

文章编号: 1000-7032(2019)07-0891-07

# InGaN/GaN 多量子阱蓝光 LED 外延片的变温光致发光谱

杨超普<sup>1,2</sup>, 方文卿<sup>3\*</sup>, 毛清华<sup>4</sup>, 杨 岚<sup>1</sup>, 刘彦峰<sup>1</sup>, 李 春<sup>1</sup>, 阳 帆<sup>2,3</sup>

(1. 商洛学院 化学工程与现代材料学院, 陕西 商洛 726000; 2. 南昌大学 材料科学与工程学院, 江西 南昌 330031;  
3. 南昌大学 国家硅基 LED 工程技术研究中心, 江西 南昌 330047; 4. 安徽工业大学 数理科学与工程学院, 安徽 马鞍山 243032)

**摘要:** 利用 MOCVD 在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0001) 衬底上制备 InGaN/GaN MQW 结构蓝光 LED 外延片。以 400 mW 中心波长 405 nm 半导体激光器作为激发光源, 采用自主搭建的 100 ~ 330 K 低温 PL 谱测量装置, 以及 350 ~ 610 K 高温 PL 测量装置, 测量不同温度下 PL 谱。通过 Gaussian 分峰拟合研究了 InGaN/GaN MQW 主发光峰、声子伴线峰、n-GaN 黄带峰峰值能量、相对强度、FWHM 在 100 ~ 610 K 范围的温度依赖性。研究表明: 在 100 ~ 330 K 温度范围内, 外延片主发光峰及其声子伴线峰值能量与 FWHM 温度依赖性, 分别呈现 S 与 W 形变化; 载流子的完全热化分布温度约为 150 K, 局域载流子从非热化到热化分布的转变温度为 170 ~ 190 K; 350 ~ 610 K 高温范围内, InGaN/GaN MQW 主发光峰峰值能量随温度变化满足 Varshni 经验公式, 可在 MOCVD 外延生长掺 In 过程中, 通过特意降温在线测 PL 谱, 实时推算掺 In 量, 在线监测外延片生长。以上结果可为外延片的 PL 发光机理研究、高温在线 PL 谱测量设备开发、掺 In 量的实时监测等提供参考。

**关键词:** GaN; 多量子阱; 发光二极管; 外延; 光致发光

中图分类号: O433.4; TN312+.8

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20194007.0891

## Temperature-dependent Photoluminescence Spectra of InGaN/GaN Multiple Quantum Wells Blue LED Wafers

YANG Chao-pu<sup>1,2</sup>, FANG Wen-qing<sup>3\*</sup>, MAO Qing-hua<sup>4</sup>,  
YANG Lan<sup>1</sup>, LIU Yan-feng<sup>1</sup>, LI Chun<sup>1</sup>, YANG Fan<sup>2,3</sup>

(1. College of Chemical Engineering and Modern Materials, Shangluo University, Shangluo 726000, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

3. National Engineering Technology Research Center for LED on Silicon Substrate, Nanchang University, Nanchang 330047, China;

4. School of Mathematics & Physics, Anhui University, Maanshan 243032, China)

\* Corresponding Author, E-mail: fwq@ncu.edu.cn

**Abstract:** A blue light LED epitaxial wafer with InGaN/GaN MQW structure was prepared on an  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0001) substrate by MOCVD. The 400 mW semiconductor laser with a center wavelength of 405 nm was used as the excitation light source. The PL-spectrum at different temperatures was measured by the self-built 100 – 330 K low-temperature PL spectrum measurement device and the 350 – 610 K high-temperature PL measurement device. The peak energy and the relative intensity of InGaN/GaN MQW main luminescence peak, the phonon concomitant peak and the n-GaN yellow band peak, as well as the temperature dependence of the FWHM in the range of 100 – 610 K were studied by Gaussian peak differentiating and imitating. The results showed that in the temperature range of

收稿日期: 2018-07-25; 修订日期: 2018-10-17

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0403700); 国家自然科学基金(61864008); 安徽省自然科学基金(1808085MF205); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2017JQ6011)资助项目

Supported by National Key Research and Development Program of China(2017YFB0403700); National Natural Science Foundation of China(61864008); Natural Science Foundation of Anhui Province(1808085MF205); Natural Science Basic Research Plan of Shaanxi Province(2017JQ6011)

