

# 408nm InGaN/GaN LED 的材料生长 及器件光学特性

王晓华<sup>†</sup> 展 望 刘国军

(长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 长春 130022)

**摘要:** 通过提高 InGaN 量子阱结构的生长温度,降低量子阱 In 组分的掺入效率,提高 InGaN/GaN 量子阱结构生长质量,缩短 LED 输出波长等手段,实现了紫光 LED 高效率输出.采用高分辨率 X 射线双晶衍射、扫描隧道显微镜和光致发光谱技术研究了高温生长 InGaN/GaN 多量子阱的结构和光学特性.封装后的  $300\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$  LED 器件在 20mA 的注入电流下输出功率为 5.2mW,输出波长为 408nm.

**关键词:** 量子阱; GaN; LED

EEACC: 4260D

中图分类号: TN312.8

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)01-0104-04

## 1 引言

由于以 III 族氮化物为主的第三代半导体材料及 LED 等器件的技术上的突破并迅速产业化,科学工作者一直在努力追求实现固体光源,以取代目前使用的白炽灯和荧光灯的照明光源系统.以白光 LED 为光源的照明市场发展潜力值得期待.与白炽钨丝灯泡及荧光灯相比,LED 具有体积小、发热量低、耗电量小、寿命长、反应速度快、环保(耐震动、耐冲击不易破碎、废弃物可回收,没有污染)、可平面封装、易开发成轻薄短小产品等优点,没有白炽灯泡易碎及日光灯废弃物含汞污染环境等缺点,是未来替代传统照明器具的一大潜力商品.

白炽灯的亮度一般为  $8 \sim 12 \text{ lm/W}$ ,荧光灯的亮度为  $80 \text{ lm/W}$ ,而目前白光 LED 的亮度仅  $30 \sim 50 \text{ lm/W}$ ,比白炽灯亮度高,但低于荧光灯,因此,还不足以取代现在的主要照明光源.制约高亮度 LED 发展的因素除了荧光粉外,另一重要因素就是所用的高功率蓝、紫或紫外光 LED 器件.提高其性能的主要手段就是,从 GaN 基材料生长和器件工艺着手,解决其中制约器件性能的关键因素.

目前,实现白光 LED 技术主要有三种方式:一是利用三基色原理将红、绿、蓝三种超高亮度 LED 混合成白光;二是采用 InGaN 蓝色 LED 管芯上加少量以钇铝石榴石为主的荧光粉;三是用紫光及紫外光 LED 激发三基色荧光粉或其他荧光粉,产生多色光混合成白光.

三种方式中,短波长紫光或紫外光 LED,有望

实现高亮度的白光 LED 输出.虽然目前紫外波段取得很大进展,但是由于生长技术方面的限制,实现高效率紫外波段 LED 比较困难.而在波长  $400 \sim 410\text{nm}$  范围内,采用低 In 组分的 InGaN 作为量子阱,能够实现大功率、高效率 LED 输出.

本文采用低压 MOCVD 法生长 InGaN/GaN 多量子阱(MQW)紫光 LED 结构,采用比蓝光 LED 量子阱生长温度更高的生长温度,生长紫光 LED 的 MQW 结构,研究生长温度对 LED 光学和结构特性的影响,以期实现紫光 LED 高效率发光.

