

# In 组分对 InGaN/GaN 蓝光 LED 的 发光性质的影响

崔 苗<sup>1,2</sup> 周桃飞<sup>1</sup> 张锦平<sup>1</sup> 黄小辉<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 江苏 苏州 215125)

<sup>2</sup>中国科学院半导体研究所, 北京 100083

**摘要** 利用扫描透射电子显微术(STEM)和变温光致发光光谱(PL)研究了 In 组分对 InGaN/GaN 蓝光 LED 的发光的影响。STEM 发现两个样品量子阱结构相同, 低温 PL 显示低 In 组分的样品的发光峰位随着温度的升高呈现出经典 S(Red-Blue-Red)曲线。目前普遍认为蓝移是 In 组分分布不均匀造成的局域激子发光的主要原因, 然而实验发现高 In 组分没有出现峰位蓝移, 产生这一异常现象的原因主要是因为高 In 组分造成的势起伏较大, 在 80 K~160 K 条件下造成很大的热势垒, 从而阻碍了载流子从强束缚局域态向弱束缚局域态的跃迁。同时, 在高温段 160 K~300 K 载流子的带填充过程在峰位蓝移方面起主要作用。这是由于高 In 样品的量子限制效应较低 In 组分的明显, 导致高温段峰位整体红移减小。

**关键词** 材料; InGaN/GaN; 扫描透射电子显微术; 光致发光光谱; 带填充

**中图分类号** TN312<sup>+</sup>.8 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1016004

## Influence of In Fraction on the Optical Properties of InGaN/GaN Blue Light-Emitting Diodes

Cui Miao<sup>1,2</sup> Zhou Taofei<sup>1</sup> Zhang Jinping<sup>1</sup> Huang Xiaohui<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics (SINANO), Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215125, China  
<sup>2</sup> Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract** Scanning transmission electron microscopy (STEM) and temperature dependent photoluminescence (PL) measurement are used to study the influence of In fraction on the optical properties of InGaN/GaN blue light-emitting diode (LED). STEM results reveal that both of two samples have the same quantum-well structure. Low-temperature dependence of PL shows that the peak energy of one sample with lower In fraction exhibits a classical S type (Red-Blue-Red) with increasing temperature. Currently it is recommended that the blue shift of peak energy (with increasing temperature) is mainly due to exciton recombination, which is caused by inhomogeneous In distribution. However, the sample with higher In fraction doesn't show any blue shift about the peak energy. This unnormal phenomenon can be mainly attributed to the large thermal barrier caused by potential fluctuation of high In composition, which prohibits carriers transition from strong localized state into weak localized state (this process can cause blue shift of energy). Meanwhile, band filling process of carriers becomes prominent in the role of energy blue shift from 160 K to 300 K, this can be attributed to the more obvious quantum confined effect in higher In fraction sample, compared with lower In fraction, resulting in smaller average red shift of peak energy.

**Key words** materials; InGaN/GaN; scanning transmission electron microscopy; photoluminescence; band filling

**OCIS codes** 160.6000; 250.5590; 270.5580

**收稿日期**: 2011-05-09; **收到修改稿日期**: 2011-06-02

**基金项目**: 国家自然科学基金(50902099)资助课题。

**作者简介**: 崔 苗(1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事 LED 测试分析方面的研究。E-mail: mcui2009@sinano.ac.cn

**导师简介**: 周桃飞(1979—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事半导体材料与器件物理方面的研究。

E-mail: tfzhou2007@sinano.ac.cn(通信联系人)

