



## 4-inch蓝宝石图形衬底上GaN基白光LED制备及表征

朱友华, 刘轩, 王美玉, 李毅

引用本文:

朱友华, 刘轩, 王美玉, 等. 4-inch蓝宝石图形衬底上GaN基白光LED制备及表征[J]. *发光学报*, 2020, 41(7): 858–862.

ZHU You-hua, LIU Xuan, WANG Mei-yu, et al. Fabrication and Characterization of GaN-based White LED on 4-inch Patterned Sapphire Substrate[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(7): 858–862.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/fgxb20204107.0858>

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### 中高温Ga<sub>N</sub>插入层厚度对蓝光LED光电性能的影响

Effect of Medium-high Temperature Interlayer Thickness on The Optical and Electrical Properties of Blue Light Emitting Diodes

*发光学报*. 2016, 37(7): 829–835 <https://doi.org/10.3788/fgxb20163707.0829>

#### 白光LED用新型MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/Ce : YAG透明陶瓷的发光性能

Luminescent Properties of New MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/Ce : YAG Transparent Ceramics for White LED Applications

*发光学报*. 2013, 34(2): 133–138 <https://doi.org/10.3788/fgxb20133402.0133>

#### 衬底弯曲度对Ga<sub>N</sub>基LED芯片性能的影响

The Influence of Substrate Bow on The Properties of GaN-based Light Emitting Diode Chips

*发光学报*. 2013, 34(3): 340–344 <https://doi.org/10.3788/fgxb20133403.0340>

#### 51 V Ga<sub>N</sub>基高压LED的热分析

Thermal Analysis of 51 V GaN-based High Voltage LED

*发光学报*. 2014, 35(2): 213–217 <https://doi.org/10.3788/fgxb20143502.0213>

#### 高温预生长对图形化蓝宝石衬底Ga<sub>N</sub>薄膜质量的提高

Improvement of GaN Thin-film Quality Grown on Patterned Sapphire Substrate by High-temperature Pre-growth Treatment

*发光学报*. 2014, 35(8): 980–985 <https://doi.org/10.3788/fgxb20143508.0980>

文章编号: 1000-7032(2020)07-0858-05

## 4-inch 蓝宝石图形衬底上 GaN 基白光 LED 制备及表征

朱友华\*, 刘 轩, 王美玉, 李 毅

(南通大学 信息科学技术学院, 江苏 南通 226019)

**摘要:** 在 4-inch 蓝宝石图形衬底上, 基于 InGaN/GaN 多量子阱结构制备了蓝光 LED 芯片, 并通过与钇铝石榴石黄色荧光粉(YAG: Ce<sup>3+</sup>)结合, 封装成白光 LED 器件。简要介绍了外延生长和芯片工艺及封装流程, 并对材料特性及器件性能进行了表征。外延片表面形貌良好, 蓝光外延片荧光光谱(PL)显示峰值波长为 442 nm。对封装后白光芯片进行电学特性测试, 得出其开启与限流电压分别为 2.7 V 与 3.6 V。此外, 电致发光光谱(EL)含有两个主要的发光峰, 分别是 440 nm 的蓝光峰以及 540 nm 的黄绿光峰, 而随着注入电流的增加, 蓝光峰位先蓝移后红移, 黄绿光峰位先红移后蓝移再红移。本文中相关的芯片制备及表征技术将对固态照明研究起到一定的促进作用。

**关键词:** GaN; YAG 荧光粉; 白光 LED; 表征及性能

中图分类号: TN312+.8

文献标识码: A

DOI: 10.37188/fgxb20204107.0858

## Fabrication and Characterization of GaN-based White LED on 4-inch Patterned Sapphire Substrate

ZHU You-hua\*, LIU Xuan, WANG Mei-yu, LI Yi

(School of Information Science and Technology, Nantong University, Nantong 226019, China)

\* Corresponding Author, E-mail: ntyouhua@ntu.edu.cn

**Abstract:** A blue light emitting diode(LED) chip has been fabricated on a 4-inch patterned sapphire substrate with an InGaN/GaN multiple quantum well structure. It has also been combined with a yttrium aluminum garnet yellow phosphor(YAG: Ce<sup>3+</sup>) to be packaged into a white LED device. In this study, its epitaxial growth, chip process and packaging process have been briefly described. Some material property and device performance have been characterized. The surface of the epitaxial wafer has a good morphology. The photoluminescence(PL) spectrum of the blue epitaxial wafer shows a peak wavelength of 442 nm. Basing on the electrical characteristics of the packaged white light chip, the threshold and current-limit voltages are 2.7 V and 3.6 V, respectively. In addition, the electroluminescence(EL) spectra contain two main peaks with one at 440 nm of blue light and the other one at 540 nm of yellow-green light. With the increase of the injection current, the blue peak varies from blue-shift to red-shift, and the yellow-green varies from red-shift to blue-shift and then red-shift. It is believed that the related chip fabrication and characterization technology would play a certain role in the research for promoting on solid-state lighting field.

