

图形化蓝宝石衬底上 InGaN/GaN 多量子阱 发光二极管的光谱特性研究

颜建, 钟灿涛, 于彤军*, 徐承龙, 陶岳彬, 张国义

北京大学介观物理与人工微结构国家重点实验室, 北京大学物理学院, 北京 100871

摘要 运用电致发光(EL)和光致发光(PL)实验, 分析了图形化蓝宝石衬底(PSSLEDs)和常规平面蓝宝石衬底(C-LEDs) InGaN/GaN 多量子阱发光二极管的光谱特性。对比 EL 谱, 发现 PSSLEDs 拥有更强的光功率和更窄的半峰宽(FWHM), 说明 PSSLEDs 具有较高的晶体质量。其次, PSSLEDs 的 EL 谱半峰宽随电流增加出现了更快的展宽, 而这两种 LED 样品的 PL 谱半峰宽随激光功率增加呈现了基本相同的展宽变化, 说明在相同电流下, PSSLEDs 量子阱中载流子浓度更高, 能带填充效应更强。另外, 随着电流的增加, PSSLEDs 和 C-LEDs 的峰值波长都发生蓝移, 且前者的蓝移程度较小, 结合半峰宽的对比分析, 说明 PSSLEDs 量子阱中的极化电场较小。最后, 对比了 PSSLEDs 和 C-LEDs 的外量子效率随电流的变化, 发现 PSSLEDs 拥有更严重的 efficiency droop, 说明量子阱中极化电场不是导致 efficiency droop 的主要原因。

关键词 图形化蓝宝石衬底发光二极管; 峰值波长; 极化场; Efficiency droop

中图分类号: O433.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)01-0007-04

引言

InGaN/GaN 多量子阱结构发光二极管(LED)作为新一代的发光器件, 具有节能, 环保, 长寿命, 多色彩, 体积小等众多优点。有着十分广泛的应用前景, 如固态照明, 交通灯, 全色显示等。目前, 尽管大功率高亮度的 LED 已经开始商业生产, 但制备大电流下高效率的 LED 仍然存在困难, LED 的发光效率普遍随注入电流增加而显著下降, 即 LED 的 efficiency droop 问题。认为可能的物理机制有: 有源区的缺陷^[1], 俄歇复合^[2, 3], 量子阱中的载流子泄漏^[4-6], 量子阱中的极化电场^[7]等。但其物理本质仍在争论中。

InGaN/GaN 多量子阱 LED 的发光特性受到极化电场引起的量子斯托克效应^[8]、In 组分不均匀引起的载流子局域化效应^[9]、缺陷提供的非辐射复合中心^[10]等影响, 光谱特性的分析可以帮助分析 LED 出现 efficiency droop 的原因。

蓝宝石衬底上刻蚀图形(PSS), 再生长 LED 的技术开始被广泛采用, 被认为能有效减少线位错密度, 改善晶体质量; 增加散射, 提高出光效率, 从而能有效的提高发光效

率^[11]。由于 LED 的发光效率本质上与光谱特性有密切联系, 对 LED 进行电致发光谱(EL 谱)和光致发光谱(PL 谱)分析应是一种有效的研究手段。分析其中的峰值波长, 半峰宽等参数能有效的反映 LED 的晶体质量, 量子阱中载流子浓度及量子阱中极化电场等情况。因此, 对图形化蓝宝石发光二极管进行光谱特性研究, 有利于进一步了解 LED 出现 efficiency droop 的内在机制。

将图形化蓝宝石衬底(PSSLEDs)和常规平面蓝宝石衬底(C-LEDs)上的 InGaN/GaN 多量子阱发光二极管进行对比, 分析了光谱中半峰宽和峰值波长的变化, 讨论了 InGaN/GaN 多量子阱结构中极化电场的影响, 结果用于说明 efficiency droop 与极化电场的关系, 为提高大功率 InGaN/GaN MQWs LED 效率提供基础。

1 实验

样品为采用金属有机化学沉积方法生长在(0001)面蓝宝石衬底上 In_xGa_{1-x}N/GaN 多量子阱蓝光 LED, 只是衬底分别为图形化蓝宝石衬底(PSSLEDs)和平面蓝宝石衬底(C-