## 1 引言

近几十年来, GaN 基发光二极管(LED)由于其效率高,寿命长,开启电压低等优点,在固态照明领域已经取得了很大的进展<sup>[1~6]</sup>。对于 InGaN/GaN LED 来说,一方面由于高 In 组分会形成 In 富集量子点局域态,束缚激子发光<sup>[7]</sup>。另一方面,高 In 组分会使量子阱产生很大的失配位错,这些位错可能起到非辐射复合中心的作用<sup>[8]</sup>,严重地降低了载流子的寿命<sup>[9]</sup>。目前有关 In 组分对 LED 发光的影响已经有一些文献报道<sup>[10~12]</sup>,虽然 In 组分分布不均匀引起局域激子发光,这种局域态将会导致在低温下光致发光光谱(PL)的发光峰位随温度的升高而发生蓝移的观点已经被普遍接受,但是具体 In 组分对低温下发光峰位蓝移的解释还不够完善。在本文中,高的 In 组分在升温过程当中并没有引起峰位的蓝移,这一现象违背了 In 不均匀分布造成的局域态和发光峰位蓝移的说法,通过对两个量子阱结构相同、In 组分不同的样品的扫描透射电子显微术(STEM)和低温 PL 的数据分析,解释了产生这一异常现象的主要原因是由于高 In 组分会形成很大的热势垒,在 80 K~160 K 温度段热不足以激发低能谷的载流子(强束缚态)向更高的能谷(弱束缚态)跃迁从而发生峰位蓝移,并且提出了在高温段 160 K~300 K 之间,高 In 样品的量子限制效应会在峰位蓝移方面起到重要的作用,减小由 Varshni 效应引起带边收缩而发生的峰位红移,由于量子阱中应力而导致的量子限制 Stark 效应(QCSE)对峰位移动的影响可以忽略。

## 2 实验

为了研究 In 组分对 InGaN/GaN LED 发光的影响,对两个 In 组分不同、量子阱结构相同的 InGaN/GaN LED 商业外延片 A 和 B 分别进行了 PL 和 STEM 成像。为了准确获得多量子阱 InGaN 层的发光,避免量子垒 GaN 层的发光,PL 激发光选取 405 nm,45 mW 的半导体激光器,利用 Princeton Instruments 生产的 Spectrapro 2500i 进行 PL 测试,光栅采用 1200 lp/cm,光谱分辨率为 0.1 nm。低温制冷装置的型号为 Oxford crystat,控温仪装置的型号为 ITC503S,可以进行温度在 3 K~300 K 的测量。利用 X 射线双晶衍射仪(DCXRD)对样品进行了表征和分析,X 射线衍射仪为 Bruker D8 Discover 型高分辨四圆衍射仪,X 射线源为  $\text{GuK}_{\alpha 1}$

( $\lambda=0.154056 \text{ nm}$ ),X 射线管的工作电压为 40 kV,工作电流为 40 mA。样品断面扫描透射电子显微术(STEM)观察是在 Tecnai G2 F20 S-Twin 上进行的,高分辨原子序数(Z)衬比度像是显示的高分辨扫描透射成像中的亮点对应于真实原子柱投影的位置,点的强度近似于平均原子序数平方( $Z^2$ ),不同成分的原子序数不同,将会在 STEM 上产生不同的衬比度,得到样品的结构和尺度信息。剖面 TEM 样品是通过研磨、抛光到 10  $\mu\text{m}$  左右,然后采用离子减薄仪得到很薄的区域。

## 3 结果与讨论

图 1 为外延片 A 和 B 的室温 PL 光谱图,A 样品和 B 样品的发光峰位分别在 460 和 476 nm,相差 16 nm,B 的 In 组分比 A 高,但是光致发光光谱有时受到杂质、缺陷等的影响不能精确地测量 In 的组分<sup>[13]</sup>。图 2(a)和(b)分别为 A 和 B 样品的 XRD 结果,实验曲线(黑色)和拟合曲线(灰色)相吻合,测量得到 A 样品的 In 组分为 12.8%,B 样品的 In 组分为 16.4%,证明了 B 的 In 组分比 A 的高。图 3(a)和(b)分别为 A 样品和 B 样品的 STEM 图像,Al 的原子序数最小,对电子散射最小,故衬比度最暗,而 In 由于原子序数较 Ga 和 Al 来说最大,故对电子散射最大,衬比度最亮。因此可以根据衬比度得到样品的结构层信息,包括成分和厚度。STEM 结果显示样品 A 和样品 B 的有源区量子阱的结构基本上是相同的,InGaN 量子阱的宽度为 2 nm,GaN 量子垒的宽度为 19~20 nm,阱的个数都为 10 个。由于 LED 的发光机理是载流子在有源区的辐射复合,所以 A 和 B 样品其他层(多量子阱层之外)的差异不会对 LED 的 PL 发光性质产生很大的影响。

