

引用格式: SU Xu-liang, WANG Can, YING Lei-ying, *et al.* Research on Auto-split GaN-based Vertical Structure LED[J].
Acta Photonica Sinica, 2020, 49(12):1223004
苏旭良,王灿,应磊莹,等. 自分裂 GaN 基垂直结构 LED 研究[J]. 光子学报, 2020, 49(12):1223004

自分裂 GaN 基垂直结构 LED 研究

苏旭良,王灿,应磊莹,徐欢,许荣彬,梅洋,郑志威,龙浩,张保平

(厦门大学 电子科学与技术学院 电子工程系,福建 厦门 361005)

摘 要:为了解决感应耦合等离子体刻蚀和衬底切割对发光二极管芯片造成损伤的问题,提高器件的成品率,提出了一种新的制备氮化镓基垂直结构发光二极管的工艺方法,成功制备出了无需衬底切割的自分裂垂直结构发光二极管.制备过程中使用化学机械抛光来代替感应耦合等离子体刻蚀对 n 型氮化镓进行减薄,避免了感应耦合等离子体刻蚀对器件侧壁和有源区造成的损伤;通过临时衬底转移技术解决了衬底切割的问题,无需衬底切割即可得到单个发光二极管芯片.与传统结构正装发光二极管相比,300 $\mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ 的自分裂垂直结构发光二极管的电学特性得到大幅度改善,电流为 20 mA 下的正向电压从 3.17 V 降到 2.88 V,降低了 9%;饱和电流从 240 mA 提高到 280 mA,提高了 17%.研究了电极形状对器件性能的影响,将电极形状由圆盘形改为环形,500 $\mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ 的自分裂垂直结构发光二极管的饱和电流从 450 mA 提高到 490 mA,提高了 9%,通过优化电极结构有望进一步改善芯片性能.

关键词:氮化镓;自分裂;垂直结构发光二极管;衬底切割;环形电极

中图分类号:TN312.8

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204912.1223004

Research on Auto-split GaN-based Vertical Structure LED

SU Xu-liang, WANG Can, YING Lei-ying, XU Huan, XU Rong-bin, MEI Yang,
ZHENG Zhi-wei, LONG Hao, ZHANG Bao-ping

(Department of Electronic Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

Abstract: In order to solve the problem of damage to LED chip caused by inductively coupled plasma etching and substrate cutting, and improve the yield of devices, a new process for fabricating GaN-based vertical structure LED is proposed. The auto-split vertical structure LED without substrate cutting is successfully fabricated. In the process of device preparation, chemical mechanical polishing is used to reduce the thickness of n-GaN instead of inductively coupled plasma etching, which avoids the damage to the side wall and active region of the device caused by inductively coupled plasma etching. The problem of substrate cutting is solved by temporary substrate transfer technology, and a single LED chip can be obtained without substrate cutting. Compared with the regular LED, the electrical characteristics of 300 $\mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ auto-split vertical structure LED are greatly improved. The forward voltage at 20 mA decreases from 3.17 V to 2.88 V, which decreases by 9%; the saturation current increases from 240 mA to 280 mA, increasing by 17%. The influence of electrode shape on the device performance is studied. The electrode shape is changed from disk shape to ring shape, the saturation current of 500 $\mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ auto-split vertical structure led is increased from 450 mA to 490 mA, which is increased by 9%. The performance of auto-split vertical structure LED is expected to be improved by optimizing the electrode structure.

基金项目:国家重点研发计划(Nos.2016YFB0400803,2017YFE0131500),科学挑战专题(No.TZ2016003)

第一作者:苏旭良(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向为宽禁带半导体器件.Email:sullivandeyx@163.com

导师(通讯作者):张保平(1963-),男,教授,博士,主要研究方向为宽禁带半导体材料与器件.Email:bzhang@xmu.edu.cn

收稿日期:2020-07-23;录用日期:2020-09-30

<http://www.photon.ac.cn>

Key words: GaN; Auto-split; Vertical structure LED; Substrate cutting; Ring electrode