100 – 330 K, the peak energy of the main luminescence peak and the phonon concomitant peak of the epitaxial wafer, as well as the temperature dependence of the FWHM displayed S and W-shaped changes respectively; the complete heating distribution temperature of the carrier was about 150 K; the transition temperature of local carriers from non-heating to heating distribution was 170 – 190 K; in the high temperature ranged 350 – 610 K, the changes in peak energy of InGaN/GaN MQW with temperature variation satisfied the Varshni empirical formula. In the In-doped process of MOCVD epitaxial growth, the PL spectrum could be measured by deliberately cooling the temperature; the amount of In-doped was calculated in real time; and the epitaxial wafer growth was monitored on-line. The above results can be used for the study of PL luminescence mechanism of epitaxial wafers, development of high-temperature online PL spectrum measurement equipment, real-time monitoring of In-doped and so on.

**Key words:** GaN; MQW; LED; epitaxial; photoluminescence

## 1 引 言

1962 年全球第一只 LED 诞生以来,就因其寿命长、能耗低、体积小等诸多优点备受关注。自 1991 年 Nakamura 等首次研制出 GaN 基蓝光 LED 以来,因其具有直接带隙、介电常数小、导热率高等特征,成为固态照明领域的焦点<sup>[1-3]</sup>。以 InGaN/GaN 多量子阱(Multi-quantum well, MQW)为 LED 的有源层,通过调节 GaN 系半导体合金组分,其带隙可从 0.7 eV (InN)连续变化至 6.28 eV (AlN),对应波长覆盖整个可见光范围<sup>[4-5]</sup>。光致发光(Photoluminescence, PL)是一种无损的在半导体工艺及研究领域广泛应用的测试分析技术<sup>[6]</sup>。通过对 InGaN/GaN MQW 结构蓝光 LED 外延片变温 PL 研究,可得到相关材料能带结构、载流子迁移、缺陷、掺杂等信息<sup>[7-8]</sup>。

InGaN/GaN MQW 结构蓝光 LED 外延片变温 PL 已有大量研究报道<sup>[9-11]</sup>,但变温范围均为低温,少有高温 PL 谱相关研究报道。另外,相关报道多为利用小功率激光器作为激发光源,研究外延片低温下主发光峰温度依赖性,少见利用大功率激光器全面细致研究 InGaN/GaN MQW 结构蓝光 LED 外延片主发光峰、声子伴线峰、n-GaN 黄带峰报道,且部分发光机理存在较大争议。本文以功率 400 mW、中心波长 405 nm 半导体激光器作为激发光源,采用自主搭建的可在 100 ~ 330 K 范围内变温的低温 PL 谱测量装置,以及可在 350 ~ 610 K 范围内变温的高温 PL 测量装置,采集了 100 ~ 610 K 范围内不同温度下的 PL 谱。通过高

质量 Gaussian 分峰拟合研究了 InGaN/GaN MQW 主发光峰、声子伴线峰、n-GaN 黄带峰峰值能量、相对强度、FWHM 在 100 ~ 610 K 范围的温度依赖性。对 InGaN/GaN MQW PL 谱主发光峰及其声子伴线峰值能量与 FWHM 温度依赖性的 S 与 W 形变化进行细致讨论分析。对 350 ~ 610 K 高温范围内,InGaN/GaN MQW 峰值能量随温度变化进行 Varshni 公式拟合,探讨了在 MOCVD 制备 InGaN/GaN MQW 结构蓝光 LED 外延片的掺 In 过程中,通过故意降温,在线测量 MOCVD 反应室内外延片的高温 PL 谱,监测掺 In 浓度的可行性。该研究结果可为 InGaN/GaN MQW 结构蓝光 LED 外延片的 PL 发光机理探究、高温在线 PL 谱测量设备开发、实现 InGaN 阱层的掺 In 情况实时监测等提供参考。

## 2 实 验

### 2.1 样品制备

实验所用样品是在 5.08 cm(2 in) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0001) 衬底上,采用英国 Thomas Swan Close Coupled Showered(CSS) MOCVD 沉积生长的 InGaN/GaN MQW 结构蓝光 LED 外延片。分别以 TMAI、TMGa、TMIn、高纯 NH<sub>3</sub> 作为 Al、Ga、In、N 源。SiH<sub>4</sub> 和 CP<sub>2</sub>Mg 分别作为 N 型和 P 型 GaN 层的掺杂剂。样品的制备过程如下:衬底在 1 100 °C 无 NH<sub>3</sub> 的 H<sub>2</sub> 氛围下清理 1 200 s;降温至 850 °C 铺 Al,通 NH<sub>3</sub> 升温至 1 100 °C 生长 500 nm GaN 缓冲层;在 1 050 °C 生长 3 μm 掺 Si 的 N 型 GaN 层,掺杂浓度约为  $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ;接着生长 6 个周期的 InGaN/