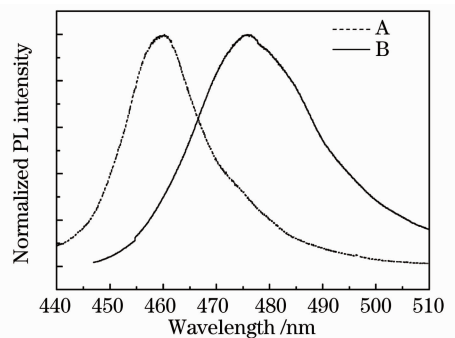


图 1 室温 PL 光谱图,激发波长为 405 nm  
Fig. 1 PL spectra at room temperature, excitation wavelength is 405 nm

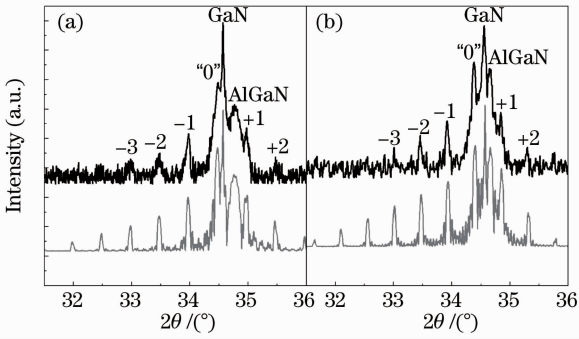


图 2 样品的 XRD 谱。(a) A 样品;(b) B 样品, 黑色是实验测量曲线,灰色是拟合曲线

Fig.2 XRD spectra of sample A (a) and sample B (b), black color is experimental curve and gray color is fitting curve

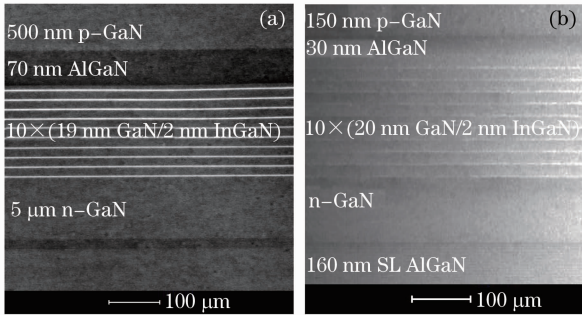


图 3 (a)样品 A 的截面 STEM 显微图; (b)样品 B 的截面 STEM 显微图

Fig. 3 STEM image of cross section of (a) sample A and (b) sample B

图 4(a)和(b)分别为低温 5 K~300 K 温度范围内的 A 样品和 B 样品的 PL 光谱,可以看出,样品 A 呈现经典的 S 曲线,而且低温下存在明显的肩峰,主要是由于零声子激子发光(ZPL)跟声子相互作用产生的声子伴线(1-LO),而 B 样品在整个温度范围内都是呈现出单一的峰,没有肩峰。

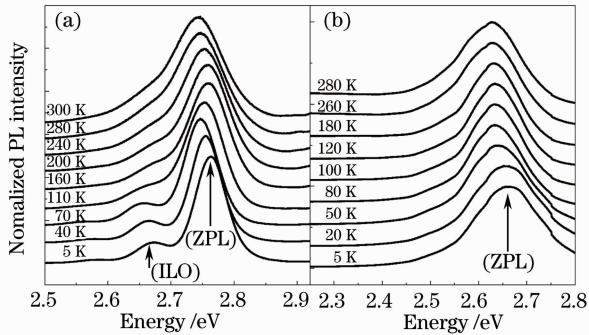


图 4 (a)样品 A 的变温 PL 谱;(b)样品 B 的变温 PL 谱, 激发波长为 405 nm

Fig. 4 Temperature dependence of PL spectra sample A (a) and sample B (b), excitation wavelength is 405 nm