OCIS Codes: 230.3670; 230.5590; 220.4000

0 引言

氮化镓(Gallium Nitride, GaN)基半导体发光二极管(Light Emitting Diode, LED)具有节能、环保、光效高、体积小、寿命长等诸多优点,被认为是新一代最具发展前景的照明光源之一,目前被广泛应用于交通信号灯、户外显示器、手机背光源、汽车车灯、固态照明、可见光通信等领域^[1, 2]. GaN基半导体发光二极管一般可分为三种结构,即正装结构、倒装结构和垂直结构. 正装结构半导体发光二极管多采用蓝宝石材料为衬底,即传统的蓝宝石衬底发光二极管(Regular Light Emitting Diode, R-LED),然而由于蓝宝石为绝缘材料,只能使用同侧电极结构,这种电极结构减少了有源区的发光面积,还会引起电流簇拥效应和局部热效应. 倒装结构半导体发光二极管(Flip-chip Light Emitting Diode, FC-LED)在正装结构的基础上将芯片倒置,增大了芯片的发光面积,为了提高发光效率,需要制备具有高反射率和低接触电阻的p型欧姆接触,但是在在大电流工作下,电流簇拥效应仍然是个具有挑战性的问题^[3, 4]. 为了更好地解决这一问题,目前多采用薄膜转移技术和激光剥离技术相结合的方法,将GaN外延片转移到Si或者金属等具有更高热导率和导电性的支撑衬底上,制备出垂直结构发光二极管(Vertical-structure Light Emitting Diode, V-LED)^[5-7]. 常用的薄膜转移技术有金属键合技术^[8]、粘结剂键合技术^[9]和电镀技术^[10, 11],其中金属键合技术对环境的要求较高,工艺复杂,操作起来难度较大;粘结剂键合技术中键合材料的导热性较差;相对来说,电镀技术具有工艺简单,易于操作,电镀的金属层导热性良好等诸多优点,因此受到了更多研究者的青睐.

近年来GaN基垂直结构LED方面的研究取得了很大的进展,2004年,美国加州大学的FUJII T等^[8]采用金属键合和激光剥离技术成功得到了Si衬底的垂直结构GaN基LED,大大提高了器件的发光特性. 2007年,CHEN Shiue-lung等^[12]通过选择性电镀镍和图形化激光剥离技术制备出了无需切割的LED芯片. 2010年,韩国高丽大学的KIM S K等^[13]利用激光剥离和金属键合技术,制备出n面朝上的垂直结构GaN/Ag/Cu LED,光电特性有了明显的提高. 2012年,CHEN Ming等^[14]利用粘结剂键合和激光剥离技术成功地将蓝宝石衬底的GaN基LED转移到了导电导热性好的Si衬底上,该工艺方法存在的缺点是需要对衬底进行切割. 2016年,WANG Liang-cheng等^[15]利用电镀铜技术制备出了性能出色的垂直结构LED,但该工艺方法仍需对铜衬底进行切割才能得到单个LED器件. 2019年,武汉大学的ZHOU Sheng-jun等^[16]提出金属化方案制备出了高功率垂直结构LED,该方法需要使用感应耦合等离子体刻蚀技术分离器件.

GaN基垂直结构LED目前仍需改进的问题:1)使用ICP刻蚀技术分离器件,对有源区造成损伤,导致反向漏电流变大;2)LED芯片制备完成后,需要使用机械切割或激光切割对衬底进行切割,分离器件得到单个LED芯片,切割过程中容易造成衬底基板出现卷边现象,导致器件短路. 本文提出了一种新的制备GaN基垂直结构发光二极管的工艺方法,成功制备出了无需衬底切割的自分裂垂直结构发光二极管(Auto Split Vertical structure Light Emitting Diode, ASV-LED). 器件制备过程中通过图形化电镀铜和自分裂激光玻璃技术对器件进行分离,用化学机械抛光来代替感应耦合等离子体刻蚀对n-GaN层进行减薄,均避免了感应耦合等离子体刻蚀(Inductively Coupled Plasma, ICP)对器件侧壁和有源区造成的损伤;通过临时衬底转移技术避免了衬底切割的问题,无需对衬底进行切割即可得到单个发光二极管芯片.

1 器件制备

使用的GaN基外延片是采用金属有机化学气相沉积技术在(0001)蓝宝石衬底上制备的,图1为提出的GaN基自分裂垂直结构LED的工艺流程. LED外延片结构(中心波长为455 nm)包括20 nm的缓冲层,2 μm 的u-GaN层,1.86 μm 的Si掺杂n型GaN层,15对厚度为15 nm的InGaN/GaN(3 nm/12 nm)量子阱,50 nm的Mg掺杂p-AlGaIn层,165 nm的Mg掺杂p型GaN层. 制备时,首先在p-GaN上沉积120 nm的氧化铟锡(Indium Tin Oxide, ITO)作为电流扩散层,之后沉积厚度为30 nm/150 nm的Cr/Au作为电镀的种子层,然后用AZ50XT光刻胶在Cr/Au表面上进行光刻,匀胶机转速设置为500 r/30 s、1 000 r/30 s、4 000 r/5s,制备出厚度约为20 μm 的光刻胶掩膜,采用的是阶段式的前烘方式,前烘的条件为:85 $^{\circ}\text{C}$ 烘2 min,110 $^{\circ}\text{C}$ 烘7 min,

