

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^[1-3]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^[4].

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 AlGaIn 和 140 nm 的 p 型 GaN.

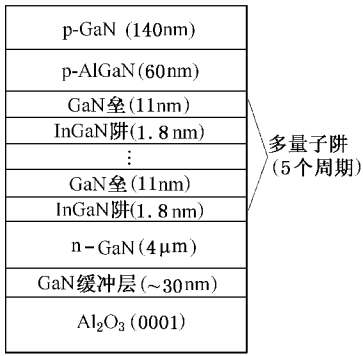


图 1 LED 器件外延结构图

^{*} 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规划(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^[5].制作完成的单个器件尺寸为 $300\text{ }\mu\text{m}\times 300\text{ }\mu\text{m}$.

制作完成的 LED 芯片放置在探针台上进行电致荧光测试,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^[6-9],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.

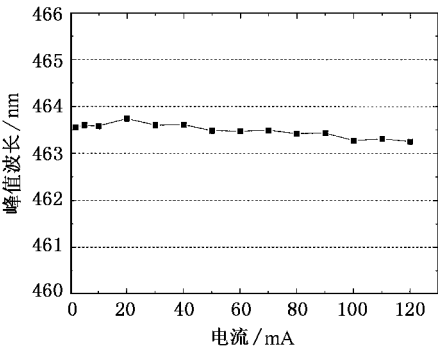


图 2 LED 芯片峰值波长随注入电流的变化

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 10^6 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^[10,11].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变量.本文通过优化量子阱阱宽来控制器件的总应变变量,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.

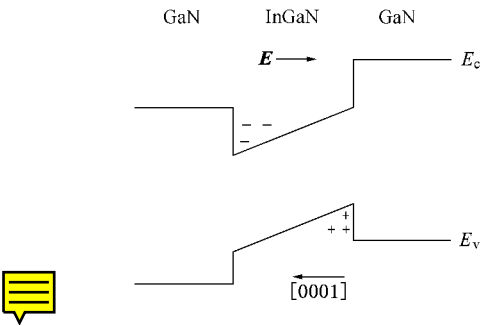


图 3 InGaN/GaN 量子阱存在极化效应时的能带图^[10]

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.

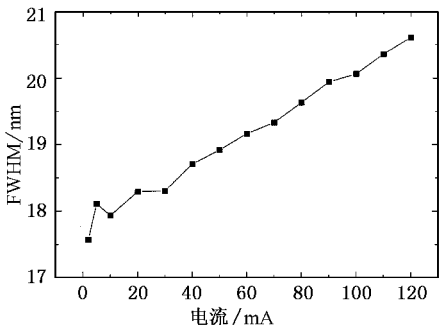


图 4 LED 发光光谱的 FWHM 随注入电流的变化

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^[6-9].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^[12].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 InGa_N 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 InGa_N/Ga_N 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. Elect.* **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^{*}

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

^{*} 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) .