

电致发光的完全悬空超薄硅衬底氮化镓基蓝光LED器件的制备与表征

蒋成伟 沙源清 袁佳磊 王永进 李欣

Fabrication and characterization of an LED based on a GaN-on-silicon platform with an ultra-thin freestanding membrane in the blue range

JIANG Cheng-wei, SHA Yuan-qing, YUAN Jia-lei, WANG Yong-jin, LI Xin

引用本文:

蒋成伟, 沙源清, 袁佳磊, 王永进, 李欣. 电致发光的完全悬空超薄硅衬底氮化镓基蓝光LED器件的制备与表征[J]. *中国光学*, 2021, 14(1): 153–162. doi: 10.37188/CO.2020-0148

JIANG Cheng-wei, SHA Yuan-qing, YUAN Jia-lei, WANG Yong-jin, LI Xin. Fabrication and characterization of an LED based on a GaN-on-silicon platform with an ultra-thin freestanding membrane in the blue range[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(1): 153-162. doi: 10.37188/CO.2020-0148

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0148>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[二维电子气等离激元太赫兹波器件](#)

Terahertz-wave devices based on plasmons in two-dimensional electron gas

中国光学. 2017, 10(1): 51 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0051>

[蓝区无机薄膜电致发光材料研究进展](#)

Research progress of the blue area of inorganic thin film electroluminescent material

中国光学. 2017, 10(1): 13 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0013>

[基于SESAM被动调Q的激光二极管泵浦Yb:CaYAlO₄脉冲激光器](#)

Output characteristics of diode-pumped passively Q-switched Yb: CaYAlO₄ pulsed laser based on a SESAM

中国光学. 2019, 12(1): 167 <https://doi.org/10.3788/CO.20191201.0167>

[ZnS:Cu电致发光电压传感器及其温度漂移补偿](#)

ZnS:Cu electroluminescent voltage sensor and its temperature drift compensation

中国光学. 2017, 10(4): 514 <https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0514>

[CdSe/ZnS量子点下转换膜的红、绿、蓝顶发射有机发光器件](#)

Top-emitting red, green and blue organic light-emitting devices with CdSe/ZnS quantum dots down-conversion films

中国光学. 2019, 12(6): 1431 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1431>

[梯度掺杂结构GaN光电阴极的稳定性](#)

Stability of gradient-doping GaN photocathode

中国光学. 2018, 11(4): 677 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0677>

文章编号 2095-1531(2021)01-0153-10

电致发光的完全悬空超薄硅衬底氮化镓基 蓝光 LED 器件的制备与表征

蒋成伟, 沙源清, 袁佳磊, 王永进, 李 欣^{*}
(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏南京 210003)

摘要:为提升硅衬底氮化镓基 LED(发光二极管)器件的光电性能和出光效率,本文提出了一种利用背后工艺实现的悬空薄膜蓝光 LED 器件。结合光刻工艺、深反应离子刻蚀和电感耦合等离子体反应离子刻蚀的背后工艺,制备了发光区域和大部分正负电极区域的硅衬底完全掏空,并减薄大部分氮化镓外延层的悬空薄膜 LED 器件。对悬空薄膜 LED 器件进行三维形貌表征,发现 LED 悬空薄膜表面平坦,变形程度小,证明背后工艺很好地解决了氮化镓外延层和硅衬底之间由于应力释放造成的薄膜变形问题。表征了 LED 器件的电流电压曲线和电致发光光谱等光电特性,对不同结构、不同发光区域尺寸的 LED 器件进行对比,发现悬空薄膜 LED 器件的光电性能和出光效率比普通 LED 器件更优越,且发光区尺寸变化对 LED 器件性能的影响更明显。在 15 V 驱动电压下,与普通 LED 器件相比,发光区直径为 80 μm 的悬空 LED 器件的电流从 4.3 mA 提升至 23.9 mA。在 3 mA 电流的驱动下,峰值光强提升了约 5 倍,而发光区直径为 120 μm 的悬空器件与发光区直径为 80 μm 的悬空器件相比,出光效率提升更为明显。本研究为发展高性能悬空氮化物薄膜 LED 器件提供了更多可能性。

关 键 词:氮化镓;发光二极管;悬空薄膜;背后工艺;电致发光

中图分类号:TP394.1; TH691.9 文献标志码:A doi:10.37188/CO.2020-0148

Fabrication and characterization of an LED based on a GaN-on-silicon platform with an ultra-thin freestanding membrane in the blue range

JIANG Cheng-wei, SHA Yuan-qing, YUAN Jia-lei, WANG Yong-jin, LI Xin^{*}

(College of Telecommunications and Information, Nanjing University of Posts and
Telecommunications, Nanjing 210003, China)

* Corresponding author, E-mail: lixin1984@njupt.edu.cn

Abstract: In order to improve the opto-electronic performance and light extraction efficiency of LEDs based on a GaN-on-silicon platform, we proposed an LED device based on GaN-on-silicon with an ultra-thin freest-

收稿日期:2020-08-24; 修订日期:2020-09-11

基金项目:中国博士后基金(No. 2018M640508);江苏省高校自然科学基金(No. 18KJB510025);南京邮电大学
1311 人才计划;南京邮电大学国自孵化基金(No. NY218013)