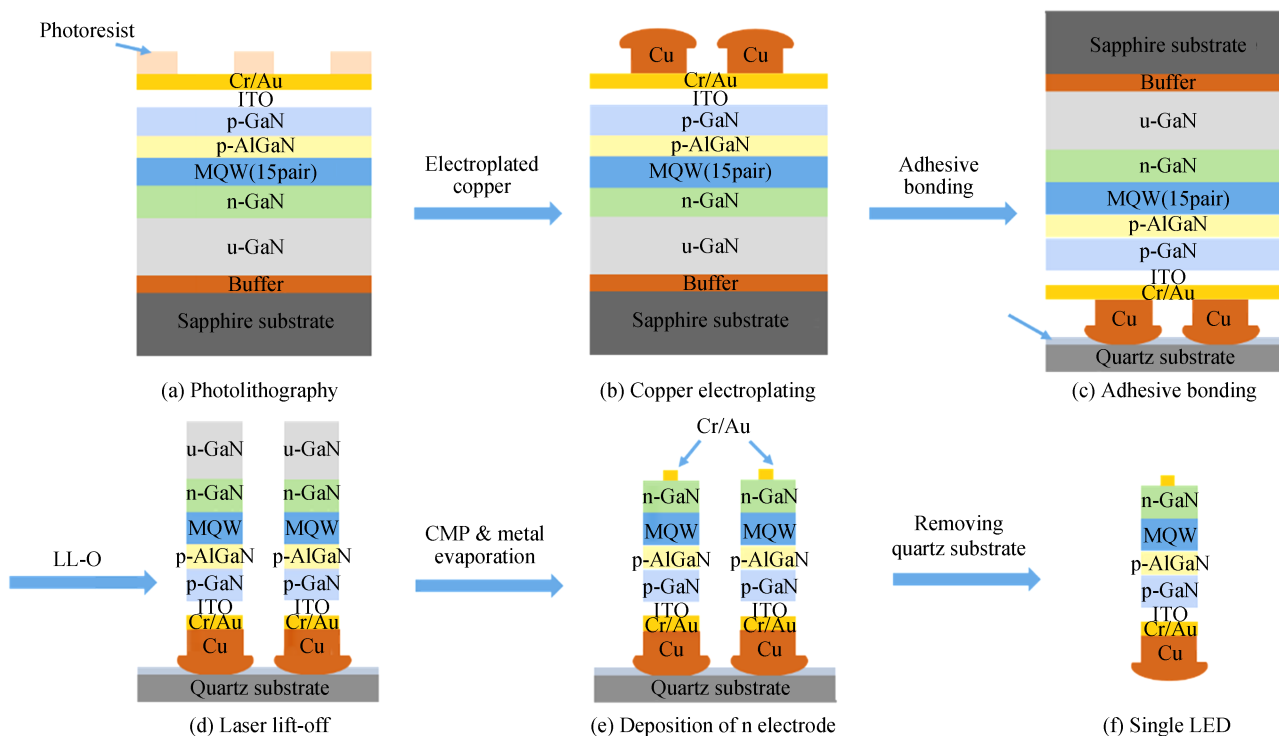
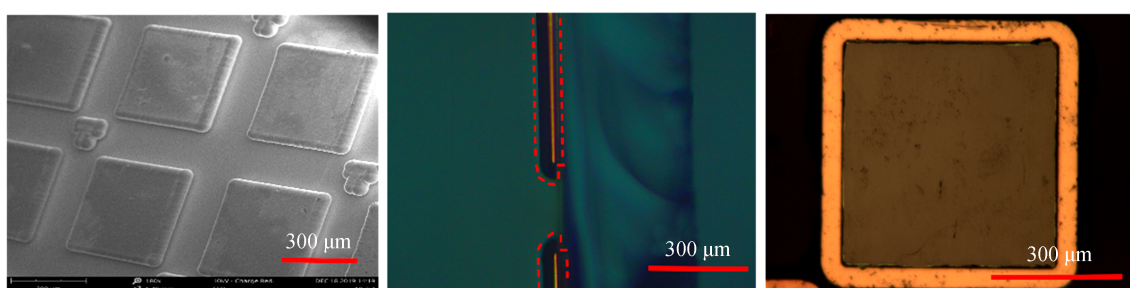