收稿日期: 2011-05-09, 修订日期: 2011-08-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB301904, 2011CB301905), 国家高技术研究发展计划项目(2009AA03A198)和国家自然科学基金项目(61076012, 61076013)资助

作者简介: 颜建, 1986年生, 北京大学物理学院硕士研究生 e-mail: yanjian616@126.com

* 通讯联系人 e-mail: tongjun@pku.edu.cn

LEDs)。PSSLEDs 上的图形为三棱锥图形,由湿法修饰干法刻蚀的图形而成,如图 1 所示。三棱锥的高和底边分别为 0.35 和 2.3 μm , 占空比为 21%。另外, PSSLEDs 和 C-LEDs 的基本结构都依次为低温的 GaN 缓冲层, 2 μm 的 $n\text{-GaIn}$ 层, 5 个周期的 InGaIn/GaN(2.5/12 nm) 的多量子阱有源区, 200 nm 的 $p\text{-GaIn}$ 层。然后采用光刻和等离子 ICP 刻蚀等工艺对 LED 的外延片进行加工, 使之成为尺寸为 300 $\mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ 大小的 LED 芯片, 电极由沉积在 $p\text{-GaIn}$ 和 $n\text{-GaIn}$ 表面的 Cr/Pt/Au 组成。最后用抗紫外的环氧树脂进行封装。

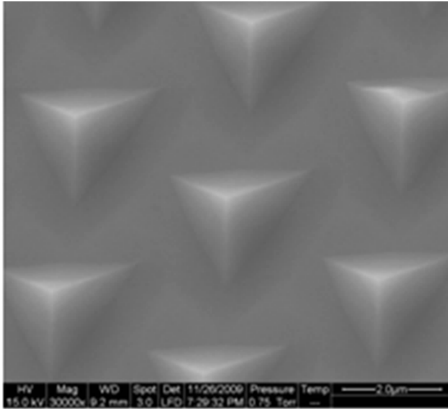


Fig. 1 SEM image of the triangular pyramid shaped array patterns in PSSLEDs

选取 PSSLEDs 和 C-LEDs 样品各 3 个, 采用 HAS2000 快速光谱测试仪分别测量了不同注入电流下它们的电致发光谱(EL 谱)。测量范围从 1~100 mA, 得到了积分球光功率, 峰值波长, 半峰宽等光学参数随注入电流的变化曲线。测量采用脉冲模式, 有效的避免了热效应带来的误差。

选取尺寸约为 5 mm \times 5 mm 的 PSSLEDs 和 C-LEDs 外延片各 3 个, 测量了不同激光功率下它们的 PL 谱。激光器发射波长为 325 nm, 出射光斑直径约 100 μm , 激光功率变化范围从 2~20 mW。得到了发光强度, 峰值波长, 半峰宽等光学参数随激光功率的变化曲线。

本文中所有数据为实验测量数据的平均值。

2 结果和讨论

图 2 描述了注入电流为 20 mA 时, PSSLEDs 和 C-LEDs 的 EL 谱。其中 PSSLEDs 的峰值波长较长, 约为 451 nm, 而 C-LEDs 的峰值波长约为 449 nm。另外, PSSLEDs 拥有更高的 EL 谱强度。

图 3 显示了不同注入电流下, PSSLEDs 和 C-LEDs 的 EL 谱半峰宽。发现 PSSLEDs 的半峰宽比 C-LEDs 小, 说明 PSSLEDs 缺陷密度较小, 晶体质量比较好, 这一结果与 I-V 特性的测量结果相一致。PSSLEDs 和 C-LEDs 的 EL 谱半峰宽随电流的相对展宽, 如图 3 的插图所示。C-LEDs 与 PSSLEDs 的半峰宽增加更快, 从 5~100 mA, PSSLEDs 的半峰宽增加了 44%, 而 C-LEDs 只增加了 39%。