图 5(a)和(b)分别是 A 样品和 B 样品的发光峰位能量随温度的变化,A 样品的一阶声子能量为 89 meV,与文献报道相一致<sup>[14,15]</sup>。B 没有出现声子伴线的原因是因为 B 的 In 含量高,载流子很快弛豫到类量子点的局域态(这些局域态是由于 In 组分分布不均匀产生的 In 富集而形成的),从而减小了多声子发射<sup>[16]</sup>。从图中可以明显看出 A 样品的发光峰位随着温度的升高呈现经典的 S 形状(Red-Blue-Red),发生峰位蓝移的温度段为 80 K~160 K。而 B 样品在整个升温过程中峰位没有出现蓝移,而在 80 K~200 K 之间峰位基本保持不变。目前关于 S 曲线主要观点是:In 组分不均匀形成类量子点的局域态,使得能带存在着势起伏,在温度作用下载流子在弱束缚局域态和强束缚局域态之间出现热跃迁而形成的<sup>[4,10]</sup>。在低温下峰位随着温度升高而产生的蓝移是存在局域态的重要标志,而 B 样品高 In 组分却没有出现蓝移是因为 B 的 In 组分不均匀引起的势起伏较大,在 80 K~160 K 之间,热能不足以激发载流子从深束缚态(强束缚态)向浅束缚态(弱的束缚态)的跃迁,即不能实现峰位的蓝移。而在 160 K~200 K 之间,虽然热能足以激发载流子的这一热跃迁而发生蓝移,但 Varshni 效应作用逐渐增强,蓝移会抵消部分 Varshni 效应造成的峰位红移,从而峰位保持不变。

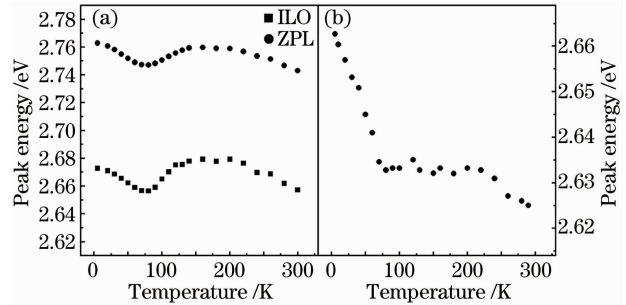


图 5 (a) A 样品零声子 ZPL 能量和一阶声子伴线能量随温度的变化;(b)样品 B 的 PL 能量随温度的变化,采用单峰 Gaussian 拟合

Fig. 5 Temperature dependence of peak energy (a) of zero phonon and first-order phonon satellite line sample A and (b) sample B using single peak Gaussian fitting

对于 InGaN/GaN LED,带边发光随温度的变化主要考虑三种机制:1)由 In 组分不均匀引起的势起伏,这会造成载流子在温度作用下实现在不同局域态的热跃迁;2)温度的升高会引起带边的收缩(Varshni 效应),从而使得发光向低能方向偏移;3)应力导致的量子限制 Stark 效应(QCSE)和载流子

带填充过程的影响。在实验中,低温变功率 PL 用来研究 QCSE 效应对 LED 发光的影响<sup>[17]</sup>,随着激发功率的增加,载流子不断增加,在量子阱中形成的分布会抵消部分由应力导致的内建电场,从而使得峰位发生蓝移。图 6(a)和(b)分别为低温 5 K 下 A 样品和 B 样品在不同激发功率下的 PL 光谱,当激发功率从 1.5 mW 增加到 45 mW 时,可以看出 A 样品和 B 样品的 PL 发光峰位不随激发功率的增加而发生变化,这证明了应力所造成的 QCSE 对 A 和 B 样品的发光影响可以忽略。

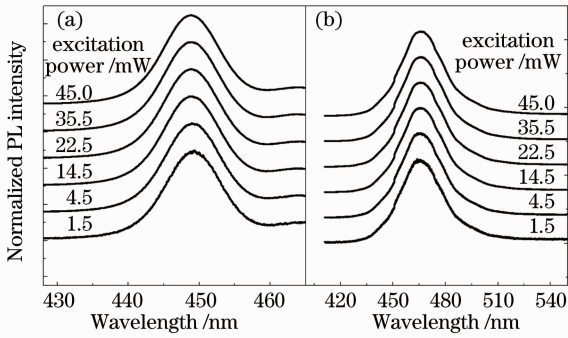


图 6 5 K 下不同激发功率下的 PL 光谱,激发波长为 405 nm。(a) A 样品;(b) B 样品

Fig. 6 Excitation power dependence of PL at 5 K, excitation wavelength is 405 nm. (a) Sample A; (b) sample B