**Key words:** GaN; YAG phosphor; white LED; characterization and performance

收稿日期: 2020-04-29; 修订日期: 2020-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(61874168); 江苏省产学研项目(BY2019114)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China(61874168); Industry-University-Research Cooperation Project of Jiangsu Province(BY2019114)

## 1 引言

GaN 基半导体材料作为第三代宽禁带半导体材料,可以通过改变 III 族原子(In, Al, Ga)之间的比例使禁带宽度从 0.7 ~ 6.2 eV 连续可调,覆盖了紫外-可见-红外区域,外加具有直接带隙半导体材料特征,并且有高度的物理和化学稳定性、高电子饱和速度、较好的介电常数以及良好的导热性能,因此 GaN 基半导体材料在光学器件方面的应用更加广泛,是优异的光电代表材料之一<sup>[1-5]</sup>。同时,被誉为“第四代照明光源”的全固态白光发光二极管(Light emitting diode, LED)与传统白炽灯、荧光灯和高强度气体放电灯相比,有着巨大的优势。其发光效率高,使用寿命长,响应时间短,工作电压低,应用范围广,是一种典型的绿色环保光源<sup>[6-9]</sup>。目前,白光 LED 以光色划分主要通过以下 3 种方式实现。其一是将发出 3 种颜色即 Red-Green-Blue(RGB)光的芯片封装在一起混合成白光<sup>[10]</sup>;其二,通过紫外光激发 RGB 荧光粉混合成白光<sup>[11]</sup>;其三,即目前最常用的白光 LED 制作方式,则是采用蓝光 LED 芯片激发黄色荧光粉合成白光<sup>[12]</sup>。由于该荧光粉被激发的黄光与 LED 芯片所发出的蓝光光谱非常匹配,相对于前两种方法,其光子能量转化效率较高,抗辐射能力强,发光效率高,光电性能稳定且成本最低,具有良好的物理化学性质<sup>[13]</sup>。

本文主要是通过蓝光 LED 激发 Ce 掺杂 YAG 黄色荧光粉的封装方式产生白光,并制备对应芯片,简要介绍了其外延和工艺以及封装流程。同时,在对外延片进行结构与材料特性分析基础上,对白光芯片进行电学与光学特性表征,并对各实验结果加以分析讨论,最后得出具有关联性的结论。

## 2 实验

在德国 AIXTRON 公司生产的 MOCVD 机台上生长 GaN 基蓝光 LED 外延片,其主要外延结构如图 1(a)所示,由下到上依次在 4-inch 蓝宝石图形衬底上生长缓冲层、n 型氮化镓层、有源区以及 p 型氮化镓层。其中有源区发光层为 9 个周期的  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$  多量子阱,每个周期对应垒及阱层厚度分别为 12 nm 和 3 nm。将生长后的外延片进行芯片的标准工艺流片,从而

形成 n 电极与 p 电极。其主要工艺步骤为:清洗、光刻、刻蚀、电子束蒸镀、钝化层生长、电极退火和后续的研磨抛光以及切割裂片等。具体实验参数可参考文献[14],其详细的工艺流程如图 1(b)所示。

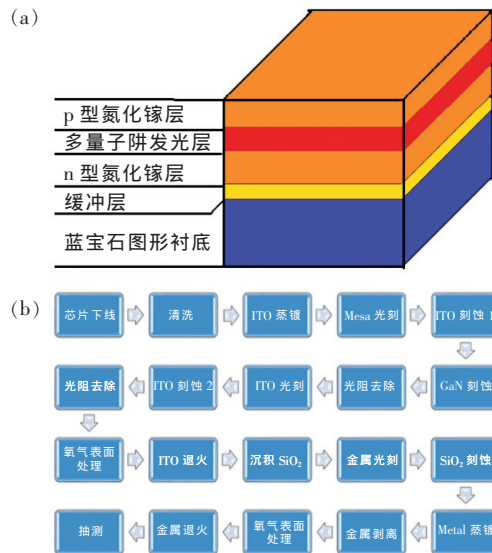


图 1 (a) LED 外延结构图;(b) 工艺流程图。

Fig. 1 (a) LED epitaxial structure diagram. (b) Process flow chart.

