

文章编号: 1000-7032(2021)04-0526-08

SiO₂图形化蓝宝石衬底对 GaN 生长及 LED 发光性能的影响

李思宏¹, 侯 想², 罗荣煌², 刘 杨², 钟梦洁², 罗学涛^{1*}

(1. 厦门大学 材料学院, 福建 厦门 361000; 2. 福建中晶科技有限公司, 福建 龙岩 364000)

摘要: 为了提高氮化镓(GaN)基发光二极管(LEDs)的发光性能,采用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)在蓝宝石衬底上沉积 SiO₂ 薄膜,经过光刻和干法刻蚀技术制备了 SiO₂ 图形化蓝宝石衬底(SiO₂ patterned sapphire substrate, SPSS),利用 LED 器件的外延生长和微纳加工技术获得了基于 SPSS 的 GaN 基 LED 器件。通过分析 GaN 外延层晶体质量、光提取效率和 LED 器件性能,重点研究了 SPSS 对 GaN 生长及 LED 发光性能的影响。实验及模拟仿真结果表明,与常规图形化蓝宝石衬底(Conventional patterned sapphire substrate, CPSS)相比,SPSS 上生长的 GaN 外延层位错密度较低,晶体质量较高,SPSS-LED 的光提取效率提高 26%、光输出功率和亮度均提高约 5%。

关键词: SiO₂ 蓝宝石复合衬底; LED 芯片; 位错密度; GaN; 光提取效率

中图分类号: TN312.8 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20200327

Effect of SiO₂ Patterned Sapphire Substrate on GaN Growth and LED Luminescence Performance

LI Si-hong¹, HOU Xiang², LUO Rong-huang², LIU Yang², ZHONG Meng-jie², LUO Xue-tao^{1*}

(1. School of Materials, Xiamen University, Xiamen 361000, China;

2. Fujian Zoomking Technology Co., Ltd., Longyan 364000, China)

* Corresponding Author, E-mail: xuetao@xmu.edu.cn

Abstract: To improve the luminescence performance of gallium nitride(GaN)-based light-emitting diodes(LEDs), a SiO₂ film was deposited on sapphire substrates by the plasma-enhanced chemical vapor deposition(PECVD) in this study. After depositing the SiO₂ film, a SiO₂ patterned sapphire substrate(SPSS) was prepared through photolithography and dry etching, and a GaN-based LED device with SPSS was obtained by using epitaxial growth and micro-nano processing technology of the LED device. The effect of SPSS on the crystal quality of the GaN epitaxial layer, the light extraction efficiency, and the performance of the LED device were investigated. The experimental and simulation results show that, compared to the conventional patterned sapphire substrates(CPSS), the GaN epitaxial layer grown on SPSS had lower dislocation density and higher crystal quality, and the light extraction efficiency of SPSS-LED was increased by 26%, as well as that the light output power and brightness of SPSS-LED were both increased by about 5%.

Key words: SiO₂ sapphire composite substrate; LED chip; dislocation density; GaN; light extraction efficiency

收稿日期: 2020-10-29; 修订日期: 2020-12-19

基金项目: 厦门大学与福建中晶科技有限公司合作项目(XDHT2018582A)资助

Supported by Cooperation Project Between Xiamen University and Fujian Zoomking Technology Co., Ltd. (XDHT2018582A)

1 引言

近年来,氮化镓(GaN)半导体材料因其在发光器件、大功率和高温器件上的应用而引起了广泛的研究兴趣^[1-3]。目前能够用于 GaN 生长的异质衬底主要有硅衬底、碳化硅和蓝宝石。由于异质衬底与 GaN 外延层之间较大的晶格失配和热失配,导致 GaN 外延层存在较高的位错密度^[4-5],这些位错充当非辐射复合中心^[6]和电子散射中心^[7],使 GaN 基发光二极管(LED)器件的内量子效率下降;另外,GaN 与空气的全反射也会降低 LED 的光提取效率,从而降低了 LED 器件的光学和电性能。为了解决这些问题,已经提出许多方法,例如采用侧向外延生长(ELOG)技术^[8]来改善 GaN 外延薄膜的晶体质量,或者采用光子晶体技术^[9]、表面粗化技术^[10]以及图形化蓝宝石衬底(Patterned sapphire substrate,PSS)技术^[11]等均可以有效提高 LED 器件的光提取效率。其中,特别是 PSS 的使用引起了广泛的关注。据报道^[12-13],PSS 能够使 GaN 外延生长由纵向变成横向,降低了 GaN 外延材料的位错密度,从而提高内量子效率;此外,非平整的 GaN/蓝宝石表面可以改变有源层发出光的传播方向,避免 GaN 与空气间因折射率差太大而造成的内部全反射,增加了光子的散射,提高了光的出射概率,使光提取效率增加。

