

文章编号: 1000-7032(2009)03-0379-06

瓦级大功率 InGaN 蓝光 LED 的光色电特性

林介本^{1,2}, 郭震宁^{1*}, 陈丽白¹, 吴利兴², 阮源山², 林瑞梅³

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021;

2. 福建省泉州市紫欣光电有限公司, 福建 泉州 362000;

3. 福建省厦门光莆电子有限公司, 福建 厦门 361006)

摘要: 封装并测量了瓦级大功率 InGaN 蓝色发光二极管(LED)在不同正向电流 I_F 驱动下的光通量、电功率、发光效率、发射光谱和色品坐标等参数的变化。研究表明,光通量与电功率随 I_F 的增大呈亚线性增加,而发光效率 η 则下降。当 I_F 从 50 mA 一直增大到 450 mA 左右时,发射光谱的峰值波长 λ_p 随 I_F 的增加发生蓝移,蓝移现象可能与 InGaN 蓝光 LED 芯片在较大电流时能带被拉平以及 In 成分的作用有关。当 I_F 大于 500 mA 或 800 mA 后, λ_p 又发生红移,红移现象可能与大电流注入下 InGaN 蓝光 LED 芯片产生的热效应以及电子-空穴对辐射复合有关。此外,光谱的半峰全宽(FWHM)产生宽化现象,色坐标 x 和 y 值也发生变化。

关键词: 大功率; InGaN 基蓝光 LED; 蓝移; 红移

中图分类号: O482.31; TN312.8

PACS: 78.60.Fi

PACC: 7860F

文献标识码: A

1 引 言

近几年来 LED 芯片发光效率不断提高,使得白光 LED 作为固态照明光源逐步被人们实现。随着大功率 LED 芯片技术与光伏技术的发展,大功率白光 LED 将有可能与太阳能电池等节能电源集成而成为未来绿色的全固态节能照明光源,如太阳能路灯等。由于白光 LED 具有广阔的照明市场,各个国家和地区均投入巨资研发白光 LED 照明光源。

白光 LED 的制备有多种方案^[1,3],其中 InGaN 蓝光芯片激发 YAG 黄色荧光粉仍然是目前照明市场上最主流的白光 LED 实现方案。因此, InGaN 蓝光芯片的性能优劣是制备白光 LED 的关键^[2,3]。器件散热是影响大功率白光 LED 发光效率最突出的问题,人们普遍认为温度升高使蓝光 LED 芯片的峰值波长红移,造成芯片发射波长与荧光粉激发波长不匹配,使白光 LED 发光效率下降^[4]。

要制备出发光效率高,质量可靠的白光 LED,特别是低色温高显色性白光 LED^[5,6],人们

必须深入认识 InGaN 蓝光 LED 的性能。但是,对于蓝光 LED 的光色电特性,特别是蓝光 LED 峰值波长随驱动电流增大先蓝移后红移的现象,仍未见有系统的报道。因此,深入系统地研究大功率 InGaN 蓝光 LED 的光色电性能对提高大功率蓝光 LED 芯片品质和制备大功率白光 LED 有着十分重要的参考价值。

本文封装并测试了瓦级大功率 InGaN 蓝光 LED 的光通量、电功率、发光效率、发射光谱和色品坐标等参数的变化,深入分析了光色电参数的变化规律,并对其变化的具体原因进行了深入探讨。

2 实 验

实验制备了瓦级大功率蓝光 LED 样品 1、2、3。样品分别采用国内外不同厂家的 InGaN 蓝光 LED 芯片,其发射峰分别为 460 ~ 465 nm, 455 ~ 460 nm, 450 ~ 455 nm, 芯片尺寸均为 1 mm × 1 mm, 样品 1、2 为双电极(正装)结构,样品 3 为单电极(垂直)结构。另外采用与样品 2 同一厂家的 InGaN 绿光芯片(尺寸为:1 mm × 1 mm)制备