GaN MQW, 其中 InGaN 阱层的生长温度为 720 °C, 厚度为 3 nm, GaN 垒层的生长温度为 840 °C, 厚度为 10 nm; 最后在 990 °C 下生长 200 nm 掺 Mg 的 P 型 GaN 层, 掺杂浓度约为  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。样品的结构如图 1 所示。

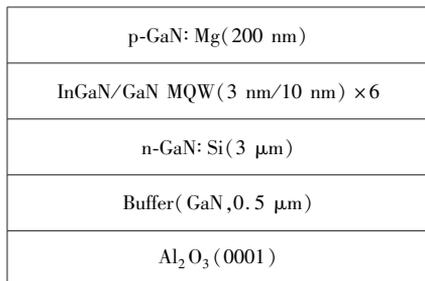


图 1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 衬底 InGaN/GaN MQW 蓝光 LED 外延结构示意图

Fig. 1 Schematic of InGaN/GaN MQW blue LED wafer on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> substrate

## 2.2 PL 谱测试

激发光源为 405 nm (3.06 eV) 连续半导体固体激光器, 最大输出功率 400 mW, 半峰宽 (Full width at half maximum, FWHM) 约为 2 nm。低温 PL 谱测量的控温系统是通过控制流经样品架下方毛细管内的高压 Ar 气流量, 以及样品架下方电阻丝加热功率来调节低温恒温室温度, 该系统的升降温速率可达 15 K/min, 控温范围为 100 ~ 330 K。为了减弱薄膜干涉的影响, 激发光采用侧面 45° 入射到样品上, 样品发出的 PL 信号由石英光纤从低温恒温室侧面 45° 处耦合至 Ocean Optics UBS2000+ 型光谱仪。在光谱仪前方安装一中心波长为 405 nm、OD 值为 6 的单波陷波滤光片, 以过滤 PL 谱中的激光信号。光谱仪采集 PL 信号的扫描间隔为 0.37 nm。测量系统如图 2(a) 所示。在测量过程中, 利用真空泵使低温恒温室压强保持在 1 Pa 左右, 每次测量时均让恒温室内温度稳定 5 min。在 100 ~ 330 K 范围内每间隔 20 K 测量一次 PL 谱。

在高温 PL 谱的测量系统中, 将一“Y 型”两分支石英光纤, 安装在 THOMAS SWAN CCS 型 MOCVD 反应室专用 M680 红外测温石英光学探针上, 作为激发光的导入及 PL 谱信号收集光路。激发光源与低温系统都安装于“Y 型”两分支石英光纤的一支上。光谱仪与单波陷波滤光片均同低温系统一样, 安装于“Y 型”两分支石英光纤的另一支上。石英光学探针的尖部, 通过金属金相用

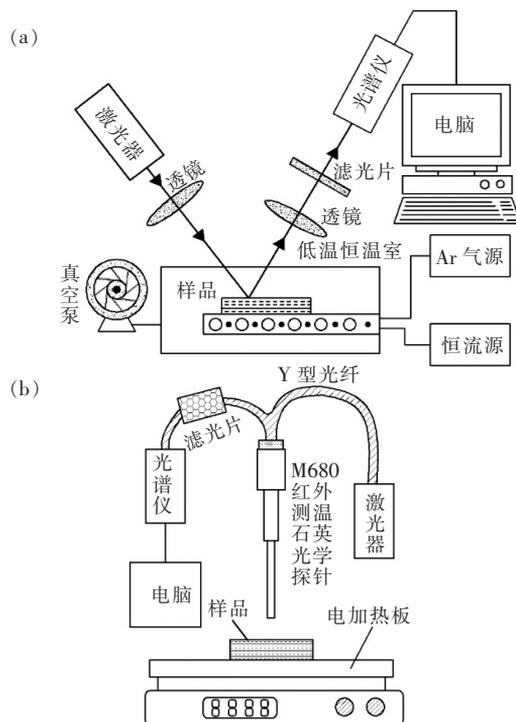


图 2 不同温度下外延片 PL 谱测量系统示意图。(a) 低温 PL 谱测量系统; (b) 高温 PL 谱测量系统。

Fig. 2 Schematic of wafer PL spectra measurement system at different temperatures. (a) PL spectra measurement system at low temperatures. (b) PL spectra measurement system at high temperatures.

