

特约专栏

## GaN基薄膜材料对器件光电性能的影响研究

陈席斌<sup>1</sup>, 马淑芳<sup>1,2</sup>, 董海亮<sup>1,2</sup>, 梁建<sup>1</sup>, 许并社<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学 新材料界面科学与工程教育部重点实验室, 山西 太原 030024)

(2. 北京工业大学 激光工程研究院, 北京 010100)

**摘要:** 采用金属有机化学气相沉积方法在蓝宝石衬底上外延生长 GaN 基材料, 设计并优化外延生长条件, 探索单层 N 型 GaN (N-GaN)、多量子阱 (MQW)、电子阻挡层 (P-AlGaIn)、P 型 GaN (P-GaN) 材料对发光二极管 (LED) 器件的光电性能的影响。通过 X 射线衍射仪 (XRD)、电致发光谱 (EL)、光致发光谱 (PL) 等测试设备对外延片进行表征。结果表明: 经优化 Si 掺杂 N-GaN 和垒层 (QB), 获得较好的 (102)、(002) 半峰宽, 正向电压从 4.46 V 分别降至 3.85 V、3.47 V, 发光强度从 4.86 mV 提高到 6.14 mV。然后对 P 型 AlGaIn 层进行 Mg 掺杂优化, 正向电压下降至 3.35 V, 发光强度提高到 6.14 mV。最后对 P-GaN 层进行了生长温度及退火温度的优化, 结果发现正向电压从 3.16 V 提高至 3.32 V, 发光强度提高至 6.70 mV 左右。全自动探针台在测试电流 20 mA 的条件下, 对芯片的电压和发光强度进行了测试, 电压大致从 4.5 V 降到 3.8 V 左右, 下降了 16%。发光强度大概从 110 mcd 提高到 135 mcd, 提高了 20% 左右。结合实验结果与理论综合分析, 解释了 N-GaN 层和 QB 层 Si 掺杂, P-AlGaIn 层 Mg 掺杂, P-GaN 层生长温度及活化温度对正向电压和亮度的影响, 从而为高质量 GaN 薄膜材料外延生长及高性能的 LED 提供了更好的实验指导与理论支持。

**关键词:** 发光二极管; GaN; 正向电压; 发光强度

**中图分类号:** TB31 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3962(2015)05-0337-05

## Effect of GaN-Based Film Materials on the Performance of Photoelectric Device

CHEN Xibin<sup>1</sup>, MA Shufang<sup>1,2</sup>, DONG Hailiang<sup>1,2</sup>, LIANG Jian<sup>1</sup>, XU Bingshe<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Interface Science and Engineering in Advanced Materials, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

(2. Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 010100, China)

**Abstract:** The epitaxial growth of GaN-based film materials on the sapphire substrate was processed by metal organic chemical vapor deposition method. The structure of epitaxial wafers was designed and epitaxial growth conditions on single N-type GaN (N-GaN), multiple quantum well (MQW), electron blocking layer (P-AlGaIn) and P-type GaN (P-GaN) material were optimized. The epitaxial wafers were characterized by X-ray diffraction (XRD), electroluminescence (EL) and photoluminescence (PL). Results show that the optimized Si doped N-GaN and quantum barrier (QB) layer could lead better half peak width of (102), (002), voltage increases from 4.46 V to 3.85 V, 3.47 V, and luminous intensity increases from 4.86 mV to 6.14 mV. Then, Mg doped P-AlGaIn layer was optimized, voltage reduces to 3.35 V and luminous intensity increases to 6.14 mV. Finally, the optimization of the growth temperature and annealing temperature on P-GaN layer make voltage increase from 3.16 V to 3.32 V, and luminous intensity increase to 6.70 mV. The voltage and the luminous intensity of chips were tested by automatic probe test under the test current of 20 mA. After optimization, the voltage decreases from 4.5 V to 3.8 V roughly, fell by 16%. Luminous intensity increases from 110 mcd to 135 mcd, increasing by 20%. Then, combining the experimental results and the theories, the influence of the N-GaN layer, Si doped QB layer, Mg doped P-AlGaIn layer, and the growth temperature and activation temperature of P-GaN layer on the voltage and brightness were analyzed. These results may provide a better experiment guidance and theoretical support for the growth of high quality GaN epitaxial thin film materials and the optimization of high performance LED device.