收稿日期: 2008-07-31; 修订日期: 2008-08-29

基金项目: 国务院侨办科研基金(06QZR02); 福建省泉州市科技计划重点项目(2008G7)资助项目

作者简介: 林介本(1984-), 男, 福建莆田人, 主要从事大功率 GaN 基白光 LED 的封装与测试的研究。

E-mail: ljb845552@163.com

*: 通讯联系人; E-mail: znguo2003@yahoo.com.cn

瓦级绿光 LED 样品 4。4 款样品的封装工艺为：首先用高热银胶将芯片固化在镀银铜支架上，使用金球焊线机在芯片正负极各引两条直径为 0.03 mm 的金线，然后盖上 PC 透镜，并填充高折射率硅胶后在 150 °C 条件下烘烤 1 h，最后将支架用导热硅脂粘结在厚度约为 1 mm 的梅花状铝基板热沉上，得到实验所需的 4 款样品。

样品的光电参数、色品质均采用杭州远方光电信息有限公司的 LED300 光色电综合测量系统进行测试与记录。该系统配有 STC3000 快速光谱仪和直径为 0.3 m LED 专用积分球，并内置量程为 0 ~ 2 000 mA 的直流恒流源。在室温下，调节正向电流 I_F (间隔 50 mA)，记录 I_F 从 50 mA 增大到 1 000 mA 过程中样品的正向电压、光通量、电功率、光效、色坐标 (x , y)、发射光谱的半峰全宽等。

3 结果与讨论

3.1 光通量、电功率与发光效率

如图 1 所示为样品 1、2、3 的光通量、电功率、发光效率随正向电流的变化曲线。由图 1 可知，3 个样品的光通量 Φ 、电功率 P 均随正向电流 I_F 的增加呈亚线性增大关系，而发光效率 η 却逐步递减。这是因为蓝光 LED 芯片的有源层是具有直接带隙的 InGaN 半导体材料，它依赖电子与空穴的辐射复合产生蓝光。当 I_F 为小电流时，pn 结的缺陷、无辐射复合以及结温的影响较小。随着 I_F 的增大，pn 结电流密度提高，注入的电子-空穴对复合增强，使得光通量随 I_F 增加呈亚线性增大。当 I_F 继续上升， Φ - I_F 曲线斜率减小，蓝光光通量趋于饱和，增强变缓，其原因可能是源自 pn 结的①电子在大电流时扩散出势阱，使无辐射复合成分上升^[4]；②缺陷和有害中心的影响逐渐增强^[7]；③功耗增大，结温上升。

Rossia 等认为 Mg-H₂ 为主的 Mg 不稳定化合物易分解成浅受主新能级，产生线位错和点位错^[8]。而 In 组分可使 GaN/InGaN 中晶格失配率高，也可能产生一些线位错^[9]。这些位错均为无辐射复合中心，可俘获大电流注入时大量的载流子。当 I_F 进一步上升时，电功率增大，结温升高，部分能量被晶格吸收，同时使光辐射产生温度猝灭^[10]。此外，随着电功率的增加，结温的上升，载流子的动能增大，造成载流子泄漏，导致反向漏电