预磨机、抛光机打磨成焦距约为 10 mm 的弧面, 可将激发光源汇聚在外延片上表面, 形成直径小于 0.3 mm 的光斑。另外, 弧面相当于一个聚光凸透镜, 便于收集 PL 谱信号。石英光学探针垂直于外延片表面, 距外延片上表面约 10 mm, 激发光的入射与 PL 谱信号的收集均在垂直方向。采用陶瓷数显加热板进行加热, 在 350 ~ 610 K 的温度范围内, 每间隔 20 K 测量一次 PL 谱, 每次测量均让温度稳定 10 min。测量系统如图 2(b) 所示。

## 3 结果与讨论

分别利用图 2 所示低温和高温 PL 谱测量系统, 测量不同温度下 THOMAS SWAN CCS 型 MOCVD 制备的 5.08 cm (2 in) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0001) 衬底 GaN 基 InGaN/GaN MQW 蓝光 LED 外延片 PL 谱。以激发激光峰为标准, 对样品在各温度下的 PL 谱进行归一化处理。100 ~ 330 K 温度范围内低温 PL 谱如图 3(a) 所示, 350 ~ 610 K 温度范围内高温 PL 谱如图 3(b) 所示。

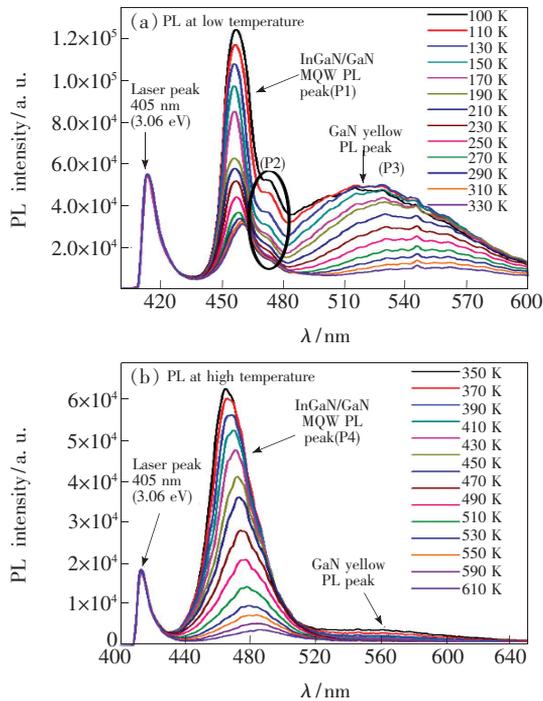


图 3 不同温度下外延片 PL 谱测量结果。(a) 低温下 PL 谱; (b) 高温下 PL 谱。

Fig. 3 Measurement results of wafer PL spectra at different temperatures. (a) PL spectra at low temperatures. (b) PL spectra at high temperatures.

由图 3 可见,随着温度的降低,外延片各个 PL 谱峰值强度均逐渐增大,即材料的内量子效率提高。图 3(a) 低温下 PL 谱主要为 InGaN/GaN MQW 中 InGaN 的带边辐射跃迁对应的主发光峰,100 K 时中心波长为 456.6 nm (2.716 eV) (标记为 P1)。该测试激光功率高达 400 mW,由于光生载流子对量子限制斯塔克效应的屏蔽作用,以及局域态的能带填充效应,峰位会随激发功率的增加而蓝移,故该 P1 峰位能量大于相关文献报道<sup>[11]</sup>;在 P1 峰右侧,可以清晰看到 MQW 发光峰分裂出一个卫星峰 (标记为 P2),且随着温度的降低,P2 峰越清晰,见图 3(a) 中虚线椭圆区域,100 K 时中心波长为 472.4 nm (2.625 eV)。在外延质量较好时,常出现声子伴线,对应峰位为  $h\nu = E_0 - nE_p$ ,  $E_0$ 、 $E_p$ 、 $n$  分别为主发光峰能量、声子能量及声子数目<sup>[11]</sup>,计算得  $E_p = 91$  meV ( $n = 1$ ),约等于 GaN 的光学声子能量;中心波长在 520 ~ 550 nm (2.254 ~ 2.384 eV) 范围内的 n-GaN 层黄带发光峰 (标记为 P3),由于法布里-珀罗薄膜干涉,P3 峰出现明显的周期性震荡。图 3(b) 高温下 PL 谱主要为中心波长约为 475 nm 左右 (2.61 eV) 的