## 2 实验

实验采用低压( $10^4 \text{ Pa}$ )MOCVD 方法在蓝宝石(0001)衬底上生长六方 GaN 基 LED 结构.使用三甲基镓(TMGa)、三甲基铝(TMAl)和三甲基铟(TMIn)分别作为 Ga, Al 和 In 源.在生长量子阱过程中,用三乙基镓(TEGa)做 Ga 源, $\text{SiH}_4$  和  $\text{Cp}_2\text{Mg}$  作为 n 型及 p 型杂质源,以高纯  $\text{NH}_3$  气为氮源,氢气为载气,生长 InGaN/GaN 多量子阱结构时氮气为载气.生长前,衬底在氢气气氛中  $1100^\circ\text{C}$  清洁表面. GaN 缓冲层的生长温度为  $520^\circ\text{C}$ ,厚度大约  $20\text{nm}$  左右.然后升温至  $1050^\circ\text{C}$  生长  $1.0\mu\text{m}$  非掺杂 GaN 层和  $1.5\mu\text{m}$  掺 Si n-GaN 层.在 n-GaN 上面生长 InGaN/GaN 多量子阱结构, InGaN 阱生长温度为  $740^\circ\text{C}$ ,厚度为  $2.5\text{nm}$ , In 组分为 0.1; GaN 垒生长温度为  $900^\circ\text{C}$ ,厚度  $22.5\text{nm}$ .在  $950^\circ\text{C}$  的温度下,生长掺 Mg  $25\text{nm}$  p-AlGaIn 和  $250\text{nm}$  p-GaN 层. LED 结构生长完毕后,将样品放置在快速退火炉

<sup>†</sup> 通信作者. Email: biewang2001@126.com

2006-06-20 收到, 2006-08-29 定稿

内,750℃氮气气氛下退火激活 p 型. 然后,用 ICP 设备刻蚀样品表面,局部露出 n-GaN,沉积 Ti/Al/Ni/Au 层作为 n 型接触电极,Ni/Au 层作为 p 型接触电极.制作的完整 LED 器件结构如图 1 所示.

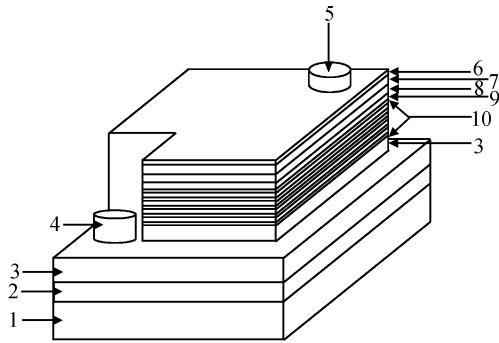


图 1 LED 器件结构示意图 1 衬底,2 本征 GaN,3 n-GaN,4 n-电极,5 p-电极,6 电流扩展层,7 p-GaN,8 p-AlGaIn,9 间隔层,10 MQW

Fig. 1 Sketch map of LED device configuration 1 substrate,2 intrinsic GaN,3 n-GaN,4 n-electric pole,5 p-electric pole,6 current extended layer,7 p-GaN,8 p-AlGaIn,9 spacer layer,10 MQW

实验过程中,采用光致发光谱(PL)及高分辨 X 射线双晶衍射法(XRD)研究样品的光学性质及结构特征. PL 谱光源为 He-Cd 激光,中心波长为 325nm,输出功率为 20mW;XRD 设备为日本理学 SLX-1AL 双晶衍射仪,该设备采用 Cu-K $\alpha$  旋转辐射靶源( $\lambda = 0.15405\text{nm}$ ),Ge(004)为单色仪,Si(220)作为分析晶体.采用扫描隧道显微镜观察 LED 多量子阱界面和结构特性.生长过程中,GaN 外延层和缓冲层的厚度由在线监测反射谱曲线确定,所用光源为碘钨灯加 600nm 的窄带滤波片.采用积分球探测器测量 LED 器件功率特性.

### 3 结果与讨论

相比于传统的 III-V 族 LED 器件,InGaN/GaN 基 LED 由于缺乏与之匹配的衬底(一般采用蓝宝石或碳化硅作为衬底),外延层和衬底之间较大的晶格失配导致所生长材料中具有非常高的位错密度,一般大约在  $10^9 \sim 10^{10}$  左右.但是 InGaN/GaN 基 LED 仍然能够高效率发光,其原因在于 InGaN 量子阱在生长中产生的载流子局域化效应<sup>[1]</sup>,使得 LED 器件对位错密度不敏感.这种局域化效应源于 InGaN 生长过程中组分非均匀性造成局域高 In 组分的深势阱,和周围低 In 组分 InGaN 组成类似量子点结构<sup>[2~6]</sup>.但是对于紫外 LED 器件,随着波长的缩短,InGaN 量子阱中的 In 组分减少,量子阱内

局域化效应也逐渐变弱,导致器件发光效率急剧下降.因此,本实验研究 400~410nm 范围内 LED,在此波段范围可以不影响 LED 发光效率,该波段适合目前白光 LED 的需求.

