

〈微光技术〉

## NEA GaN 光电阴极材料光学特性研究

乔建良<sup>1</sup>, 高有堂<sup>1</sup>, 徐源<sup>2</sup>, 牛军<sup>1</sup>, 常本康<sup>2</sup>

(1. 南阳理工学院 电子与电气工程学院, 河南 南阳 473004; 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:** 针对 NEA GaN 光电阴极结构设计和制备工艺需进一步优化的问题, 结合阴极量子效率表达式和影响量子效率的因素, 采用理论和实验相结合的方法, 分别研究了 GaN 光电阴极材料的表面反射率、光学折射率、光谱吸收系数以及透射光谱等光学参数。结果表明在 250 nm 到 365 nm 的波长范围内, 表面反射率相对平稳, 是影响量子效率的直接因素, 而光学折射率则通过电子表面逸出几率间接影响着量子效率。给出了均匀掺杂 GaN 光电阴极的光谱吸收系数的特点, 根据变掺杂 NEA GaN 光电阴极的结构特点, 给出了光谱平均吸收系数的概念和等价计算公式, 并对均匀掺杂与变掺杂 NEA GaN 光电阴极光谱吸收系数进行了对比。

**关键词:** GaN; 光电阴极; 量子效率; 变掺杂; 光谱吸收系数

中图分类号: TN304 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2017)07-0664-05

## Optical Characteristics of NEA GaN Photocathode Material

QIAO Jianliang<sup>1</sup>, GAO Youtang<sup>1</sup>, XU Yuan<sup>2</sup>, NIU Jun<sup>1</sup>, CHANG Benkang<sup>2</sup>

(1. School of Electronic and Electrical Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China;

2. School of Electronic Engineering and Optoelectronic Techniques,

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** To optimize the structure design and preparation technology of NEA GaN photocathode, considering the cathode quantum efficiency formula and the factors that influence the quantum efficiency, the surface reflectivity, optical refractive index, spectral absorption coefficient and transmission spectra of GaN photocathode material were studied theoretically and experimentally. As a direct influencing factor of the quantum efficiency, the surface reflectivity is relatively steady in the waveband from 250 nm to 365 nm. The optical refractive index influences the quantum efficiency indirectly by the electronic surface escape probability. The characteristics of uniform doping GaN photocathode spectral absorption coefficient were given. According to the structure characteristics of variable doping NEA GaN photocathode, the concept of spectrum average absorption coefficient and the equivalent formula were given. The spectral absorption coefficients of the uniform doping and the variable doping of NEA GaN photocathode were compared.

**Key words:** GaN photocathode, quantum efficiency, varied doping, spectral absorption coefficient

## 0 引言

伴随着 GaN 晶体生长技术的不断突破, NEA GaN 光电阴极在紫外探测、臭氧监测、真空电子源等领域将获得越来越广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。GaN 光电阴极材料的生长质量和结构设计是决定探测器件灵敏度的主要因素, 而生长质量和结构设计最终通过 GaN 晶体材

料的性能参数来表征<sup>[4-5]</sup>。用于光电阴极的 GaN 晶体材料是 P 型掺杂的半导体材料, 包括均匀掺杂和变掺杂等掺杂结构。表征 GaN 晶体性能的参数可分为光学参数和电学参数两大类, 其中光学参数主要包括材料对入射光的表面反射率、材料的光谱吸收系数、材料的光学折射率、材料的透射光谱等。这些参数对阴极的灵敏度都有直接或间接的影响, 决定着光谱响应

收稿日期: 2017-03-21; 修订日期: 2017-06-17。

作者简介: 乔建良 (1974-), 男, 教授, 主要从事光电发射与测试、信号分析与处理等方面的研究。

基金项目: 国家自然科学基金 (批准号: 61371058) 资助的课题。

的峰值及其对应的波长范围, 最终通过阴极的量子效率大小反映出来<sup>[6-9]</sup>。

近年来不少研究者对 GaN 晶体材料的光学特性进行了的研究, 如文献[10]给出了 GaN 晶体材料的光学折射率, 斯坦福大学给出了均匀掺杂 GaN 阴极材料的吸收系数<sup>[11]</sup>, 李雪等研究者测量了纤锌矿 GaN 外延薄膜的透射光谱, 并采用导纳矩阵对样品的透射光谱进行了理论拟合, 得到了纤锌矿 GaN 外延薄膜的光学特性<sup>[12]</sup>。但作为紫外光电阴极材料, 由于有反射式和透射式两种工作模式, GaN 光电阴极的透射光谱、变掺杂阴极材料的光谱吸收系数等光学特性需要进一步明确, 阴极的光学特性参数对激活后阴极量子效率的影响需进一步研究。本文通过对 GaN 晶体材料光谱吸收系数的研究, 结合理论分析和实验结果对均匀掺杂和变掺杂 GaN 外延材料进行分析和表征。结合影响 GaN 阴极量子效率的主要因素, 在目前材料生长技术和制备水平的限制下, 为阴极结构的优化设计提供了思路和参考。