为了更清楚地解释 In 分布不均匀造成的势起伏对低温 PL 发光的影响,图 7 给出了 A 和 B 样品势起伏引起的热跃迁模型,对于经典 S 曲线,可以用下面的模型来解释。图 7(a)是 A 样品的势起伏引起的热跃迁模型,在极低的温度下载流子被束缚在较浅的局域态,在低温 5 K~80 K 之间,随着温度的升高,载流子被激活,从浅的局域态跃迁到较深的局域态,如黑色实线所代表的过程,峰位相应红移。随着温度继续增加,80 K~160 K 之间,所有载流子都已束缚在较深的局域态里,温度不断增加,使得深局域态(强束缚态)的载流子获得足够多的热能,热激发到更高的能态,到达比较浅的局域态,如图 7(a)黑色虚线所表示热激发的过程:这主要是因为随着温度的升高,非辐射复合作用逐渐增强,使得载流子的寿命减小,载流子在到达最低能谷之前已经复合发光,这将会导致发光峰位蓝移。温度在 200 K~300 K 之间,Varshni 效应起主要作用,带边随温度升高而收缩,造成发光峰位红移。对于 B 样品,在整个温度范围内峰位没有出现蓝移的原因是由于 B 高 In 组分引起的势起伏比较大,在温度第二阶段(80 K~160 K)当载流子被热激发时,由于热

能 $k_B T < e\phi_2$ ,不足以使载流子激发到更高的局域态上,如图 7(b)黑色虚线所示,虚线代表较高的温度下,随着温度的升高载流子被热激发,从深束缚态向浅的束缚态跃迁,发生蓝移;实线代表在低温度下,随着温度的升高弱的束缚局域态(浅的束缚态)的载流子被激活,跃迁至强的束缚局域态(深的束缚态),发生红移。因为 B 样品的 In 组分比 A 样品的组分高,而且 B 样品的半峰全宽(FWHM)是 A 样品的 2 倍多(图 8),故 B 样品相对于 A 样品来说 In 组分不均引起的势起伏大,即图 7 中  $e\phi_2 > e\phi_1$ ,其中  $e\phi_1$  和  $e\phi_2$  分别代表样品 A 和样品 B 的势涨落,这样就解释了为什么 B 样品在 80 K~200 K 之间没有出现蓝移。

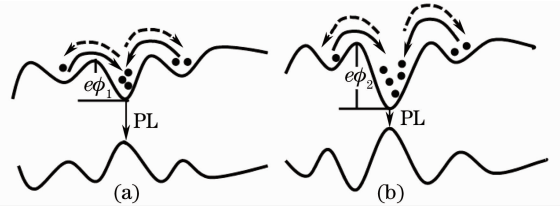


图 7 势起伏引起的热跃迁模型。(a) A 样品; (b) B 样品

Fig. 7 Model for thermal transition caused by potential fluctuations of (a) sample A and (b) sample B

图 8(a)和(b)分别给出了中 A 和 B 两个样品的 FWHM 随温度的变化,A 样品的 FWHM 随着温度的升高呈现出经典 W 线型,这个主要是因为不同局域态之间声子辅助激子跳跃<sup>[18]</sup>。但是样品 B 的 FWHM 随着温度的升高呈现明显的 V 形状,而且在 160 K 左右才出现半峰全宽增加的趋势。如图 8(a)样品(圆点)的 FWHM 随着温度的变化所示,80 K~160 K 之间 FWHM 变化得非常小,这一温度过渡段被认为是激子能量热激发分布过程<sup>[19]</sup>,即激子从强束缚态热激发到弱束缚态的跃迁过程,而对于图 8 的 B 样品(方点)来说,发生 FWHM 转变的温度发生在更高的温度点 160 K,这主要是因为发生激子能量从局域到热激发的温度转变点(即峰位发生蓝移的温度转变点)与势起伏的能量大小  $\phi$  有关<sup>[19]</sup>,高 In 组分的 B 的势起伏能量  $e\phi_2$  大于 A 样品的  $e\phi_1$ ,所以 B 的 FWHM 发生转变的温度点高于 A 样品的。当温度继续升高,两个样品的 FWHM 都随着温度的增加而变宽,这主要是因为温度升高时晶格散射增加,导致峰变宽。