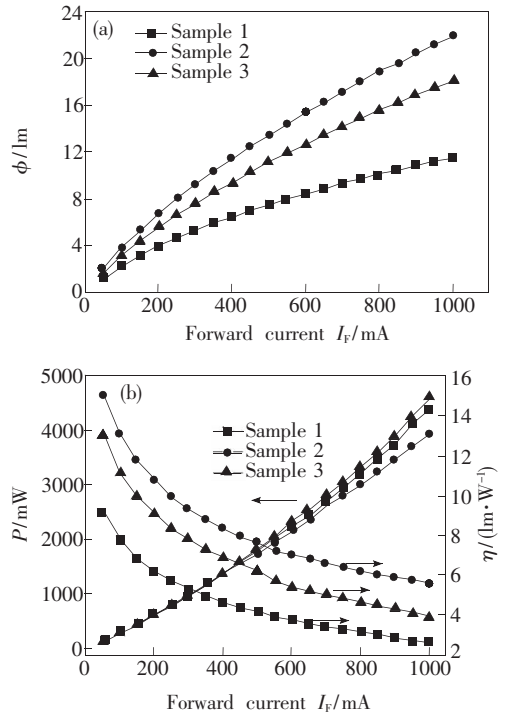


图 1 光通量(a)、电功率、发光效率(b)与正向电流的关系曲线

Fig. 1 Relation curves of luminous (a), electric power and efficiency (b) vs. forward current.

流的增大^[11]，使大功率蓝光 LED 的光通量呈现饱和现象，且发光效率 $\eta = \frac{\Phi}{w}$ (lm/W) 随 I_F 的增加呈递减趋势[如图 1(b)所示]。通常人们通过优化 GaN/InGaN 量子阱、增加电子反射层，增加钝化层等方法来提高电性能，减少漏电流对发光效率的影响。

3.2 EL 光谱

图 2 (a) 和图 2 (b) 分别给出样品 2、3 的 InGaN 蓝芯片制作的蓝光 LED 在 100, 350, 700, 1 000 mA 的正向电流下的 EL 光谱。从图中可以看出，发射光谱呈现高斯分布。两种蓝光 LED 在 $I_F = 350$ mA 下，发射色纯度高于 96% 的纯蓝光，样品 2 发射峰为 457.6 nm，样品 3 发射峰为 453.2 nm，均满足同时激发 YAG 黄色荧光粉，硅酸盐绿色荧光粉，氮氧化物红色荧光粉的需要，可用于制备高显色性暖白光 LED。

如图 2 所示，当 I_F 从 50 mA 开始增加，发射光谱谱形和发射峰会发生变化。和 100 mA 正向驱动电流下的发射光谱相比，350, 700, 1 000 mA 下的 EL 光谱和发射峰向短波移动，即发生蓝移；当电流进一步增大时 (>500 mA 或 800 mA)，发射

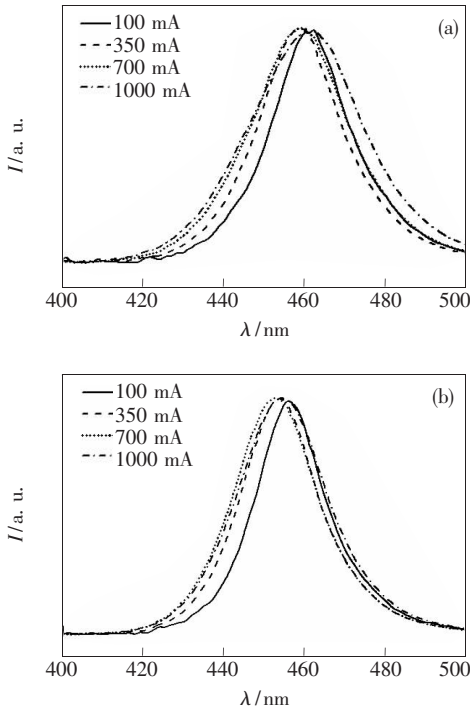


图2 在 100, 350, 700, 1 000 mA 的正向电流下, 样品 2 (a) 和 3 (b) 的 EL 光谱
Fig.2 EL spectra of sample 2 (a) and 3 (b) with the forward current of 100, 350, 700 and 1 000 mA, respectively.