然而,对于常规 PSS,工业化路线已经相对成熟,亮度提高已经达到了理论极限,如何在蓝宝石衬底材料体系的大前提下,进一步提升 LED 的发光性能,是我们所关注的焦点。据 Lin^[14]报道,采用折射率低于蓝宝石衬底(1.78)的纳米粒子衬底,可以提高 LED 的外量子效率;Ueda^[15]通过旋涂法在蓝宝石衬底上制备了直径为 300~550 nm 的 SiO₂ 亚微米球;Li^[16]采用自组装的方法在蓝宝石衬底上制备了直径为 3 μm 的 SiO₂ 微米球,通过生长 GaN 外延层并制成 LED 器件,结果显示采用 SiO₂ 球可以降低 GaN 外延层的位错密度,提高其晶体质量,从而使 LED 的光输出功率提高。尽管选择 SiO₂ 材料作为衬底是可行的,但由于 SiO₂ 球的排列是随机分布的并且容易紧密地排列在一起,从而导致 LED 的光学和电性能的均匀性和稳定性较差,不适合应用于工业化生产。

为了解决上述问题,本文设计了一种具有优异性能的 SiO₂ 图形化蓝宝石衬底(SiO₂ patterned

sapphire substrate,SPSS)及基于 SPSS 的 GaN 基 LED 器件。对比常规图形化蓝宝石衬底(Conventional patterned sapphire substrate,CPSS)的 LED,SPSS-LED 的光提取效率提高 26%,光输出功率和亮度均提高约 5%。该方法涉及的 SiO₂ 材料刻蚀工艺简单成熟、刻蚀速率高且对掩膜材料的胶型无依赖性,可以大幅度提升 ICP 刻蚀机台的产能,降低生产成本。本文所提出的 SPSS 对于实现高效低成本 LED 的产业化生产具有广阔的应用前景。

2 实验

本文实验中 SPSS 的制备主要由薄膜沉积、光刻(涂胶、曝光、显影)、刻蚀等步骤组成。具体的制备过程如图 1 所示。

第一步,将 10.16 cm(4 in)蓝宝石衬底放入等离子体增强化学气相沉积(PECVD)设备(SENTECH SI 500D)中,设备在 SiH₄ 和 O₂ 气体中起辉放电形成等离子体,沉积一层 2.1 μm 左右的 SiO₂ 薄膜。

第二步,采用匀胶机(CND E1512-DV3-246)旋涂光刻胶(AZ601),匀胶转速为 3 500 r/min,控制光刻胶厚度在 2.1 μm,利用光刻机(Nikon NSR 19)对带有光刻胶的衬底进行曝光。曝光完成后,用显影液(瑞红 238)对曝光后的带胶蓝宝石衬底显影 60 s,清洗甩干后将其在 110 °C 的热板上烘烤 120 s。

第三步,将光刻完成的衬底在刻蚀机(maxis ICP 300L)中刻蚀,刻蚀气体为 BCl₃。首先在上下电极功率 1 750 W/450 W 的条件下刻蚀 1 800 s,待刻出二氧化硅的图形后,改变功率至 1 750 W/800 W 继续刻蚀 300 s,使 SiO₂ 下面蓝宝石基座的高度约为 0.25 μm,最后得到了 SPSS。值得一提的是, SiO₂ 材料下部分的蓝宝石更有利于 GaN 外