为了定量解释 In 组分对 PL 发光的影响,计算出 Varshni 效应导致峰位红移<sup>[4]</sup>,得到势起伏造成的峰位的偏移,表 1 和表 2 分别给出 A 样品和 B 样品在不同温度范围内的计算结果。



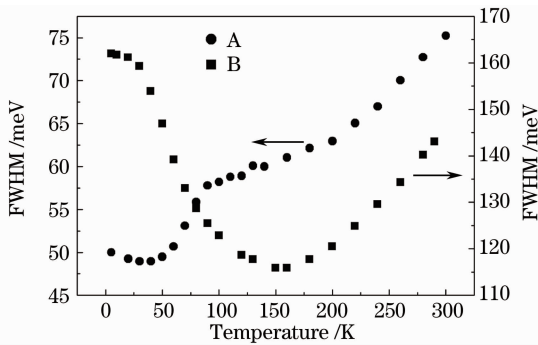


图 8 半峰全宽随着温度的变化关系

Fig. 8 Temperature dependence of FWHM

表 1 表示 A 样品在不同温度范围内峰位的偏移,可以看出在低温段 5 K~80 K 范围内, A 样品势起伏引起的能带的红移为 10 meV,而 B 样品的为 24.3 meV, B 样品的势起伏引起峰位的红移量是 A 样品的 2 倍多,这也证明了 B 样品的势起伏比较大。80 K~160 K 时 A 样品热跃迁势起伏造成峰位的蓝移量 28.3 meV,大于 B 样品的 15.6 meV,这是由于 B 样品的 In 组分高引起的势起伏较 A 大,载流子不足以跨过热势垒,从而使得蓝移过程缩短。而在 160 K~300 K 时, B 样品的蓝移量 35.6 meV 大于 A 样品的 27.9 meV,因为 B 样品的 In 组分比较高,温度的升高使得载流子的带填充变得明显而发生峰位向高能方向移动,即峰位发生蓝移。在相同的势阱结构中,高的 In 组分(B 样品)的量子限制效应更加明显,产生的量子态能级更多,随着温度的增加载流子向更高的能级填充产生的蓝移

表 1 A 样品在不同温度范围内峰位的偏移

Table 1 Peak energy shift of sample A at different temperature regions

Temperature region /K	Peak-energy shift /meV	Varshni red shift /meV	Energy shift caused by potential fluctuation /meV
5~80	redshift 15.7	5.7	red-shift 10
80~160	blueshift 12.7	15.6	blue-shift 28.3
160~300	redshift 16.7	44.6	blue-shift 27.9

表 2 B 样品在不同温度范围内峰位的偏移

Table 2 Peak energy shift of sample B at different temperature regions

Temperature region /K	Peak energy shift /meV	Varshni red shift /meV	Energy shift caused by potential fluctuation /meV
5~80	redshift 30	5.7	red-shift 24.3
80~160	redshift 0	15.6	blue-shift 15.6
160~300	redshift 9	44.6	blue-shift 35.6

量较大。考虑带边随温度升高的红移, B 样品的整体峰位的红移小于 A 样品。

## 4 结 论

通过 PL 和 STEM 分析手段研究了 In 组分对 InGaN/GaN LEDs 发光的影响,发现高 In 组分样品的低温 PL 随着温度的升高没有发生峰位蓝移,这主要是因为温度在 80 K~160 K 之间高 In 组分引起的势起伏形成很高的热势垒,比温度不足以热激发载流子从深束缚局域态向浅束缚局域态的跃迁,从而导致其未发生峰位蓝移。高温 160 K~300 K 之间量子限制效应是造成峰位蓝移的主要原因,从而减小了带边随温度升高而收缩发生的峰位红移,由于应力造成的量子限制 Stark 效应(QCSE)对发光峰位的影响可以忽略。