China Postdoctoral Science Foundation funded project (No. 2018M640508); Natural Science Foundation of the
Jiangsu Higher Education Institutions (No. 18KJB510025); 1311 Talent Program of Nanjing University of
Posts and Telecommunications; National Self-funding Project of Nanjing University of Posts and Telecommu-
nications (No. NY218013)

anding membrane. By combining photolithography, deep reactive ion etching and inductively-coupled plasma reactive ion etching, we prepared an LED based on a GaN-on-silicon platform with an ultra-thin freestanding membrane, removing the silicon substrate of light-emitting area and most area of the electrodes, and thinning most of the GaN epitaxial layer. We performed three-dimensional morphology characterization for the LED device and found that the surface of the LED's membrane is flat and that the membrane's deformation is minimal. It is proved that the back process can solve the problem of membrane deformation caused by stress release between the GaN epitaxial layer and the silicon substrate. By characterizing the current-voltage and electroluminescence spectrum of the LED and comparing the LEDs with different structures and different light-emitting area sizes, we found that the opto-electronic performance and light output efficiency of the LED with an ultra-thin freestanding membrane are better than that of the common LED, and the change in size of the light-emitting area has a significant effect on the performance of the LED. Compared with the current of common LED, the current of the LED which has an ultra-thin freestanding membrane with 80- μm diameter light-emitting area increased from 4.3 mA to 23.9 mA under 15 V driving voltage. Under 3-mA current, the peak light intensity increased by about 5 times. The light-emitting efficiency of the LED with a 120- μm diameter light-emitting area is improved more perceptibly compared with that of LED with a 80- μm diameter light-emitting area. This research provides more possibilities for the development of high-performance LED devices with an ultra-thin freestanding membrane.

Key words: gallium nitride; LED; freestanding membrane; back process; electroluminescence

1 引言

氮化镓(GaN)作为Ⅲ-V族氮化物半导体材料中的重要成员,具有直接带隙易发光、热导率高、耐高温、耐酸碱、硬度高等优良的光电和机械性能^[1-2]。通过改变氮化物中 In, Ga 和 Al 的含量,可以覆盖 0.63~6.2 eV 的连续禁带宽度,故可制备紫外、可见光至红外光波段的发光二极管和其他光电子和光通信技术中使用的器件^[3-4]。目前 GaN 已成为制作 LED 器件的主流材料之一,氮化镓基 LED 器件在照明、光电探测和光通信领域占有重要地位。商业化的氮化镓基 LED 器件根据 GaN 材料外延生长衬底材料的不同可分为 3 种:碳化硅(SiC)衬底、蓝宝石(Al_2O_3)衬底及硅(Si)衬底。目前蓝宝石衬底 LED 器件技术最为成熟,占据的市场份额最大,碳化硅衬底 LED 器件的市场占有率居中,硅衬底 LED 器件尽管目前市场占有率较小,但发展速度很快^[5-6]。虽然硅衬底和 GaN 材料之间存在热膨胀系数和应力系数差距较大,晶格匹配度较低等问题,但由

于硅衬底具有成本低、尺寸大、能够与成熟的硅基半导体工艺兼容等特点,仍得到了众多研究者的关注^[7-9]。尽管氮化镓基 LED 器件已经有 20 几年的发展历史,然而现有器件结构的改进、新工艺的开发、相关物理机理的研究仍然是光电器件领域的研究热点^[10-11]。

目前国内外关于提升硅衬底氮化镓 LED 器件性能的研究工作,主要包含以下技术路线:图形化硅衬底、在硅衬底和外延层间添加布拉格反射镜、将 LED 器件转移至铜衬底。日本名古屋工业大学 Takashi Egawa 教授研究小组从材料生长的角度,利用 MOCVD(金属有机化合物化学气相沉积)技术在硅衬底和氮化镓外延层之间制备分布式布拉格反射镜(DBR)结构,DBR 结构可以实现对有源区出射光的全反射,从而减少硅衬底对出射光的吸收^[12-13]。同时,该小组也利用选择性激光剥离(SLO)去除 LED 器件发光区下方的硅衬底,并利用键合工艺将 LED 器件转移至铜衬底,以提升 LED 器件的光电性能^[14]。香港科技大学刘纪美教授的研究小组将衬底图形化的方法应用于硅衬底氮化物 LED 器件的研究。该小组以

多孔氧化铝为模板刻蚀硅衬底,之后在图形化硅衬底上生长氮化物外延层^[15]。电致发光测试结果表明,衬底图形尺寸为纳米级的LED器件的出光效率比衬底图形尺寸为微米级的LED器件的出光效率更高^[16]。日本东北大学 Hane Kazuhiro 教授的研究小组专注于制备悬空的硅衬底氮化物 LED 器件。该小组利用深硅刻蚀技术制得具有悬空结构的氮化物蓝光 LED 器件,并将该器件与平板型静电微驱动器结合,开发了在平面上可以进行 50 μm 空间位置移动的可调式 LED 光源^[17-18]。此项研究工作开拓了悬空 LED 器件的应用范围。

目前限制硅衬底氮化物 LED 器件性能的关键性问题之一是硅衬底的存在和较厚的氮化物外延层对 LED 器件光电性能的影响。通过硅衬底去除及氮化物外延层减薄可以有效减少对出射光的吸收,提高器件的光电性能。本实验室在之前的工作中利用硅衬底剥离和悬空氮化物背后减薄技术,获得过具有优良光电性能的悬空 LED 器件,但当时的 LED 器件的尺寸并不是很大,且在发光区域和电极区域仍然保留了部分硅衬底^[19-20]。本文在此研究基础上,继续发展高性能悬空氮化物薄膜 LED 器件,开发了完全剥离硅衬底,并减薄氮化镓外延层的背后工艺。利用背后工艺制备了发光区域和大部分正负电极区域完全为悬空薄膜结构的新型 LED 器件,并对悬空薄膜 LED 器件进行了形貌测试、电学及光学性能表征。新型悬空薄膜 LED 器件的光电性能,特别是出光效率相比于普通 LED 有了极大的提高,且悬空薄膜 LED 的性能与薄膜厚度和发光区尺寸变化密切相关。本研究为发展高性能悬空氮化物薄膜 LED 器件提供了更多可能性。

2 完全悬空超薄硅衬底氮化镓基 LED 器件的制备及形貌表征

图 1(彩图见期刊电子版)为硅衬底氮化镓基完全悬空薄膜 LED 器件的双面工艺加工流程。首先,利用光刻技术在硅衬底氮化镓材料的上表面进行图形化,然后,用针对Ⅲ-V 族材料的电感耦合等离子体反应离子刻蚀技术(ICP-RIE)将氮化镓外延层刻蚀到 n 型 GaN 层,刻蚀速率约为

