这两种材料具有较高的晶格匹配度;同时 AlN 的禁带宽度较大(6.2 eV),对中长波紫外光具有良好的透射率。p 型 GaN 材料采用 MOCVD 外延生长在 AlN 上,厚度约 150 nm。利用霍尔效应测试得到的 p-GaN 的空穴载流子浓度为

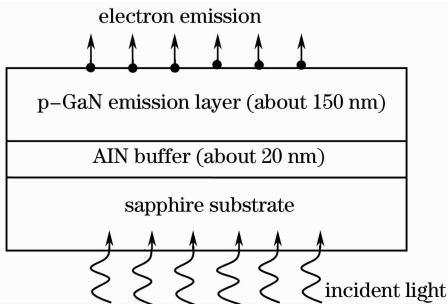


图 1 透射式 GaN 阴极材料结构及工作示意图
Fig. 1 Structure and operation diagram of transmission-mode GaN photocathode material

$3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,电阻率为 $0.004 \Omega \cdot \text{cm}$;迁移率 $400 \text{ cm}^2/(\text{v} \cdot \text{s})$ 。在这种透射式结构模式下,紫外光从透明的蓝宝石衬底入射进来,经过 AlN 缓冲层后被 p 型 GaN 光电发射层吸收。当吸收的光子能量大于 GaN 的禁带宽度(3.4 eV)时,GaN 体内产生光生电子并通过扩散到达材料表面。如果 p-GaN 表面被 Cs 或(Cs,O)层吸附,使得表面达到负电子亲和势,则到达表面的光电子将以一个较高的表面逸出几率从阴极表面发射进入真空,并被外加高压收集,从而产生明显的光电发射。

3 透射式 GaN 光电阴极的制备

GaN 光电阴极的制备分表面净化 and 表面激活两个步骤。首先对 GaN 阴极材料表面进行化学清洗以去除油污等污染物,然后将样品送到超高真空系统中的加热台,在 $700 \text{ }^\circ\text{C}$ 高温下对材料表面进行加热净化,以彻底去除 GaN 材料表面的 C,O 等杂质,达到表面的原子级洁净。

高温净化结束后,将样品从加热台传送到激活台,通过 Cs 吸附以及 Cs/O 交替吸附的激活工艺,将样品制备成具有负电子亲和势表面的 GaN 光电阴极。在 GaN 光电阴极的激活过程中,将 10 W/240 V 的氙灯通过真空激活室的入射窗照射到样品表面,通过外接机械手收集激活过程中产生的光电流,并利用光电流实时采集系统在线收集光电流随激活时间的变化过程曲线。光电阴极的制备与多信息量测试系统如图 2 所示。

该透射式样品的(Cs,O)激活过程如图 3 所示。从图中看到,GaN 表面在开始进 Cs 5 min 就开始出现光电流,然后随着 Cs 的吸附,光电流以一个较为平稳的速率上升,直至光电流不再发生变化并开始略微下降。接下来进行 Cs/O 循环激活。在 2~3 个 Cs/O 循环激活后 GaN 光电阴极的光电流又提高了约 15%,但继续 Cs/O 循环,GaN 光电阴极的光电流不再上升且保持不变,整个(Cs,O)激活过程结束。

在第一步单独用 Cs 激活阶段,光电流的上升幅度较大,按照 NEA 光电阴极的偶极层表面模型^[10~12],GaN 表面的晶格原子悬挂键与 Cs 之间的偶极化作用是降低材料表面电子亲和势、提高光电发射效率的主要原因,表面分析实验结果显示^[10],单独用 Cs 激活就可使 GaN 表面达到 NEA 状态。Cs 激活后进行 Cs/O 循环激活可进一步提高 GaN 阴极的光电流,这与 GaAs 光电阴极的激活效果一致,根据偶极

