

# GaN 基蓝光发光二极管的波长稳定性研究 \*

罗 毅 郭文平 邵嘉平 胡 卉 韩彦军 薛 松 汪 莱 孙长征 郝智彪

(清华大学电子工程系,集成光电子学国家重点实验室,北京 100084)

(2003 年 10 月 13 日收到 2003 年 12 月 9 日收到修改稿)

尽管 GaN 基蓝绿光发光二极管(LED)已进入大规模商品化阶段,但其发光波长随注入电流的变化仍是一个尚未解决的关键技术难题。同时,蓝绿光 LED 电注入发光光谱的半高全宽多为 25 nm 以上,通过优化 LED 器件材料的生长条件和总应变量,获得了高质量的 InGaN/GaN 多量子阱 LED 外延片。由此制作的 LED 器件在 0—120 mA 的注入电流下,发光波长变化小于 1 nm。在 20 mA 的正向电流下,其光谱半高全宽只有 18 nm,且随注入电流变化较小。

关键词:GaN, 发光二极管, 波长稳定性

PACC: 7280E, 7865P, 7860F, 7840G

## 1. 引 言

GaN 基材料由于具有直接带隙,发射光谱覆盖整个可见光范围,并且具有很高的击穿电压,因而在高亮度蓝绿光发光二极管(LED)、蓝紫光激光二极管(LD)以及高温大功率电子器件<sup>[1-3]</sup>中具有极为重要的应用价值。近几年来高亮度蓝绿光 LED 发展迅速,已成为大屏幕全彩色显示、交通信号灯必需的发光器件。同时,由蓝光 LED 激发黄色荧光粉制作的白光 LED 已大量应用于手机照明等领域,并在固体照明光源领域显示了巨大的应用潜力<sup>[4]</sup>。

尽管如此,InGaN/GaN 多量子阱发光的物理机理仍存在许多疑问。例如,目前的高亮度蓝绿光 LED 还存在许多问题,主要包括:LED 的峰值波长随着注入电流的改变而变化;LED 的光谱宽度较宽,其半高全宽(FWHM)一般大于 25 nm;LED 的光谱宽度随着注入电流的增大迅速恶化。由于存在着这些缺陷,采用上述 GaN 基 LED 产品在实际应用中将产生如下两个问题:(1)在显示方面,波长变化将导致全彩色显示控制极为困难,同时光谱太宽会导致色彩不纯。(2)在白光照明领域,由于蓝光波长的变化将造成白光的颜色或色温发生变化。

本文的目的就在于通过优化器件的总应变量和金属有机物汽相外延(MOVPE)的生长条件,提高

GaN 基 LED 发光光谱的稳定性,并实现极窄的发光光谱。

## 2. 实验步骤

本文的 InGaN/GaN 多量子阱 LED 结构采用 MOVPE 技术在(0001)面蓝宝石衬底表面生长,其外延结构如图 1 所示。首先,在蓝宝石衬底上生长约 30 nm 的低温 GaN 缓冲层。然后,将衬底温度升高到 1040℃,生长约 4 μm 的 Si 掺杂 n 型 GaN 层。随后,衬底温度降低到 700—740℃生长 5 个周期具有极平整界面的 InGaN(1.8 nm)/GaN(11 nm)多量子阱作为发光区。在多量子阱生长结束后,升温至 900℃左右生长约 60 nm 的 p 型 AlGaN 和 140 nm 的 p 型 GaN。

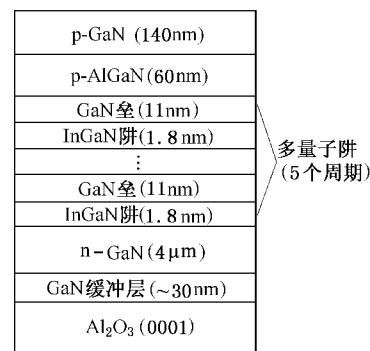


图 1 LED 器件外延结构图

\* 国家高技术研究发展计划(批准号 2001AA313130,2001AA312190)国家重点基础研究发展计划(批准号 TG2000036601)和国家自然科学基金(批准号 60244001,60290084)资助的课题。

外延完成后,首先对外延片进行材料退火,然后制作成LED器件。制作过程中,采用感应耦合等离子体刻蚀技术进行n型台面的刻蚀,并分别采用Ni/Au和Ni/Al作为p型和n型的电极材料<sup>[5]</sup>。制作完成的单个器件尺寸为300 μm × 300 μm。

