







属，去胶后形成 PAD 电极。

6) 钝化层 (PV) 制作: 通过等离子增强型化学气相沉积 (PECVD) 在材料表面沉积一层 240 nm 厚度  $\text{SiO}_2$ , 采用标准光刻工艺, 在材料表面均匀涂覆正胶, 经过曝光显影, 形成 PV 图形, 扫胶后通过 BOE 溶液蚀刻掉非光刻胶保护区域的  $\text{SiO}_2$ , 去胶后形成 PV 层。

最后将蓝宝石衬底研磨抛光后, 经切割、裂片和无胶填充封装后制备成单粒灯珠。

### 1.3 外延样品微观形貌与芯片器件性能表征

未生长 P 型层的样品的微观形貌采用扫描电镜 (SEM, 型号 TESCAN LYRA3) 测量表征, 并用变功率光致发光 (PL, 型号中拓 IM3200) 测量表征样品的波长及发光强度变化。完整外延结构制作成的 LED 芯片的电流-电压 ( $I-U$ ) 特性曲线及反向电压参数用 Keithley2430 数字源表完成。光学性能测试采用 GAMMA 光谱和积分球测试系统 (型号 GS-1220) 进行: 将 LED 芯片封装在标准 TO 支架上, 再将封装好的芯粒样品置于积分球内, 通过探针施加电压发光, 然后由光纤传输至光谱系统收集。

## 2 结果与分析

### 2.1 V 型缺陷密度的表征与统计

选择样品 SS1~SS4 外延片上中下左右 5 个位置取样表征 V 型缺陷, 表征区域取边长约为  $40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$  的正方形, 统计该区域内 V 型坑的数量, 除以区域面积计算 V 型缺陷的密度, 然后取 5 个区域 V 型缺陷密度的算数平均值得出该样品的 V 型缺陷密度, 用 5 个区域 V 型缺陷密度的标准偏差表征样品的均匀性。测量统计显示四组样品的各区域 V 型缺陷密度统计标准偏差均在 2%~4% 之间。图 2 显示了样品 SS1~SS4 的 V 型缺陷典型分布, 其中样品 SS1 的 V 型缺陷密度约为  $1.7 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ , SS2 的 V 型缺陷密度约为  $2.7 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ , SS3 的 V 型缺陷密度约为  $4.2 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ , SS4 的 V 型缺陷密度约为  $5.9 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 。