**Key words:** light emitting diode; GaN; forward voltage; luminous intensity

收稿日期: 2014-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(21471111)

第一作者: 陈席斌, 男, 1990 年生, 工程硕士

通讯作者: 许并社, 男, 1955 年生, 教授, 博士生导师, Email: xubs@tyut.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2015.05.01

## 1 前言

高亮度 GaN 基 LED 器件是一种冷光源, 它具有体积小、发光效率高、响应时间短、绿色环保节能、使用寿命长(使用寿命可达 10 万 h 左右)等特点<sup>[1]</sup>。因此,

在室内外照明、汽车照明及交通信号灯、LCD 背光源、显示屏等方面有着广泛的应用。目前, 半导体照明技术随着生产工艺技术水平的提高和未来能源节能的趋势, 高亮度低能耗的 LED 器件将成为未来绿色光源时代的主体。但是 LED 器件的光电性能参数直接制约着 LED 产品在市场的应用及发展<sup>[2]</sup>。

蓝光 LED 芯片的尺寸大小、波长范围、工作电压、反向漏电流、半波宽度, 最大电流、亮度等光电性能参数是直接影响 LED 器件的关键因素。根据芯片的光电性能参数不同可以应用于不同类型的产品。其中芯片的工作电压和亮度是表征芯片质量的最关键参数, 因此, 低工作电压和高发光强度的 LED 器件是高质量产品参考指标的前提条件。低的工作电压表明 LED 器件的内阻较小, 在器件正常工作时产生的热量就越小, LED 器件的散热问题一直是芯片封装工艺的关键因素<sup>[3]</sup>。器件产生的热量越小器件本身的温度就越低。LED 芯片 PN 结点处的温度(结温)直接影响 LED 器件的寿命, 同时, 随着温度的升高 LED 器件的亮度也随之衰减, 发光均匀性、一致性变差, 因此低的工作电压显得尤为重要<sup>[4]</sup>。与传统荧光灯相比, LED 器件发光效率高, 目前 LED 白光光源产品的光效是 120 lm/W, 而理论值大约 330 lm/W。因此, 蓝光 LED 发光效率的提高才能使新的绿色能源在市场中体现更高社会价值和经济价值。

本文采用金属有机化学气相沉积的方法制备了 GaN 基外延片, 经过芯片工艺加工成 7 mil × 9 mil 芯片, 进行光电性能测试。结果表明, 通过优化外延生长工艺, LED 芯片的光电性能得到了明显的改善, 降低了 LED 芯片的正向电压, 其发光强度也得到明显提高。

## 2 实验方法

### 2.1 外延片的结构设计

图 1 为 LED 外延生长的标准样品(标样)结构示意图, 设计了 LED 全结构的各个单层的参数, 为了更好地

Contact(~15 nm)
P-GaN(~85 nm)
P-AlGaIn(~50 nm)
MQW × 6 pairs (Initial 4 doping Si)
N-GaN(~2.2 μm)
U-GaN(~2.2 μm)
Nucleation(~30 nm)
Substrate