光谱又将出现红移现象。该现象在实验的样品以及产线抽样的产品中均有发现, 但不同厂家的蓝光 LED 蓝移和红移的情况有所不同。实验表明: 样品 1、2、3 由蓝移转为红移的区间分别在 500 ~ 750 mA, 350 ~ 600 mA 和 650 ~ 800 mA。

3.2.1 光谱蓝移的分析

In 成分的波动是光谱出现蓝移的关键原因之一。In 成分波动在 InGaN 阱中形成 290 meV 的深束缚态, 可能会对能带起填充作用^[12]。Lee 等^[13]研究表明, InGaN 基绿光芯片含有的 In 成分比 InGaN 基蓝光芯片要多, 使其蓝移更为明显。如图 3 所示, 比较样品 2、4 的光谱漂移情况, 在 50 mA 峰值波长分别为 462.0, 523.4 nm, 蓝移至最短波长分别为 457.6 nm ($I_F = 400$ mA), 517.8 nm ($I_F = 350$ mA)。样品 2 蓝移约 0.013 nm/mA, 样品 4 蓝移约 0.019 nm/mA。本实验进一步证实了 In 成分对蓝移的影响。

利用 In 成分的作用, Wang 等^[14]通过 InGaN 的应力调制层, 使 InGaN 量子阱中形成了大量的富 In 量子点。对 InGaN/GaN 多量子阱进行应力

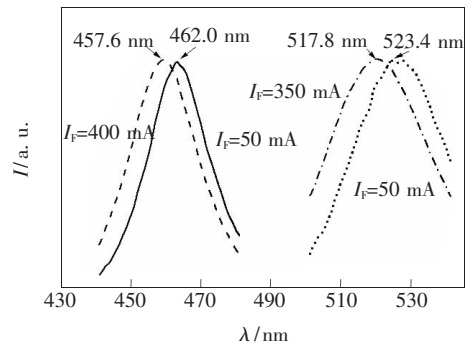


图3 蓝(样品 2)、绿光(样品 4) LED 蓝移量的差异
Fig.3 Different blue-shift between blue and green LEDs

调制和控制, 即可实现无荧光粉的单芯片白光发光器件。芯片在低注入电流的时候, 载流子先被富 In 量子点俘获, 芯片发黄光; 随着电流增加, 量子点之外的量子阱区域开始俘获载流子, 辐射复合发射出蓝光, 蓝光与黄光混合产生白光。

Sala 等^[15]研究结果表明: 若正向注入大电流, 大量的载流子会对电场起屏蔽作用, 也可使能带被拉平而产生蓝移。因此, 当 InGaN 基蓝光 LED 工作时, 发射光谱的峰值波长随着正向电流的增大而蓝移。

3.2.2 光谱红移的分析

目前, Mg、Zn 是基于 MOCVD 生长的 p 型 GaN 层最合适的掺杂元素。当载流子注入时, 电子与空穴注入在此活性层借助 Mg 复合中心发生复合辐射光子, 符合施主-受主(D-A)对复合发光机制^[16], 其辐射的光子能量 $h\nu$ 可表示为

$$h\nu = (E_g - E_D + E_A) + e^2/4\pi\epsilon_0\epsilon R \quad (1)$$

其中, E_g 为禁带宽度, E_D 和 E_A 分别为施主和受主的结合能, R 代表 D-A 对之间的距离, $e^2/\epsilon R$ 为库仑能, 与 R 有关。

实验数据表明, 当驱动电流持续增大后, InGaN 蓝光 LED 出现红移的现象, 可能由以下因素引起:

首先, 随着 InGaN 蓝光 LED 芯片工作电流增加, 功耗增大, 必然会导致其结温升高。若只考虑热效应引起的红移现象, 即可通过计算得到禁带宽度和温度的关系。由于禁带宽度随着温度的升高而收缩, 光子能量随之减小。

其次, 在大电流 ($I_F > 500$ mA 或 800 mA) 下, 载流子注入使得 D-A 对俘获的电子-空穴对增加, D-A 层能级逐渐展宽, D-A 对间距 R 增大, 辐射复合的光子能量减少, 最终导致发射光谱红移