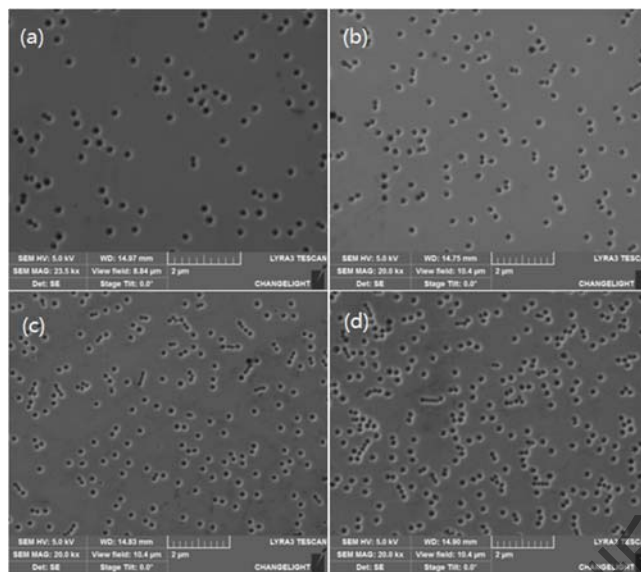


图 2 扫描电镜表征的样品 SS1~SS4 的 V 型缺陷密度

Fig.2 V-pits densities of SS1~SS4 characterized by SEM

## 2.2 变功率 PL 表征结果与分析

样品 SS1~SS4 用变功率 PL 表征波长及发光强度的变化，激光波长 375 nm，激光功率密度从  $0.1 \text{ W/cm}^2$  到  $25 \text{ W/cm}^2$  连续可调，取最强的 PL 强度为 100，对不同样品和激发功率密度的 PL 强度做归一化处理。图 3(a)显示了样品 SS1~SS4 在不同激发功率条件下的峰值波长 ( $W_p$ ) 变化，其  $W_p$  变化趋势无明显差异，波长蓝移均小于 0.3 nm，且 SS1~SS4 的  $W_p$  最大值与最小值差值在 0.7 nm 之内。因为  $W_p$  主要是 10 对多量子阱有源区决定，既然 4 组样品的量子阱的生长条件完全相同，其  $W_p$  没有显著差异也是合理的。虽然 4 组样品是不同炉次生长出来的，但生长条件参数波动所引起的量子阱厚度和组分的轻微波动在外延生长过程中高度可控，因此导致的  $W_p$  的轻微漂移也在合理范围内；另一方面，虽然底层 20 个周期的超晶格应力调制层对上层量子阱的应力状态会有影响，如果应力调制作用足够强，以至于导致量子阱区压电效应发生显著变化，那么  $W_p$  一定会发生明显的蓝移或红移动，但从图 3(a)呈现的  $W_p$  的轻微漂移来看，4 组样品的量子阱区的应力差异也是可以忽略的。图 3(b)给出了样品 SS1~SS4 在不同激发功率条件下的 PL 强度变化和相对 IQE 的变化趋势，这里的相对  $\text{IQE} = \text{PL 强度} / \text{激光功率密度}$ ，4 组样品的变化趋势同样未呈现明显差异，进一步说明 4 组样品的量子阱结构、应力和组分差异可以忽略。一般情况下 V 型缺陷的开口始于穿通位错的顶端，而位错通常是非辐射复合中心，是影响 IQE 的重要因素。虽然 4 组样品的 V 型缺陷密度存在较大差异，但由于底层 GaN 的生长条件完全一样，因此其穿通位错的密度也应保持



同一水平，超晶格应力调制层生长条件的变化并不改变既有的穿通位错密度，只是对于 V 型缺陷的产生存在不同的抑制作用，从而导致了 4 组样品不同 V 型缺陷密度的呈现。既然穿通位错密度并无明显差异，4 组样品表现出相似的 IQE 行为也是合理的。

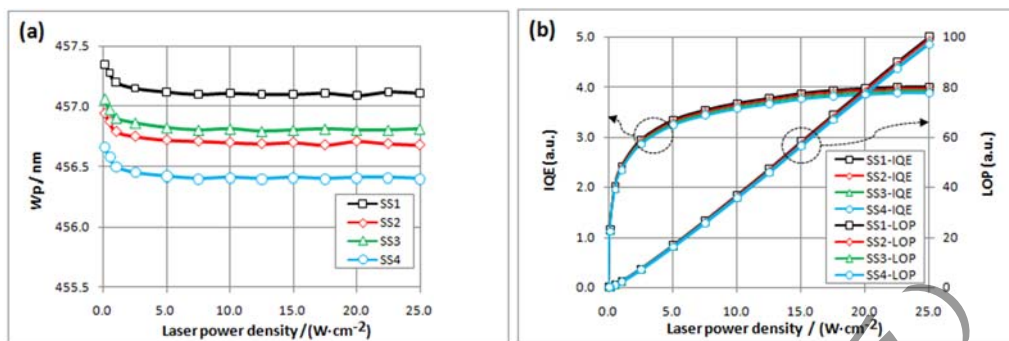


图 3 样品 SS1~SS4 在不同激发功率密度条件下 PL 峰值波长变化(a); 样品 SS1~SS4 在不同激发功率密度条件下 PL 强度变化和相对 IQE 变化(b)

Fig.3 Laser power density dependence of PL peak wavelength for samples SS1~SS4 (a); Laser power density dependence of PL intensity and relative IQE for samples SS1~SS4 (b)