InGaN/GaN MQW 发光峰 (标记为 P4)。高温下 n-GaN 层黄带发光峰已经非常弱。

为了便于精确确定 PL 谱各峰值能量、强度以及 FWHM 随温度变化情况。将图 3(a) 中各温度下的 PL 谱进行 Gaussian 分峰拟合,以  $T = 310$  K 为例,结果如图 4 所示。利用 OriginPro 软件的 Fit Multi-peaks 功能进行 3 个 Gaussian 峰拟合,图 3(a) 中各温度拟合的  $R^2$  均大于 0.999,且各参数的标准误差均较小,可见该分峰拟合质量较高,能保证后续计算分析的精度。

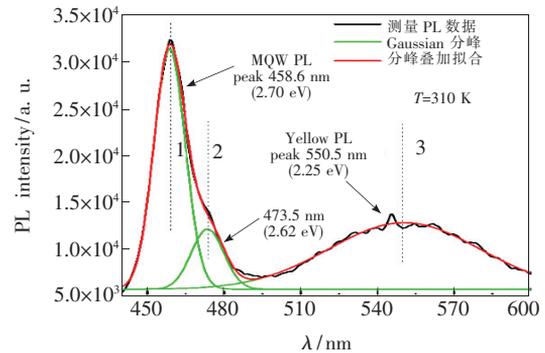


图 4 外延片 PL 谱高斯分峰及拟合分析

Fig. 4 Gauss multi-peaks and fitting analysis of wafer PL spectra

对图 3(a) 中低温下不同温度点的 PL 谱进行 3 个 Gaussian 分峰拟合,分别计算 P1、P2、P3 3 个峰的峰值能量、相对强度、半峰宽,结果如图 5 所示。P1 峰值能量先由 100 K 时的 2.717 36 eV 蓝移至 150 K 的 2.721 46 eV,再红移至 330 K 的 2.700 26 eV。P2 峰值能量随温度变化,表现为明显的先红移后蓝移而后再红移的 S 形变化特性<sup>[11]</sup>。第一个拐点为 110 K,对应于局域势能的最小值。第二个拐点为 150 K,同于 P1,对应于载流子的完全热化分布。由 P2 峰完整的 S 形曲线可算得第二段蓝移为 7.4 meV。InGaN/GaN MQW 中 In 组分的涨落变化或者相分离形成 In 团簇,产生的激子局域化效应以及内建电场导致的 QCSE 是 P1 发光主要机理。P2 可能是 InGaN 阱层中组分及阱宽不均匀引起。P1 与 P2 峰值能量呈 S 形变化,110 ~ 150 K 随着温度升高,晶格错配度减小,相界应力逐渐释放,压变电场减小,QCSE 导致的 Stark 红移逐渐消失,进而产生峰值蓝移,P1 与 P2 分别蓝移 4.1,7.4 meV。150 ~ 330 K 范围内,随着温度继续升高,Vanish 效应开始起主导作用,峰值开始红移,P1 与 P2 分别红移 21.2,28.24 meV。P3 为 n-GaN

杂质带在 PL 谱中的体现,黄带发光主要机理为 Ga 空位与 ON 施主结合,以及碳杂质等<sup>[12-13]</sup>。在 100 ~ 330 K 范围内,随着温度上升,P3 峰红移