图 1 外延片结构示意图

Fig. 1 The illustration structure of epitaxial wafer

对器件的光电性能优化、分析, 工艺参数的调节是在标样结构的基础上外延生长。

### 2.2 外延片的制备

设计标准的外延片结构(标样)依次生长的过程为: 在蓝宝石衬底(Substrate)上两步法生长外延 GaN 缓冲层, 具体为低温 550 °C 外延 ~30 nm GaN 缓冲层(nucleation), 高温 1 035 °C 外延 ~2.2 μm 未掺杂 GaN 层(U-GaN)。高温 1 055 °C 外延生长掺入 Si 的 N-GaN 层, 载流子浓度为  $5.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 提供电子注入。外延生长周期数为 6 的 MQW 结构, 在高温 824 °C 生长 12.5 nm 的 QB 层, 高温 740 °C 生长 2.5 nm QW 层, 提供辐射复合中心, 使电子和空穴在其中复合发光。生长的前 4 个周期的 QB 掺 Si, 后 2 个周期的 QB 不掺 Si。高温 850 °C 生长 ~50 nm 掺 Mg 的 P-AlGaIn, 高温 940 °C 生长 ~85 nm 掺 Mg 的 P-GaN 层, 载流子浓度  $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , 提供空穴注入。在 P-GaN 的生长条件下, 增加 Mg 的流量, 生长 20 nm 的金属接触层(Contact)。在标样的基础上优化 N-GaN 的 Si 掺杂, Si 流量的分别为 16.51、19.81、22.68 sccm。结合 XRD, EL 和 PL 光电性能分析, 得到 Si 流量为 19.81 sccm 的性能较好的样品定义为样品 A。同样的方法, 在样品 A 的基础上, QB 的 Si 流量分别为 0.18、0.27、0.41 sccm, 把 Si 流量为 0.27 sccm 的性能较好的样品定义为样品 B。在样品 B 的基础上, 优化 P-AlGaIn 掺 Mg 的流量分别为 150、250、350 sccm, 把 Mg 流量为 250 sccm 性能较好的样品定义为样品 C。在样品 C 的基础上, 优化 P-GaN 的生长温度, 分别为 940、980、1 020 °C, 把生长温度为 980 °C 性能较好的样品定义为样品 D。在样品 D 的基础上, 优化活化温度, 分别为 700、650、600 °C, 把活化温度为 650 °C 的性能较好的样品定义为样品 E。样品 A、B、C、D、E 优化工艺参数如表 1 所示。

## 3 结果与讨论

### 3.1 单层优化实验测试结果与分析

标样的外延薄膜的(102)、(002)半峰宽, 分别为 273、337 arcsec, 对应的波长为 455 nm 时, PL 谱的发光强度为 5.65 mV。以下所测的样品, EL 和 PL 均是同样的条件下测试的。在标样的基础上进行, 优化 N-GaN 时做了 3 组对比实验, Si 的流量分别为 16.51、19.81、22.68 sccm, 对应的(102)半峰宽分别为 273、231、244 arcsec, (002)半峰宽分别为 337、245、301 arcsec, 对应的 PL 强度分别为 4.86、6.08、5.89 mV, 对应的电压分别为 4.46、3.85、4.22 V。由图 2a 可见在 Si 流量为 19.81 sccm 时获得了较好的薄膜晶体质量、PL 发光强度和电压。在 QB 的 Si 流量优化实验中, 分别选择了 0.18、

表1 标样、样品 A、B、C、D、E 的工艺参数

Table 1 The process parameters of the standard sample and the samples A, B, C, D, E

Sample	N-GaN: SiH <sub>4</sub> /sccm	QB: SiH <sub>4</sub> /sccm	P-AlGaIn: Mg /sccm	P-GaN growth temperature /°C	P-GaN activation temperature /°C
Standard sample	16.51	0.18	150	940	700
Sample A	19.81	0.18	150	940	700
Sample B	19.81	0.27	150	940	700
Sample C	19.81	0.27	250	940	700
Sample D	19.81	0.27	250	980	700
Sample E	19.81	0.27	250	980	650

0.27、0.41 sccm, 对应的发光强度分别为 6.08、6.14、5.87 mV, 对应的电压分别 3.85、3.47、3.22 V, 如图 2b 所示, 经发光强度和电压的综合分析 QB 的 Si 流量为 0.27 sccm 时, 能获得光电性能较好的外延片。

在优化 P-AlGaIn 实验中, 如图 2c 实验结果所示, Mg 的流量分别为 150、250、350 sccm, 对应的电压分别为 3.47、3.35、3.59 V, 发光强度分别为 6.14、6.42、6.35 mV。为了得到更好的光电性能, 在 P-AlGaIn 优化实验中, Mg 的流量为 250 sccm。P-GaN 生长温度的优化实验的设计是建立在之前的生长温度 940 °C 基础上, 然后生长温度分别为 980、1020 °C。实验结果表明: 电压分别为 3.30、