## 1 GaN 光电阴极材料光学特性分析

### 1.1 GaN 光电阴极材料表面反射率

作为外光电效应的光电发射现象, 材料响应范围内入射光的照射是其发生的必要条件。阴极材料对入射光的表面反射率直接影响到材料对光的吸收效率, 并最终影响到阴极的量子效率。

通过求解非平衡载流子的扩散方程, 可推导出反射式均匀掺杂 NEA GaN 光电阴极的量子效率表达式如公式(1)所示:

$$Y_r = \frac{J}{I_0} = \frac{P\alpha L_D}{1 + \alpha L_D} (1 - R) \quad (1)$$

同理可得透射式均匀掺杂 NEA GaN 光电阴极的量子效率表达式如公式(2)所示<sup>[13]</sup>:

$$Y_t(hv) = \frac{P(1-R)\alpha L_D}{\alpha^2 L_D^2 - 1} \times \left\{ \frac{\alpha D_n + S_v}{(D_n/L_D) \cosh(T_e/L_D) + S_v \sinh(T_e/L_D)} - \frac{\exp(-\alpha T_e) [S_v \cosh(T_e/L_D) + (D_n/L_D) \sinh(T_e/L_D)]}{(D_n/L_D) \cosh(T_e/L_D) + S_v \sinh(T_e/L_D)} - \alpha L_D \exp(-\alpha T_e) \right\} \quad (2)$$

式中:  $P$  是电子的表面逸出几率;  $\alpha$  是材料发射层对入射光的吸收系数;  $L_D$  是材料的电子扩散长度;  $R$  是阴极材料对入射光的反射率;  $D_n$  是电子扩散系数;  $S_v$  是后界面复合速率;  $T_e$  是阴极材料发射层的厚度。

由公式(1)、(2)可见, NEA GaN 光电阴极的量子效率最终受材料的光学和电学参数影响, 尤其是材料

对入射光的反射率  $R$ , 吸收系数  $\alpha$ , 电子扩散长度  $L_D$  等参数, 表面反射率  $R$  是影响阴极材料量子效率的主要因素之一。

通过计算可得 GaN 阴极材料的表面反射率如图 1 所示<sup>[14]</sup>, 由图 1 可知, 在测试的起始波长 250 nm 到 GaN 阈值附近 365 nm 的短波端, 表面反射率相对平稳固定, 其值约为 0.2。在阈值附近 365 nm 到 375 nm 的过渡区, 表面反射率由 0.2 线性增大到 0.27, 而 375 nm 以上的长波段, 表面反射率由 0.27 缓慢下降到 0.25 左右。结果显示, GaN 材料的表面反射率特性可有效地保障测试波长范围内阴极量子效率的平稳性, 在小于 365 nm 的紫外波段内表面反射率小而且相对稳定, 在阈值之外突然变大也保证了 GaN 阴极用于紫外探测的有效性。

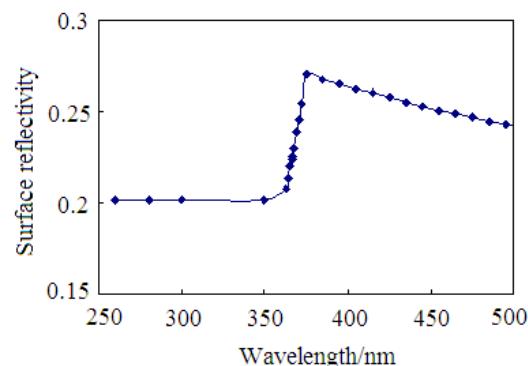


图 1 GaN 阴极材料的表面反射率

Fig.1 The surface reflectivity for GaN photocathode material

### 1.2 GaN 光电阴极材料光学折射率

用于光电阴极材料的 GaN 晶体为纤锌矿结构, 300 K 时生长在蓝宝石衬底上的纤锌矿 GaN 的折射率  $n$  与波长的关系曲线如图 2 所示<sup>[10]</sup>, 由图可见, 折射率  $n$  在入射光波长约为 365 nm 时最大, 365 nm 以上, 折射率  $n$  随着波长的增大而迅速减小, 其红外折射率约为 2.3。根据上述量子效率的计算公式, GaN 阴极材料的光学折射率  $n$  并未直接影响到量子效率, 但折射率会影响到进入体内的光子的方向, 进而影响到产生光电子的材料体内位置和深度, 使到达表面的光生电子数量发生变化, 最终通过电子的表面逸出几率  $P$  间接影响量子效率。