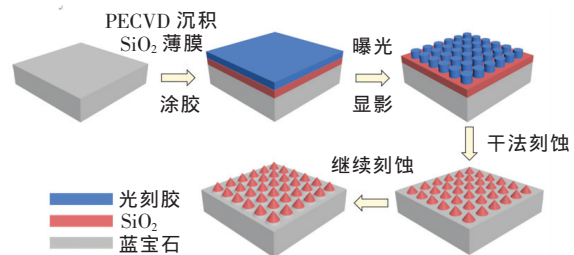


图 1 SPSS 的制备流程

Fig. 1 Preparation process of SPSS

延层成功生长在衬底上,解决了由于衬底的尺寸过大引起外延生长过程中“雾化”的问题,缩短了外延生长时间,有效提高了生产效率。

用传统的方法制备图形形貌跟 SPSS 一致的 CPSS,与 SPSS 的制备流程相比,CPSS 的制备流程没有 PECVD 沉积 SiO_2 薄膜这一步,即通过在蓝宝石平片上涂胶、曝光、显影、干法刻蚀等步骤制备得到 CPSS。两种结构的微观形貌如图 2 所示,制备得到的 CPSS 和 SPSS 具有良好的周期性和均匀性的图形形貌,最后形成锥形的周期为 $3 \mu\text{m}$,占空比 $85\% \sim 90\%$,高度 $1.9 \mu\text{m}$ 。

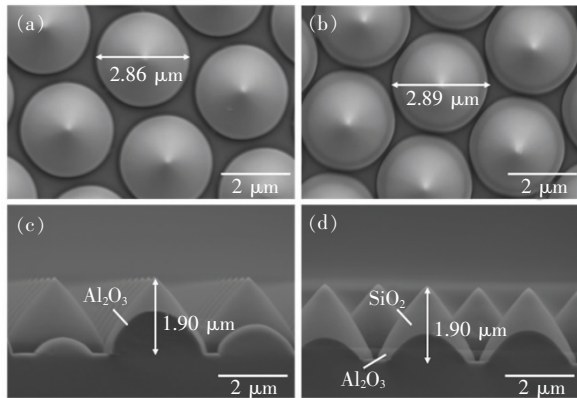


图 2 (a) CPSS 平视图;(b) SPSS 平视图;(c) CPSS 截面图;(d) SPSS 截面图。

Fig. 2 (a) CPSS plan view. (b) SPSS plan view. (c) CPSS cross-section view. (d) SPSS cross-section view.

本实验采用金属有机气相沉积 (MOCVD) 设备 (Veeco K465I) 生长 GaN 基 LED 外延片。两种衬底采用同炉生长,生长过程采用 H_2 和 N_2 作为载气,三甲基镓 (TMGa)、三甲基铟 (TMIIn) 和氨气 (NH_3) 分别是 Ga 源、In 源和 N 源,二茂镁 (CP2Mg) 和硅烷 (SiH_4) 分别是 p 型氮化镓 (p-GaN) 和 n 型氮化镓 (n-GaN) 的掺杂材料。首先,衬底在反应室内 1100°C 高温氢化处理去除表面杂质;接着,采用两步法生长,先生长 30 nm 的低温 GaN 缓冲层,再高温生长 $2 \mu\text{m}$ 非掺杂 GaN 和 $2 \mu\text{m}$ 的 n 型 GaN;然后,在此基础上继续生长由 10 个周期 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ 量子阱构成的有源区, 30 nm 的 AlGaN 电子阻挡层, 150 nm 的 p 型 GaN 接触层;最后,将两个样品进行外延退火后用相同的芯片工艺流程制作成 LED 芯片,芯片尺寸为 $250 \mu\text{m} \times 575 \mu\text{m}$ ($10 \text{ mil} \times 23 \text{ mil}$)。

实验过程中所用的扫描电子显微镜 (SEM)

为 SU-70,高分辨率 X 射线衍射仪 (HRXRD) 为 PANalytical 的 X Pert PRO,原子力显微镜 (AFM) 为 Asylum Research 的 Cypher S,透射电子显微镜 (TEM) 为 FEI 的 Talos F200X,拉曼测试设备为 WITec alpha 300RA。采用有限元差分 (FDTD) 软件模拟光提取效率,维明 LED627 芯片测试仪测量芯片数据,封装完成后用 YF-1000 积分球测试光电参数,维明 CX-800 LED 光强分布测试仪测量配光曲线。