### 2.3 电致发光 (EL) 特性表征结果与分析

图 4 显示了样品 S1~S4 制作成芯片后在 150 mA 电流驱动条件下的 EL 光电性能与 V 型缺陷密度的对应关系。如图 4 (a)所示，随着 V 型缺陷密度的增加，发光主波长 ( $W_d$ ) 几乎没有变化，最大值与最小值差值在 0.5 nm 之内，说明 4 组样品由于外延生长的波动引入的量子阱结构及组份差异可以忽略。如图 4(b)所示，随着 V 型缺陷密度的增加，发光功率 ( $P_{op}$ ) 也呈现升高趋势，从 S1 的 172.2 mW 增加到 S2 的 176.5 mW,  $P_{op}$  提升 2.5%；当 V 型缺陷密度增加到  $4.2 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$  时,  $P_{op}$  最佳，到达 S3 的 183.5 mW,  $P_{op}$  累计提升 6.6%；V 型缺陷密度继续增加,  $P_{op}$  转而呈现下降趋势，减少到 S4 的 178.8 mW,  $P_{op}$  较最优下降 2.6%，前面分析已经排除了外延生长波动引入的量子阱结构与组分差异带来的影响，这说明存在非单调机制在影响发光效率。如图 4 (c)所示，随着 V 型缺陷密度的增加，正向电压 ( $U_f$ ) 呈现单调下降趋势，从 S1 的 3.231 V 下降至 S4 的 3.127 V, 累计降幅 0.104 V。如图 4 (d)所示，随着 V 型缺陷密度的增加，反向电压 ( $U_z$ ) 也呈现单调下降趋势，从 S1 的 59.4 V 下降至 S4 的 48.1 V, 累计降幅 10.3 V。

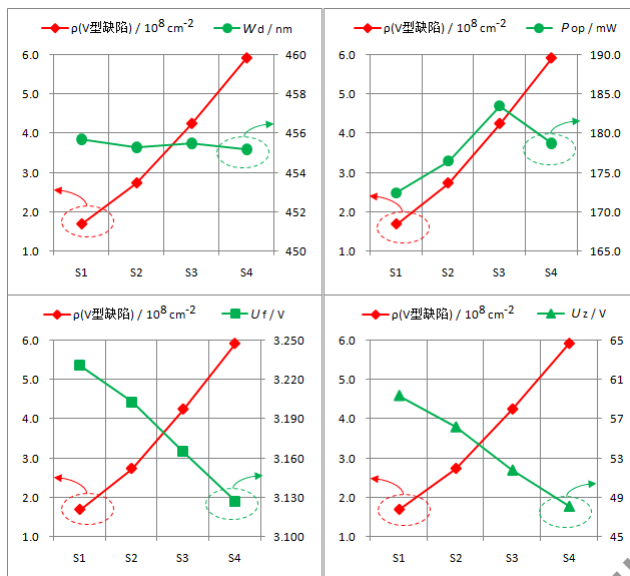


图4 S1~S4 芯片样品在 150mA 特征电流驱动条件下的光电性能与 V 型缺陷密度的对应关系。

Fig. 4 Dependence relationships between the electronic-optical parameters of S1~S4 chips driven at 150mA with varied V-pits densities

如图 5(a)所示, 在没有或者缺少 V 型缺陷的 LED 结构中, 由于 P 型掺杂效率远低于 N 型掺杂效率, 空穴浓度仅为  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  量级, 而电子浓度可达  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  量级, 导致空穴的注入效率远低于电子的注入效率, 空穴无法注入到离 P 型层更远的量子阱区域, 电子空穴对只能在最靠近 P 型层一侧的少数量子阱区域复合发光, 因此 IQE 较低。如图 5(b)所示, 在具有 V 型缺陷的 LED 结构中, P 型区域渗透至整个量子阱区, 电流的侧向注入有效的提升了空穴向距离 P 型层较远的量子阱区域的注入, 使得电子空穴能够在整个量子阱区域参与复合发光, 因此 IQE 得到显著提升; 另一方面, 虽然 V 型缺陷侧壁会生长上侧壁量子阱, 但侧壁量子阱厚度远小于 C 面量子阱优化过的厚度, 对电子和空穴的量子限制效应显著削弱, 在恒定电流注入条件下, 载流子在量子阱区的分布是稳态的, 但载流子几乎不能分布在 V 型缺陷区域, 而是主要分布在 C 面量子阱中, V 型缺陷的存在减少了 C 面量子阱的面积, 所以同样的电流注入条件下, C 面量子阱的实际面积越小, 载流子密度越大, 俄歇复合和载流子泄露越严重, 这一机制又会造成 IQE 下降。V 型缺陷侧壁量子阱所在晶面是半极性面, 极化效应减弱理论上会导致发光波长显著蓝移, 本实验中 PL 和 EL 量测均没有观测到蓝移的发光峰, 因此本实验中 V 型缺陷自身对发光贡献可以忽略。有研究表明阴极射线发光 (CL) 测量显示 V 型缺陷区域为暗区, 自身不贡献发光<sup>[19]</sup>, 这与本实验的观测结果及理论推测一致。由于上述两