图1 GaN基自分裂垂直结构LED的工艺流程

Fig.1 Process flow of GaN-based auto-split vertical structure LED

前烘后使用光刻机进行曝光,其中LED芯片区域光刻胶被曝光,而芯片以外的区域的光刻胶不曝光,定义芯片尺寸为 $500\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m}$,过道区域为 $300\ \mu\text{m}$,光刻后用体积浓度为25%的显影液(显影液:水=1:3)显影5 min,显影后如图1(a);光刻后在外延片表面电镀厚度约为 $60\ \mu\text{m}$ 的铜薄膜,由于光刻胶不导电,所以铜薄膜只在没有光刻胶的LED芯片区域沉积生长,有光刻胶的GaN薄膜区域没有Cu沉积,最终电镀的铜薄膜在外延片上呈图形化分布,如图1(b).由于当电镀的铜薄膜的厚度超过光刻胶的厚度时,Cu会横向漫延到光刻胶的表面进行横向生长,呈现为“蘑菇状”,表面形貌如图2(a)、(b),当铜薄膜的厚度生长到 $60\ \mu\text{m}$ 时,过道间距由于横向生长从 $300\ \mu\text{m}$ 缩小到 $220\ \mu\text{m}$.



(a) SEM picture of the surface of "mushroom" copper after electroplating (b) Side-view image under microscope of "mushroom" copper film (c) Plan-view of sample after laser lift-off

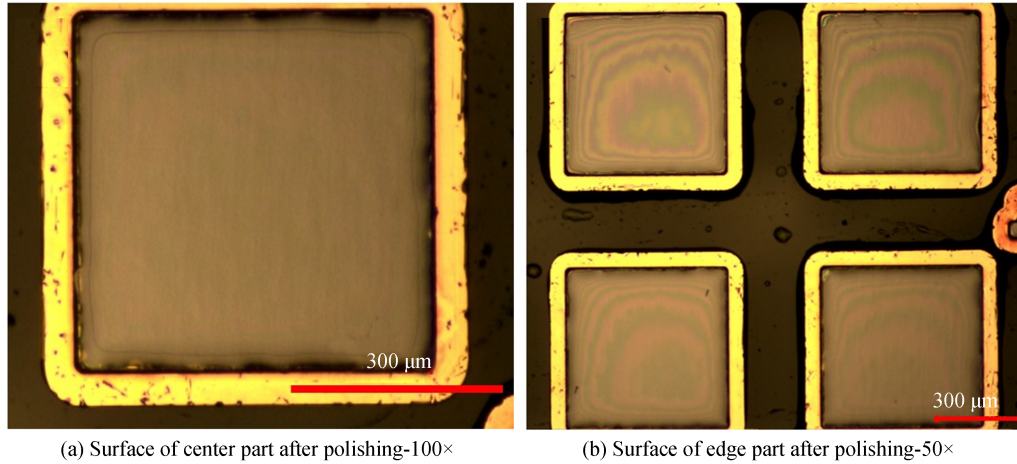
图2 蘑菇状铜衬底形貌

Fig.2 Morphology of mushroom copper substrate

电镀后,使用粘结剂键合技术将外延片键合到临时石英基板上,如图1(c).键合后,采用脉冲宽度为25 ns的高功率248 nm-KrF准分子激光器,在 $142\ \text{J}/\text{cm}^2$ 的激光能量下进行激光剥离,剥离时,GaN分解成Ga和 N_2 ,在产生的氮气蒸汽压力的作用下,无铜薄膜支撑区域的GaN薄膜内的缺陷会移动、聚集、形成微裂纹并扩展,最终这些扩展的裂纹使无铜薄膜支撑区域的GaN薄膜发生自分裂,裂纹的扩展方向主要由铜薄膜控制,实现器件之间的自分离,如图1(d).当过道宽度为 $100\ \mu\text{m}$ 时,无法完成器件的自分裂,将过道宽度设置为 $300\ \mu\text{m}$ 时,器件可以形成较好的自分裂,GaN薄膜与铜衬底较为贴合,台面间距是自分裂的一个重要因素,