现象。

3.2.3 半峰全宽 (FWHM) 宽化的分析

如图 4 所示,光谱半峰全宽 (FWHM) 随 I_F 的增大而宽化。其原因之一可能是温度 T 随着 I_F 的增大而升高,晶格振动能越大,处于激发态的电子先弛豫到较高的振动态,后跃迁至基态,使得发射光谱逐步展宽。根据位形坐标模型^[17],位形差 $(\Delta e_m)^2$ 正比于 $k_B T$, T 为温度,而光谱半峰全宽 $\Delta\omega \propto \Delta e_m$ 。故

$$\Delta\omega(\text{FWHM}) \propto T^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

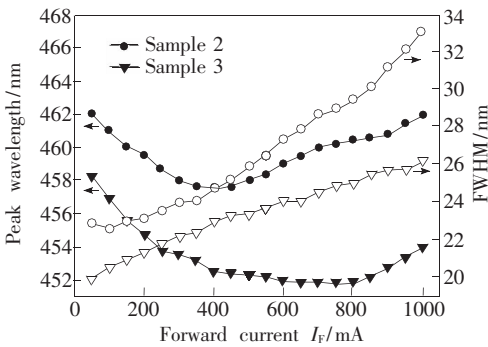


图 4 峰值波长、半峰全宽随正向电流变化曲线

Fig. 4 Relation curves of peak wavelength, FWHM vs. forward current

其原因之二还可能是随着电流注入增大,载流子浓度增大,对能带起到一定填充作用,使导带和价带能级加宽,导致 EL 光谱宽化。此外,In 组分不均匀使能带的应变或偏移也可能造成其 EL 光谱宽化^[13,14]。

3.3 色品坐标 x, y 的变化

由图 4 可知,在不同的正向电流 I_F 的驱动下,InGaN 蓝光 LED 芯片发射峰 λ_p 和光谱的半峰全宽均发生变化。这种变化使色纯度和色比产生波动,最终导致了色品坐标 x, y 值也发生了变化。如图 5 所示, x 值先随 I_F 增大而增加,当 I_F 大于 500 mA 后, x 值逐步减小, y 值的变化趋势与之相反。样品 3 的 x, y 值在 0 ~ 800 mA 区间分别呈上升与下降趋势,当 I_F 在 800 ~ 1 000 mA 范围内时, x, y 值则保持在 (0.151 8, 0.032 9)。样品

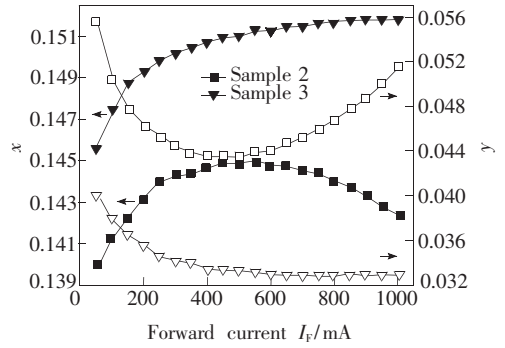


图 5 蓝光 LED 的色坐标 x, y 值与正向电流 I_F 的关系
Fig. 5 Relation curves of chromaticity coordinate x, y value vs. forward current I_F of blue LEDs

3 比样品 2 变化趋势不明显,主要是由于样品 3 所采用的蓝光芯片为垂直结构,该芯片采取金属合金衬底(导热系数接近 $400 \text{ W/m} \cdot \text{k}$),不仅散热性能好,而且可耐大电流,整体性能比较稳定,使得色纯度、蓝色比波动范围分别仅为 0.2%、2.3%。样品 2 采用传统的蓝宝石衬底导热系数为 $50 \text{ W/m} \cdot \text{k}$,仅是金属合金衬底的 1/8,其对应的色纯度、蓝色比波动范围分别达 1.0%、4.3%。

