

文章编号: 0253-2239(2010)s100511

NEA GaN 光电阴极在反射和透射模式下的量子效率特性比较与分析

田 健¹ 杜晓晴¹ 常本康² 钱芸生² 高 频²

(¹重庆大学光电工程学院光电技术及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 利用超高真空制备技术,对以蓝宝石为衬底、AlN 为缓冲层的 MOCVD 外延 P-GaN 样品进行了光电阴极制备,并利用紫外光谱响应测试仪,对所制备的基于负电子亲和势(NEA) GaN 光电阴极在反射式和透射式两种工作模式下的量子效率特性进行了测试与对比分析。实验结果显示,在反射模式下,样品在 240 nm 处具有高达 50% 的量子效率,而在透射模式下量子效率最高只有 15%,量子效率曲线拟合表明该样品的后界面复合速率为 10^4 cm/s。通过分析发现,造成两种工作模式下量子效率相差较大的主要影响因素是后界面复合速率和 GaN 外延材料厚度。

关键词 光电子学; GaN 光电阴极; 量子效率; 反射式; 透射式

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201030.s100511

Comparison and Analysis of Quantum Efficiency Properties of NEA GaN Photocathode under Reflection mode and Transmission mode

Tian Jian¹ Du Xiaoqing¹ Chang Benkang² Qian Yunsheng² Gao Pin²

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 MOCVD epitaxial P-GaN, which was grown on the sapphire substrate and AlN buffering layer, was used to make photocathode by ultra-high vacuum preparation technique. The quantum efficiency properties of prepared GaN photocathode under reflection mode and the transmission mode measured and analyzed by UV spectral response testing instrument. Experimental results showed that the sample in reflection mode has up to 50% quantum efficiency at 240 nm, but in transmission mode, the maximum quantum efficiency is only 15%. Curve fitting results of experimental quantum efficiency revealed that sample's back interface recombination velocity is about 10^4 cm/s. It was also found that the reasons for the great difference in this two operating modes were back-interface recombination velocity and the thickness of GaN epitaxial materials.

Key words optoelectronics; GaN photocathode; quantum efficiency; reflection mode; transmission mode

OCIS codes 040.5160; 160.1890; 230.0250; 310.6860

1 引 言

紫外探测技术目前已经逐渐延伸到了军事、空间天文、环境监测、工业生产等许多领域,而紫外光

电阴极是紫外真空探测器件的核心部件,决定着器件的性能。基于负电子亲和势(NEA)的 GaN 紫外光电阴极具有“日盲”特性,有着良好的工作背景,干

收稿日期: 2010-06-08; 收到修改稿日期: 2010-08-07

基金项目: “211 工程”三期创新人才计划建设项目(s-09112)和国家自然科学基金(60701013,60871012)资助课题。

作者简介: 田 健(1985—),男,硕士研究生,主要从事光电子器件方面的研究。E-mail: tianjian1877@126.com

导师简介: 杜晓晴(1978—),女,博士,副教授,主要从事光学探测技术方面的研究。

E-mail: duxq@cqu.edu.cn(通信联系人)

扰小, 虚假信号少; 同时它具有量子效率高、发射电子能量集中等优点, 是非常理想的新型紫外光电阴极^[1~4]。

获得高量子效率且稳定性良好的阴极一直是近年来发展 GaN 光电阴极的重要方向。阴极材料的生长、化学清洗、真空加热、表面激活等每一个制备环节都决定着光电阴极的性能优劣^[3,5]。不同结构参数的阴极材料在合适的工作模式下, 能表现出更佳的性能。本文报道了 GaN 紫外光电阴极的制备过程, 并利用自行研制的紫外光谱响应测试仪, 对 NEA GaN 光电阴极在反射式和透射式两种工作模式下的量子效率特性进行了测试与对比, 考虑衬底材料和缓冲层的折射率、后界面复合速率及 GaN 外延层厚度等因素对量子效率特性差异进行了分析。

2 实验样品及阴极制备

实验所用样品是以蓝宝石为衬底、AlN 为缓冲层, 利用金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 技术外延的 P-GaN。蓝宝石衬底厚为 300~500 μm, 缓冲层 AlN 厚为 20 nm 左右。P-GaN 的相关参数为: 载流子浓度为 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 厚度为 150 nm。