### 1.3 GaN 光电阴极材料光谱吸收系数

#### 1.3.1 均匀掺杂 GaN 光电阴极的光谱吸收系数

GaN 阴极材料的吸收系数  $\alpha$  表示材料对光子吸收能力的强弱, 光谱吸收系数  $\alpha$  与阴极光电发射现象有着极其密切的关系。图 3 给出了 GaN 的吸收系数  $\alpha$  与入射光子能量的关系<sup>[11]</sup>。

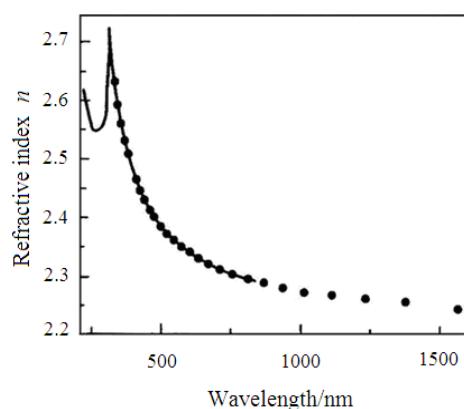


图2 纤锌矿GaN阴极材料的折射率

Fig.2 The refractive index for wurtzite GaN photocathode material

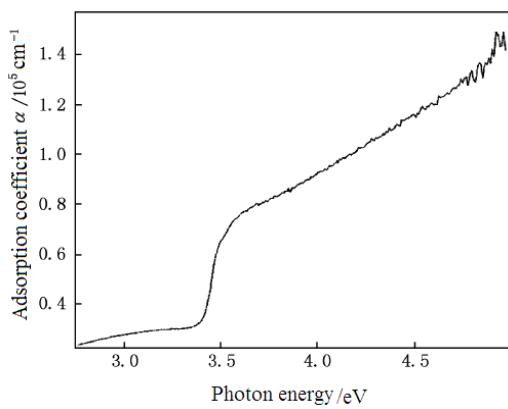


图3 均匀掺杂GaN阴极材料的吸收系数

Fig.3 The adsorption coefficient for uniform doping GaN photocathode material

由图3可见,  $\alpha$ 是入射光子能量的函数。对某一具体半导体材料, 吸收系数 $\alpha$ 随着入射光子波长的变化而变化, 也会受到材料的生长质量, P型掺杂浓度等其他特性的影响。根据图3给出的均匀掺杂GaN阴极材料的吸收系数 $\alpha$ 随入射光子能量变化曲线, 可以把GaN阴极材料对紫外入射光的吸收分为3个区域: 入射光子能量在3.3 eV以下的弱吸收区, 该区域吸收系数在 $0.2 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ 以下, 3.3 eV到3.4 eV的过渡吸收区, 该区域吸收系数约在 $0.3 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ 左右, 3.4 eV以上的强吸收区, 该区域吸收系数在 $0.5 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ 以上。

在光电发射“三步模型”的第一阶段, 即光的吸收阶段, 阴极材料在入射光的照射下, 价带中的电子要吸收入射光子的能量, 这是光电发射产生的第一步, 所以GaN阴极材料发射层对光子的吸收是影响阴极激活后量子效率的关键因素之一, 量子效率的计算公式给出了入射光的吸收系数 $\alpha$ 对量子效率的定量

影响。

### 1.3.2 变掺杂GaN光电阴极的光谱吸收系数

一般地, 对采用某一固定掺杂浓度的均匀掺杂GaN阴极材料, 吸收系数 $\alpha$ 可看作入射光子能量的 $h_v$ 函数, 其值随入射光子能量 $h_v$ 的增加而增加。变掺杂技术的采用使得材料的掺杂浓度从体内到表面依次降低, 实际制备时采用梯度掺杂方式, 即掺杂浓度呈梯度变化规律, 因吸收系数 $\alpha(h_v)$ 会受到材料掺杂浓度的影响, 所以变掺杂GaN阴极材料的吸收系数会变得不再是定值, 由生长后材料的具体掺杂情况来决定。实际计算时可采用材料的平均吸收系数来表示<sup>[15]</sup>。