4 结 论

对 1 W 大功率 InGaN 蓝光 LED 进行了封装与测试,研究表明:蓝光 LED 的光通量、电功率、发光效率、发射光谱,色坐标以及光谱半峰全宽与其正向驱动电流有紧密的联系。光通量、电功率随着正向电流的增加呈亚线性增长,并趋于饱和,发光效率则逐渐下降。在 I_F 较小时,In 成分的波动和能带被拉平使蓝光 LED 发射光谱和峰值波长随 I_F 增加发生蓝移;当 I_F 增大到 500 mA 或 800 mA 时,电功率增加产生的热效应以及电子-空穴对的辐射复合,促使蓝光 LED 的发射光谱和峰值波长随 I_F 的增加而发生红移。此外,随 I_F 的增加,蓝光 LED 的光谱半峰全宽 (FWHM) 产生宽化现象,色坐标 x, y 值也发生变化。InGaN 蓝光 LED 的上述光色电特性,将决定制造白光 LED 时荧光粉的选择及其成品的光谱特性和质量。

参 考 文 献:

- [1] Katsuya Kobashi, Tsunemasa Taguchi. Warm white LEDs lighting over $R_a = 95$ and its applications [J]. *SPIE*, 2007, **6486**:648610-1-6.
- [2] Fang Fubo, Wang Yaohao, Song Daihui, et al. Spectroscopic analysis of white LED attenuation [J]. *Chin. J. Lumin.*

- (发光学报), 2008, **29**(2):353-356 (in Chinese).
- [3] Wu Qing, Huang Xian, Liu Li, *et al.* The corresponding relation between the color coordinate and the luminous flux [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2007, **28**(5):736-740 (in Chinese).
- [4] Wang Jian, Huang Xian, Liu Li, *et al.* Effect of temperature and current on LED luminous efficiency [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2008, **29**(2):358-362 (in Chinese).
- [5] Naoki Kimura, Ken Sakuma, Syunichiro Hirafune. Extrahigh color rendering white light-emitting diode lamps using oxynitride and nitride phosphors excited by blue light-emitting diode [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(5):051109-1-3.
- [6] Xie Rongjun, Naoto Hirosaki, Naoki Kimura, *et al.* 2-phosphor-converted white-emitting diodes using oxynitride/nitride phosphors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(19):191101-1-3.
- [7] Li Xiaobai. Development of GaN-based solid-state devices [J]. *Semiconductor Technology* (半导体技术), 2001, **26**(5):20-25 (in Chinese).
- [8] Rossia F, Armania N, Salviatia G, *et al.* The role of Mg complexes in the degradation of InGaN-based LEDs [J]. *Superlattices and Microstructures*, 2004, **36**(4-6):859-868.
- [9] Sugahara T, Sato H, Hao M, *et al.* Direct evidence that dislocations are non-radiative recombination centers in GaN [J]. *Jpn. J. Appl. Phys. Part 2*, 1998, **37**(4A):L398-L400.
- [10] Lei Yong, Fan Guanghan, Liao Changjun, *et al.* Research on the thermal property of powerful white LEDs [J]. *J. Optoelectronics & Laser* (光电子·激光), 2006, **17**(8):945-947 (in Chinese).
- [11] Lin Liang, Chen Zhizhong, Chen Ting, *et al.* Characteristics of the accelerated aging white LEDs [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2005, **26**(5):617-620 (in Chinese).
- [12] Xu Xiaoliang, Shi Chaoshu. Defects and impurities in GaN [J]. *Progress in Phys.* (物理学进展), 2001, **21**(1):1-11 (in Chinese).
- [13] Lee Y J, Lin P C, Kuo H C, *et al.* Dichromatic InGaN-based white light emitting diodes by using laser lift-off and wafer-bonding schemes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(16):161115-1-3.
- [14] Wang X H, Jia H Q, Guo L W, *et al.* White light-emitting diodes based on a single InGaN emission layer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(16):161912-1-3.
- [15] Sala F D, Carlo A D, Lugli P, *et al.* Free-carrier screening of polarization fields in wurtzite GaN/InGaN laser structures [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**(14):2002-2004.
- [16] Yu Lisheng. *Semiconductor Hetero-junction Physics* [M]. 2nd Edition, Beijing: Science Press, 2006, 170.
- [17] Fang Rongchuan. *Solid State Spectroscopy* [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001, 127-132.