本研究中芯片加工后所切割裂片的芯片尺寸为 10 mil × 28 mil,进而再对芯片进行简要封装。封装后白光 LED 的发光原理如图 2 所示,即在芯片上直接均匀涂抹 YAG 荧光粉,其目的就是通过蓝光激发荧光粉发出黄光与蓝光芯片本身发出的蓝光混合而成白光。最后采用环氧树脂将其封装成白光 LED 芯片。此外,外延片生长后通过原子力显微镜(AFM)和激光测量仪(Nanometrics,激发波长为 266 nm)对样品进行结构分析表征。芯片封装后在常温及直流电流下采用 Cascade 探针台以及 iHR320 单色仪等仪器进行电学(I-V)与光学(EL)特性表征。

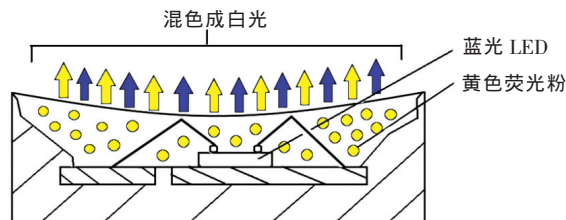


图 2 白光 LED 发光原理图

Fig. 2 White LED lighting schematic diagram

### 3 结果与讨论

采用 AFM 观察外延片的表面,其扫描范围分别为  $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$ 、 $3\ \mu\text{m} \times 3\ \mu\text{m}$  以及  $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ 。如图 3 所示,可以清晰地观察到该样品表面非常平滑,在  $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$  和  $3\ \mu\text{m} \times 3\ \mu\text{m}$  两种扫描范围内均有原子层台阶状的表面形貌,无明显表面异物、缺陷及 V 型凹坑。其均方根粗糙度分别为 0.13, 0.46, 0.34 nm, 说明该样品在  $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$  范围内有更好的表面形貌,但不是随着扫描范围的增加,粗糙度变大。图 3(c) 的粗糙度相比 (b) 反而变小,推测可能是受到其上表面异物等影响。

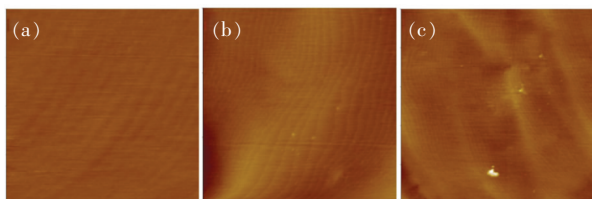


图 3 3 种扫描范围的 AFM 表面形貌。(a)  $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$ ;  
(b)  $3\ \mu\text{m} \times 3\ \mu\text{m}$ ; (c)  $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ 。

Fig. 3 AFM surface morphologies of the three scanning area.  
(a)  $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$ . (b)  $3\ \mu\text{m} \times 3\ \mu\text{m}$ . (c)  $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ .

通过白光反射光谱测得外延片厚度 mapping 图如图 4(a) 所示,外延片厚度分布总体比较均匀,但由于受到衬底图形及腔体内部气流的影响,从细节上来看由中间 ( $5.05\ \mu\text{m}$ ) 向周边 ( $3.50\ \mu\text{m}$ ) 逐渐减小,平均厚度  $5.225\ \mu\text{m}$ 。另外,基于激光测量仪测得外延片的 PL 谱如图 4(b) 所示。从图中可以得出其峰值波长为 442 nm,所对应的光子能量为 0.094 eV,半峰全宽为 14.8 nm,符合结构设计预期的蓝光范畴。