制作完成的LED芯片放置在探针台上进行电致发光测试,注入电流范围为0—120 mA。本文主要测试了LED芯片的波长稳定性和光谱的FWHM及其随注入电流的变化。

### 3. 结果及讨论

首先,我们测量了LED芯片的峰值波长随注入电流的变化,结果如图2所示。从图2可以看出,正向工作电流为0—120 mA时,器件的峰值波长变化远小于1 nm,即发光波长随注入电流的变化非常小。目前许多研究组所报道的GaN基蓝绿光LED普遍存在发光波长随注入电流的变化问题<sup>[6—9]</sup>,如Koike等报道的结果为正向电流0—50 mA时峰值波长变化5 nm,Wu等报道的结果为正向电流0—50 mA时峰值波长变化6 nm以上。而在实际应用中,蓝绿光波段5 nm左右的波长变化已经足以让人眼感觉到颜色的差异。

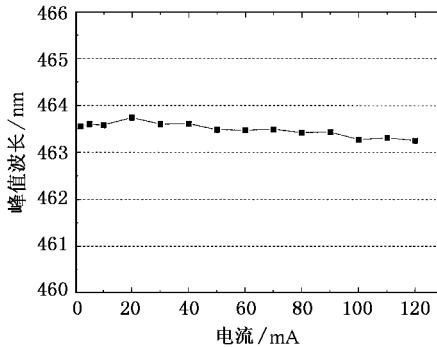


图2 LED芯片峰值波长随注入电流的变化

目前的研究普遍认为,蓝光LED发光波长随注入电流的变化主要来源于InGaN/GaN多量子阱区强烈的极化效应(polarization effects),包括压电极化(piezoelectric polarization)和自发极化(spontaneous polarization)。在考虑极化效应的情况下InGaN/GaN多量子阱的能带结构如图3所示。极化效应会在多量子阱区产生很强的内建电场(约为10<sup>6</sup> eV/cm),此内建电场将导致显著的量子限制斯塔克效应(QCSE),从而引起多量子阱发光波长的红移。随着

注入电流的增大,由于载流子在导带(或价带)内的弛豫时间(约ps量级)比载流子寿命(约ns量级)要短得多,因此多量子阱区的自由载流子增加,在一定程度上屏蔽了内建电场,使QCSE减弱,从而使LED的峰值波长发生蓝移<sup>[10,11]</sup>。这种蓝移正是LED的峰值波长随注入电流变化的内在物理原因。由于在InGaN材料中,压电极化占据主要地位,并且压电极化强度与器件的总应变量成正比,同时,在压电效应一定的情况下,电流注入导致的能带填充效应也会对发射波长的变化产生一定影响。因此,要提高蓝光LED的波长稳定性,必须优化控制器件的应变量。本文通过优化量子阱阱宽来控制器件的总应变量,有效地抑制了InGaN/GaN量子阱中极化效应的影响,从而极大地提高了蓝光LED的发光波长稳定性。

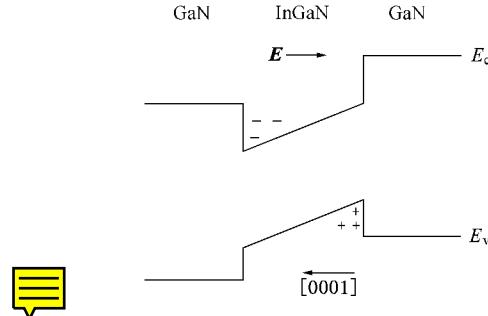


图3 InGaN/GaN量子阱存在极化效应时的能带图<sup>[10]</sup>

另一方面,我们测量了LED芯片发光光谱的FWHM及其随注入电流的变化,结果如图4所示。

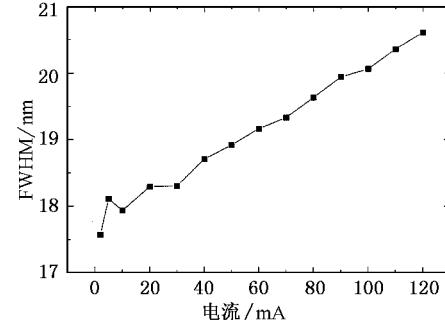


图4 LED发光光谱的FWHM随注入电流的变化

从图4可以看出,在工作电流为20 mA时,我们的LED芯片发光光谱的FWHM只有18 nm。就作者所知,这是目前文献报道的最好水平。值得指出的是,本文的LED芯片在正向电流达到120 mA时,光谱的FWHM仍然只有21 nm,变化仅3 nm,此结果同样优于目前文献报道的结果<sup>[6—9]</sup>。由于InGaN层的