可以通过调整 InGaN 量子阱中的 In 组分,来调整 LED 波长,实现不同波段 LED 输出.如图 2 所示,LED 波长和生长过程 TMIn 流量符合严格的线性关系.因此,为实现 400~410nm 波段 LED 输出,可以在成熟的蓝光 LED 生长条件上通过减少 TMIn 流量而减少量子阱的 In 组分,从而实现不同波段 LED 的输出.但是,由于 In 组分的减少,In-GaN 量子阱生长局域化效应逐渐减弱,对量子阱发光效率有一定影响.另外,缩短波长可以通过升高 InGaN 量子阱生长温度来实现.这是由于 InGaN 生长过程中,In 的掺入效率随着温度的升高而降低,因此,采用高温生长 InGaN 量子阱是生长短波长 LED 的手段之一.这样做的优点是不但可以通过提高温度控制不同波长输出,而且在较高温度下生长较低 In 组分的 InGaN 量子阱可以有效提高 InGaN 生长质量.图 3 给出了在实验过程中,LED 输出波长和 InGaN 量子阱生长温度的关系.由图可见,欲得到 400~410nm 范围内的 MQW 结构,生长温度应控制在 740~750℃ 范围内.当然,随着温度变化,量子阱的厚度也有微小的变化,因此在蓝光 LED 基础上通过提高温度控制紫光 LED 波段,其量子阱厚度还需优化调节.在实验过程中,蓝光 LED 生长温度为 690℃,紫光波长的 LED 生长温度为 740℃.在 MQW 生长过程中,阱和垒采用不同温度生长,垒的生长温度为 900℃.需要说明的是,虽然图 2 和图 3 中 LED 的输出波长和 TMIn 的流量以及量子阱的生长温度呈良好的线性关系,但是从理论上讲其中没有必然联系.因为,LED 的输出波长和很多因素有关.首先,对于波长和 TMIn 流量的关系,从生长方面考虑,理论上波长正比于  $\text{TMIn}/(\text{TMIn} + \text{TMGa})$ ,但实际上生长 InGaN 过程中由于强烈的解吸附现象的存在,In 的掺入效率要远低于理论上的预测.同时,随着 TMIn 流量的增加,波长也随之变长,即 InGaN 中的 In 组分增加.In 组分的增加将导致量子阱中 InGaN 和 GaN 之间的失配增大,进而加剧量子阱结构的压电场和自发极化作用,结果也将导致波长移动.其次,对于生长温度和波长的关系还要更加复杂,一是不同温度下 In 的解吸附程度不一样;另外,不同生长温度下量子阱的生长速率会略有不同,即使实验过程经过调整,也很难保证不同温度下生长的量子阱宽度的严格一致性,这也会导致一定的波长离散性.此外,不同 MOCVD 系统也会导致 In 掺入效率不同,并且表现的规律会略有不同.因此,实验结果中的线性

拟和是在实验结果基础上给出的一个表示波长变化趋势的标识,也只是在一定条件下的变化趋势.

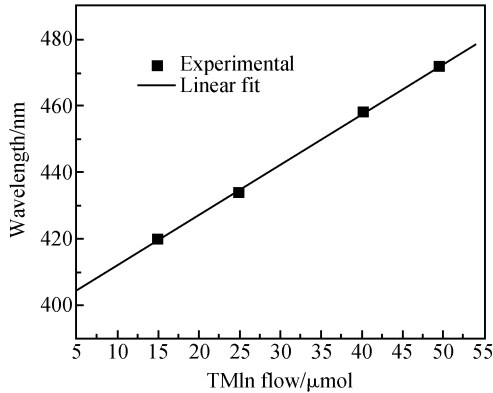


图 2 LED 波长和 TMIn 流量的关系 生长温度为 700°C.

Fig. 2 Relationship of LED wavelength and TMIn flow Growth temperature is 700°C.