3.16、3.52 V, 发光强度分别为 6.35、6.47、6.08 mV, 如图 2d 所示。据文献报道, P-GaN 的生长温度如果在 1 000 °C 左右时, Mg 空穴的自补偿效应就越来越明显, 空穴的载流子浓度降低<sup>[5]</sup>。因此, P-GaN 的生长温度提高 40 °C 得到了光电性能更好的外延片。P-GaN 的活化温度分别为 700、650、600 °C 时, 对应电压分别为 4.15、3.32、3.68 V, 发光强度分别为 6.34、6.70、6.52 mV, 如图 2e 所示。基于以上工艺参数的优化实验, 电压从标样的 4.05 V 降低至 3.4 V, 降低了 16%, 发光强度从大约 5.68 mV 提升至 6.75 mV, 提高了 17.5%, 由图 2f 可知, 电压和发光强度均得到了较大幅度的改善。

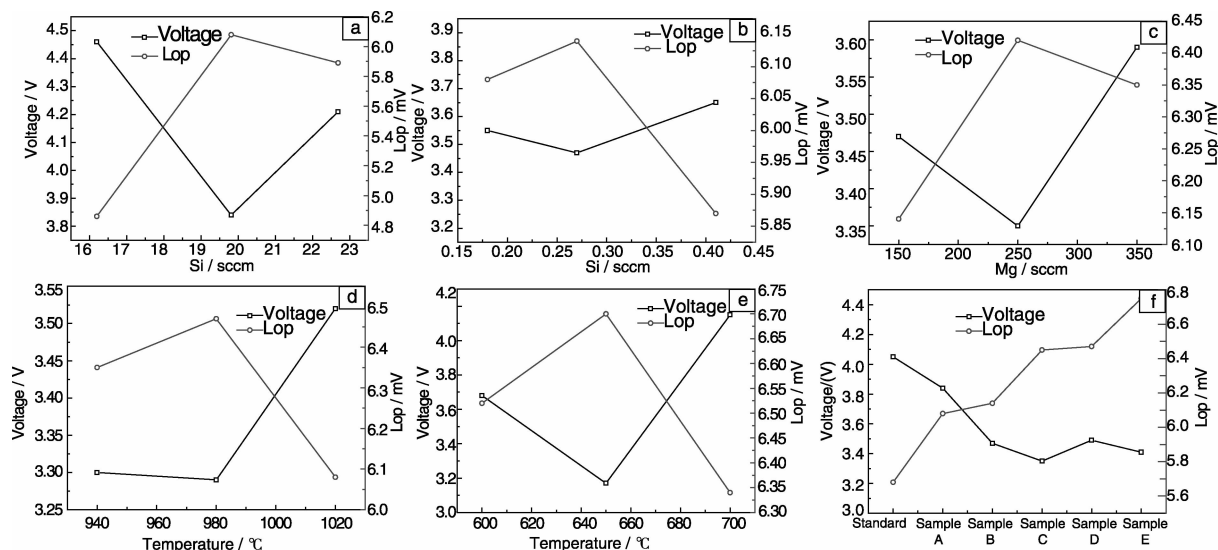


图2 N-GaN 掺 Si 量(a)、QB 掺 Si 量(b)、AlGaIn 掺 Mg 量(c)、P-GaN 生长温度(d)和活化温度(e)不同的样品对应的电压和 PL 强度, 标样、样品 A、样品 B、样品 C、样品 D、样品 E 的电压和 PL 强度变化趋势曲线(f)

Fig. 2 The voltage and the PL intensity of the samples with different Si doping in N-GaN (a), Si doping in QB (b), Mg doping in AlGaIn (c), different growth temperatures (d) and activation temperatures (e) of P-GaN, the whole trend curves of the voltage and the PL intensity of the standard sample, and the sample A, B, C, D, E (f)

### 3.2 单层优化实验的综合对比分析

图 3 中样品是外延片经过芯片工艺加工后, 制备出的芯片尺寸大小为 7 mil×9 mil 的小功率芯片。为保证对比数据的可靠性, 芯片的测试数据是同一炉次的条件下, 选取 3 个不同外延片位置分别内圈、中圈、外圈各取一