图4给出了计算梯度掺杂GaN阴极材料平均吸收系数的示意图。假设采用 $n$ 层掺杂结构, 各层的厚度分别为 $l_1, l_2, \dots, l_n$ , 假设各层对应的掺杂浓度表示为 $N_{A1}, N_{A2}, \dots, N_{An}$ , 其中位于材料外层的 $N_{A1}$ 最小, 位于材料内层的 $N_{An}$ 最大, 设不同掺杂浓度GaN材料的吸收系数分别表示为 $a_1, a_2, \dots, a_n$ 。

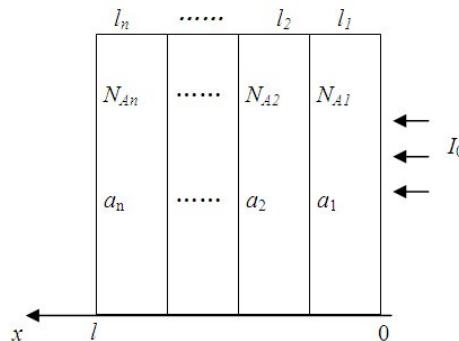


图4 变掺杂GaN阴极材料的平均吸收系数示意图

Fig.4 The schematic diagram of mean adsorption coefficient for varied GaN photocathode material

假设入射光强在反射模式下为 $I_0$ , 进入阴极后光强按指数规律减小。则入射光到达阴极内 $x=1$ 处时, 光强 $I_l$ 由公式(3)表示:

$$I_l = I_0 \exp(-\alpha_1 \cdot l_1) \exp(-\alpha_2 \cdot l_2) \cdots \exp(-\alpha_n \cdot l_n) \quad (3)$$

经过计算, 可得变掺杂GaN阴极材料的平均吸收系数 $\alpha_E$ 的计算方法如公式(4)所示:

$$\alpha_E = (\alpha_1 \cdot l_1 + \alpha_2 \cdot l_2 + \cdots + \alpha_n \cdot l_n) / l \quad (4)$$

由上式可见, 平均吸收系数 $\alpha_E$ 可由阴极总的厚度, 对应不同掺杂浓度的各层厚度以及各层吸收系数决定。其值与变掺杂阴极的分层情况、各层厚度以及各层掺杂浓度都有关系, 设计时必须综合全面考虑。

实验测试的均匀掺杂与变掺杂NEA GaN光电阴极光谱吸收系数的对比结果如图5所示<sup>[16]</sup>, 变掺杂GaN光电阴极吸收系数为各掺杂浓度的平均吸收系

数。

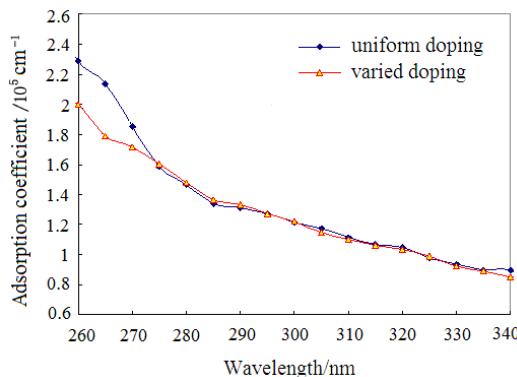


图 5 GaN 阴极材料的光学吸收系数

Fig.5 The optical adsorption coefficients for GaN photocathode material

### 1.3.3 GaN 光电阴极材料光谱吸收系数讨论

一般地, GaN 材料的吸收系数  $\alpha$  随入射光子能量  $h\nu$  的增加而增加, 可表示为  $\alpha(h\nu)$ , 入射光子能量越大, 吸收系数  $\alpha(h\nu)$  越大, 光子在材料内的吸收长度越短。研究发现, 阴极吸收系数  $\alpha(h\nu)$  还与材料的掺杂浓度有关。当入射光子的能量大于阈值 3.4 eV 时, 吸收系数  $\alpha(h\nu)$  会随掺杂浓度的增大而略微减小, 即掺杂浓度较低的 GaN 阴极材料相对具有较强的入射光吸收能力。对高掺杂浓度的重 p 型 GaN 材料, 在阈值附近吸收系数曲线的斜率会变小, 变得没那么陡峭, 即在入射光子的能量小于阈值 3.4 eV 时, 材料对光子的有效吸收能力会随着掺杂浓度的提高而增强。另一方面, 重掺杂技术会造成 GaN 材料能带带尾扩张, 禁带压缩, 使得电子由价带激发到导带所需能量减小, 这对阴极量子效率的提高是有帮助的。通过采用重掺杂技术, 尽量减小 GaN 材料表面附近的耗尽层宽度, 可减小材料内部电离杂质移动的距离, 减小光生电子的散射现象和在表面层的俘获现象。这些都可以弥补因吸收系数略微减小造成的负面影响。