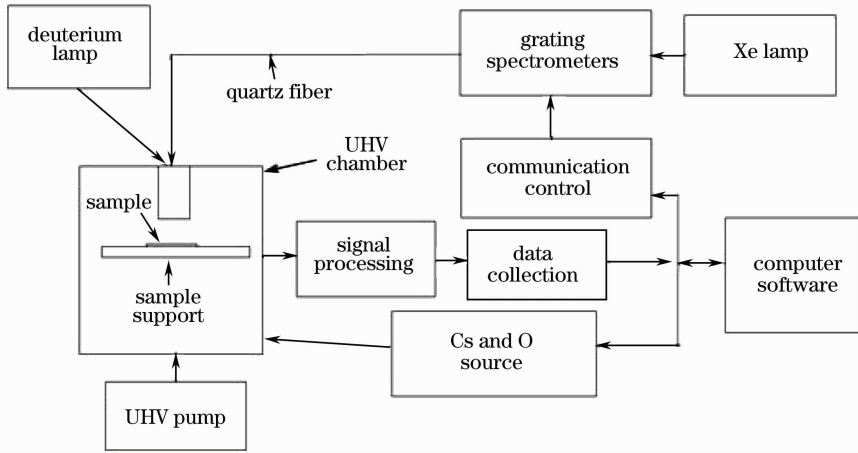


图 2 GaN 光电阴极的制备与多信息量测试系统

Fig. 2 System diagram of GaN photocathode preparation and multi-parameters measurement

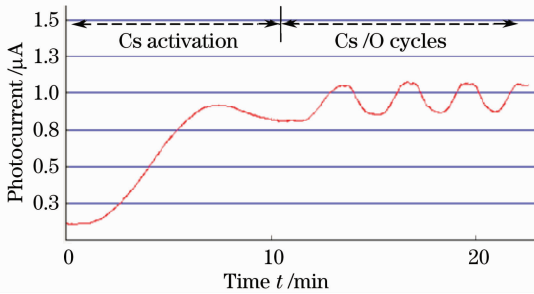


图 3 透射式 GaN 光电阴极的激活实验曲线

Fig. 3 Activation experimental curve of transmission-mode GaN photocathode

层表面模型,这种降低是 GaN 表面形成的 GaN—Cs 以及 Cs—O—Cs 双偶极层的作用结果^[10]。

4 透射式 GaN 光电阴极的光电发射性能及分析

样品激活结束后,采用光纤引入的紫外光谱响

应在线测试技术(如图 2 所示),对 GaN 光电阴极在透射式工作模式下(背面光注入)的光电发射特性进行了测试与表征。为了便于比较,还对该样品在反射式工作模式下(正面光注入)的光电发射特性也进行了测试,两种测试结果如图 4 所示。图中测试结果显示,所制备的 GaN 紫外光电阴极在透射式工作模式下具有明显的“门”字响应,短波起始响应波长为 260 nm,长波截止波长为 375 nm,最高量子效率 15%,明显高于已实用化的 CsTe 等正电子亲和势紫外光电阴极 10%的发射效率,这表明了透射式 GaN 紫外光电阴极已经成功制备,并已初步达到阴极实用化的水平。与反射式光谱响应曲线相比,所制备的阴极在透射式下的总体响应幅度较低。

为了理解透射式 GaN 光电阴极在背面光注入和正面光注入两种模式下的光电发射性能差异,图 5 给出了其工作原理示意图。

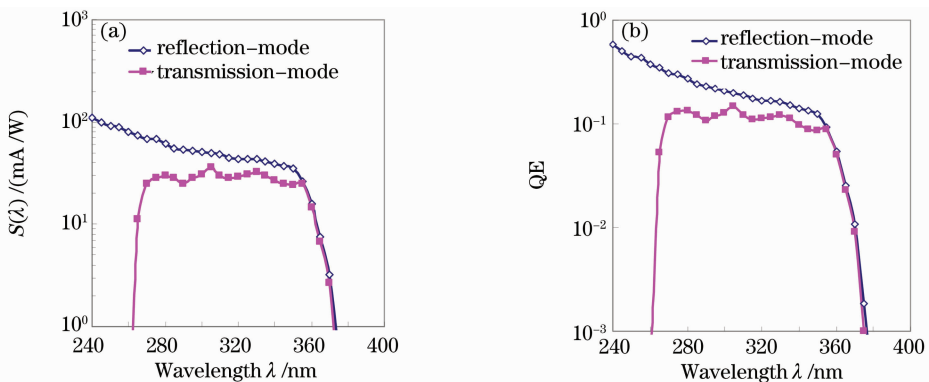


图 4 透射式 GaN 光电阴极在两种工作模式下的光电发射性能。(a)光谱响应曲线,(b)量子效率曲线

Fig. 4 Photoemission properties of transmission-mode GaN photocathode under two operation manners. (a) spectral response curves, (b) quantum efficiency curves