130 nm/min(步骤(a)-(b))。去除残留的光刻胶后,再利用光刻技术在硅衬底氮化镓材料的上表面制备半透明金属电极的图形,接下来,利用电子束蒸镀技术沉积半透明金属电极(5 nmNi/10 nmAu 金属薄膜),再利用剥离技术获得具有透光性的半透明金属电极(步骤(c)-(e))。接着,用和步骤(c)-(e)相同的方法继续沉积、剥离,获得用于探针接触,施加驱动电流的 p/n 电极(20 nmNi/180 nmAu 金属薄膜)(步骤(f)-(h))。去除残留的光刻胶后,再次旋涂光刻胶,保护上表面加工后的 LED 器件结构。在 LED 器件下方的硅衬底利用光刻技术从硅衬底氮化物材料的背面进行图形化,并通过深反应离子刻蚀(DRIE)技术刻蚀掉全部硅衬底,形成悬空薄膜结构的 LED 器件(步骤(i))。之后,利用针对Ⅲ-V 族材料的 ICP-RIE 刻蚀技术从背面减薄氮化镓外延层,通过控制刻蚀时间来调整薄膜厚度(步骤(j))。最后,去除残留的光刻胶,获得薄膜厚度可控的硅衬底氮化镓基完全悬空薄膜 LED 器件(步骤(k))。

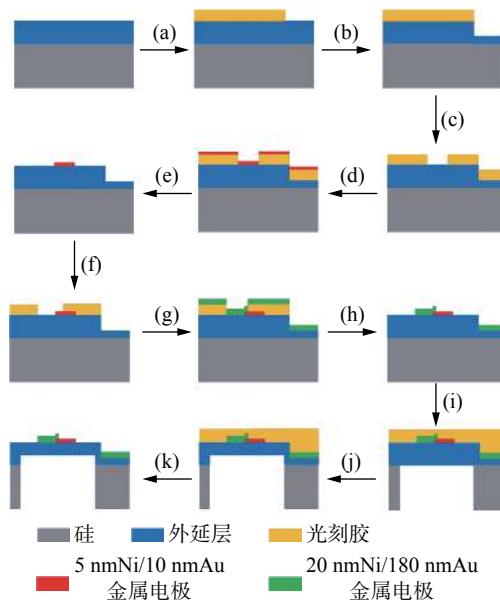


图 1 硅衬底氮化镓基悬空薄膜 LED 器件工艺流程图

Fig. 1 Fabrication process of the GaN-based LED with an ultra-thin freestanding membrane

图 2(彩图见期刊电子版)为利用光学显微镜从正面观察到的不同尺寸完全掏空硅衬底的悬空薄膜 LED 器件的二维形貌特征。图 2(a)是直径为 80 μm 的 LED 器件的二维形貌图,图 2(b)是直径为 120 μm 的 LED 器件的二维形貌图。如

图 2 所示,通过电子束蒸镀技术沉积、剥离形成两层不同厚度的金属薄膜电极。第一层 5 nmNi/10 nmAu 的半透明金属电极为图中圆形浅色区域,其为主要 p 型发光区;第二层 20 nmNi/180 nmAu 的亮金色金属电极,为后续光电测试实验中用于导入驱动电流的主电极。p 型发光区下方的硅衬底已经完全掏空,形成了图 2 中围绕 p 型发光区的方形区域。

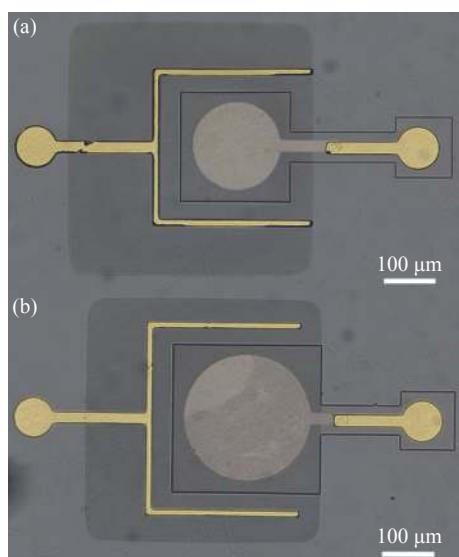


图 2 不同尺寸完全掏空硅衬底的悬空薄膜 LED 器件的二维形貌正视图。(a) 发光区直径为 80 μm ; (b) 发光区直径为 120 μm

Fig. 2 Two-dimensional images of GaN-based LED device with a freestanding membrane when light emitting area's diameter is (a) 80 μm and (b) 120 μm

图 3(彩图见期刊电子版)和图 4(彩图见期刊电子版)为利用数字光学显微镜的高景深三维模块从背后观察不同尺寸的完全掏空硅衬底悬空薄膜 LED 器件的三维形貌结构图。图 3(a)和图 4(a)为多点聚焦模式下拍摄的直径为 80 μm 和直径为 120 μm 的 LED 器件的三维形貌平面图。可以看出,在掏空硅衬底后获得的悬空薄膜 LED 器件具有良好的表面质量,悬空薄膜未出现裂纹或其他缺陷。完全掏空硅衬底并减薄氮化镓外延层后,从背后观察,可以通过透明的氮化物悬空薄膜清晰观察到 LED 器件表面的电极结构。图 3(b)和图 4(b)为相应的三维形貌立体图。如图 3、4 所示,LED 器件的 p 型发光区和几乎全部电极下方的硅衬底都被完全掏空。利用 DRIE 技术掏空硅衬底,可以对侧壁进行有效保护,能够实现可控的侧向刻蚀,制作出陡峭的侧壁。由于进行硅衬底剥离和悬空氮化物背后减薄工艺时存在应力释放,薄膜会出现一定程度的变形,所以,在剥离硅衬底的深硅刻蚀工艺中要控制背后刻蚀时间、刻蚀气体流量、功率等工艺参数,并且先进行快速刻蚀剥离大部分硅衬底,在接近硅衬底和氮化物外延层界面时再进行慢速刻蚀,释放残余应力。由图 3(b)和图 4(b)可以看出,LED 悬空薄膜表面平坦,变形程度很小,证明优化加工工艺很好地解决了应力释放造成的薄膜变形问题。