3 结果与讨论

3.1 GaN 外延层晶体质量分析

为了表征 CPSS 和 SPSS 的 GaN 外延层晶体质量,使用 HRXRD 沿两个样品的对称 (002) 面和非对称 (102) 面进行 ω 扫描摇摆曲线测量。图 3 (a)、(b) 分别为 (002) 对称面和 (102) 非对称面的摇摆曲线扫描结果。由图可知,与直接生长在 CPSS 上的 GaN 外延层相比,生长在 SPSS 上的 GaN 外延层的摇摆曲线峰值宽度明显减少。定量分析结果表明,对于 (002) 对称面,SPSS 的 GaN 外延层和 CPSS 的 GaN 外延层的半高宽 (FWHM) 值从 198 arcsec 减小到 128 arcsec ;对于 (102) 非对称面,半高宽 (FWHM) 值从 210 arcsec 减小到 140 arcsec 。据报道^[17], (002) 对称面的半高宽值反映了螺型位错和混合型位错的位错密度, (102) 非对称面的半高宽值反映了刃型位错和混合型位错的位错密度。根据位错密度公式^[18]:

$$D_s = \frac{\beta_s^2}{4.35 \times |b_s|^2} = \frac{\beta_{002}^2}{4.35 \times (b_s \cos \alpha)^2}, \quad (1)$$

$$D_e = \frac{\beta_e^2}{4.35 \times |b_e|^2} = \frac{\beta_{102}^2 - \beta_{002}^2}{4.35 \times (b_e \sin \alpha)^2}, \quad (2)$$

其中, D_s 和 D_e 分别是刃型位错和螺型位错的位错密度, β 为 XRD 摇摆曲线半高宽, b 为伯格矢量长度, $|b_s| = 0.5185 \text{ nm}$, $|b_e| = 0.3189 \text{ nm}$; α 是倒格子矢量 (\mathbf{K}_{hkl}) 和 (001) 面法线之间的夹角。通过计算得出,生长在 CPSS 上 GaN 外延层的刃型位错和螺型位错的位错密度分别为 $3.7 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 和 $0.78 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$,而生长在 SPSS 上的 GaN 外延层的刃型位错和螺型位错的位错密度分别为 $2.4 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 和 $0.33 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 。因此,采用 SPSS 可降低 GaN 外延层的位错密度,进而提高 GaN

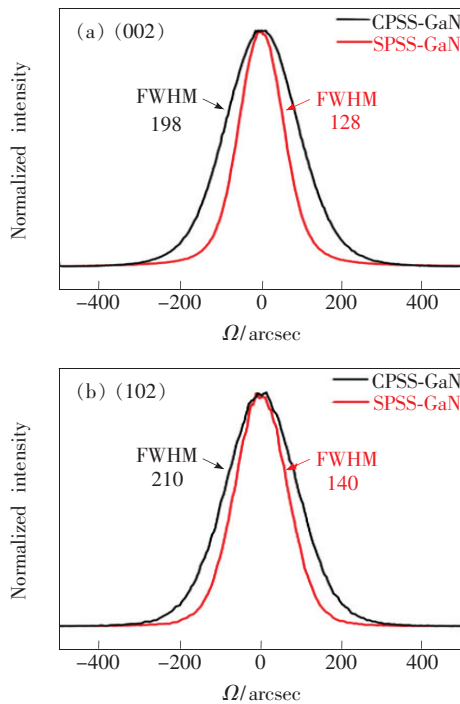


图 3 CPSS-GaN 和 SPSS-GaN 的 XRD 摇摆曲线。(a) 对称(002)面;(b)非对称(102)面。

Fig. 3 XRD rocking curves of CPSS-GaN and SPSS-GaN. (a) Symmetric (002) plane. (b) Asymmetric (102) plane.

外延层的晶体质量。

通过透射电子显微镜 (TEM) 图像研究了 CPSS 和 SPSS 上 GaN 外延层的位错分布情况。图 4 (a)、(b) 分别为 CPSS-GaN 和 SPSS-GaN 沿 $[10\bar{1}0]$ 晶带轴拍摄的双束暗场像, $g = [0002]$ 。图 4 (c)、(d) 分别为 CPSS-GaN 和 SPSS-GaN 沿 $[10\bar{1}0]$ 晶带轴拍摄的双束暗场像, $g = [11\bar{2}0]$ 。从图 4 (a)、(c) 可以看出, 在 $g = [0002]$ 和 $g = [11\bar{2}0]$ 时, 都可以观察到 CPSS-GaN 沿生长方向传播的高位错密度, 这些位错大多数是具有刃型位错和螺型位错的混合位错, 主要存在圆锥的锥顶和侧壁之上。从图 4 (b)、(d) 可以观察到, SPSS-GaN 的位错主要存在于圆锥的锥顶之上, 并且其位错数量明显低于 CPSS-GaN 的位错数量。此外, 从图 4 (d) 可以看到, SPSS-GaN 的下部分蓝宝石区域产生了一些位错, 这是由于 GaN 外延层与蓝宝石衬底之间的晶格失配引起的。但是, 这些位错无法渗透到圆锥的锥顶之外, 原因是 SPSS 的底部蓝宝石区域的 GaN 横向生长和蓝宝石衬底 c 面区域的 GaN 生长相结合, 产生堆垛层错, 堆垛层错的形成几乎不产生晶格畸变, 并且其存