片。全自动芯片检测仪的测试条件是在相同条件下, 测试出波长、电压和发光强度。从图 3 中可以观察到经过工艺参数的优化, 电压大致从 4.5 V 降到 3.8 V 左右, 下降了 16%。发光强度大概从 110 mcd 提高到 135 mcd, 提高了 20% 左右。在外延生长过程中在同一圈的外延片

的光电性能几乎一样。但是 3 圈之间的电压、波长及亮度会有些差异,这主要是由于生长设备的加热丝的温度不均匀导致的。因此,在图 3 中同一炉次的电压、波长及亮度的变化幅度可能较大。从样品 A 到样品 B,电压下降的幅度最大,但同时发光强度也有一定程度的降低。相比样品 B,样品 C 的电压稍微升高,但发光强度从 90 mcd 提高到 100 mcd 左右,提高了大概 10%。经 P-GaN 生长温度的优化,样品 D 的发光强度的提高了 25%,达到了 125 mcd,获得了较高的发光强度。但电压 3.6 V 升高到 4.0 V,增加了大概 11%。继续经过活化温度优化,这时的电压下降到了 3.8 V,并且发光强度从 125 mcd 增加到 135 mcd 左右,提高了 12%。

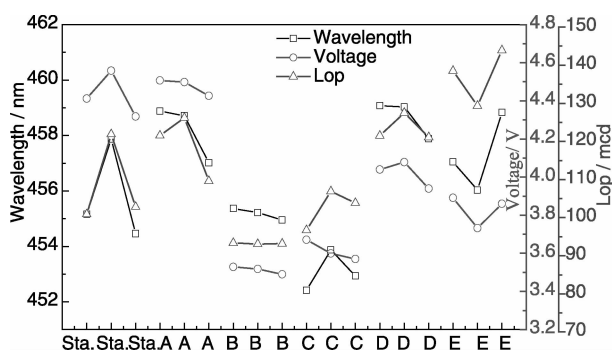


图3 标样、样品 A、B、C、D、E 外延片 3 个不同位置制成芯片的对应的波长、电压和发光强度

Fig. 3 The wavelength, the voltage and EL intensity of 3 chips of the standard sample, and the samples A、B、C、D、E, respectively

### 3.3 优化工艺参数对光电性能的影响

#### 3.3.1 N-GaN 掺 Si 对器件光电性能的影响

N-GaN 外延层的 Si 流量直接决定了薄膜的载流子浓度和迁移率。载流子浓度并不是越大越好,判断所需载流子浓度根据器件的光电性能参数为参考。当增大 Si 流量, N-GaN 外延薄膜的载流子浓度增大,迁移率下降, XRD 的半高宽增加。据文献报道,随着 Si 流量增加,当浓度高于  $2.74 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  时, Si 掺杂使晶粒尺寸逐渐减小,导致 GaN 晶核从三维生长转化二维生长的过程中产生更多的位错,这种位错释放掉了薄膜中的应力。因此,在宏观上表现为摇摆曲线半高宽变宽。当载流子浓度增加一定程度可以降低器件的工作电压,但是如果载流子浓度过高会引起应变弛豫和缺陷密度增大,外延薄膜晶体质量变差,电学性能方面就是导致电子泄漏,降低了电光转换效率<sup>[6]</sup>,如图 2a 所示结果相符。同时, Si 掺杂还影响着 LED 器件光学性能。比如,高温生长的 N-GaN 外延层在室温下容易产生应变弛豫和缺陷,并且在 N-GaN 靠近 MQW 区域的导带或者价带发生弯曲,即带尾

效应,应变弛豫和带尾效应的作用导致光学波长发生红移<sup>[7]</sup>。

#### 3.3.2 QB 掺 Si 对器件光电性能的影响

在生长 QB 的过程中掺 Si 会使其张应力增加,根据岛状(Volmer-Weber)生长模型,基材表面张力大,有利于材料的二维生长。同时, QB 中掺 Si 使其载流子浓度急剧升高,可能会使材料的导热能力变好,受热均匀使材料生长的均匀性变好。QB 中掺 Si 并不是掺的量越多越好,掺杂量越多外延材料的应力就越大,应力越大就容易导致能带发生弯曲,在适当 QB 掺杂 Si 的条件下,量子阱的极化效应严重,在室温小电流密度注入时量子阱的能带更趋于水平,在大电流密度的注入下,量子阱的能带弯曲倾斜度变大,电子更容易溢出,电子波函数与空穴波函数的重叠几率变小,发光效率降低。QB 的掺杂相当于代替电子注入层即 N-GaN 层, QB 掺 Si 离注入层越近,相当于单位体积内外延薄膜的 Si 掺杂浓度高,导致电流扩展不好,从而引起工作电压偏高,反向电压越低<sup>[8-9]</sup>。