另外, 我们对对比分析了不同激光功率下 PSSLEDs 和

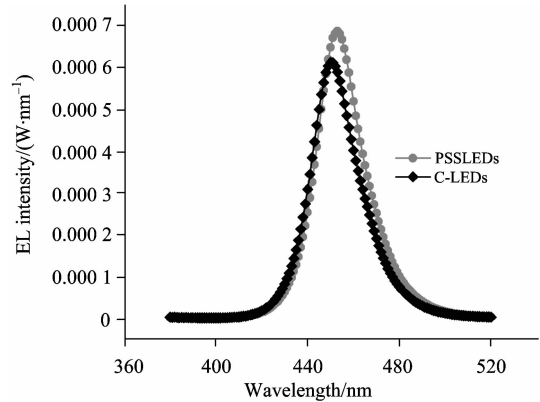


Fig. 2 Electroluminescence (EL) spectra of PSSLEDs and C-LEDs at 20 mA

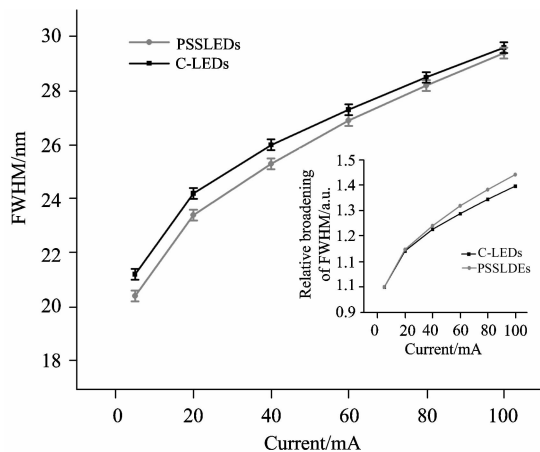


Fig. 3 Relative broadening of FWHMs for PSSLEDs and C-LEDs vs injection current, and the FWHMs of PSSLEDs and C-LEDs vs injection current shown in the inset

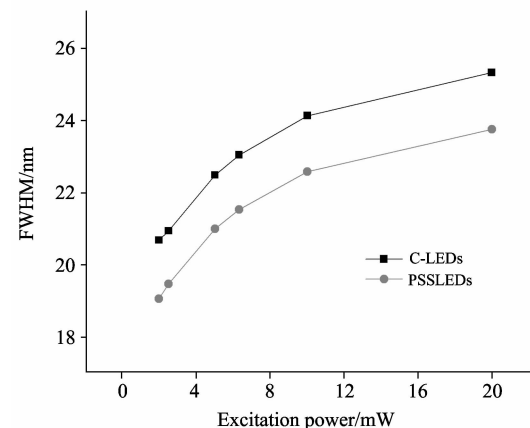


Fig. 4 FWHMs of PSSLEDs and C-LEDs vs excitation power

C-LEDs 的半峰宽(FWHM), 如图 4 所示。在相同激光功率下 PSSLEDs 的半峰宽更窄, 这与 EL 谱的情况一样。然而, 两种 LED 的半峰宽随激光功率的增加却出现了基本相同的

展宽。当激光功率从 2 mW 增加到 20 mW, PSSLEDs 的半峰宽展宽了约 4.7 nm, 而 C-LEDs 半峰宽的展宽约为 4.6 nm。这与电流注入增加时, PSSLEDs 的半峰宽有着更快的展宽明显不同。一般认为, 半峰宽的展宽主要是由量子阱中载流子的能带填充效应引起的^[12, 13]。所以, 随着激光功率的增强, PSSLEDs 和 C-LEDs 的半峰宽展宽基本相同, 说明两者量子阱中的载流子浓度基本相同, 具有相同的能带填充效应。而在电注入情况下, PSSLEDs 拥有更快的半峰宽展宽, 说明在相同的注入电流下, PSSLEDs 的量子阱中的载流子浓度更高, 能带填充效应更强。

分析了 PSSLEDs 和 C-LEDs 的峰值能量随注入电流的相对变化, 如图 5 所示。电流从 1 mA 增加到 100 mA, PSSLEDs 和 C-LEDs 的峰值能量都增大, 波长随电流都发生蓝移, 且 PSSLEDs 的峰值波长蓝移程度较小。图 6 表示了不同激光功率下 PSSLEDs 和 C-LEDs 的 PL 谱峰值能量。随着激光功率的增加, 两者的峰值能量都增大, 峰值波长发生蓝移。图 6 的插图表示了激光功率从 2 ~ 20 mW,