此外,将工艺流片后的样品通过 YAG 荧光粉及环氧树脂的初步封装后置入 Cascade 探针台测得其  $I$ - $V$  特性,如图 5 所示。从图中可以看出电流在  $0 \sim 50\ \text{mA}$  范围内,电压从 2.7 V 增加到 3.6 V,而在该范围之外电流不随电压的变化而变化,由此得出白光芯粒的开启电压为 2.7 V,限流电压为 3.6 V。同时,从图 5 可以看出白光芯粒的出光功率 ( $L$ ) 随着电流增加而不断上升,其出光功率是利用图 6(a) 所示的 EL 谱,在不同电流下分别对  $400 \sim 700\ \text{nm}$  波长范围内积分求得。由于其测试时输入电流的限流范围设定为 50 mA,因

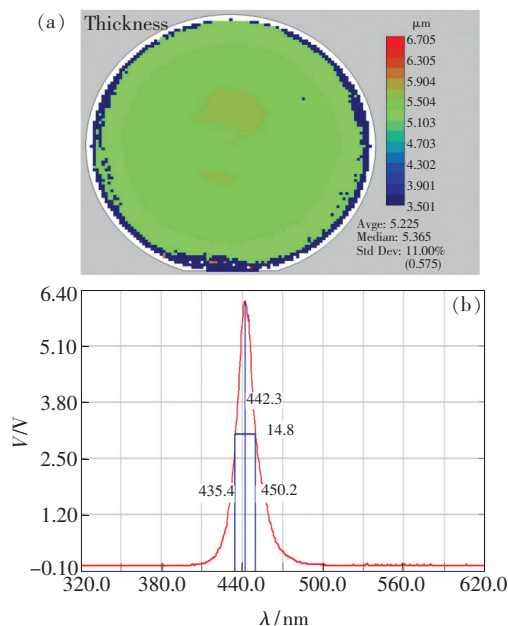


图 4 (a) 外延片厚度 mapping 图; (b) PL 谱。

Fig. 4 (a) Thickness mapping of the epitaxial wafer. (b) PL spectrum.

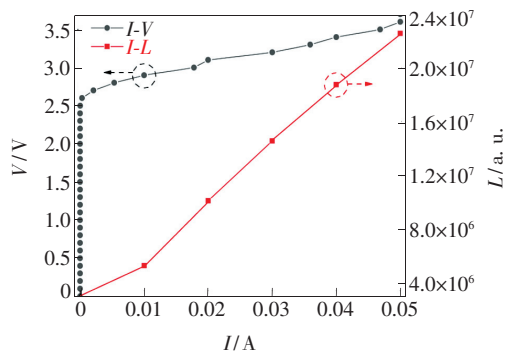


图 5 封装后白光 LED 的  $I$ - $V$  和  $I$ - $L$  特性

Fig. 5  $I$ - $V$  and  $I$ - $L$  characteristics of the encapsulated white LED

此下述的电致发光谱 (EL) 也主要在该电流范围内加以分析。

白光 LED 芯片在不同电流下的 EL 谱如图 6(a) 所示,其中  $I_s$  为强度,  $\lambda$  为波长。在  $10 \sim 50\ \text{mA}$  注入电流下,EL 谱含有两个主要的发光峰: 分别是位于 440 nm 处的蓝光峰及 540 nm 处的黄绿光峰。图 6(a) 中的插图是本实验初步封装后的白光 LED 小芯粒,EL 与 PL 谱在蓝光峰位上体现了实验数据的高度一致性。随着电流的增加,蓝光与黄绿光的荧光强度均不断增大,荧光强度增大表明短波长的蓝光吸收效率和荧光量子效率都比较高,因此导致短波长黄绿光荧光峰更强<sup>[15]</sup>。图 6(b) 表示在  $10 \sim 50\ \text{mA}$  电流注入下,