## 参 考 文 献

- Huang S., Wu H., Fan B. *et al.*. A chip-level electrothermal-coupled design model for high-power light-emitting diodes[J]. *J. Appl. Phys.*, 2010, **107**(5): 054509
- J. H. Son, J. L. Lee. Numerical analysis of efficiency droop induced by piezoelectric polarization in InGaN/GaN light-emitting diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **97**(3): 032109
- Jianzheng Hu, Lianqiao Yang, Moo Whan Shin. Electrical, optical and thermal degradation of high power GaN/InGaN light-emitting diodes[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2008, **41**(3): 035107
- Yong Hoon Cho, G. H. Gainer, A. J. Fischer *et al.*. "S-shaped" temperature-dependent emission shift and carrier dynamics in InGaN/GaN multiple quantum wells[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **73**(10): 1370~1372
- Cui Desheng, Guo Weiling, Cui Bifeng *et al.*. Effects of human-body-mode electrostatic discharge on GaN-based power light-emitting diode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0323004  
崔德胜, 郭伟玲, 崔碧峰等. 人体模式静电放电对 GaN 基大功率发光二极管特性的影响[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0323004
- Wang Yanming, Xiong Chuangbing, Wang Guangxu *et al.*. Study on aging characterization of 1 W epitaxy on Si substrate blue LED based on different substrates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1749~1754  
王延明, 熊传兵, 王光绪等. 不同基板 1 W 硅衬底蓝光 LED 老化性能研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1749~1754
- Nakamura S.. The roles of structural imperfections in InGaN-based blue light-emitting diodes and laser diodes[J]. *Science*, 1998, **281**(5379): 956~961
- D. Cherns, S. J. Henley. Edge and screw dislocations as nonradiative centers in InGaN/GaN quantum well luminescence[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**(18): 2691~2693
- J. J. Wierer, Jr., A. J. Fischer, D. D. Koleske. The impact of piezoelectric polarization and nonradiative recombination on the performance of (0001) face GaN/InGaN photovoltaic devices[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(5): 051107
- A. Bell, S. Srinivasan, C. Plumlee *et al.*. Exciton freeze-out and thermally activated relaxation at local potential fluctuations in thick Al<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>N layers[J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, **95**(9): 4670~4674

- 11 Shihwei Feng, Yungchen Cheng, Yiyin Chung *et al.*. Impact of localized states on the recombination dynamics in InGaN/GaN quantum well structures[J]. *J. Appl. Phys.*, 2002, **92**(8): 4441~4448
- 12 E. Kuokstis, J. W. Yang, G. Simin *et al.*. Two mechanisms of blueshift of edge emission in InGaN-based epilayers and multiple quantum wells[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **80**(6): 977~979
- 13 Li Shutu, Jiang Fengyi, Fan Guanghan *et al.*. The bowing parameters and Stokes' shift in InGaN films[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 751~755  
李述体, 江风益, 范广涵等. InxGa1-xN 薄膜的弯曲因子及斯托克斯移动研究[J]. 光学学报, 2004, **24**(6): 751~755
- 14 S. Kalliakos, X. B. Zhang, T. Taliercio *et al.*. Large size dependence of exciton-longitudinal-optical-phonon coupling in nitride-based quantum wells and quantum boxes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**(3): 428~430
- 15 D. M. Graham, A. Soltani-Vala, P. Dawson *et al.*. Optical and microstructural studies of InGaN/GaN single-quantum-well structures[J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **97**(10): 103508
- 16 Fan Zhijun, Liu Xianglin, Wan Shouke *et al.*. Dependence of InGaN photoluminescence on temperature[J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2001, **22**(5): 569~572  
樊志军, 刘祥林, 万寿科等. InGaN 光致发光性质与温度的关系 [J]. 半导体学报, 2001, **22**(5): 569~572
- 17 T. Wang, J. Bai, S. Sakai. Investigation of the emission mechanism in InGaN/GaN-based light-emitting diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**(18): 2617~2619
- 18 K. Kazlauskas, G. Tamulaitis, A. Zukauskas. Double-scaled potential profile in a group-III nitride alloy revealed by Monte Carlo simulation of exciton hopping [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(18): 3722~3724
- 19 K. Kazlauskas, G. Tamulaitis, A. Zukauskas. Exciton hopping in In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N multiple quantum wells[J]. *Phys. Rev. B*, 2005, **71**(8): 085306