在不影响器件的自分裂前提下, 过道间距有进一步缩小的空间, 以提高外延片的利用率。

激光剥离后, 样品的俯视显微镜照片如图 2(c)。采用化学机械抛光技术 (Chemical Mechanical Polishing, CMP) 去除 u-GaN 层以及对 n-GaN 层进行减薄, 相对于 ICP 刻蚀减薄 n-GaN 层, CMP 具有操作简单、价格低廉的优点, 抛光后样品表面如图 3 所示, 器件表面的 RMS 可以达到 $0.1 \text{ nm}^{[17]}$ 。



(a) Surface of center part after polishing-100×

(b) Surface of edge part after polishing-50×

图 3 器件抛光后表面形貌

Fig. 3 Surface morphology after polishing

如图 3(b) 所示, 抛光过程中各点处的抛光速度不同, 出现边缘区域抛光速度更快的现象, 导致薄膜出现干涉条纹, 难以精准控制 GaN 薄膜的厚度, 这也是抛光工艺中的一个难点。

之后沉积 Cr/Au 作为 n 型接触电极, 如图 1(e)。最后, 去除粘结剂, 即可得到单个 LED 器件, 如图 1(f)。为了更好地对比分析, 用同样的外延片结构制备了传统的蓝宝石衬底 LED 和不同尺寸的 ASV-LED, 详细结构如表 1。

表 1 四种不同的 LED 结构

Table 1 Four different LED structures

Device number	Device size/ μm^2	Electrode shape	Device structure
LED-I	300×300	Disc shape	Regular-LED
LED-II	300×300	Disc shape	ASV-LED
LED-III	500×500	Disc shape	ASV-LED
LED-IV	500×500	Ring shape	ASV-LED

2 实验结果与分析

2.1 正装结构与自分裂垂直结构 LED 性能对比

图 4 展示了芯片尺寸均为 $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ 的传统蓝宝石正装结构 LED (LED-I) 和自分裂垂直结构 LED (LED-II) 的性能, LED-I 和 LED-II 的 n 型电极均是直径为 $100 \mu\text{m}$ 的圆盘型电极。图 4(a) 为 LED-I 和 LED-II 的 IV 特性, 在正向电流为 20 mA 时, 其正向电压分别为 3.17 V 和 2.88 V , 与传统蓝宝石衬底正装结构 LED 相比, 自分裂垂直结构 LED 的正向电压下降了 9% , 正向电压的降低是因为垂直结构 LED 有着更少的电流聚集效应和更短的电流通路。图 4(a) 中的插图为 LED-I 和 LED-II 的反向电流电压特性, 在反向电压为 -5 V 时, LED-I 和 LED-II 的反向漏电流的数量级均为 10^{-9} , 表明该工艺方法制备出的自分裂垂直结构 LED 对有源区的损伤非常小, 与本团队之前的结果相比有了很大的提高, 下降幅度提高了将近 1.8 倍^[14]。IV 特性的改善主要归功于此次制备工艺中没有使用 ICP 刻蚀和金属键合技术, 避免了 ICP 刻蚀和金属键合对有源区造成损伤。图 4(b) 为两种 LED 的相对发光强度随注入电流的变化曲线, LED-I 在注入电流为 240 mA 时, 发光强度就达到饱和, 当注入电流大于 400 mA 时, 发光强度迅速降低, 这主要是因为在大注入电流下, 传统蓝宝石正装结构 LED 中产生大量的焦耳热, 导致结温迅速升高, 高温下载流子从量子阱逃逸