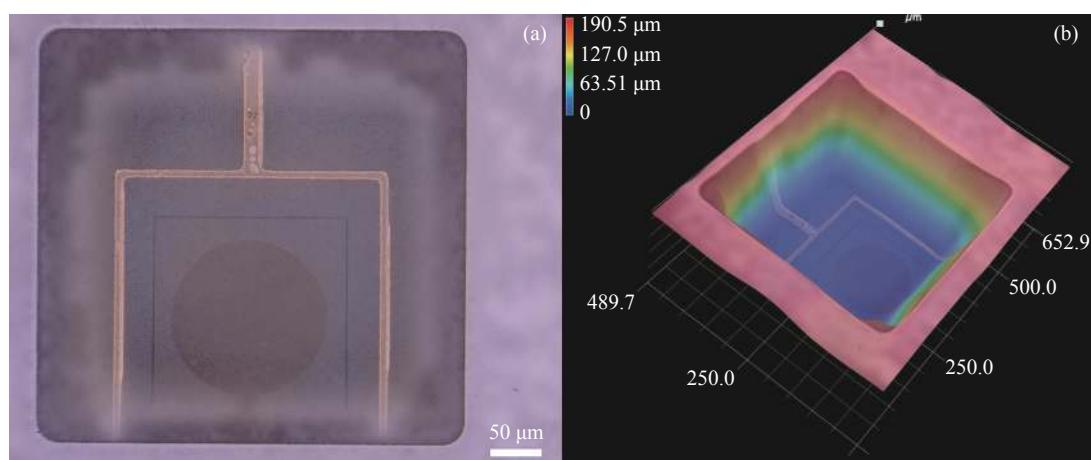


图 3 从背面观察的发光区直径为 80 μm 的完全掏空硅衬底的悬空薄膜 LED 器件的三维形貌图

Fig. 3 Three-dimensional images of an LED device with a freestanding membrane with a light emitting area of 80 μm in diameter (back view)

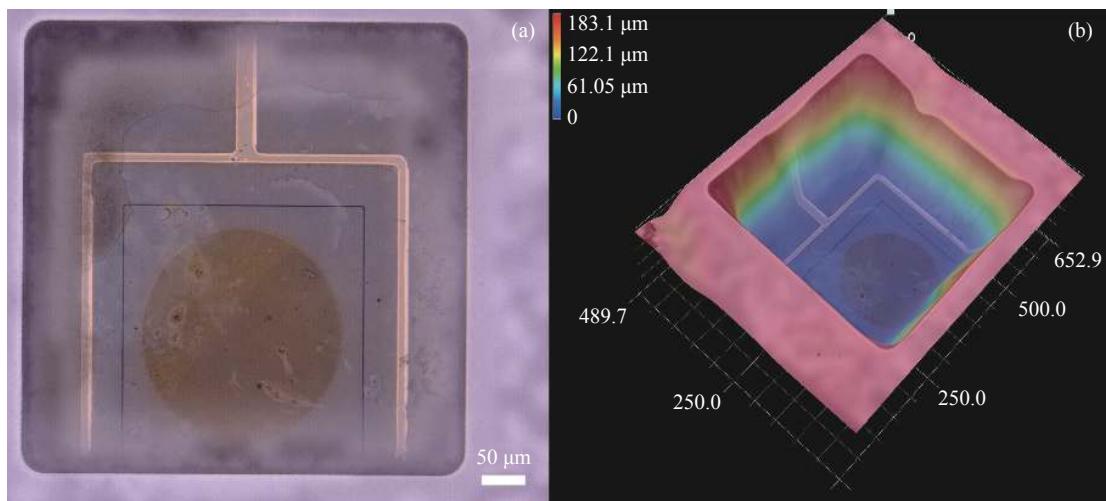


图4 从背面观察的发光区直径为 $120 \mu\text{m}$ 的完全掏空硅衬底的悬空薄膜 LED 器件的三维形貌图

Fig. 4 Three-dimensional images of an LED with a freestanding membrane device with a light emitting area of $120 \mu\text{m}$ in diameter (back view)

3 完全悬空超薄硅衬底氮化镓基 LED 器件的电学特性表征及仿真分析

图5为利用半导体分析仪测得的不同结构不同尺寸的LED器件的I-V(电流-电压)曲线。由图5可知,在15 V驱动电压下,发光区直径为 $80 \mu\text{m}$ 的普通LED器件的电流为4.3 mA,发光区直径为 $120 \mu\text{m}$ 的普通LED器件的电流为4.9 mA。当完全掏空硅衬底、减薄外延层制成悬空薄膜LED器件后,发光区直径为 $80 \mu\text{m}$ 的悬空薄膜LED器件的电流提高至23.1 mA,发光区直径为 $120 \mu\text{m}$ 悬空薄膜LED器件的电流提高至38.1 mA。

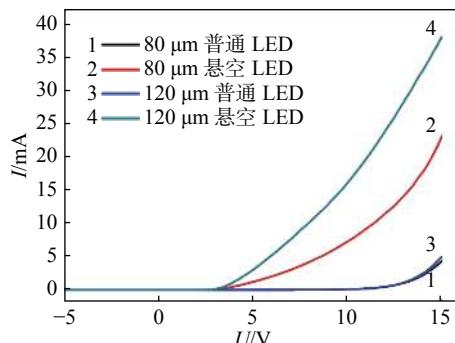


图5 不同结构、不同尺寸LED器件的I-V(电流-电压)曲线
Fig. 5 I-V (current-voltage) curves of LEDs with different structures and sizes

通过分析上述实验结果可知:

(1)对于相同尺寸的LED器件,相比于普通LED器件,采用硅衬底完全剥离和悬空氮化物薄膜背后减薄技术制成的悬空薄膜LED器件可以有效改善器件的电学性能,将开启电压由14 V左右降低至3 V左右,并且在同等电压下,电流也得到了大幅提升。

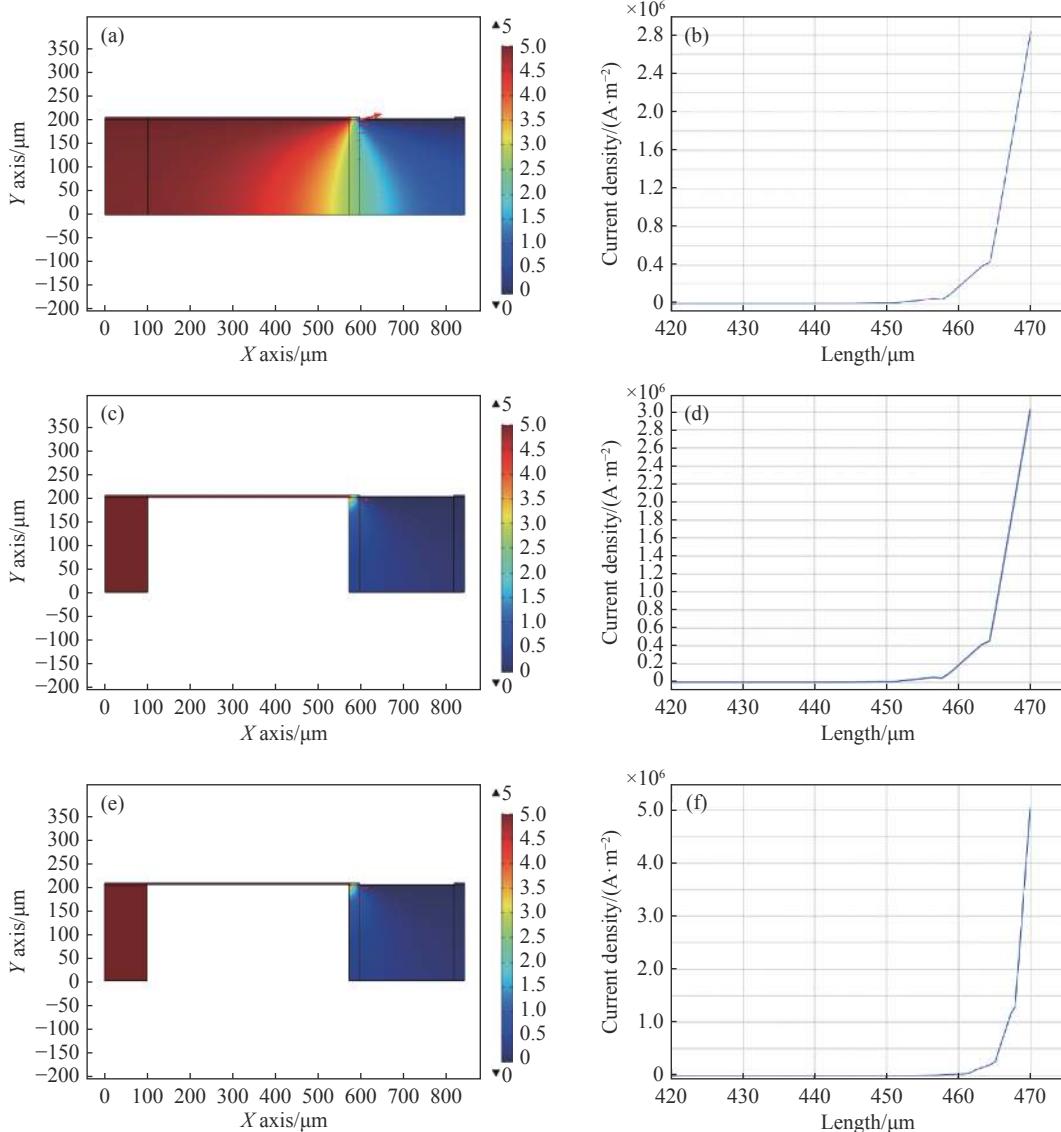
(2)对于普通LED器件,在驱动电压相同条件下(15 V)下,发光区直径的改变($80\sim120 \mu\text{m}$)仅使得电流由4.3 mA提高至4.9 mA。而经过完全掏空硅衬底、减薄外延层后制成的悬空薄膜LED器件,在同样的情况下可以使得电流由4.3 mA提高至23.1 mA($80 \mu\text{m}$ 普通LED)及由4.9 mA提高至38.1 mA($120 \mu\text{m}$ 普通LED)。这说明对于采用硅衬底完全剥离和悬空氮化物薄膜背后减薄技术制备的悬空薄膜LED器件,发光区直径变化对其电学性能的影响更为明显。

由于氮化镓外延层与硅衬底之间存在晶格失配,导致氮化镓外延层内部存在较高的位错密度,其降低了氮化镓外延层中载流子的迁移率,增加了LED器件的整体扩展电阻^[21]。在剥离硅衬底后,硅衬底和氮化镓外延层之间的压应力得以释放,氮化镓外延层内的晶格失配程度降低,从而使得氮化镓外延层的载流子迁移率提高,悬空LED器件的扩展电阻降低,悬空LED器件的