样品首先进行化学清洗净化, 分别用四氯化碳、丙酮、无水乙醇、去离子水进行超声波清洗各 5 min, 去除阴极表面上的油污等。然后用浓硫酸、双氧水、去离子水按 2:2:1 的体积比例对样品刻蚀 10 min, 去除外延片表面的杂质, 主要是 C 和 O。最后用去离子水超声波清洗 3 min 完成化学清洗。接着进行加热净化, 将样品送入本底真空度为 $1 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ 超高真空系统 (UHV) 中加热净化, 去除表面的各种氧化物, 获得原子级清洁表面。最高加热温度为 710 °C, 持续时间 25 min。

加热净化结束, 待样品自然冷却到室温后开始 Cs, O 激活^[6~9], 此时真空度恢复到 10^{-7} Pa 。激活采用 Cs 源持续, O 源断续的方法进行。在第一次进 Cs 过程中待光电流升至峰值, 再降至峰值的 70% 左右时开始进 O。此时光电流会升至一个新的峰值, 达到峰值时停 O, 待光电流再次降至峰值的 70% 左右时再次进 O。由于进 O 对 GaN 阴极材料的光电流影响不大, 所以上述过程重复 3~4 次即可。最后短时间暴露于 Cs 蒸气而结束 GaN 紫外光电阴极的制备。激活过程中光电流随时间的变化曲线如图 1 所示。

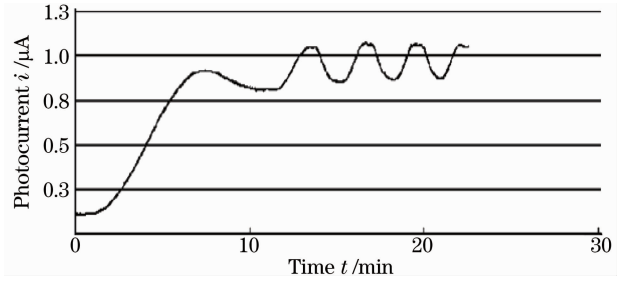


图 1 光电流随激活时间的变化曲线

Fig. 1 Variation curve of photocurrent with activation time

3 量子效率特性测试结果

激活结束后, 利用紫外光谱响应测试仪对 GaN 光电阴极分别在反射和透射工作模式下进行在线光谱响应测试。GaN 光电阴极工作的两种模式示意图分别如图 2 所示。根据我们获得的光谱响应测试曲线 $S(\lambda)$ 通过换算转换成量子效率 $Y(h\nu)$ 曲线, 其换算表达式为

$$Y(h\nu) \approx 1.24 S_{\lambda} / \lambda, \quad (1)$$

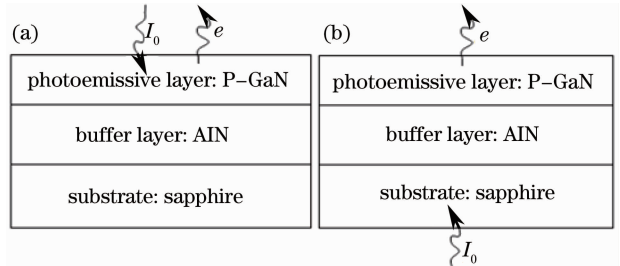


图 2 GaN 光电阴极的反射两种工作模式。

(a) 反射式, (b) 透射式

Fig. 2 Two kinds of GaN photocathode. (a) reflection mode, (b) transmission mode

图 3 为测试得到的 GaN 光电阴极的量子效率曲线。曲线 1 是 GaN 光电阴极工作在反射模式下的实验结果, 曲线 2 是 GaN 光电阴极工作在透射模

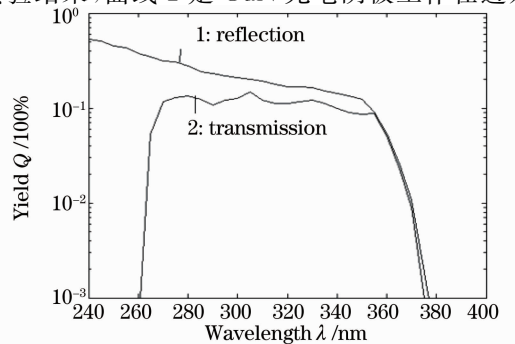


图 3 GaN 光电阴极在反射和透射模式下的量子效率测试曲线

Fig. 3 Quantum efficiency curve at reflection mode and transmission mode

式下的实验结果。

从图 3 可以看到:该样品在反射模式下,在 240 nm 处具有高达 50% 的量子效率;而在透射模式下,量子效率最高只有 15%。同一样品,在不同工作模式下量子效率相差较大。另外,从图 3 中还可以看到当 GaN 光电阴极工作在透射模式下时,其光电发射基本在波长为 260 nm 以后才有较高的响应,整个量子效率曲线形成一个“门”型。