由图 5 可见, 均匀掺杂与变掺杂 NEA GaN 光电阴极光谱吸收系数在测试的 260 nm 到 340 nm 范围内变化规律基本一致, 但在数值的大小上还是有一定区别的。整体上来看, 变掺杂的平均吸收系数比均匀掺杂的要略小, 原因之一可能是由于测试的变掺杂阴极材料平均掺杂浓度大于均匀掺杂的掺杂浓度。小于 275 nm 的短波端表现出的差异更大, 说明短波端测试的变掺杂阴极材料对入射光子的吸收长度相对于均匀掺杂的要大。

### 1.4 GaN 光电阴极材料透射光谱

通过测试 GaN 阴极材料的透射光谱, 可评估材料的光学特性和结构参数对量子效率的影响。为使问

题简化, 暂不考虑阴极材料内部的二次和多次反射引起的干涉现象, 一种典型的 GaN 光电阴极样品模型示意图见图 6。

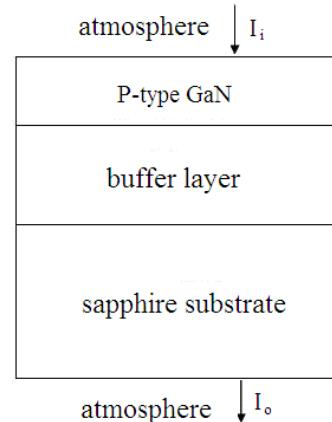


图 6 GaN 光电阴极样品模型示意图

Fig.6 The schematic diagram for GaN photocathode model

一般地, GaN 阴极材料包括 p 型 GaN 发射层、缓冲层和蓝宝石衬底 3 层, 其中发射层为 0.5  $\mu\text{m}$  厚的 GaN, 缓冲层采用 2  $\mu\text{m}$  厚的 GaN, 衬底采用 300  $\mu\text{m}$  到 500  $\mu\text{m}$  厚的蓝宝石, 三层与空气分别形成了 4 个界面, 各个界面处均存在光的反射现象。

设  $R_0$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  分别为空气和 p 型 GaN 层, p 型 GaN 层和缓冲层, 缓冲层和蓝宝石衬底, 蓝宝石衬底和空气 4 个界面的反射率。 $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  分别为 GaN 发射层、缓冲层和蓝宝石衬底的厚度。 $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  分别为 GaN 发射层、缓冲层和蓝宝石衬底的光学吸收系数。则 GaN 阴极材料的透射光谱可表示为公式(5)<sup>[16]</sup>:

$$T = (1 - R_0)(1 - R_1)(1 - R_2)(1 - R_3) \exp(-\alpha_1 d_1 - \alpha_2 d_2 - \alpha_3 d_3) \quad (5)$$

可见, GaN 阴极材料的透射光谱与材料的分层结构紧密相关, 对于某种结构的阴极样品, 若知道了不同界面的反射率和材料不同层的吸收系数及厚度, 就可以通过公式(5)计算出透射光谱。反过来, 根据测试的透射光谱也可以评估材料结构的具体参数。

## 2 结论

作为新型紫外光电阴极, NEA GaN 光电阴极具有美好的发展前景, 以其为核心的探测器件探测灵敏度的高低与阴极材料的生长质量和制备水平直接相关, 材料质量可通过光学特性和电学特性参数来表征。本文以 NEA GaN 光电阴极的量子效率表达式为依据, 从影响阴极量子效率的因素入手, 较为详细地给出了表面反射率、光学折射率、材料的光谱吸收系

数以及透射光谱等光学参数的特性，分析了这些光学参数对阴极光电发射特性的影响。并重点从变掺杂NEA GaN 光电阴极的结构特点入手，研究了光谱平均吸收系数的等价计算公式。光学特性的测试和分析对优化 GaN 光电阴极材料的制备工艺和材料结构设计，提高阴极量子效率，最终提高探测器件的探测灵敏度有着重要意义。