白光芯粒 EL 谱的蓝光和黄绿光两种峰值波长变化图。随着注入电流的增加,蓝光峰位由 10 mA

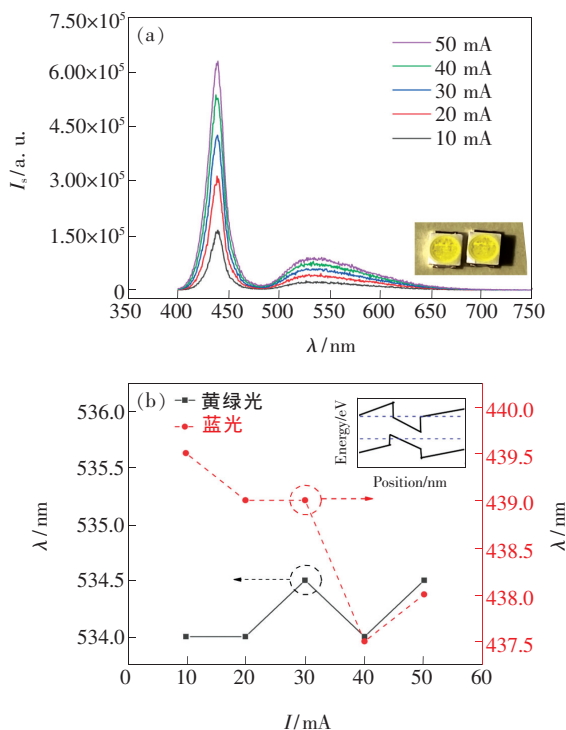


图6 封装后白光 LED 的 EL 谱以及电流与两种发光峰值波长的关系。(a)不同注入电流下的发光强度,插图为封装后白光 LED 小芯粒;(b)不同注入电流下蓝光与黄绿光峰值变化,插图为极化电场作用下的能带结构示意图。

Fig. 6 EL spectra of the packaged white LED and the relationship of current and two wavelength peaks. (a) Wavelength intensity at different injection currents, the illustration is the packaged white LED chip. (b) Peak shifts of the blue light and yellow-green light at different injection currents, and the illustration is the band structure schematics with the polarized electric field.

## 参 考 文 献:

- [1] 李建飞. GaN 基 HEMT 和 LED 结构的光电特性研究 [D]. 济南:山东大学, 2018.  
LI J F. *Study of Electrical and Optical Properties on GaN-based HEMT and LED* [D]. Jinan: Shandong University, 2018. (in Chinese)
- [2] 胡培培. III-V 族半导体材料及 AlGaIn/GaN HEMT 器件辐照效应研究 [D]. 北京:中国科学院近代物理研究所, 2019.  
HU P P. *Investigation of Radiation Effects of III-V Semiconductor Materials and AlGaIn/GaN HEMT Devices* [D]. Beijing: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [3] 曹亚庆, 黄火林, 孙仲豪, 等. 基于宽禁带 GaN 基异质结结构的垂直型高温霍尔传感器 [J]. 物理学报, 2019, 68(15): 158502-1-10.

的 439.5 nm 蓝移到 40 mA 的 437.5 nm,接着开始红移;黄绿光峰位由 10 mA 的 534 nm 红移到 30 mA 的 534.5 nm,接着再蓝移至 40 mA 的 534 nm 后再次红移。蓝光峰的蓝移是由其物理性质引起,如图 6(b)插图所示,由于极化场的存在导致能带倾斜,当电流增加时,注入的载流子屏蔽了极化电场,使得能带倾斜得以缓和,从态重叠空间上载流子复合产生光子的能量变大。同时也有可能受能带填充的影响,导致导带与价带的能量间距增加发生蓝移<sup>[14]</sup>。而之后的红移与黄绿光峰的红移类似,在小电流注入下芯片可能受到热效应的影响,导致禁带宽度减少,波长红移;随着注入电流的增加,推测受到竞争机制的影响,量子限制斯塔克效应的作用大于芯片热效应的作用,波长蓝移;同时由于封装后芯片尺寸过小,受生长结构与封装工艺的影响,在电流继续增大后芯片热效应占主要作用,波长红移。其色坐标、色温及显色指数的变化将在后续研究中再进行探讨。

## 4 结 论

本研究主要验证了在蓝宝石图形衬底上生长 GaN 基蓝光 LED,并利用 YAG 黄色荧光粉封装成白光 LED,对其结构与性能进行了相关表征。AFM 表明外延片生长及表面形貌良好,无明显缺陷;PL 谱测得其峰值波长为 442 nm; $I-V$  特性得出其开启与限流电压分别为 2.7 V 和 3.6 V;EL 谱显示其在 10 ~ 50 mA 注入电流下分别有蓝光与黄绿光发光峰,即合成所设计的预期白光。而随着注入电流的增加,蓝光峰位先蓝移后红移,黄绿光峰位先红移后蓝移再红移。总之,通过对相关实验数据分析与讨论,进一步验证了该 GaN 基白光 LED 芯片得以成功制备。