145 meV。低温下 GaN 的自由激子和束缚激子等复合发光峰约为 3.5 eV,该 PL 谱激发光源为 3.06 eV,故无法观察到 GaN 的带边峰。

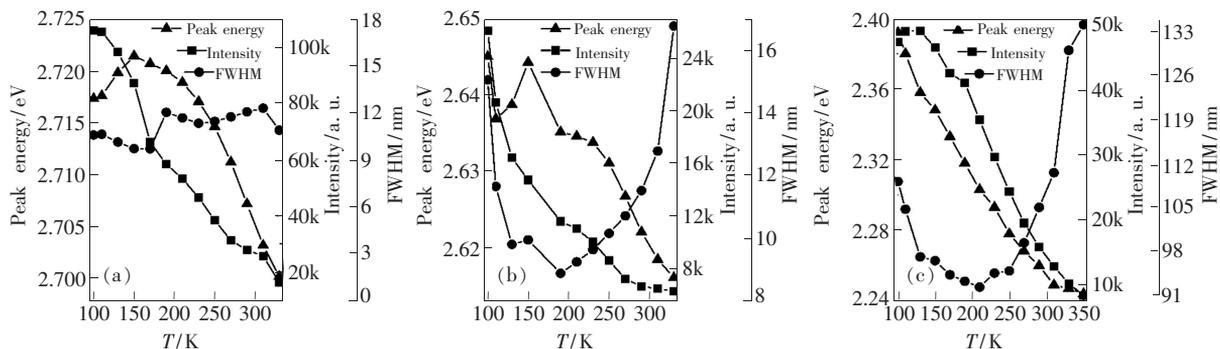


图 5 低温下外延片 PL 谱峰值能量、强度、半峰宽随温度变化。(a) MQW PL 主发光峰;(b) MQW 声子伴线;(c) n-GaN 黄带峰。

Fig. 5 Change of peak energy, intensity and FWHM of wafer PL spectra with temperature at low temperatures. (a) Main luminescence peak of MQW. (b) Phonon concomitant peak of MQW. (c) n-GaN yellow band peak.

由图 5 可见 P1、P2、P3 3 个峰值相对强度均随温度的升高而降低。温度由 100 K 升温至 330 K,3 个峰值强度分别减小至 100 K 时的 0.154, 0.238,0.176。随着温度的升高,3 个峰的发光效率均急剧下降,这样因为与温度相关的多声子发射、俄歇复合等非辐射复合增加引起。P1 与 P3 相比较,P1 峰相对强度随温度衰减比 P3 峰稍慢。这是因为 InGaN 阱层中存在的富 In 区和贫 In 区,相当于量子点,过剩载流子可以快速弛豫至富 In 区,稳定在“量子点”的局域量子能级上,进而减少多声子发射几率。

由图 5 可见,P1、P2 的 FWHM 约为 10 nm,P3 则约为 100 nm,FWHM 可以反映材料的晶体质量,InGaN/GaN MQW FWHM 约为 10 nm,说明该外延片晶体质量较好,由该外延片制作的 LED 芯片,在 350 mA 电流下,功率大于 500 mW。P1、P2 的 FWHM 远小于 P3,是因为量子阱对电子和空穴均有较强的量子限制效应,使得发光强度和 FWHM 均优于黄带发光。由图 5 可见 P1、P2 的 FWHM 随温度的变化为较明显的 W 形(减小-增大-减小-增大)。P1 温度由 100 K 升至 170 K 过程中,FWHM 由 10.6 nm 下降至 9.7 nm,变化幅度不大,平均 FWHM 为 10 nm 左右;当温度上升至 190 K 时,FWHM 越变至 12 nm,在温度由 190 K 升至 330 K 过程中,FWHM 变化不大,平均值为 11.5 nm。170 ~ 190 K 范围 P1 峰 FWHM 呈现一个明显跳变(约为 2.332 nm),对应于局域载流子

从非热化到热化分布的转变。P2 峰温度由 100 K 升至 130 K 过程中,FWHM 降幅为 5.247 nm;在 130 ~ 150 K 过程中出现小幅度跳变(约为 0.143 nm);在 150 ~ 190 K 过程中 FWHM 下降 1.068 nm,说明即使在较强的局域态中的载流子也会由于吸收热能具有一定的活性;190 ~ 330 K 升温过程中,FWHM 开始快速上升,增加至 16.8 nm,说明温度高于 190 K 时,随着温度上升,载流子常规热化开始变得越来越显著,FWHM 随温度上升,直到载流子完全解局域化。P3 峰温度由 100 K 升至 210 K 过程中,FWHM 由 109 nm 下降至 92.2 nm;在温度由 210 K 升至 330 K 过程中,FWHM 增加至 134 nm。

由图 3 (b) 外延片高温 PL 谱可见,InGaN/GaN MQW 发光峰对称性较好,呈现较为完美的 Gaussian 函数峰形,故无需分峰拟合处理。另外,高温下 n-GaN 层黄带发光峰与 MQW 峰相比已非常弱,且难于分峰研究。故仅研究 MQW 峰值能量、相对强度、半峰宽随温度变化,结果如图 6 所示。

随着温度的升高 MQW 带隙收缩效应明显,故温度由 350 K 升至 610 K 过程中,峰值能量红移 114 meV。随着温度的升高,非辐射复合越来越强,因此,610 K 时 MQW 发光峰的相对强度减小至 350 K 时的 0.062 倍。点缺陷平衡浓度  $C = A \exp[-Q_f/RT]$ ,与温度为 e 指数关系,随着温度上升,晶体缺陷浓度增大,晶体质量下降,故 FWHM