### 参考文献：

- [1] Siegmund O., Vallerga J., McPhate J., et al. Development of GaN photocathodes for UV detectors[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2006, **567**: 89-92.
- [2] 刘一兵, 黄新民, 刘安宁, 等. 基于 GaN 材料 p 型掺杂的研究进展[J]. 红外技术, 2008, **30**(3): 146-149.  
LIU YIBING, HUANG XinMin, LIN AnNing, et al. Research Progress Based on GaN Material p-type doped[J]. *Infrared Technology*, 2008, **30**(3): 146-149.
- [3] 孙晓娟. GaN 紫外探测器材料的 MOCVD 生长及器件研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012: 37.  
Sun Xiaojuan. Study on growth of GaN by MOCVD and fabrication of GaN ultraviolet detectors[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2012: 37.
- [4] Wang Xiaohui, Shi Feng, Guo Hui, et al. The optimal thickness of a transmission-mode GaN photocathode[J]. *Chinese Physics B*, 2012, **21**(8): 087901.
- [5] 高频, 张益军, 王晓晖, 等. III-V 族半导体 NEA 光电阴极智能激活测试系统设计及应用研究[J]. 红外技术[J]. 2011, **33**(12): 721-725.  
GAO Pin, ZHANG Yi-jun, WANG Xiao-hui, et al. Design and Application of III-V Semiconductor NEA Photocathode Intelligent Auto-activation and Test System[J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(12): 721-725.
- [6] 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.  
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.
- [7] 李飙, 常本康, 徐源, 等. 均匀掺杂和梯度掺杂结构 GaN 光电阴极性能对比研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, **31**(8): 2036-2039.  
Li Biao, Chang Benkang, Xu Yuan, et al. Comparative study of uniform-doping and gradient-doping negative electron affinity GaN photocathodes[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, **31**(8): 2036-2039.
- [8] 郝广辉, 常本康, 陈鑫龙, 等. 近紫外波段 NEA GaN 阴极响应特性的研究[J]. 物理学报, 2013, **62**(9): 097901.  
Hao Guanghui, Chang Benkang, Chen Xinlong, et al. A study of spectral response for reflection-mode GaN photocathodes in UVA band[J]. *Acta Physica Sinica*. 2013, **62**(9): 097901.
- [9] 王晓晖, 常本康, 张益军, 等. GaN 光电阴极激活后的光谱响应分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, **31**(10): 2655-2658.  
Wang Xiaohui, Chang Benkang, Zhang Yijun, et al. The Spectral Response Analysis of Activated GaN Photocathode[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, **31**(10): 2655-2658.
- [10] Michael E Levinshtein, Sergey L Rumyantsev, Michael S Shur, et al. 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: 23.  
Michael E Levinshtein, Sergey L Rumyantsev, Michael S Shur. *Handbook of advanced semiconductor materials performance and data*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 23.
- [11] Francisco Javier Machuca Jr. A Thin Film p-type GaN Photocathode: prospect for a high performance electron emitter[D]. Stanford: Stanford University, 2003: 133.
- [12] 李雪, 魏彦峰, 龚海梅, 等. 纤锌矿 GaN 薄膜光学性质的研究[J]. 光子学报, 2007, **36**(2): 304-307.  
LI Xue, WEI Yanfeng, GONG Haimei, et al. Study on Optical Characteristics of Wurtzite GaN[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(2): 304-307
- [13] 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): 395-397.  
Qiao Jianliang, Chang Benkang, Yang Zhi, et al. Study of the quantum yield of NEA GaN photocathode[J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(3): 395-397
- [14] 杜晓晴. 利用反射与投射光谱测量 GaN 外延层的光学参数[J]. 光学与光电子技术, 2010, **8**(1): 76-79.  
DU Xiaoqing. Measurement of Optical Parameters of GaN epitaxy layer using reflective and transmission spectra[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2010, **8**(1): 76-79.
- [15] 牛军. 变掺杂 GaAs 光电阴极特性及评估研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011: 23-24.  
Niu Jun. Characteristic and evaluation of varied doping GaAs photocathode[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2011: 23-24.
- [16] 杜晓晴, 田健, 周强富. 利用紫外透射光谱研究透射式 GaN 光电阴极的材料结构及光学特性[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, **31**(6): 1606-1610.  
DU Xia-qing, TIAN Jian, ZHOU Qiangfu. Investigation of Material Structure and Optical Property of Transmission -Mode GaN Photocathode by Ultraviolet Transmission Spectral[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, **31**(6): 1606-1610.