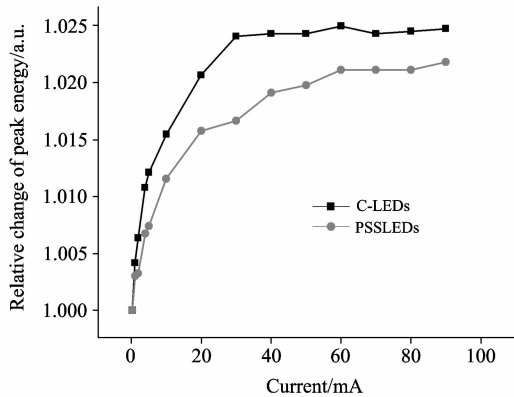


Fig. 5 Relative shifts of peak energy for PSSLEDs and C-LEDs

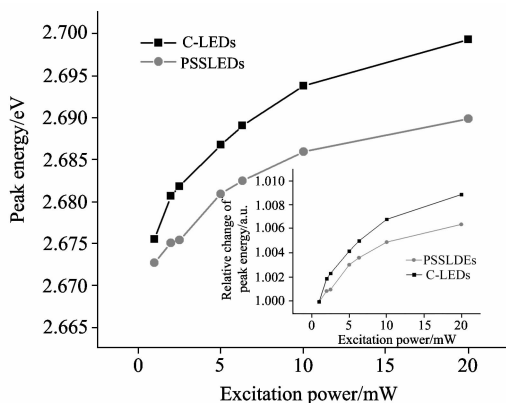


Fig. 6 Peak energy of PSSLEDs and C-LEDs vs excitation power. The relative changes of peak energy for PSSLEDs and C-LEDs vs excitation power shown in the inset

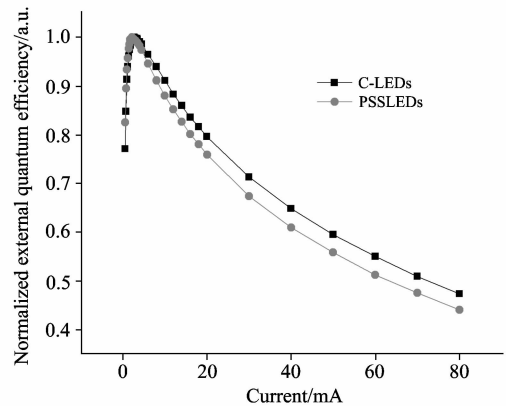


Fig. 7 Normalized EQEs of PSSLEDs and C-LEDs at different injection currents

PSSLEDs 和 C-LEDs 峰值能量的相对变化, 明显的看出 PSSLEDs 的峰值蓝移程度相对较小。PL 谱的这些结果与 EL 谱得到的结果是一致的。一般来说, 峰值波长发生蓝移, 主要原因有两点: (1) 注入的载流子屏蔽了量子阱中的极化场^[12, 13]; (2) 载流子的能带填充效应^[14, 15]。由上段关于半峰宽展宽的分析可知能带填充效应起主导地位, 应该是造成 PSSLEDs 和 C-LEDs 的峰值波长蓝移的主要原因。而 PSSLEDs 的峰值波长蓝移更小, 说明影响峰值波长蓝移的另一原因, 载流子屏蔽极化场, 在 PSSLEDs 中更弱, 可以推论, PSSLEDs 的量子阱中极化场更小。

我们分析了 PSSLEDs 和 C-LEDs 的归一化外量子效率随时间的变化, 如图 7 所示。发现 PSSLEDs 在更小的电流下达到外量子效率的最大值, PSSLEDs 达到外量子效率最大值时对应的注入电流大约为 2.2 mA, 而 C-LEDs 约为 2.8 mA。而且 PSSLEDs 的外量子效率随注入电流的增加下降更快。这些都说明 PSSLEDs 的 efficiency droop 现象更加严重。由前面的分析, 我们已经知道 PSSLEDs 中的极化场更小, 说明量子阱中极化场不是导致 efficiency droop 的主要原因。