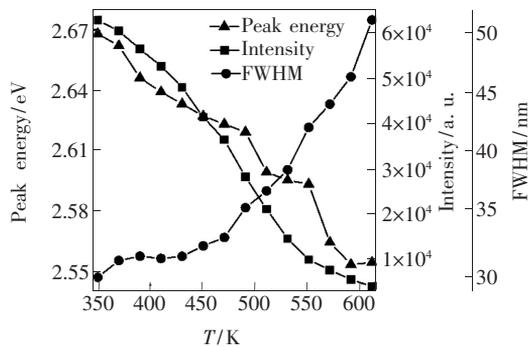


图6 高温下外延片MQW PL谱峰值能量、强度、半峰宽随温度变化。

Fig. 6 Change of peak energy, intensity and FWHM of wafer MQW PL spectra with temperature at high temperatures.

迅速增加。温度由 350 K 升至 610 K 过程中, FWHM 由 29.13 nm 增加至 51.12 nm。

多篇文献报道 InGaN、GaN 峰值能量在低温下,随温度的变化规律为 Varshni 经验公式  $E_g(T) = E_g(0) - \alpha T^2 / (T + \beta)$ , 式中  $E_g(0)$  是  $T = 0$  K 时的禁带宽度,  $\alpha$ 、 $\beta$  为两个 Varshni 温度系数。利用该经验公式对 350 ~ 610 K 温度范围内 InGaN/GaN MQW PL 谱的峰值能量随温度的变化进行拟合。拟合结果为  $E_g(0) = 2.732$  eV,  $\alpha = 1.31$  meV,  $\beta = 2100$  K, 相关系数  $R^2 = 0.9940$ 。In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N 带隙与组分  $x$  的关系为  $E_g = 3.42 - 2.65x - 2.4x(1 - x)$ , 计算得  $x = 0.15$ , 即外延片 MQW 的 InGaN 阱层掺 In 量为 15%, 该计算结果和外延生长时的设计 In 掺杂浓度重合。结果证明:外延片 MQW 高温 PL 峰值能量随温度的变化也满足 Varshni 经验公式,在 MOCVD 外延生长过程中,可考虑在阱层掺 In 过程中,通过 MOCVD 控温系统特意降低反应室温度,在线测量不同温度下 PL 谱,利用上式方法判断掺 In 是否成功,进而及时调整生长

工艺或终止生长,提高生长良率,降低损失<sup>[6,14]</sup>。

## 4 结 论

利用 Thomas Swan CSS MOCVD 在 5.08 cm (2 in) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0001) 衬底上沉积生长了 InGaN/GaN MQW 结构蓝光 LED 外延片。以 405 nm 半导体激光器作为激发光源,分别采用自主搭建的 100 ~ 330 K 变温范围低温 PL 谱测量装置,以及 350 ~ 610 K 变温范围高温 PL 测量装置,测量不同温度下的 PL 谱。对不同温度下 PL 谱进行高质量 Gaussian 分峰拟合,分别研究了 InGaN/GaN MQW 主发光峰及其声子伴线峰、n-GaN 黄带发光峰峰值能量、相对强度、FWHM 在 100 ~ 610 K 温度范围内随温度变化情况。得到以下结论:

(1) 利用 400 mW 激发功率,在 100 ~ 330 K 温度范围内,清晰观察到了 InGaN/GaN MQW PL 谱主发光峰及其声子伴线峰值能量与 FWHM 温度依赖性,分别呈现 S 与 W 形变化。未出现因激发功率太大而减弱量子阱中局域态对载流子的局域效果,从而使 S 与 W 形变化消失的现象;

(2) 根据 InGaN/GaN MQW PL 谱随温度变化分析得到:载流子的完全热化分布温度约为 150 K,局域载流子从非热化到热化分布的转变温度为 170 ~ 190 K;

(3) 350 ~ 610 K 高温范围内,InGaN/GaN MQW 主发光峰峰值能量随温度变化满足 Varshni 经验公式,在线测量不同温度下 MOCVD 外延生长掺 In 过程中的 PL 谱,可实时推算掺 In 量,在线监测外延片生长。

以上结果可为 InGaN/GaN MQW 结构蓝光 LED 外延片的 PL 发光机理研究、高温在线 PL 谱测量设备开发、实现 InGaN 阱层的掺 In 情况实时监测等提供参考。

## 参 考 文 献:

- [1] 刘诗涛,王立,伍菲菲,等. InGaN/GaN 多量子阱 LED 载流子泄漏与温度关系研究 [J]. 发光学报, 2017, 38(1): 63-69.  
LIU S T, WANG L, WU F F, *et al.*. Temperature-dependent carrier leakage in InGaN/GaN multiple quantum wells light-emitting diodes [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017, 38(1): 63-69. (in Chinese)
- [2] HATTORI A N, HATTORI K, MORIWAKI Y, *et al.*. Enhancement of photoluminescence efficiency from GaN(0001) by surface treatments [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2014, 53(2): 021001-1-5.
- [3] 杨超普. MOCVD 在线光致发光与红外测温研究 [D]. 南昌:南昌大学, 2014.