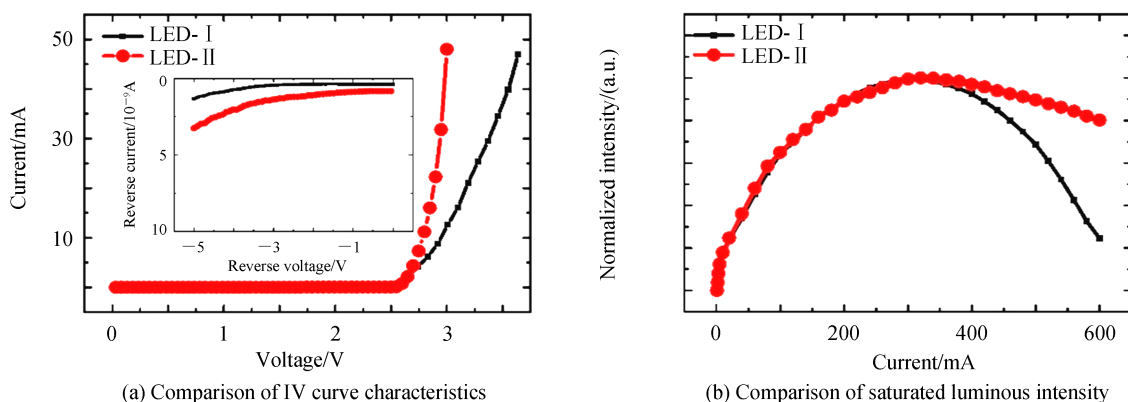


图4 LED-I 和 LED-II 的性能对比
Fig.4 Performance comparison of LED-I and LED-II

的几率增加,非辐射复合中心被激活,增加了非辐射复合几率,大幅度降低了器件的发光效率和发光强度. LED-II 在注入电流为 280 mA 时,发光强度才达到饱和,相比 LED-I,饱和电流提高了 17%. 当注入电流继续增加时,LED-II 的发光强度仍然较为稳定,这是因为相比 LED-I,LED-II 的电流路径更短,可以有效缓解电流簇拥效应,电流产生的热量能够较为均匀的分布,且铜薄膜良好的散热性能使 LED 芯片产生的热量能够及时导出,进一步缓解大电流下的热效应.

2.2 不同尺寸的垂直结构 LED 性能对比

图 5 展示了垂直结构尺寸为 $300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$ 的 LED-II 和尺寸为 $500\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m}$ 的 LED-III 的芯片性能,其中 n 型电极均为直径为 $100\ \mu\text{m}$ 的圆盘型电极. 图 5(a) 为 LED-II 和 LED-III 的 IV 特性曲线,在正向电流为 20 mA 时,LED-II 和 LED-III 的正向电压分别为 2.88 V 和 2.83 V. 图 5(b) 为 LED-II 和 LED-III 的相对发光强度随注入电流的变化曲线,LED-II、LED-III 的饱和电流分别为 280 mA 和 450 mA,饱和电流密度分别为 $311\ \text{A}/\text{cm}^2$ 、 $180\ \text{A}/\text{cm}^2$,LED-II 的饱和电流密度是 LED-III 的 1.7 倍. 结果表明电极结构相同,大尺寸 LED 的饱和电流密度却大幅度降低,这是因为大尺寸下电流分布的不均匀性造成的. 研究表明电极结构极大地影响着 LED 芯片的电流扩展能力^[18-20],由于圆盘型电极下方区域的电流密度较大,远离电极的区域电流密度会有一定程度的减小,从而造成电流分布不均匀,因此对于大尺寸的垂直结构 LED 而言,有必要通过优化电极结构来改善电流分布的均匀性,进一步提升 LED 芯片的性能.

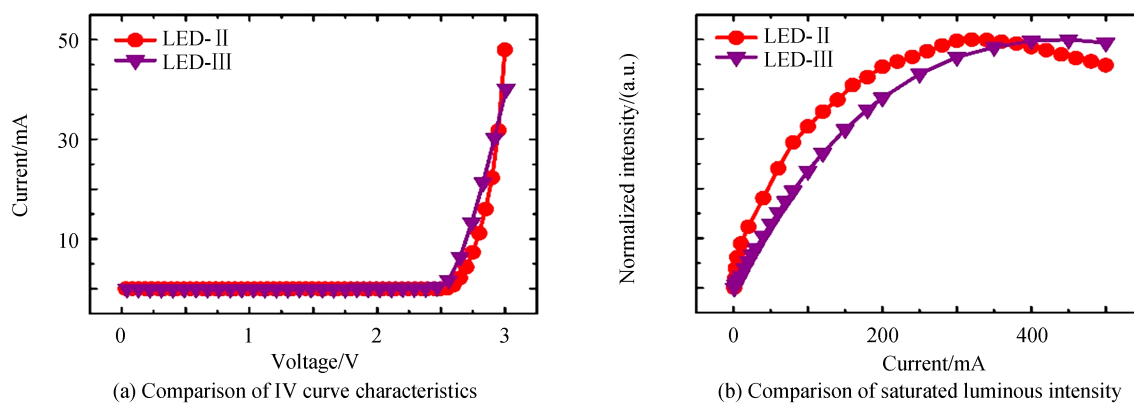


图5 LED-II 和 LED-III 性能对比
Fig.5 Performance comparison of LED-II and LED-III

2.3 n-型电极结构优化

针对上述电流分布不均匀的问题,对尺寸为 $500\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m}$ 的垂直结构 LED 的电极结构进行优化,研究了不同电极结构对器件性能的影响. 图 6 展示了不同电极结构 LED 的芯片性能,其中 LED-III 的 n 型电极结构分别为半径为 $50\ \mu\text{m}$ 的圆盘型电极,LED-IV 的 n 型电极结构外半径为 $100\ \mu\text{m}$ 、内半径为 $30\ \mu\text{m}$ 的环形