厚度很薄(约7个单原子层),所以量子阱界面的轻微起伏都将引起阱宽的较大波动,从而导致光谱展宽.因此,上述光谱的 FWHM 测量结果直接反映出我们的 LED 外延片的界面生长质量是相当好的.同时,极化场的存在也会使 LED 的发光光谱变宽,其变宽的程度与极化场强度基本成正比<sup>[12]</sup>.由于本文的 LED 外延片中极化效应在一定程度上得到抑制,同时我们优化了 InGaN 发光区的 MOVPE 生长条件,所以发光光谱的 FWHM 比较窄,且随注入电流变化较小.

## 4. 总 结

本文通过优化 LED 器件的总应变量和 MOVPE 生长工艺,制备出高质量的 InGaN/GaN LED.由于有效地抑制了极化效应,制成的 LED 当注入电流在0—120 mA 范围内发光波长基本保持不变.同时,正向电流 20 mA 时的发光光谱的 FWHM 仅 18 nm,且随注入电流变化较小.就作者所知,本文所述的发射波长稳定性结果是目前为止文献报道的最好水平.

- 
- [1] Nakamura S, Senoh N, Iwasa N *et al* 1995 *Jpn. J. Appl. Phys.* Part 2 **34** L797
  - [2] Nakamura S, Fasol G 1997 *The Blue Laser Diode* ( Berlin, New York : Springer ) pp7—9
  - [3] Kong Y C, Zheng Y D, Chu R M *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1756 ( 孔月蝉、郑有、储荣明等 2003 物理学报 **52** 1756 )
  - [4] Steigerwald D A, Bhat J C, Collins D *et al* 2002 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **8** 310
  - [5] Luo Y, Han Y J, Guo W P *et al* 2002 *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering* **4918** 197
  - [6] Koike M, Shibata N, Kato H *et al* 2002 *IEEE J. Sel. Top.* *Quant.* **8** 271
  - [7] Lester S D, Ludowise M J, Killeen K P *et al* 1998 *J. Cryst. Growth* **189—190** 786
  - [8] Huh C, Lee J M, Kim D J *et al* 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 2248
  - [9] Wu L W, Chang S J, Wen T C *et al* 2002 *IEEE J. Quant. Electr.* **38** 446
  - [10] Takeuchi T, Sota S, Sakai H *et al* 1998 *J. Cryst. Growth* **189—190** 616
  - [11] Traetta G, Carlo A D, Reale A *et al* 2001 *J. Cryst. Growth* **230** 492
  - [12] Peng L H, Chuang C W, Lou L H 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 795

# A study on wavelength stability of GaN-based blue light emitting diodes<sup>\*</sup>

Luo Yi Guo Wen-Ping Shao Jia-Ping Hu Hui Han Yan-Jun Xue Song

Wang Lai Sun Chang-Zheng Hao Zhi-Biao

(State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(Received 13 October 2003; revised manuscript received 9 December 2003)

## Abstract

Although GaN-based blue and green light-emitting diodes (LEDs) have already been commercialized, the variation of the electro-luminescence wavelength of the LEDs along with the injection current remains a major problem. Furthermore, the full width at half maximum (FWHM) of the emission spectrum of the LEDs is relatively broad (typically greater than 25 nm). In this paper, high performance LEDs with InGaN/GaN multiple quantum wells were grown and fabricated by optimizing the growth conditions and the total strain in the structure. The emitting wavelength of our LEDs remains stable within 1 nm as the forward current varies from 0 to 120 mA. At a forward current of 20 mA, the FWHM of the emission spectrum is as low as 18 nm and remains basically constant as the forward current varies.

**Keywords** : GaN, light-emitting diode, wavelength stability

**PACC** : 7280E, 7865P, 7860F, 7840G

<sup>\*</sup> Project supported by the National High Technology Development Program of China (Grant Nos. 2001AA313130, 2001AA312190), the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. TG2000036601), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60244001, 60290084).