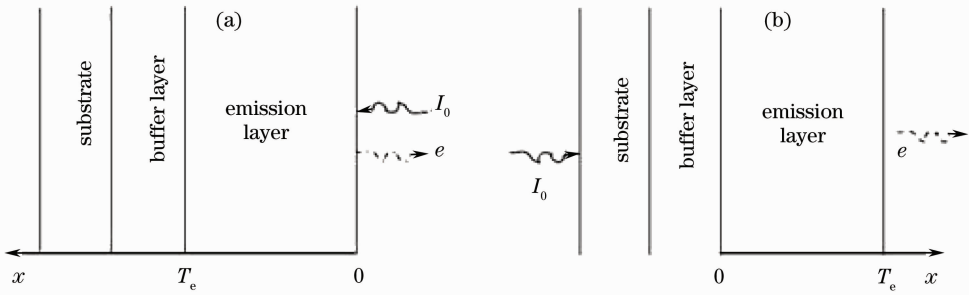


图5 透射式 GaN 光电阴极在两种光照模式下的工作原理图。(a)正面光注入,(b)背面光注入

Fig. 5 Principle diagram of transmission-mode GaN photocathode under two operation manners. (a) light induced from front substrate, (b) light induced from back surface

分析图4的光入射及电子发射过程,透射式光电阴极在两种光注入方式下,其光电发射效率都受到 GaN 材料电子扩散长度 L_D 及阴极表面电子逸出几率 P 的影响, L_D 和 P 的取值越高,阴极的最终光电发射效率就越大。其中 L_D 主要受到外延工艺、杂质浓度和缺陷水平的限制,从前面给出的霍尔效应测试结果看,所用的 GaN 材料具有较大的迁移率和较小的电阻率,说明 GaN 材料的外延质量较好。 P 主要由阴极的超高真空制备工艺的水平决定,从反射式光谱响应测试曲线看,所制备的 GaN 光电阴极量子效率最高可达到 50% 以上,这说明所采用的制备工艺是比较理想的。进一步分析透射式光电阴极在两种光注入方式下的光电发射过程差异,其产生原因可主要体现于以下两点:

1) 光电发射的光谱范围不同

由于透射式阴极存在缓冲层,因此在背面光注入方式中,有部分的短波光会首先被缓冲层吸收,使得阴极光电发射基本在 262 nm 以后才有明显的响应,然后在 p-GaN 的吸收限(360 nm 左右)截止,整个光谱响应曲线形成一个“门”型。而正面光注入时不存在这种限制,因为光从 GaN 光电发射层的前表面入射,无需穿过缓冲层,因此短波光不会损失,此时阴极的光电发射光谱范围顺利地延伸到短波区。由于短波光主要在近表面吸收,因此正面光注入下阴极的短波响应也明显高于背面光注入的值。进一步分析所采用的 GaN 样品缓冲层材料 AlN,按照 AlN 的禁带宽度(6.2 eV),其短波吸收限应在 200 nm,但实验中测得背面光注入下阴极的短波限为 262 nm,对应的缓冲层材料禁带宽度约为 4.73 eV。结合 MOCVD 外延工艺分析其原因,可能是由于在 GaN 材料外延生长过程,有部分的 Ga 原子与 AlN 表面发生了反应,形成了禁带宽度较 AlN 小的 $Al_xGa_{1-x}N$ 层,从而限制了透射式 GaN 光电阴极的短波响应。

2) 受后界面复合速率的影响不同

背面光照方式下,阴极的光电发射会受到缓冲层与发射层之间的后界面复合速率的严重影响。这主要是因为光从衬底层一侧入射,必须先经过缓冲层和发射层的交界面。由于阴极材料对入射光的吸收随着光入射距离 x 呈指数衰减,因此交界面处产生的光电子数很多,而这个区域也正是光电子容易大量复合的地方,所以后界面复合速率越大,阴极的光电发射效率就会急剧下降,尤其是对短波区的光影响更为严重。和背面光照方式相比,正面光照下因为大量的光生电子均产生于发射层的近表面处,离交界面处较远,因此受后界面复合速率的影响较弱。根据上述分析,所制备的阴极在透射式下的总体响应幅度明显低于反射式的原因,可能主要来自于缓冲层与发射层之间的界面特性还不够好,存在一定的后界面复合速率。