在能有效抑制穿透位错的攀爬, 有效地抑制和阻挡位错向上传播^[19-20], 使位错数量急剧减少。同样, 在 CPSS-GaN 中也观察到了该现象, 这也解释了在 SPSS 制备过程中底部继续刻蚀出蓝宝石区域的原因。然而, 在 SPSS 上的 GaN 外延层横向合并时, 在圆锥的锥顶之上形成了一些位错, 如图 4 (d) 所示, 该区域不存在堆垛层错, 所以这些位错无法被抑制。尽管如此, 相比于 CPSS-GaN, SPSS-GaN 仍然显示出了更少的位错数量以及更好的结晶质量, 与 XRD 测试结果吻合。

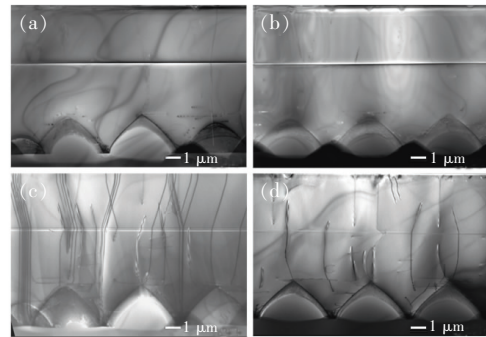


图 4 CPSS-GaN 沿 $[10\bar{1}0]$ 晶带轴的暗场 TEM 横截面图像, 其中反射 $g = [0002]$ (a) 和 $g = [11\bar{2}0]$ (c); 对于 SPSS-GaN 沿 $[10\bar{1}0]$ 晶带轴的暗场 TEM 横截面图像, 其中反射 $g = [0002]$ (b) 和 $g = [11\bar{2}0]$ (d)。

为了进一步探究 SPSS 对 GaN 外延层晶体质量的优化作用, 本文通过 AFM 对上述两种样品的表面进行了 $3 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$ 和 $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ 范围扫描, 扫描模式为轻敲模式。如图 5 所示, 两种扫描范围内, 两种样品均显示原子层台阶状的表面形貌。在 $3 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$ 范围内, CPSS 和 SPSS 上 GaN 外延层的均方根粗糙度 (RMS) 分别为 0.155 nm 和 0.122 nm; 在 $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ 范围内, CPSS 和 SPSS 上 GaN 外延层的 RMS 分别为 0.154 nm 和 0.127 nm, 且 RMS 并没有随着扫描范围的增加而增大, 说明采用 SPSS 的 GaN 外延层更有利于获得原子平面。从图 5 (a)、(c) 中可以看到, CPSS 的 GaN 外延层表面存在着大小不一的缺陷坑和较小的黑点, 其中较小的黑点是位错露头^[21]。通

过对比可知,SPSS 上的 GaN 外延层具有较少的台阶终端和位错露头。上述结果表明,SPSS 上的 GaN 外延层的结晶质量优于 CPSS 上的 GaN 外延层,与 XRD 及 TEM 测试结果吻合。

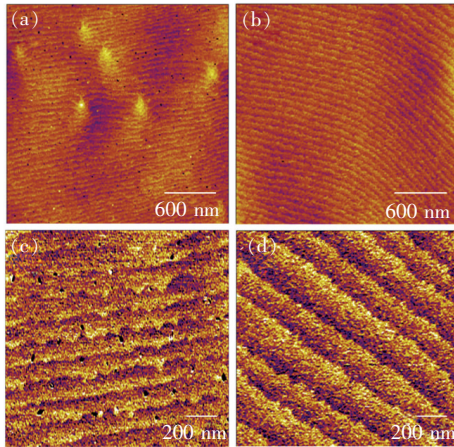


图 5 CPSS-GaN 和 SPSS-GaN 的 AFM 图像:3 $\mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$ CPSS-GaN (a), SPSS-GaN (b); 1 $\mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ CPSS-GaN (c), SPSS-GaN (d)。