Watt-level High Power InGaN-based Blue LED Photometric, Chromatic and Electric Characteristics

LIN Jie-ben^{1,2}, GUO Zhen-ning¹, CHEN Li-bai¹, WU Li-xing², RUAN Yuan-shan², LIN Rui-mei³

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;

2. Quanzhou Zixin Opto-electronic Co., Ltd., Quanzhou 362000, China;

3. Xiamen Guangpu Electronic Co., Ltd., Xiamen 361006, China)

Abstract: Watt-level high power InGaN-based blue LEDs were packaged using a traditional packaging method, and their luminous flux, electric power, luminous efficiency, emission spectra and chromaticity coordinates were measured under different forward current (I_F) from 50 to 1 000 mA, with a current interval of 50 mA. The results showed that the luminous flux rises sub-linearly, but the luminous efficiency declines with the increase of I_F . When the temperature rises with the increase of drive current, the carrier kinetic energy enhances, and then more non-equilibrium electrons diffuse out of the quantum wells, which could result in the

decrease of luminous efficiency. The spectrum morphologies and the peak wavelength λ_p shows a slight blue-shift with the increase of I_F from 50 mA to 450 mA, which is related to the influence of In ingredient and the leveled band-gap at a proper high current. The blue-shift values are different between different blue LEDs. However, when I_F increases from 500 mA to 800 mA, λ_p shows a slow red-shift due to the temperature dependence of band-gap energy, and the electron-hole pair recombination luminescence mechanism. In addition, full width at half maximum (FWHM) of the InGaN-based blue LED emission spectra is widened, and the reason was analyzed by the model of configuration coordinate. Moreover, the chromaticity coordinate x, y also changes at the same time.

Photometric, chromatic and electric characteristics of blue LEDs make important contributions to chip manufacture and the high power white light LEDs, especially, to the high color rendering warm white LEDs.

Key words: high power; InGaN-based blue-LED; blue-shift; red-shift

CLC number: O482.31; TN312.8

PACS: 78.60.Fi

PACC: 7860F

Document code: A

Received date: 2008-07-31

向您推荐《液晶与显示》——中文核心期刊

《液晶与显示》是中国最早创办的液晶学科专业期刊,也是中国惟一的液晶学科和显示技术领域综合性专业学术期刊。它由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国光学光电子行业协会液晶专业分会和中国物理学会液晶分会主办,科学出版社出版。

《液晶与显示》以研究报告、研究快报、综合评述和产品信息等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域最新理论研究、科研成果和创新能力,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态,是宣传、展示我国该学科领域和产业科技创新实力与硕果,进行国际交流的平台。本刊是英国《科学文摘》(INSPEC)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、“中国科技论文统计源期刊”等 20 余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊。

《液晶与显示》征集有关各类显示材料及制备方法、液晶显示、等离子体显示、阴极射线管显示、发光二极管显示、有机电致发光显示、场发射显示、微显示、真空荧光显示、电致变色显示及其他显示、各类显示器件物理和制作技术、各类显示新型模式和驱动技术、显示技术应用、显示材料和器件的测试方法与技术、成像技术和图像处理等研究论文。《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿。同时,竭诚欢迎社会各界洽谈广告业务、合作组织技术交流与信息发布活动。

《液晶与显示》为双月刊,国内定价 30 元。国内邮发代号:12-203;国外发行代号:4868BM。广告经营许可证号:2200004000068。

地 址:长春市东南湖大路 3888 号

《液晶与显示》编辑部

邮 编:130033

电 话:(0431)86176059

E-mail: yjxs@ciomp.ac.cn

国内统一刊号:CN 22-1259/04

国际标准刊号:ISSN 1007-2780

国际刊名代码(CODEN):YYXIFY

传 真:(0431)84695881

网 址:www.yjxs.com