#### 3.3.3 P-AlGaN 掺 Mg 对器件光电性能的影响

P-AlGaN 层通常位于量子阱与 P-GaN 之间,其作用是作为电子阻挡层将电子限定在量子阱区域,以克服在大电流密度注入条件下,电子溢出量子阱层导致发光效率下降等问题。AlGaN 电子阻挡层不但能提高对电子传输的限制能力,而且能提高空穴的注入率,使量子阱中参与辐射复合的载流子浓度升高,从而提高了内量子效率和发光效率<sup>[10]</sup>。Mg 掺杂增大了空穴载流子浓度,提高了空穴的迁移率,增加了量子阱中的电子空穴的复合。但 Mg 掺杂会增加体电阻率,引起工作电压升高<sup>[11]</sup>。

#### 3.3.4 P-GaN 生长温度及活化对器件光电性能的影响

GaN 基发光器件 LED 成功关键之一是高质量的 P 型掺杂。据文献报道,在生长温度从 940 °C 提高到 1 020 °C 之间, P-GaN 的空穴浓度增加,当生长温度增加到 1 040 °C 时,空穴浓度下降。这主要是由于在材料生长中,生长和解吸附是同时存在的两个过程,当生长温度低于 1 040 °C 时,生长过程占优势,有更多的 Mg 杂质参与生长,取代 Ga 位而形成受主  $\text{Mg}_{\text{Ga}}$ ,从而外延薄膜的空穴浓度增加,当温度继续增加时,由于解吸附作用的增强, N 空位( $\text{V}_{\text{N}}$ )的数目增加,形成自补偿效应,导致薄膜的空穴浓度降低<sup>[12-13]</sup>。同时,由于生长温度的升高,更多的  $\text{NH}_3$  裂解产生 H 原子导致钝化效应增强,也能降低薄膜的空穴浓度。P-GaN 的生长条件是在  $\text{H}_2$  条件下,生长之后的 Mg 掺杂的 GaN 薄膜有较高的电阻率,主要是由于 Mg 和 H 原子结合形成非活性的 Mg-H 络合物, Mg 被钝化。因此,为了达到器件所要求的电学性质必须活化 Mg,获得低电阻率的 P-GaN。目前,常用的活

化 Mg 的方法主要是采用热退火方式, 能使 Mg-H 键断裂, 获得较好的电阻率、空穴浓度和迁移率。Youn 等<sup>[14]</sup>人已经报道 P 型掺杂的空穴浓度与位错密度有关, 位错成为裂解的 H 原子的迁移路径或中和源。因此在适当的温度下退火, 明显导致受主 Mg 活化, 更多的 Mg 被活化, 得到更高的空穴载流子浓度和更低的电阻率等电学参数, 是获得高性能的 LED 器件的基本条件。P-GaN 给量子阱区提供了大量的与电子复合的空穴数目, 从而能够获得更高的内量子效率<sup>[15-16]</sup>。

## 4 结 论

采用金属有机化学气相沉积方法设计并优化外延生长工艺条件, 通过对 N-GaN、MQW、P-AlGaN、P-GaN 外延材料的优化, 结果发现 QB 掺杂 Si 对电压的影响较大, P-GaN 的生长温度及活化温度对 LED 的发光强度的影响比较大。经过优化后, 芯片光电性能均得到了很大的改善, 电压大致从 4.5 V 降到 3.8 V 左右, 下降了 16%。发光强度大概从 110 mcd 提高到 135 mcd, 提高了 20% 左右。结合实验结果与理论综合分析, 解释了 N-GaN 和 QB 层掺 Si, P-AlGaN 掺 Mg, P-GaN 层进行了生长温度及活化温度优化对正向电压和发光强度的影响, 从而为外延生长高质量 GaN 薄膜材料以及高性能 LED 的研发提供了更好的实验指导与理论支持。