Fig. 5 AFM images of CPSS-GaN and SPSS-GaN: 3 $\mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$ CPSS-GaN (a), SPSS-GaN (b); 1 $\mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ CPSS-GaN (c), SPSS-GaN (d)。

图 6 为 CPSS 和 SPSS 上的 GaN 外延层高能 $E_2(\text{high})$ 模式周围的拉曼光谱, $E_2(\text{high})$ 对应力敏感,已广泛用于测量 GaN 外延层的应力。与无应力状态的 GaN (567.6 cm^{-1})^[22] 相比,CPSS 和 SPSS 上生长的 GaN 样品, $E_2(\text{high})$ 分别为 570.8 cm^{-1} 和 569.8 cm^{-1} ,两种样品均往高能方向移动,说明 CPSS 和 SPSS 的 GaN 外延层均处于压应力状态。通过对比可知,SPSS 上生长的 GaN 外延层所受到的压应力较小。拉曼测试结果与 XRD、TEM、AFM 的结果相符。由此可知,SPSS 的存在有助于减少 GaN 层的位错,提高了载流子迁移率

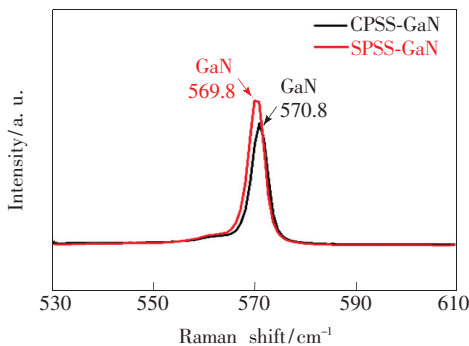


图 6 CPSS-GaN 和 SPSS-GaN 的拉曼光谱

Fig. 6 Raman spectra of CPSS-GaN and SPSS-GaN

和少数载流子寿命,从而获得了晶体质量较高的 GaN 外延层。

3.2 LED 光提取效率分析

由于光提取效率较难从表征手段上进行验证,故本文采用了 FDTD 方法模拟 CPSS 和 SPSS 结构对 LED 光提取效率的影响。

本文采用结构尺寸为 $20 \mu\text{m} \times 5.75 \mu\text{m}$ 的二维 LED 计算模型。如图 7 所示,从上而下结构依次为 p-GaN (折射率为 2.45)、有源层 MQWs (折射率为 2.49)、n-GaN (折射率为 2.45)、CPSS (折射率为 1.78) 或 SPSS (折射率为 1.47)、蓝宝石 (折射率为 1.78)^[23-24]。设置图形周期为 $3 \mu\text{m}$,高度为 $1.9 \mu\text{m}$, 占空比 85% ~ 90%,模型四周采用完美匹配层 (PML) 包围。Benisty^[25] 的研究结果表明,LED 中有源层的载流子复合发光过程可以用点光源模拟,同时由于多个偶极子源相互之间会产生非物理特性的干涉,导致计算结果不准确。因此,本文选择单个偶极子源模拟有源层,其中心波长为 450 nm 。在模型顶部设置监视器 monitor1,用来测试光从 LED 辐射出来的光功率 P_{out} ;在偶极子源处用监视器 monitor2 包围计算发出的光在各个方向的总功率 P_{total} 。定义光提取效率为:

$$\eta_{\text{LEE}} = P_{\text{out}}/P_{\text{total}}, \quad (3)$$

模拟结果如图 7 所示,可见 CPSS-LED 和 SPSS-LED 的光提取效率随着波长呈现规律性的变化。在 450 nm 处,CPSS-LED 的 η_{LEE} 为 12.30%, SPSS-LED 的 η_{LEE} 为 15.49%。

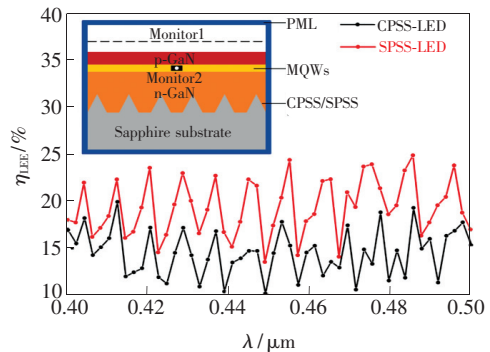


图 7 CPSS-LED 和 SPSS-LED 的光提取效率

Fig. 7 Light extraction efficiency of CPSS-LED and SPSS-LED

我们采用光提取效率的增强因子来反映 LED 光提取效率的增强作用,并且定义光提取效率的增强因子 F 为:

$$F = \frac{\eta_{\text{LEE-SPSS}} - \eta_{\text{LEE-CPSS}}}{\eta_{\text{LEE-CPSS}}} \times 100\%, \quad (4)$$