5 结 论

设计的透射式 GaN 阴极材料,并成功进行制备及光电发射性能表征测试。所制备的 GaN 紫外光电阴极在透射式工作模式下具有明显的“门”字响应,其短波响应起始波长主要受到缓冲材料及其外延生长工艺的限制;最高量子效率 15%,已初步达到阴极实用化的水平。通过比较 GaN 光电阴极在背面光注入和正面光注入下的光谱响应特性差异,证实所采用的 GaN 阴极材料外延质量较好,阴极制备工艺合适,但阴极缓冲层与发射层之间的界面特性还不够理想,从而对最终的光电发射性能有一定影响。

参 考 文 献

- 1 F. Machuca, Y. Sun, Z. Liu *et al.*. Prospect for high brightness III-nitride electron emitter [J]. *J. Vacuum Science and Technol. B*, 2000, **18**: 3042~3046
- 2 Oswald H. W. Siegmund. High-performance microchannel plate detectors for UV/visible astronomy [J]. *Nuclear Instruments and*

- Methods in Physics Research A, 2004, **525**: 12~16
- 3 O. Siegmund, J. Vallerger, J. Mcphate *et al.*. Development of GaN photocathodes for UV detectors [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2006, **567**: 89~92
- 4 Zhang Yan, Chu Kaihui, Shao Xiumei *et al.*. GaN-based 512×1 ultraviolet linear focal plane arrays[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3515~3518
张燕, 储开慧, 邵秀梅等. GaN基 512×1 元紫外长线列焦平面探测器组件[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3515~3518
- 5 Du Xiaoqing, Chang Benkang, Qian Yunsheng *et al.*. Experimental investigation of high-low-temperature two-step preparation of GaN UV photocathode material[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1734~1738
杜晓晴, 常本康, 钱芸生等. GaN 紫外光阴极材料的高低温两步制备实验研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1734~1738
- 6 Du Xiaoqing, Chang Benkang, Qian Yunsheng *et al.*. Activation technique of GaN negative electron affinity photocathode[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 385~388
杜晓晴, 常本康, 钱芸生等. GaN 负电子亲和势光电阴极的激活工艺[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 385~388
- 7 Du Xiaoqing, Chang Benkang. Revision of quantum efficiency formula for negative electron affinity photocathodes[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(12): 8643~8650
杜晓晴, 常本康. 负电子亲和势光电阴极量子效率公式的修正[J]. *物理学报*, 2009, **58**(12): 8643~8650
- 8 Qiao Jianliang, Chang Benkang, Du Xiaoqing *et al.*. Quantum efficiency decay mechanism for reflection-mode negative electron affinity GaN photocathode [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(4): 2855~2859
乔建良, 常本康, 杜晓晴等. 反射式负电子亲和势 GaN 光电阴极量子效率衰减机理研究[J]. *物理学报*, 2010, **59**(4): 2855~2859
- 9 E. L. Michael, L. R. Sergey. Performance and Data Sheets of Advanced Semiconductor Materials[M]. Yang Shuren, Yin Jingzhi Transl.. Beijing: Chemical Industry Press, 2003. 1~43
迈克尔, 谢尔盖. 先进半导体材料性能与数据手册[M]. 杨树人, 殷景志译. 北京: 化学工业出版社, 2003. 1~43
- 10 C. I. Wu, A. Kahn. Negative electron affinity and electron emission at cesiated GaN and AlN surfaces[J]. *Appl. Surface Science*, 2000, **162-163**: 250~255
- 11 Du Xiaoqing, Chang Benkang. Angle-dependent X-ray photoelectron spectroscopy study of the mechanisms of "high-low temperature" activation of GaAs photocathode[J]. *Applied Surface Science*, 2005, **251**: 267~272
- 12 Qiao Jianliang, Tian Si, Chang Benkang *et al.*. Activation mechanism of negative electron affinity GaN photocathode [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(8): 5847~5851
乔建良, 田思, 常本康等. 负电子亲和势 GaN 光电阴极激活机理研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(8): 5847~5851