4 实验结果分析

实验样品在两种工作模式下的量子效率相差较大,根据 GaN 光电阴极在反射和透射工作模式下的

表 1 四个典型波长下的相关数据

Table 1 Correlative data of the four classic wavelength

Wavelength / nm	250	300	350	400
GaN Refractive Index, n_1	2.55	2.65	2.55	2.46
AlN Refractive Index, n_2	2.25	2.0	1.95	1.92
Sapphire Refractive Index, n_3	1.8452	1.8144	1.7972	1.7865
Sapphire Transmission, T	0.799	0.830	0.832	0.835
Reflectivity from sapphire to AlN, R_0	0.0098	0.0024	0.0017	0.0013
Reflectivity from sapphire to GaN, R_1	0.0039	0.0195	0.0178	0.0152
General Reflectivity, R	0.2119	0.1881	0.1842	0.1788

其中 GaN 折射率 n_1 和 AlN 折射率 n_2 的数据是参考文献[1]所得;蓝宝石折射率 n_3 由公式^[12]

$$n^2 = 1 + 1.43134936\lambda^2 / [\lambda^2 - (0.0726631)^2] + 0.65054713\lambda^2 / [\lambda^2 - (0.1193242)^2] + 5.3414021\lambda^2 / [\lambda^2 - (18.028251)^2], \quad (2)$$

计算所得。反射率 R_0 、反射率 R_1 均由反射率公式 $R_i = [(n_{i+1} - n_i) / (n_{i+1} + n_i)]^2$ 计算所得。最后由 $R = 1 - T(1 - R_0)(1 - R_1)$ 计算得到入射光最终入射进 GaN 外延层时的总反射率。从表 1 中的数据,可以看到虽然在紫外波段,从衬底到缓冲层再到外延层的折射率是不断变大的,但是总的反射率并不是很大。在反射模式下,实验测得在紫外波段,入射光在 GaN 外延层表面的反射率大概为 0.2。两种工作模式下的反射率相差不大,说明界面的反射率

入射光路差异,从蓝宝石衬底和缓冲层的反射情况、后界面复合速率及 GaN 外延层厚度等三个方面进行分析。

4.1 蓝宝石衬底和缓冲层反射对量子效率特性的影响

由图 2 可见,GaN 光电阴极在反射式工作模式下,入射光直接照射在 GaN 外延层上。在透射式工作模式下,入射光要先后经过衬底、缓冲层后进入 GaN 外延层,整个过程必然会有光的反射和衰减,最终影响到量子效率的大小。表 1 给出了在 250, 300, 350 和 400 nm 四个典型波长下的相关数据。

不是影响量子效率相差较大的主要原因。

对于 GaN 光电阴极工作在透射模式下,整个量子效率曲线形成一个“门”型的实验现象,经过分析可能是在紫外短波段,蓝宝石衬底或缓冲层的吸收系数系数比较大,大部分短波紫外光经过衬底和缓冲层时都衰减掉了。

4.2 后界面复合速率对量子效率特性的影响

在透射模式下,入射光经过衬底、缓冲层进入 GaN 外延层产生光电子,一部分光电子向表面运动最终逸出。有一小部分的光电子会以一定的速率向缓冲层和 GaN 外延层的接触面运动最终被复合掉,此速率为后界面复合速率 S_v 。透射式 GaN 光电阴极的量子产额公式为^[3]

$$Y_1(h\nu) = \frac{p(1-R)\alpha L_D}{\alpha^2 L_D^2 - 1} \left\{ \frac{\alpha D_n + S_v}{\frac{D_n}{L_D} \cosh \frac{T_e}{L_D} + S_v \sinh \frac{T_e}{L_D}} - \frac{\exp(-\alpha T_e) \left[S_v \cosh \frac{T_e}{L_D} + \frac{D_n}{L_D} \sinh \frac{T_e}{L_D} \right]}{\frac{D_n}{L_D} \cosh \frac{T_e}{L_D} + S_v \sinh \frac{T_e}{L_D}} \right\} \alpha L_D \exp(-\alpha T_e), \quad (3)$$

式中 L_D 是电子扩散长度, p 是逸出几率, α 是吸收系数, R 是反射率, T_e 是 GaN 外延层厚度。从式中

可以看到 S_v 的大小影响量子效率的高低。对反射式模式下的量子效率进行了曲线拟合^[10,11],得到

GaN 外延层材料的逸出几率 p 和扩散长度 L_D 分别为: $p=0.78$, $L_D=0.13 \mu\text{m}$ 。然后将 p 和 L_D 代入(3)式中,结合实验测得的量子效率曲线进行曲线拟合,得到 GaN 光电阴极的后界面复合速率 S_v 为 $S_v=10^4 \text{ cm/s}$ 。在透射式下,高的后界面复合速率会使阴极的量子效率降低。