通过计算可知,在波长 450 nm 处,相较于 CPSS-LED, SPSS-LED 的光提取效率增强了 26%,说明 GaN/SPSS 界面可以比 GaN/CPSS 界面反射出更多的光至空气中。这是由于当量子阱的光到达底部 GaN/衬底界面时,折射率小的材料对应的全反射角度更小,更有利于光反射回到顶部界面射出,从而提高 LED 器件的出光效率。因此,SPSS-LED 具有更高的光提取效率。

3.3 LED 器件性能分析

将 CPSS-GaN 和 SPSS-GaN 进行外延退火后制作成尺寸为 250 μm × 575 μm (10 mil × 23 mil) 的 LED 芯片并封装,测试两者的 LED 芯片参数,结果如表 1 所示。从表 1 中可以看出,两种结构的 LED 正向电压 (V_{F1}) 基本一致,两者都在正常工作范围内。在波长 450 nm 处,对封装前 LED 芯片的光输出功率 (LOP) 取平均值,CPSS-LED 和 SPSS-LED 的光输出功率分别为 211.85 mW 和 223.05 mW,可知 SPSS-LED 的光输出功率比 CPSS-LED 提高约 5%。同样地,芯片封装后的 CPSS-LED 和 SPSS-LED 的亮度平均值分别为 63.05 lm 和 65.9 lm。由此可知,相比于 CPSS-LED, SPSS-LED 的亮度提高约 5%,与光输出功率

的结果一致。为了获取高的 LED 发光性能,通常需要高的外量子效率 (EQE), EQE 与内量子效率 (IQE)、光提取效率 (LEE) 和载流子注入效率 (CIE) 有关。由于两种样品的器件制备过程是相同的,因此我们认为两者的 CIE 相同,在这不给予讨论,仅着重研究 IQE 和 LEE 对 LED 的影响。IQE 一般与 LED 外延层的晶体质量、衬底与外延层的匹配度等因素相关,LEE 一般与 LED 的微结构、封装等因素相关。FDTD 模拟表明,相较于 CPSS-LED, SPSS-LED 的光提取效率增强了 26%,需要说明的是,理论计算采用的是理想的结构,与实际的结构稍有差异,比如缺陷位错引起的光的损耗等,造成实际情况与理论计算稍有不同。LED 器件在实际制备过程中受到多种因素的影响,导致 SPSS-LED 的光输出功率和亮度仅仅提高约 5%。在半导体器件中,反向击穿电压是衡量器件稳定性的重要参数,并且反向击穿电压可以反映器件的穿透位错数量,反向击穿电压越高,穿透位错越少。从芯片数据可知,在 5 μA 漏电流下,SPSS-LED 反向击穿电压 V_z 较 CPSS-LED 电压提高约 10 V。因此,SPSS-LED 反向击穿电压的大幅提升可以充分说明 SPSS 对外延 GaN 层晶体质量的提升。

表 1 CPSS-LED 和 SPSS-LED 的芯片参数

Tab. 1 Chip parameters of CPSS-LED and SPSS-LED

衬底种类	片号	芯片					封装			
		$V_{F1}/$ V	WLD/ nm	LOP/ mW	$V_z/$ V	芯片长 LOP (450 nm)/mW	$V_{F1}/$ V	色温/ K	亮度/ lm	光效/ (lm · W ⁻¹)
SPSS	1	3.13	451.9	224.1	52.5	225.5	3.17	5 974	66.1	139.0
	2	3.13	453.5	216.9	51.7	220.6	3.18	6 013	65.7	137.7
CPSS	3	3.14	452.2	210.0	42.5	211.7	3.19	5 920	63.2	132.1
	4	3.13	453.6	208.2	42.3	212.0	3.18	6 011	62.9	131.9