## 参考文献 References

- [1] Frank Lu, Dong Lee, Dan Byrnes, *et al.* Blue LED Growth from 2 inch to 8 inch [J]. *Scientia Sinica Technologica* (中国科学: 技术科学), 2011, (54)1: 33-37.
- [2] Chen Jun (陈 峻), Fan Guanghan (范广涵), Zhang Yunyan (张运炎). Improvement of Characteristics of an InGaN Light-Emitting Diode by Using a Staggered AlGaN Electron-Blocking Layer [J]. *Chinese Physics B* (中国物理 B), 2013, 22(1): 552-555.
- [3] Shao Xianjie (邵贤杰), Yan Dawei (闫大伟), Lu Hai (陆海). Efficiency Droop Behavior of GaN-Based Light Emitting Diodes under Reverse-Current and High-Temperature Stress [J]. *Solid-State Electronics*, 2011, 57: 9-13.
- [4] Han S H, Lee D Y, Lee S J, *et al.* Effect of Electron Blocking Layer on Efficiency Droop in InGaN/GaN Multiple Quantum Well Light-Emitting Diodes [J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 94(23): 231123-1-231123-3.
- [5] Jeong T S, Kim J H, Han M S. Room-Temperature Luminescence Study on the Effect of Mg Activation Annealing on p-GaN Layers Grown by MOCVD [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2005, 280: 401-407.
- [6] Halidou I, Benzarti Z, Boufaden T. Thermodynamic Analysis of Si Doping in GaN [J]. *Superlattices and Microstructures*, 2006, 40: 496-500.
- [7] Li D B, Ma B, Reina M. Photoluminescence Study of Si-Doped a-Plane GaN Grown by MOVPE [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2009, 311: 2 906-2 909.
- [8] Ramaiah K S, Su Y K, Chang S J. Photoluminescence Characteristics of Mg-and Si-Doped GaN Thin Films Grown by MOCVD Technique [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2000, 220: 405-412.
- [9] Cui Desheng (崔德胜), Guo Weiling (郭伟玲), Cui Bifeng (崔碧峰), *et al.* 注入电流对 GaN 基 LED 发光特性的影响 [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser* (光 电 子 · 激 光), 2009, 22(9): 1 309-1 312.
- [10] Xie S Y, Yin J Y, Zhang S, *et al.* Trap Behaviors in AlGaN-GaN Heterostructures by C-V Characterization [J]. *Solid-State Electronics*, 2009, 53: 1 183-1 185.
- [11] Zhang W, Xue J S, Zhou X W. Effect of Si Doping in Wells of Al-GaN/GaN Superlattice on the Characteristics of Epitaxial Layer [J]. *Chin Phys B*, 2012, 21(7): 077103-1-077103-5.
- [12] Aleksiejunas R, Krotkus S, Nargelas S. Impact of Doping on Carrier Recombination and Stimulated Emission in Highly Excited GaN: Mg [J]. *Physica B*, 2011, 406: 2 990-2 993.
- [13] Keunjo K, Joseph G H. Critical Mg Doping on the Blue-Light-Mission in p-Type GaN Thin Films Grown by Metal-Organic Chemical-Vapor Deposition [J]. *Vac Sci Technol A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2003, 21(1): 134-139.
- [14] Youn D, Lachab M, Hao M, *et al.* Investigation on the p-Type Activation Mechanism in Mg-Doped GaN Films Grown by Metal Organic Chemical Vapor Deposition [J]. *Jpn J Appl Phys*, 1999, 38: 631-634.
- [15] Li Z G, Yu T J, Yang Z J, *et al.* Effect of Annealing on Photoluminescence and Microstructures of InGaN/GaN Multi-Quantum Well with Mg-Doped p-Type GaN [J]. *Chin Phys*, 2005, 14(4): 830-833.
- [16] Li J B, Liang J K, Rao G H. Thermodynamic Analysis of Mg-Doped p-Type GaN Semiconductor [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2006, 422(1): 279-282.

(编辑 惠 琼)