电极,使n电极分布区域更加均匀.图6(a)为LED-III和LED-IV的IV特性,在正向电流为20 mA时,LED-III、LED-IV的正向电压分别为2.83 V和2.73 V,环形电极LED的正向电压比圆形电极的正向电压低了4%,LED-IV的0.1 V的正向电压的降低是因为环形电极的串联电阻更小,更有利于电流的扩散,电流密度更加均匀.这是因为电流横向扩展所需的距离越短,电流流经n电极下方以外的路径要克服的电阻越小,相对于圆盘形电极,环型电极电流横向扩展所需的距离较短.图6(b)为LED-II和LED-III的相对发光强度随注入电流的变化曲线,通过优化电极形状,饱和电流由LED-III的450 mA提高到了LED-IV的490 mA,提高了9%,进一步提升了LED芯片的性能,为大功率、大尺寸垂直结构LED的提供了设计思路.

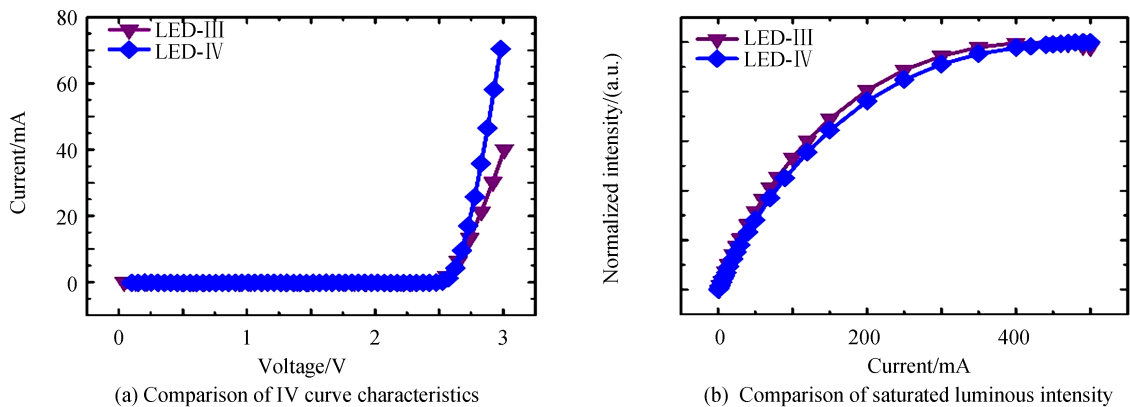


图6 LED-III和LED-IV的性能对比
Fig. 6 Performance comparison of LED-III and LED-IV

3 结论

本文提出了一种新的制备垂直结构LED的工艺方法,利用自分裂激光剥离技术和临时衬底转移技术,成功制备出了无需切割的Ga_N基自分裂垂直结构LED,该工艺方法避免了ICP刻蚀和衬底切割对芯片造成的损伤,简化了工艺流程.与传统蓝宝石正装结构LED相比,自分裂垂直结构LED在20 mA下的正向电压降低了9%,饱和电流提高了17%,有效缓解了电流簇拥效应和大电流下的热效应,光电特性有了明显的提高.研究了不同电极结构对器件性能的影响,通过优化电极结构,将圆盘形电极替换为环形电极,将大尺寸LED芯片在20 mA下的正向电压降低了4%,饱和电流提高了9%.所提出的Ga_N基自分裂垂直结构LED的制备方法,在未来大功率、大尺寸的单LED应用中具有很大的潜力.