电学性能得以改善,其电流密度增大,开启电压降低。

本文使用多物理场有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics ®(COMSOL, Inc., Sweden)建立基于电学模块的有限元模型,用于分析发光区直径为 80 μm 的不同结构 LED 器件的电学性能,如图 6 所示。二维模型的几何结构是 LED 器件沿发光区中心线的横截面,p 电极设置在二维模型的中心,n 电极设置在二维模型的右侧。建立 4 种不同结构的 LED 模型,分别是保留硅衬底的普通 LED 器件、掏空硅衬底但未减薄外延层的悬空 LED 器件、掏空硅衬底并将外延层减薄至 3 μm 的悬空 LED 器件和掏空硅衬底并将外延层减薄至 1 μm 的悬空 LED 器件。

p 电极和 n 电极之间施加电压设定为 5 V,不同结构 LED 器件的电势和电流密度分布和 p 电极的电流密度曲线如图 6(彩图见期刊电子版)所示。电流密度最大值出现在 p 电极边缘,电流密度从 p 电极边缘到中心逐渐减小。比较有限元仿真分析结果可知,相较于普通 LED 器件,掏空硅衬底后的悬空 LED 器件的电流密度增大,电流分布集中。减薄氮化物外延层后,电流密度增大更明显,电流密度的最大值从 $2.8 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ 增加至 $1.2 \times 10^7 \text{ A/m}^2$,增加幅度达到约 4.3 倍。仿真分析结果进一步支撑了本文关于通过完全剥离硅衬底,并减薄氮化镓外延层的背后工艺可以有效提升 LED 器件的电学性能的实验结果。



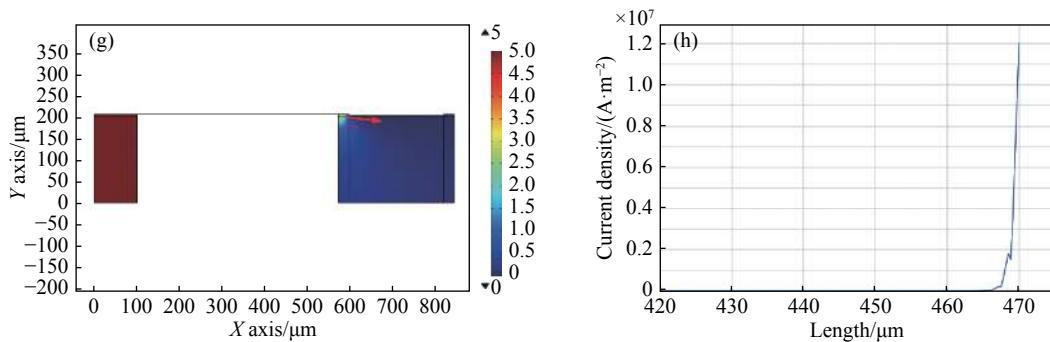


图 6 (a)普通 LED 器件的电势和电流密度分布及(b)普通 LED 器件 p 电极的电流密度曲线图;(c)掏空硅衬底的悬空 LED 器件的电势和电流密度分布;(d)掏空硅衬底的悬空 LED 器件 p 电极的电流密度曲线图;(e)掏空硅衬底并将外延层减薄至 3 μm 的悬空 LED 器件的电势和电流密度分布;(f)掏空硅衬底并将外延层减薄至 3 μm 的悬空 LED 器件 p 电极的电流密度曲线图;(g)掏空硅衬底并将外延层减薄至 1 μm 的悬空 LED 器件的电势和电流密度分布;(h)掏空硅衬底并将外延层减薄至 1 μm 的悬空 LED 器件 p 电极的电流密度曲线图。

Fig. 6 (a) Distribution of the potential and current density and (b) p electrode current density curve of the common LED; (c) distribution of the potential and current density and (d) p electrode current density curve of the LED with a membrane but without a silicon substrate; (e) distribution of potential and current density and (f) p electrode current density curve of the LED with a membrane and a GaN epitaxial layer thinned to 3 μm ; (g) distribution of potential and current density and (h) p electrode current density curve of the LED with a membrane and a GaN epitaxial layer thinned to 1 μm

4 完全悬空超薄硅衬底氮化镓基 LED 器件的光学特性表征

图 7(彩图见期刊电子版)为发光区直径为 120 μm 的不同结构的 LED 器件在刚好到达开启电压的情况下发光情况。图 7(a)为发光区直径为 120 μm 的普通 LED 器件在开启电压下的发光情况;图 7(b)为发光区直径为 120 μm 的悬空薄膜 LED 器件在开启电压情况下的发光情况。由图 7(a)可以看出,普通 LED 器件的开启电压为 14 V,此时电流为 1 mA,从显示器中可以看到 LED 器件的发光情况。由图 7(b)可以看出,悬空薄膜 LED 器件的开启电压降为 3 V,此时电流为 1 mA。通过显示器中的图像可以看出,相对于普通 LED 器件,悬空薄膜 LED 的发光亮度有较为明显的提高。该实验结果表明剥离硅衬底并减薄氮化物外延层有效提高了 LED 器件的光学性能。

图 8 为不同尺寸和不同结构的 LED 器件在 3 mA 驱动电流下的电致发光光谱。利用连接到探针台的半导体参数分析仪 (Agilent, B1500A, 美国) 驱动 LED 器件发光,利用可见光波段的光谱仪在垂直方向上接收 LED 器件的正面出射光,并进行光谱分析。由图 8 可知,不同尺寸、不同结

构的 LED 器件的电致发光光谱的发光峰都在 449 nm 左右,经过完全掏空硅衬底、减薄外延层制成悬空薄膜 LED 器件后,LED 器件的发光峰并未出现明显偏移。这说明制备悬空薄膜 LED 器件的工艺不会影响器件的基本光电性能,没有对有源区的材料特性造成破坏,LED 器件的光谱保持稳定。通过对实验结果进行分析,得出以下结论:

(1) 在 LED 器件尺寸相同的情况下,相比于普通 LED 器件,悬空薄膜 LED 器件的电致发光光谱峰值光强提高了约 5 倍,表明采用硅衬底完全剥离和悬空氮化物薄膜背后减薄技术可以显著提高 LED 器件的出光效率。本次实验中除了用于探针接触施加电流的 p 电极点以外,绝大部分的发光区域都实现了悬空薄膜结构,这也有利于 LED 器件出光效率的提升。