个机制是竞争的机制，共同影响该结构的 IQE。这一竞争机制合理的解释了图 4 (b)中 S1~S4 样品随着 V 型缺陷密度增加发光功率增加再降低的现象。同时由于 V 型缺陷附近 P 型与 N 型区距离更近，耗尽层变薄，阻值下降，电流更容易从 V 型缺陷附近通过，导致电压降低和反向性能下降，另一方面，V 型缺陷的底部就是穿通位错，这也会增加漏电几率，同样导致电压和反向性能下降，因此 V 型缺陷密度的增加单向的导致正向电压降低和反向性能下降。

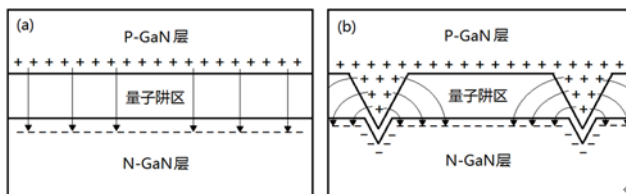


图 5 没有 V 型缺陷的 LED 及电流分布示意图(a);有 V 型缺陷的 LED 及电流分布示意图(b)

Fig. 5 Schematic diagram of LED without V-Pits and the current distribution (a); Schematic diagram of LED with V-Pits and the current distribution (b);

为了进一步研究 V 型缺陷密度对光电性能的影响，图 6 给出了样品 S1~S4 的芯片  $P_{op}$ - $I$  特性曲线、EQE- $I$  特性曲线以及  $I$ - $U$  特性曲线。如图 6(a)所示，S1~S4 4 组样品表现出类似的  $P_{op}$ - $I$  特性，输入电流在 0~100mA 时，4 组芯片样品的  $P_{op}$  呈线性增长，继续增加输入电流， $P_{op}$  随电流增加而增大的趋势变缓，输入电流达到 300 mA 左右时， $P_{op}$  趋于饱和，继续增加输入电流， $P_{op}$  开始下降。图 6(a)中的插图分别显示 4 组芯片样品在了小电流 (0-5 mA)、特征电流 (145~155 mA)，以及过饱和电流 (340~350 mA) 3 个区间的  $P_{op}$  变化趋势：当输入电流极小时 (0~5 mA)，S1~S4 的  $P_{op}$  随 V 型缺陷密度的增加单调增加，V 性缺陷密度越高， $P_{op}$  越高，V 型缺陷对注入效率改善的机制起主导作用；当输入电流增加到特征电流区间时 (145~155 mA)，V 型缺陷对注入效率改善的机制与 V 型缺陷对有效发光面积减小的机制相互竞争，具有最优化的 V 型缺陷密度的 S3 样品  $P_{op}$  最佳；当输入电流进一步增加到过饱和区间时 (340~350 mA)，S1~S4 的  $P_{op}$  随 V 型缺陷密度的增加单调降低，V 性缺陷密度越高， $P_{op}$  越低，V 型缺陷对有效发光面积减小的机制起主导作用。

如图 6(b)所示，样品 S1~S4 的芯片 EQE- $I$  特性曲线更为清晰的呈现了不同 V 型缺陷密度对 EQE 的影响，极低电流注入条件下 (0~5 mA)，V 型缺陷对注入效率改善极为有效，密度最高的样品 S4 的 EQE 峰值为 65%，远高于密度最低的样品 S1 的 EQE 峰值 52%；特征电流注入条件下 (145~155 mA)，竞争机制导致具有最优化 V 型缺陷密度的样品 S3 的 EQE 最高；





过饱和电流注入条件下 (340~350 mA), 有效发光面积减少导致俄歇复合与载流子泄露加剧的机制, 导致样品 S1~S4 的  $P_{op}$  随 V 型缺陷密度的增加单调降低, V 型缺陷密度越高,  $P_{op}$  越低。