3 结 论

本文研究了图形化蓝宝石衬底(PSSLEDs)和平面蓝宝石衬底(C-LEDs) InGaN/GaN 多量子阱蓝光 LED 的光谱特性。通过分析 EL 谱, 发现 PSSLEDs 拥有更强的光功率和更窄的半峰宽(FWHM), 说明运用图形化蓝宝石衬底有效的减少了缺陷, 提高了晶体质量。在电注入情况下, PSSLEDs 拥有更快的半峰宽展宽, 说明在相同的注入电流下, PSSLEDs 的量子阱中的载流子浓度更高, 能带填充效应更强。另外, 在 EL 谱和 PL 谱中都发现 PSSLEDs 和 C-LEDs 的峰值波长发生蓝移, 且前者的蓝移程度较小, 可推断 PSSLEDs 的量子阱中极化电场更小。结合 PSSLEDs 拥有更严重的 efficiency droop, 可以认为量子阱中极化电场不是导致 efficiency droop 的主要原因。

References

- [1] Shao X J, Lu H, Chen D J, et al. Appl. Phys. Lett., 2009, 95(16): 163504.
- [2] Shen Y C, Müller G O, Watanabe S, et al. Appl. Phys. Lett., 2007, 91(14): 141101.
- [3] Gardner N F, Müller G O, Shen Y C, et al. Appl. Phys. Lett., 2007, 91(24): 243506.
- [4] Kim M H, Schubert M F, Dai Q, et al. Appl. Phys. Lett., 2007, 91(18): 183507.
- [5] Vampola K J, Iza M, Keller S, et al. Appl. Phys. Lett., 2009, 94(6): 061116.
- [6] Dai Q, Shan Q F, Wang J, et al. Appl. Phys. Lett., 2010, 97(13): 133507.
- [7] Tao Y B, Chen Z Z, Zhang F F, et al. J. Appl. Phys., 2010, 107(10): 103529.
- [8] Schubert M F, Xu J, Kim J K, et al. Appl. Phys. Lett., 2008, 93: 041102.
- [9] Mukai T, Nakamura S, et al. Jpn. J. Appl. Phys., 1999, 38: 5735.
- [10] Cao X A, Teetsov J M, D'Evelyn M P, et al. Appl. Phys. Lett., 2004, 85: 1.
- [11] Wu D S, Wang W K, Wen K S, et al. Appl. Phys. Lett., 2006, 89(16): 161105.
- [12] Zhang J Y, Cai L E, Zhang B P, et al. Appl. Phys. Lett., 2009, 95(16): 161110.
- [13] Ryou J H, Lee W, Limb J, et al. Appl. Phys. Lett., 2008, 92(10): 101113.
- [14] Chang S P, Wang C H, Chiu C H, et al. Appl. Phys. Lett., 2010, 97(25): 251114.
- [15] Kuokstis E, Yang J W, Simin G, et al. Appl. Phys. Lett., 2002, 80(6): 977.

Optical Characteristics of InGaN/GaN Light Emitting Diodes on Patterned Sapphire Substrate

YAN Jian, ZHONG Can-tao, YU Tong-jun*, XU Cheng-long, TAO Yue-bin, ZHANG Guo-yi

State Key Laboratory for Artificial Microstructures and Mesoscopic Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract In the present paper, optical characteristics of InGaN/GaN multiple quantum wells light emitting diodes fabricated on the conventional (C-LEDs) and patterned sapphire substrates (PSSLEDs) were investigated by electroluminescence (EL) and photoluminescence (PL). PSSLEDs show higher light output power and smaller full width at half maximum (FWHM) of EL than those of C-LEDs for their better crystalline quality. The FWHM of EL for PSSLEDs exhibits faster broadening as current increases than C-LEDs, while the same broadening of FWHM of PL as excitation power increases is shown in PSSLEDs and C-LEDs, which indicate that there is stronger band filling effect in PSSLEDs caused by relatively higher carrier density in their QWs at the same current injection level. Besides, smaller blue-shift of peak wavelength of EL as injection current increases in PSSLEDs suggests that piezoelectric field in PSSLEDs is weaker than that in C-LEDs. Therefore, comparing the changes in external quantum efficiency as current increases for PSSLEDs and C-LEDs, more serious efficiency droop for PSSLEDs could not be mainly caused by piezoelectric field in QWs.

Keywords Light emitting diodes on patterned sapphire substrate; Peak wavelength; Piezoelectric field; Efficiency droop

(Received May 9, 2011; accepted Aug. 20, 2011)

* Corresponding author