- CAO Y Q, HUANG H L, SUN Z H, *et al.*. Demonstration of wide-bandgap GaN-based heterojunction vertical Hall sensors for high-temperature magnetic field detection [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2019, 68(15):158502-1-10. (in Chinese)
- [ 4 ] 宋嘉良, 文尚胜, 马丙戌, 等. GaN 基白光 LED 可靠性研究与失效分析 [J]. *发光学报*, 2018, 39(12):1705-1713.
- SONG J L, WEN S S, MA B X, *et al.*. Invalid analysis and dependability research of GaN-based white LED [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2018, 39(12):1705-1713. (in Chinese)
- [ 5 ] 于莉媛, 杨磊, 田海涛, 等. 电子束辐照对 GaN 基白光 LED 发光性能的影响 [J]. *固体电子学研究与进展*, 2018, 38(2):127-131.
- YU L Y, YANG L, TIAN H T, *et al.*. Influence of electron beam irradiation on luminescence properties of GaN-based white LED [J]. *Res. Prog. SSE*, 2018, 38(2):127-131. (in Chinese)
- [ 6 ] 曹逊, 曹翠翠, 孙光耀, 等. 单基质白光 LED 荧光粉研究进展 [J]. *无机材料学报*, 2019, 34(11):1145-1155.
- CAO X, CAO C C, SUN G Y, *et al.*. Recent progress of single-phase white light-emitting diodes phosphors [J]. *J. Inorg. Mater.*, 2019, 34(11):1145-1155. (in Chinese)
- [ 7 ] 易灵红, 万卫平, 吴春燕. 白光 LED 用新型荧光粉的探索 [J]. *化工技术与开发*, 2011, 40(9):25-27.
- YI L H, WAN W P, WU C Y. Exploration of new phosphors for white light emitting diode [J]. *Technol. Dev. Chem. Ind.*, 2011, 40(9):25-27. (in Chinese)
- [ 8 ] LIU X Y. Development perspective of LED and backlight [J]. *Lamps Light.*, 2008, 12(4):14-17.
- [ 9 ] 刘婉露. 钛酸钡基荧光粉的制备及其光致发光性能研究 [D]. 上海:中国科学院上海硅酸盐研究所, 2018.
- LIU W L. *Synthesis and Photoluminescence Properties of Barium Titanate Based Phosphors* [D]. Shanghai:Shanghai Institute of Silicate, Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
- [ 10 ] WALTEREIT P, BRANDT O, TRAMPERT A, *et al.*. Nitride semiconductors free of electrostatic fields for efficient white light-emitting diodes [J]. *Nature*, 2000, 406(6798):865-868.
- [ 11 ] 谢晔, 印瑛, 张瑞西, 等. 白光 LED 用单一基质白光荧光粉的研究进展 [J]. *化工新型材料*, 2012, 40(2):24-27.
- XIE Y, YIN Y, ZHANG R X, *et al.*. Progress in the single matrix white light emitting phosphor for white-light LED [J]. *New Chem. Mater.*, 2012, 40(2):24-27. (in Chinese)
- [ 12 ] LIN C C, LIU R S. Advances in phosphors for light-emitting diodes [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2011, 2(11):1268-1277.
- [ 13 ] 杨程. 白光 LED 用 YAG 系列荧光材料的制备及光学性质研究 [D]. 温州:温州大学, 2017.
- YANG C. *The Preparation and Optical Properties of Yag Fluorescent Materials for White LED* [D]. Wenzhou:Wenzhou University, 2017. (in Chinese)
- [ 14 ] 刘轩, 王美玉, 李毅, 等. 阶梯状量子阱结构对蓝光 GaN 基 LED 性能的改善 [J]. *半导体技术*, 2019, 44(10):767-772.
- LIU X, WANG M Y, LI Y, *et al.*. Performance improvement of GaN-based blue LED with step-like quantum well structure [J]. *Semicond. Technol.*, 2019, 44(10):767-772. (in Chinese)
- [ 15 ] 陈志忠, 秦志新, 胡晓东, 等. 大功率白光 LED 的制备和表征 [J]. *液晶与显示*, 2004, 19(2):83-86.
- CHEN Z Z, QIN Z X, HU X D, *et al.*. Fabrication and characterization of high-power white LED [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2004, 19(2):83-86. (in Chinese)



朱友华(1976 - ),男,江苏海门人,博士,副教授,硕士研究生导师,2012年于日本名古屋工业大学获得博士学位,主要从事宽禁带化合物半导体材料生长与器件物理等相关研究。

E-mail: ntyouhua@ntu.edu.cn