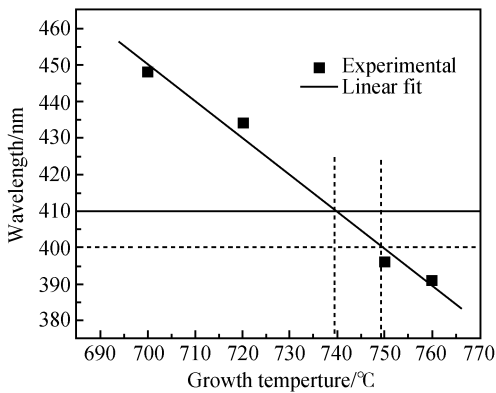


图 3 LED 波长和 InGaIn/GaN MQW 生长温度的关系

Fig. 3 Relationship of LED wavelength and InGaIn/GaN MQW growth temperature

生长后的 MQW 结构的扫描隧道显微镜 (STM) 截面像 (见图 4) 显示,量子阱宽度为 2.5nm,垒厚度为 22.5nm. InGaIn 量子阱生长显示明显的团簇现象. 图 5 为高分辨率 X 射线双晶衍射仪  $\omega$ -2 $\theta$  扫描结果及模拟结果. 结果显示,垒和阱的厚度与设计一致,清晰而尖锐的卫星峰表明, MQW 结构具有较好的界面,这有利于 LED 高效发光. 将生长得到的 LED 结构材料经后工艺制作成  $300\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$  大小的 LED 器件. 其电致发光光谱 (EL) 如图 6 所示,可见器件输出波长为 408nm, EL 谱半高宽为 21nm. 封装后的器件输出功率和电流关系 (见图 7) 表明,在 20mA 注入电流下,输出功率为 5.4mW. 器件测试结果表明,通过提高量子阱的生长温度实现紫光 LED 输出是切实可行的手段,但是在高温下生长 InGaIn/GaN 量子阱的界面还必需改善,可以通过优化量子阱生长条件和器件结构设计等手段来实现.

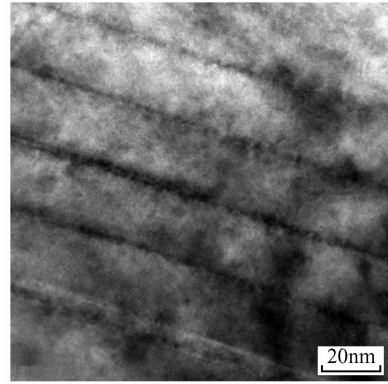


图 4 扫描隧道显微镜 (STM) 显示的 LED 结构照片

Fig. 4 Photograph of LED configuration in scanning tube microscope (STM)

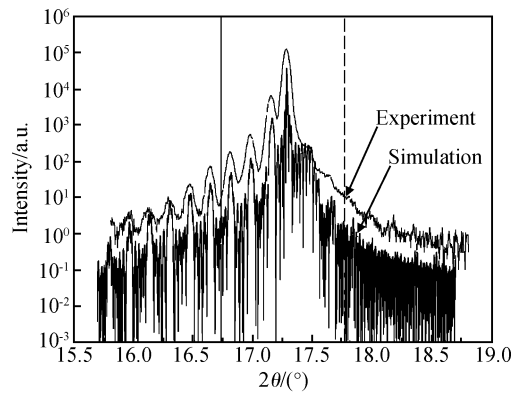


图 5 LED 器件 MQW 结构的 XRD 测试和模拟曲线

Fig. 5 MQW configuration of LED device XRD testing and analog curve

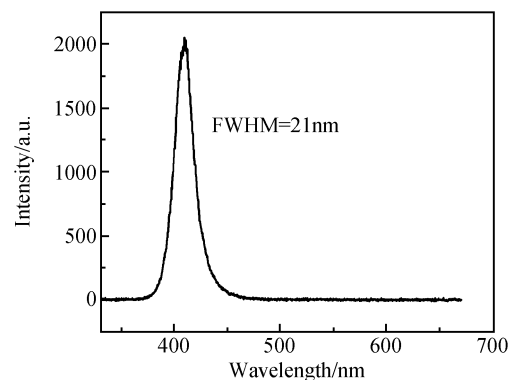


图 6 LED 器件的电致发光光谱

Fig. 6 Electric-fluorescence spectrum of LED device

虽然在 400nm 左右发光的 LED 可以通过提高量子阱的生长温度实现高效率发光,但是,从白光照明角度考虑需要波段向紫外移动. 这时, In 组分应更低,甚至接近于零,更短的波段需要 Al 组分的掺入. 这样,量子阱内的局域化效应不再存在,使得