4.3 GaN 外延层厚度对量子效率特性的影响

由于在透射式下,在一定电子扩散长度下阴极厚度存在一个最佳值 T_e ,即阴极应当厚得足以吸收大部分的入射光,又薄得足以使受光激发产生的光子能够到达发射表面^[2]。而在反射模式下,要求阴极足够厚就行了。因此,对于同一光电阴极,反射式下的量子效率高于透射式下的量子效率的主要原因除了后界面复合速率比较高外,厚的外延层也是主要原因之一。

5 结 论

利用紫外光谱响应测试仪,对所制备的 NEA GaN 光电阴极在反射式和透射式两种工作模式下的量子效率特性进行了测试与对比分析;并对在两种工作模式下阴极的量子效率相差较大的现象,从蓝宝石衬底和缓冲层的反射情况、后界面复合速率及 GaN 外延层厚度等 3 个方面进行了分析。分析结果表明,在制备透射式光电阴极时,除了要生长质量好的外延材料以减小后界面复合速率外,还需要在制备前确定阴极的最佳厚度 T_e ,以保证 GaN 光电阴极在透射式工作模式下获得高量子效率。

参 考 文 献

- 1 Michael E. Levinshtein, Sergey L. Rumyantsev, Michael S. Shur. Properties of advanced semiconductor materials [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003. 9
Michael E. Levinshtein, Sergey L. Rumyantsev, Michael S. Shur. 先进半导体材料性能与数据手册[M]. 北京:化学工业出版社, 2003. 9
- 2 Du Xiaoping. Study of GaAs photocathode with high performance

- [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005
杜晓晴. 高性能 GaAs 光电阴极研究[D]. 南京:南京理工大学, 2005
- 3 Qiao Jianliang, Chang Benkang, Yang Zhi *et al.*. Study of the quantum yield of NEA GaN photocathode[J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(3): 395~400
乔建良, 常本康, 杨 智 等. NEA GaN 光电阴极量子产额研究[J]. 光学技术, 2008, **34**(3): 395~400
- 4 Li Huirui, Shen Tujun, Dai Liying *et al.*. GaN based negative electron affinity photocathode[J]. *Optoelectronic Technology*, 2006, **27**(2): 73~77
李慧蕊, 申屠军, 戴丽英 等. 负电子亲和势氮化镓光电阴极[J]. 光电技术, 2006, **27**(2): 73~77
- 5 O. Siegmund, J. Vallerga, J. McPhate *et al.*. Development of GaN photocathodes for UV detectors[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2006, **567**: 89~92
- 6 Guo Xiangyang, Chang Benkang, Qiao Jianliang *et al.*. Comparison of stability of GaN and GaAs photocathode[J]. *Infrared Technology*, 2010, **32**(2): 117~120
郭向阳, 常本康, 乔建良 等. GaN 与 GaAs NEA 光电阴极稳定性的比较[J]. 红外技术, 2010, **32**(2): 117~120
- 7 Qiao Jianliang, Chang Benkang, Niu Jun *et al.*. Similarities and differences between negative electron affinity GaN and GaAs photocathode activation mechanisms [J]. *Chinese J. Vacuum Science and Technology*, 2009, **29**(2): 115~118
乔建良, 常本康, 牛 军 等. NEA GaN 和 GaAs 光电阴极激活机理对比研究[J]. 真空科学与技术学报, 2009, **29**(2): 115~118
- 8 Qiao Jianliang, Huang Dayong, Niu Jun *et al.*. Study of photoemission mechanism for NEA GaN photocathode [J]. *Infrared Technology*, 2008, **30**(10): 611~614
乔建良, 黄大勇, 牛 军 等. NEA GaN 光电阴极光电发射机理研究[J]. 红外技术, 2008, **30**(10): 611~614
- 9 Du Xiaoping, 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
- 10 Du Xiaoping, Chang Benkang, Zhou Jijun *et al.*. High quantum efficiency GaAs photocathode by gradient doping[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1411~1414
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
- 11 Du Xiaoping, Chang Bengkang, Zong Zhiyuan *et al.*. Evaluation of property parameters of NEA photocathode[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, **29**: 55~61
杜晓晴, 常本康, 宗志园 等. NEA 光电阴极的性能参数评估[J]. 光电工程, 2002, **29**: 55~61