参考文献

- [1] CHEN Chien-ju, CHEN Hong-chun, LIAO Jyun-hao, *et al.* Fabrication and characterization of active - matrix 960×540 blue GaN-based micro-LED display[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2019, **55**(2): 1-6.
- [2] XIE En-yuan, BIAN Rui, HE Xiang-yu, *et al.* Over 10 Gbps VLC for long-distance applications using a GaN-based series-biased micro-LED array[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, **32**(9): 499-502.
- [3] ZHOU Sheng-jun, LIU Xing-tong, YAN Han, *et al.* Highly efficient GaN-based high-power flip-chip light-emitting diodes[J]. *Optics Express*, 2019, **27**(12): A669.
- [4] ZHOU Sheng-jun, LIU Xing-tong, GAO Yi-lin, *et al.* Numerical and experimental investigation of GaN-based flip-chip light-emitting diodes with highly reflective Ag/TiW and ITO/DBR Ohmic contacts[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(22): 26615-26627.
- [5] KOU Der-min, WANG Shui-jinn, UANG Kai-ming, *et al.* Enhanced performance of vertical GaN-based LEDs with highly reflective p-ohmic contact and periodic indium-zinc-oxide nano-wells[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(5): 338-340.
- [6] LEE Wei-chi, WANG Shui-jinn, UANG Kai-ming, *et al.* Enhanced light output of GaN-based vertical-structured light-emitting diodes with two-step surface roughening using KrF laser and chemical wet etching[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(17): 1318-1320.
- [7] LI Yuan, WANG Wen-liang, HUANG Lie-gen, *et al.* High-performance vertical GaN-based near-ultraviolet light-emitting diodes on Si substrates[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, **6**(42): 11255-11260
- [8] FUJII T, GAO Y, HU E L, *et al.* Increase in the extraction efficiency of GaN-based light-emitting diodes via surface roughening[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **84**(6): 855-857.

- [9] HORNG Ray-hua, HUANG Shao-hua, HSICH Chuang-yu, *et al.* Enhanced luminance efficiency of wafer-bonded InGaN-GaN LEDs with double-side textured surfaces and omnidirectional reflectors [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2008, **44**(11-12): 1116-1123.
- [10] HORNG R H, LEE C E, HSU S C, *et al.* High-power GaN light-emitting diodes with patterned copper substrates by electroplating[J]. *Physica Status Solidi (a)*, 2004, **201**(12): 2786-2790.
- [11] TAWFIK W Z, HYUN G Y, *et al.* Enhanced performance of GaN-based LEDs via electroplating of a patterned copper layer on the backside[J]. *Journal of Materials Science*, 2018, **53**(12): 8878-8886.
- [12] CHEN Shiue-lung, WANG Shui-jinn, UANG Kai-ming, *et al.* Fabrication of dicing-free vertical-structured high-power GaN-based light-emitting diodes with selective nickel electroplating and patterned laser liftoff techniques [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, **19**(5-8): 351-353.
- [13] KIM S K, LEE J W, EE H S, *et al.* High-efficiency vertical GaN slab light-emitting diodes using self-coherent directional emitters[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(11): 11025-11032.
- [14] CHEN Ming, LIU Wen-jie, HU Xiao-long, *et al.* Fabrication of vertical-structured GaN-based light-emitting diodes using auto-split laser lift-off technique[J]. *ECS Solid State Letters*, 2012, **1**(2): Q26-Q28.
- [15] WANG Liang-cheng, GUO En-qing, LIU Zhi-qiang, *et al.* High-performance nitride vertical light-emitting diodes based on Cu electroplating technical route[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2016, **63**(3): 892-902.
- [16] ZHOU Sheng-jun, XU Hao-hao, TANG Bin, *et al.* High-power and reliable GaN-based vertical light-emitting diodes on 4-inch silicon substrate[J]. *Optics Express*, 2019, **27**(20): A1506.
- [17] WU Jin-zhao, SHI Xiao-ling, LONG Hao, *et al.* Large rabi splitting in InGaN quantum wells microcavity at room temperature[J]. *Materials Research Express*, 2019, **6**(7): 076204.
- [18] HUANG Ya-jun, WANG Liang-chen, LIU Zhi-qiang, *et al.* Current distribution study of vertical structure GaN-based light-emitting diodes[J]. *Semiconductor Technology*, 2009, **34**(9): 861-863.
黄亚军,王良臣,刘志强,等.垂直结构 GaN 基 LEDs 电流分布计算分析[J]. 半导体技术, 2009, **34**(9):861-863.
- [19] LIU Yi, ZHAO Guan-cai, LI Pei-xian, *et al.* Simulation and optimization of current distribution in GaN-based LEDs[J]. *Electronic Sci&Tech*, 2010, **23**(8): 43-46.
刘毅,赵广才,李培咸. GaN 基 LED 电流分布的模拟[J]. 电子科技, 2010, **23**(8):43-46.
- [20] LIU Li, HU Xiao-long, WANG Hong. N-type electrode patterns design and device fabrication of GaN-based vertical structure LEDs[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(3): 338-345.
刘丽,胡晓龙,王洪. GaN 基垂直结构 LED 的 n 型电极结构设计及芯片制备[J]. 发光学报, 2016, **37**(3):338-345.