如图 6(c)所示, 样品 S1~S4 的芯片  $I-U$  特性曲线呈现类似的标准二极管特性, V 型缺陷密度越大,  $U_f$  越低。

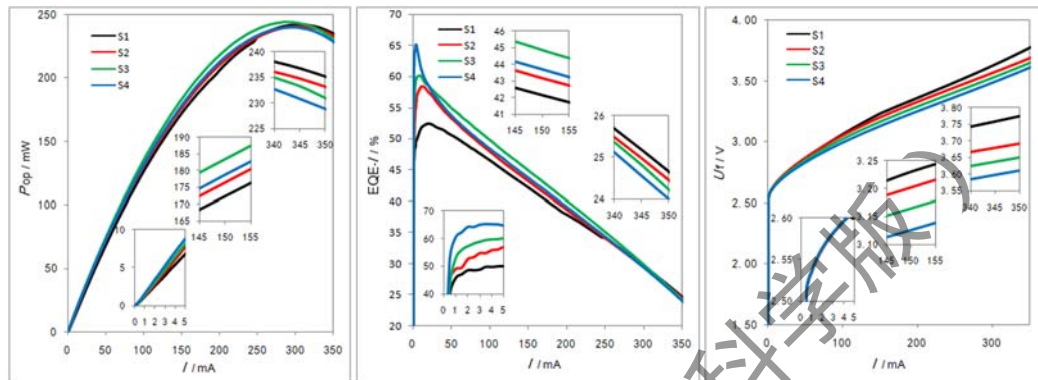


图 6 S1~S4 的芯片  $P_{op}-I$  特性曲线(a); S1~S4 的芯片 EQE- $I$  特性曲线(b); S1~S4 的芯片  $I-U$  特性曲线(c);

Fig. 6  $P_{op}-I$  curves of S1~S4 Chips (a); EQE- $I$  curves of S1~S4 Chips (b);  $I-U$  curves of S1~S4 Chips (c);

### 3 结论

本研究通过对具有不同 V 型缺陷密度外延片和芯片样品的制备和表征, 量化研究了 V 型缺陷对发光效率的影响, 并分析 V 型缺陷对发光效率影响的机制, 发现 V 型缺陷一方面通过提升载流子 (特别是空穴) 注入效率而改善发光效率, 另一方面又会通过减少有效发光面积而降低发光效率, 这一竞争机制共同影响具有 V 型缺陷结构的 GaN-LED 的发光效率。将 V 型缺陷密度在  $1.7 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \sim 5.9 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$  范围内的样品制作成  $0.25 \text{ mm} \times 0.75 \text{ mm}$  尺寸的芯片, 150 mA 电注入条件下, 随着 V 型缺陷密度的增加,  $P_{op}$  和 EQE 呈现先上升后下降趋势。最优化缺陷密度 ( $4.2 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ ) 样品的  $P_{op}=183.5 \text{ mW}$  和  $\text{EQE}=45.0\%$ , 较最小缺陷密度 ( $1.7 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ ) 样品的  $P_{op}=172.2 \text{ mW}$  和  $\text{EQE}=42.2\%$ , 均有约 6.6% 的显著提升。

### 参考文献:

- [1] 宋贤杰, 屠其非, 周伟, 等. 高亮度发光二极管及其在照明领域中的应用[J]. 半导体光电, 2002, 23(5): 356-360.
- [2] CARUGE J M, HALPERT J E, WOOD V, et al. Colloidal quantum-dot light-emitting diodes with metal-oxide charge transport layers[J]. Nature Photonics, 2008, 2(4): 247-250.