- YANG C P. *Research on MOCVD in situ Photoluminescence and On-line Infrared Thermometry* [D]. Nanchang: Nanchang University, 2014. (in Chinese)
- [4] 张凯. InGaN/GaN 多量子阱发光特性的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2015.  
ZHANG K. *Optical Investigation on InGaN/GaN Multiple Quantum Wells* [D]. Jinan: Shandong University, 2015. (in Chinese)
- [5] LIU S T, QUAN Z J, WANG L. Carrier transport via V-shaped pits in InGaN/GaN MQW solar cells [J]. *Chin. Phys. B*, 2017, 26(3): 038104-1-6.
- [6] YANG C P, FANG W Q, MAO Q H, *et al.*. Photoluminescence study of blue light LED epitaxial wafer during growth by MOCVD [J]. *Optoelectron. Adv. Mater.—Rapid Commun.*, 2015, 9(11-12): 1575-1578.
- [7] 王雪蓉, 魏莉萍, 郑会保, 等. 利用光致发光法测定  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  外延膜中的铝元素含量 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(5): 051601-1-5.  
WANG X R, WEI L P, ZHENG H B, *et al.*. Al contents of  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  epitaxial films studied by photoluminescence technique [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2012, 49(5): 051601-1-5. (in Chinese)
- [8] 魏国华, 王斌, 李俊梅, 等.  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$  单量子阱 PL 谱温度特性及其机制 [J]. *发光学报*, 2010, 31(5): 619-623.  
WEI G H, WANG B, LI J M, *et al.*. Temperature dependence of the photoluminescence properties and the research on the mechanism of  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$  single quantum well [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2010, 31(5): 619-623. (in Chinese)
- [9] 邢兵, 曹文彧, 杜为民. 不同 In 含量 InGaN/GaN 量子阱材料的变温 PL 谱 [J]. *发光学报*, 2010, 31(6): 864-869.  
XING B, CAO W Y, DU W M. Temperature-dependent PL of InGaN/GaN multiple quantum wells with variable content of In [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2010, 31(6): 864-869. (in Chinese)
- [10] LIN T, QIU Z R, YANG J R, *et al.*. Investigation of photoluminescence dynamics in InGaN/GaN multiple quantum wells [J]. *Mater. Lett.*, 2016, 173: 170-173.
- [11] 王绘凝. InGaN/GaN 多量子阱的结构及其光学特性的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2014.  
WANG H N. *Structure and Optical Investigation on InGaN/GaN Multiple Quantum Wells* [D]. Jinan: Shandong University, 2014. (in Chinese)
- [12] 竹有章, 傅关新, 王红霞, 等. HVPE 生长 GaN 厚膜光致发光特性研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(9): 093101-1-5.  
ZHU Y Z, FU G X, WANG H X, *et al.*. Luminescence of GaN thick film grown by HVPE [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2011, 48(9): 093101-1-5. (in Chinese)
- [13] WANG Q, ZHU C R, ZHOU Y F, *et al.*. Fabrication and photoluminescence of strong phase-separated InGaN based nanopillar LEDs [J]. *Superlattices Microstruct.*, 2015, 88: 323-329.
- [14] PRALL C, RUEBESAM M, WEBER C, *et al.*. Photoluminescence from GaN layers at high temperatures as a candidate for *in situ* monitoring in MOVPE [J]. *J. Cryst. Growth*, 2014, 397: 24-28.



杨超普(1987 -), 男, 陕西商洛人, 博士研究生, 讲师, 2014 年于南昌大学获得硕士学位, 主要从事光电子材料与器件的研究。  
E-mail: ycpslu@163.com



方文卿(1964 -), 男, 江西抚州人, 硕士, 教授, 1988 年于中国科学院安徽光学精密机械研究所获得硕士学位, 主要从事 MOCVD 及相关设备的研究。  
E-mail: fwq@ncu.edu.cn