(2) 在发光区尺寸发生改变(发光区直径为 80~120 μm)的情况下,普通 LED 器件的电致发光光谱峰值光强仅提高了约 1.5 倍,而经过完全掏空硅衬底、减薄外延层后制成的悬空薄膜 LED 器件,电致发光光谱峰值光强提高了约 1.9 倍。表明对于采用硅衬底完全剥离和悬空氮化物薄膜背后减薄技术制备的悬空薄膜 LED 器件,发光区直径变化对出光效率的影响更为明显。



图 7 发光区直径均为 $120 \mu\text{m}$, 结构不同的 LED 器件在刚好到达开启电压的情况下发光情况。(a) 普通 LED; (b) 悬空薄膜 LED

Fig. 7 The light-emitting images of the LED with different structures and with light-emitting area's diameter of $120 \mu\text{m}$ when its voltage is turned on. (a) Common LED; (b) LED with a freestanding membrane

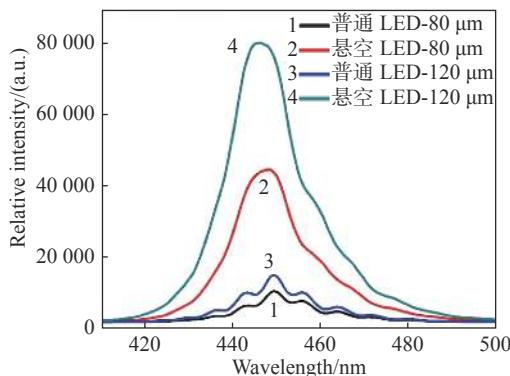


图 8 不同尺寸和不同结构的 LED 器件的电致发光光谱
Fig. 8 Electroluminescence spectra of the LEDs with different sizes and structures

图 9(a) 为发光区直径为 $120 \mu\text{m}$ 的结构不同的 LED 器件在不同电流下总光强(即光谱仪在整个发光光谱域下对光强的积分值)的对比结果。由图 9(a) 可知, 相比于普通 LED 器件, 悬空薄膜 LED 器件在不同注入电流下的总光强都有明显提高, 且随着注入电流不断增大, 悬空薄膜 LED 器件相比于普通 LED 器件的出射光总光强的提升幅度越来越明显。图 9(b) 为利用可见光波段的光功率计和半导体分析仪测得的发光区直径为 $120 \mu\text{m}$ 的悬空薄膜 LED 器件的光功率-电压-电流曲线。可见, 在电压-电流呈现线性变化的区间, 光功率-电流也表现出与之相吻合的线性变化规律, 并且悬空薄膜 LED 器件的光功率增强趋势明显。上述实验结果表明采用硅衬底完全剥离和悬空氮化物薄膜背后减薄这一工艺可以显著提升 LED 器件的出光效率。

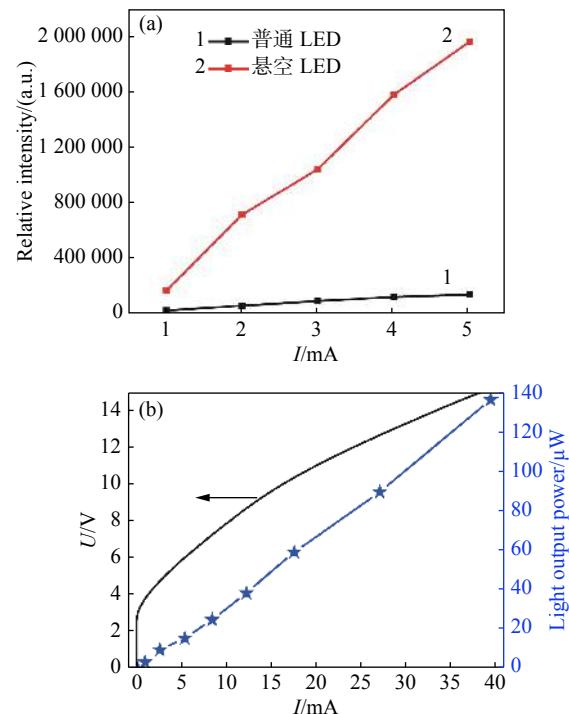


图 9 (a) 发光区直径为 $120 \mu\text{m}$ 的结构不同的 LED 器件电致发光情况下总光强对比; (b) 发光区直径为 $120 \mu\text{m}$ 的悬空薄膜 LED 器件的光功率-电压-电流曲线

Fig. 9 (a) Comparison of the electroluminescence total light intensities of the LED with different structures when light emitting area's diameter is $120 \mu\text{m}$; (b) L-V-I (light output power-voltage-current) curves of the LED with a $120 \mu\text{m}$ -diameter light emitting area and with a freestanding membrane

5 结 论

本文基于硅衬底氮化镓晶圆, 利用双面工艺实现了在发光区域完全为悬空薄膜结构的新型 LED 器件。在双面工艺中, 利用深反应离子刻蚀技术完全剥离硅衬底, 并利用三五族材料的 ICP-RIE 刻蚀技术从背面减薄氮化镓外延层, 通过控制刻蚀时间来调整薄膜厚度, 获得了悬空薄膜厚度可控的 LED 器件。研究了不同尺寸的普通 LED 器件和悬空薄膜 LED 器件的多种光电特性, 并进行了对比。结果显示, 相比于普通 LED 器件, 悬空薄膜 LED 器件的电学性能有了很大提高, 且随着 LED 器件尺寸(发光区直径)的增大, 电学性能的提高更为明显。发光区直径为 $120 \mu\text{m}$ 的普通 LED 器件在 15 V 驱动电压下的电流为 4.9 mA , 同样尺寸、同样驱动电压下悬空薄膜结

构的 LED 器件的电流提高至 38.1 mA。通过检测同一开启电压下 LED 器件的发光情况发现, 悬空薄膜 LED 器件的发光亮度较普通 LED 器件也有明显提高。通过电致发光测试发现, 悬空薄膜 LED 器件的制备工艺不会影响其发光光谱的稳定, 没有对有源区的材料特性造成破坏, 并有效提升了 LED 器件的出光效率。随着尺寸(发光区直