- [3] LI X, NI X, LEE J, et al. Efficiency retention at high current injection levels in-plane InGaN light emitting diodes[J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(12): 121107-1-3.
- [4] SHATALOV M, SUN W H, LUNEV A, et al. AlGaN deep-ultraviolet light-emitting diodes with external quantum efficiency above 10% [J]. Applied Physics Express, 2012, 5(8): 082101-1-3.
- [5] DONG P, YAN J C, WANG J X, et al. 282 nm AlGaN-based deep ultraviolet light-emitting diodes with improved performance on nano-patterned sapphire substrates[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(24): 241113.
- [6] ZHAO Y, TANAKA S, PAN C C, et al. High-power blue-violet semipolar (20-2-1) InGaN/GaN light-emitting diodes with low efficiency droop at 200 A/cm<sup>2</sup>[J]. Applied Physics Express, 2011, 4(8): 082104-1-3.
- [7] SATOSHI W, NORIHIDE Y, MASAKAZU N, et al. Internal quantum efficiency of highly-efficient In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N-based near-ultraviolet light-emitting diodes[J]. Applied Physics Letters, 2003, 83(24): 4906-1-3.
- [8] LI Y F, YOU S, ZHU M W, et al. Defect-reduced green GaInN/GaN light-emitting diode on nanopatterned sapphire[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(15): 151102-1-3
- [9] NGUYEN H P T, ZHANG S F, CUI K, et al. High-efficiency InGaN/GaN dot-in-a-wire red light-emitting diodes[J]. IEEE Photonics Technology Letters 2011, 24(4): 321-323.
- [10] FUJI T, GAO Y, SHARMA R, et al. Increase in the extraction efficiency of GaN-based light-emitting diodes via surface roughening[J]. Applied Physics Letters, 2004, 84(6): 855-1-3
- [11] KIM K K, LEE S D, KIM H S, et al. Enhanced light extraction efficiency of GaN-based light-emitting diodes with ZnO nanorod arrays grown using aqueous solution[J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(7): 071118-1-3.
- [12] RYU H Y, CHOI I G, CHOI H S, et al. Investigation of light extraction Efficiency in AlGaIn deep-ultraviolet light-emitting diodes[J]. Applied Physics Express, 2013, 6(6): 062101-1-3.
- [13] LE L C, ZHAO D G, JIANG D S, et al. Carriers capturing of V-defect and its effect on leakage current and electroluminescence in InGaN-based light-emitting diodes[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(25): 252110-1-3.
- [14] NIKHIL S, THOMAS P, TRICKER D, et al. Chemical mapping and formation of V-defects in InGaN multiple quantum wells[J]. Applied Physics Letters, 2000, 77(9): 1274-1-3.
- [15] TING S M, RAMER J C, FLORESCU D I, et al. Morphological evolution of InGaN/GaN quantum-well heterostructures grown by metalorganic chemical vapor deposition[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 94(3): 1461-1-3.
- [16] HAN S H, CHO C Y, LEE S J, et al. Effect of Mg doping in the barrier of InGaN/GaN multiple quantum well on optical power of light-emitting diodes[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(5): 051113-1-3.



- [17] LI Y F, YUN F, SU X L, et al. Carrier injection modulated by V-defects in InGaN/GaN multiple-quantum-well blue LEDs[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2014, 53(11):112103-1-3.
- [18] 魏茂林. 横向外延 GaN 材料的 MOCVD 生长与特性研究[D]. 上海: 中国科学院上海冶金研究所, 2001, 46-58.
- [19] MAHANTY S, HAO M, SUGAHARA T, et al. V-shaped defects in InGaN/GaN multiquantum wells[J]. Materials Letters 1999, 41(2): 67-71.

## Effects of V-Defects in GaN-based materials on LED luminescence efficiency

汪洋<sup>1,2\*</sup>

(1. Collaborative Innovation Center for Optoelectronic Semiconductors and Efficient Device, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Xiamen Changelight Co., Ltd, Xiamen 361101, China)

**Abstract:** luminescence efficiency is one of the key indicators of LEDs, on which studies have been focused. In this paper, the samples of epi-wafers and chips with varied V-defect densities are prepared and characterized. The effects of V-defects on the luminescence efficiency are studied quantitatively, and the competitive mechanism is revealed as that: In one hand, the injection efficiency promotion of carriers (hole mainly) due to the increased V-defect density results in the increase of luminescence efficiency. On the other hand, the area decrease of the active region due to the increased V-defect density leads to the decrease of luminescence efficiency. LED chips are fabricated with identical size of 0.25 mm × 0.75 mm and varied V-defect densities from  $1.7 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$  to  $5.9 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ . At the injection current of 150mA, the best light output and external quantum efficiency of the chips with the V-defect density of  $4.2 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$  are shown as 183.5mW and 45.0% respectively, which are 6.6% better than those of 172.2mW and 42.2% of the chips with un-optimized V-defect density of  $1.7 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ .

**Keywords:** GaN; light-emitting diodes (LED); V-defect;