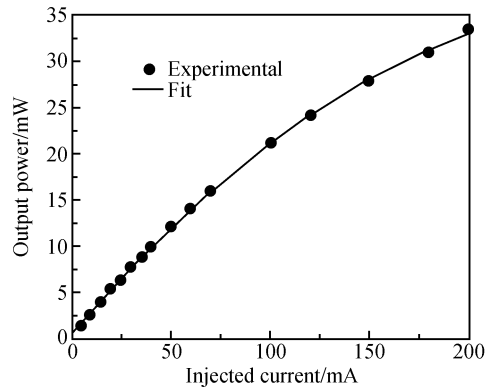


图 7 封装后 LED 器件的输出功率和注入电流的关系

Fig. 7 Relationship of output power and injection current of packaged LED device

LED 发光效率急剧下降. 如何生长低位错的 GaN 材料将是重要的挑战.

## 4 结论

在生长紫光 LED 结构过程中, 通过提高 In-GaN 量子阱结构的生长温度, 降低量子阱 In 组分

的掺入效率, 从而缩短 LED 输出波长. 这样, 既可以控制 LED 不同波段输出, 又可以提高量子阱的生长质量, 从而提高 LED 的发光效率.

## 参考文献

- [ 1 ] Nakamura S. UV/blue/green InGaN-based LEDs and laser diodes grown on epitaxially laterally overgrown GaN. *IEICE Trans Electron*, 2000, E83-C(4):529
- [ 2 ] Narukawa Y, Kawakami Y, Funato M, et al. Role of self-formed InGaN quantum dots for exciton localization in the purple laser diode emitting at 420nm. *Appl Phys Lett*, 1997, 70:981
- [ 3 ] Kisielowski C, Weber Z L, Nakamura S. Atomic scale indium distribution in a GaN/In<sub>0.43</sub>Ga<sub>0.57</sub>N/Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N quantum well structure. *Jpn J Appl Phys*, 1997, 36:6932
- [ 4 ] Nistor L, Bender H, Vantomme A, et al. Direct evidence of spontaneous quantum dot formation in a thick InGaN epilayer. *Appl Phys Lett*, 2000, 77:507
- [ 5 ] Shapiro N A, Perlin P, Kisielowski C, et al. The effects of indium concentration and well-thickness on the mechanisms of radiative recombination in In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N quantum wells. *MRS Internet J Nitride Semicond Res*, 2000, 5:1
- [ 6 ] O'Donnell K P, Martin R W, Middleton P G. Origin of Luminescence from InGaN diodes. *Phys Rev Lett*, 1999, 82:237

# Growth and Optical Characteristics of 408nm InGaN/GaN MQW LED

Wang Xiaohua<sup>†</sup>, Zhan Wang, and Liu Guojun

(State Key Laboratory of High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** High efficiency output of a violet LED is obtained by increasing the growth temperature of InGaN quantum wells, reducing the intermingling efficiency of In content, and improving the quality of InGaN/GaN. High-resolution X-ray double crystal diffraction and a scanning tube microscope are used to characterize the configuration and optical characteristics of In-GaN/GaN MQW grown at high temperatures. The output power of a packaged  $300\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$  LED is 5.2mW under a 20mA input current, the output wavelength is 408nm.

**Key words:** quantum well; GaN; LED

**EEACC:** 4260D

**Article ID:** 0253-4177(2007)01-0104-04

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: biewang2001@126.com

Received 20 June 2006, revised manuscript received 29 August 2006