径)的提高, 出光效率提高的更为明显, 有效提高了 LED 器件的光学性能。在 3 mA 驱动电流下, 相比于 120 μm 发光区直径的普通 LED 器件, 同样驱动电流下相同尺寸悬空薄膜结构的 LED 器件的电致发光谱峰值光强提高了约 5 倍。本文的研究工作为发展高性能悬空氮化物薄膜 LED 器件开辟了新的空间。

参考文献:

- [1] 张雨茜, 陆志成, 张伟, 等. 硅基纳米柱GaN-LED的制备与光谱特性分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(8): 2450-2453.
ZHANG Y X, LU ZH CH, ZHANG W, et al.. Study of the fabrication and spectral analysis of silicon-based nanocolumn GaN-LED[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(8): 2450-2453. (in Chinese)
- [2] 江孝伟, 赵建伟, 武华. 高光提取效率倒装发光二极管的设计与优化[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 092302.
JIANG X W, ZHAO J W, WU H. Design and optimization of flip-chip light-emitting diode with high light extraction efficiency[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 092302. (in Chinese)
- [3] 洪国彬, 杨钧杰, 卢廷昌. 蓝紫光氮化镓光子晶体面射型激光器[J]. 中国光学, 2014, 7(4): 559-571.
HONG G B, YANG J J, LU T CH. Blue-violet GaN-based photonic crystal surface emitting lasers[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 559-571. (in Chinese)
- [4] ALHASSAN A I, YOUNG E C, ALYAMANI A Y, et al.. Reduced-droop green III-nitride light-emitting diodes utilizing GaN tunnel junction[J]. *Applied Physics Express*, 2018, 11(4): 042101.
- [5] WONG M S, NAKAMURA S, DENBAARS S P. Review-progress in high performance III-Nitride micro-light-emitting diodes[J]. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2020, 9(1): 015012.
- [6] WU T ZH, SHER C W, LIN Y, et al.. Mini-LED and micro-LED: promising candidates for the next generation display technology[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(9): 1557.
- [7] ZHANG X, LI P A, ZOU X B, et al.. Active matrix monolithic LED micro-display using GaN-on-Si epilayers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(11): 865-868.
- [8] KOESTER R, SAGER D, QUITSCHE W A, et al.. High-speed GaN/GaInN nanowire array light-emitting diode on silicon(111)[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(4): 2318-2323.
- [9] HORNG R H, WU B R, TIEN C H, et al.. Performance of GaN-based light-emitting diodes fabricated using GaN epilayers grown on silicon substrates[J]. *Optics Express*, 2014, 22(S1): A179-A187.
- [10] MONAVARIAN M, RASHIDI A, ARAGON A A, et al.. Impact of crystal orientation on the modulation bandwidth of InGaN/GaN light-emitting diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(4): 041104.
- [11] YANG J, ZHAO D G, JIANG D S, et al.. Emission efficiency enhanced by introduction of the homogeneous localization states in InGaN/GaN multiple quantum well LEDs[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 681: 522-526.
- [12] ISHIKAWA H, ASANO K, ZHANG B, et al.. Improved characteristics of GaN-based light-emitting diodes by distributed Bragg reflector grown on Si[J]. *Physica Status Solidi (A)*, 2004, 201(12): 2653-2657.
- [13] ISHIKAWA H, JIMBO T, EGAWA T. GaInN light emitting diodes with AlInN/GaN distributed Bragg reflector on Si[J]. *Physica Status Solidi C*, 2008, 5(6): 2086-2088.
- [14] ZHANG B J, EGAWA T, ISHIKAWA H, et al.. Thin-film InGaN multiple-quantum-well light-emitting diodes transferred from Si (111) substrate onto copper carrier by selective lift-off[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(7): 071113.
- [15] DENG D M, YU N S, WANG Y, et al.. InGaN-based light-emitting diodes grown and fabricated on nanopatterned Si substrates[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(20): 201106.
- [16] CHIU C H, LIN C C, DENG D M, et al.. Optical and electrical properties of GaN-Based light emitting diodes grown on

- micro- and nano-scale patterned Si substrate[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2011, 47(7): 899-906.
- [17] WAKUI M, SAMESHIMA H, HU F R, et al.. Fabrication of GaN light emitting diode membrane on Si substrate for MEMS applications[J]. *Microsystem Technologies*, 2011, 17(1): 109-114.
- [18] NAKAZATO H, KAWAGUCHI H, IWABUCHI A, et al.. Micro fluorescent analysis system integrating GaN-light-emitting-diode on a silicon platform[J]. *Lab on a Chip*, 2012, 12(18): 3419-3425.
- [19] LI X, SHI ZH, ZHU G Y, et al.. High efficiency membrane light emitting diode fabricated by back wafer thinning technique[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(3): 031109.
- [20] 李欣, 沙源清, 蒋成伟, 等. 超薄氮化镓基LED悬空薄膜的制备及表征[J]. *中国光学*, 2020, 13(4): 873-883.
LI X, SHA Y Q, JIANG CH W, et al.. Fabrication and characterization of ultra-thin GaN-based LED freestanding membrane[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 873-883. (in Chinese)
- [21] KANG B S, KIM S, KIM J, et al.. Effect of external strain on the conductivity of AlGaN/GaN high-electron-mobility transistors[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(23): 4845-4847.

作者简介:

蒋成伟 (1997—), 男, 安徽马鞍山人, 硕士研究生, 2015 年于厦门理工学院获得学士学位, 现为南京邮电大学通信与工程学院硕士, 主要从事氮化物光电子器件方面的研究。E-mail: 707242813@qq.com



李 欣 (1984—), 女, 陕西三原人, 博士, 2013 年于西安交通大学获得博士学位, 现为南京邮电大学通信与信息工程学院副教授, 主要从事硅基氮化镓光电子器件方面的研究。E-mail: lixin1984@njupt.edu.cn