为了进一步论证 LED 芯片的内部和外部表现,本文测试了 CPSS-LED 和 SPSS-LED 两种芯片的配光曲线,即出光角和相对光强的关系,测试结果如图 8 所示。图 8(a)、(b) 为两种样品的配光曲线图,为极坐标表示法,从中可知 SPSS-LED 在更大的角度范围内具有光强分布,并且发光强度大于 CPSS-LED。图 8(c)、(d) 为直角坐标表示法,可以直观地看出 LED 在不同角度的光强值。

从图 8(c) 可以看出,CPSS-LED 的配光曲线在左右两侧约 30° 的方向有最大的发光强度,在中心 0° 方向,曲线存在中央凹陷,成类似于马鞍形状分布,由此可知 CPSS-LED 的发光强度分布比较分散。从图 8(d) 可以明显看到 SPSS-LED 的光更加集中,轴向光更好。SPSS-LED 在配光角度方面的集中性表明其未来在背光显示等领域具有较好的应用潜力。

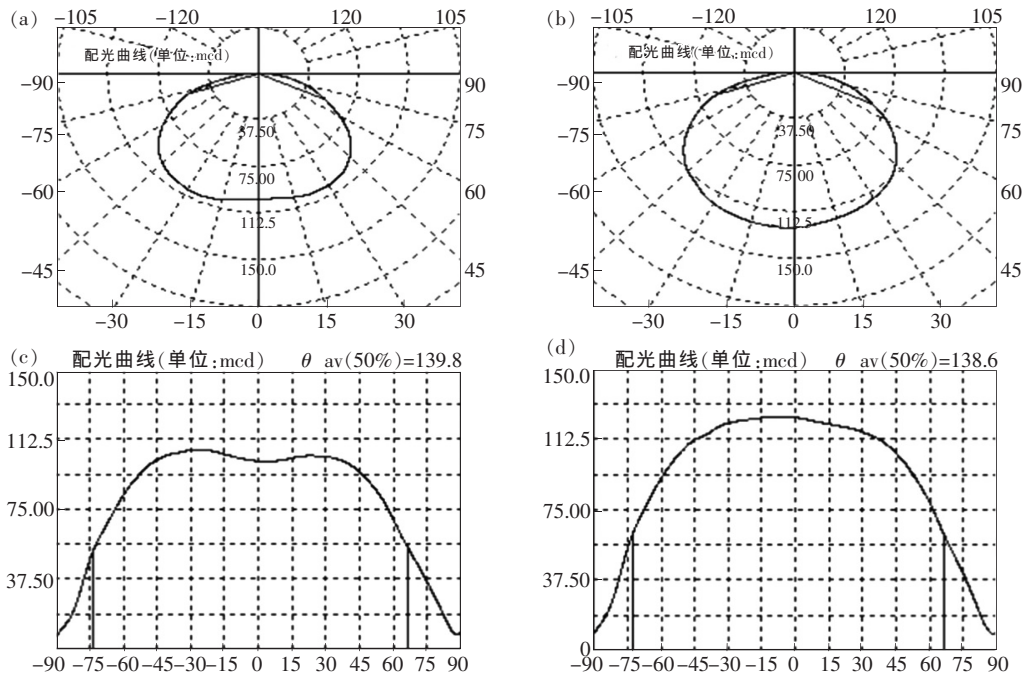


图 8 (a)、(c)CPSS-LED 的配光曲线图;(b)、(d)SPSS-LED 的配光曲线图。

Fig. 8 (a),(c)Light distribution curve of CPSS-LED. (b),(d)Light distribution curve of SPSS-LED.

4 结 论

本文研究了 SPSS 对 GaN 生长及 LED 发光性能的影响。为了提高 GaN 基 LED 的发光性能,我们采用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)方法在蓝宝石衬底上沉积 SiO₂ 薄膜,再经过光刻和干法刻蚀技术制备了 SPSS,结合 LED 器件的外延生长和微纳加工技术获得了 CPSS 和 SPSS 的 GaN 基 LED 器件并对其进行了

表征分析。实验结果表明,与 CPSS-LED 相比,所制备的 SPSS-LED 光输出功率和亮度提高约 5%。机理研究表明,SPSS 上生长的 GaN 外延层位错密度较低,晶体质量较高。结合有限元差分模拟(FDTD)仿真,可知 SPSS-LED 的光提取效率提高了 26%。通过对相关实验数据分析和讨论,结果表明 SPSS 有望取代 CPSS 进行工业化生产,并且其在背光显示等领域将展现良好的应用潜力。

参 考 文 献:

- [1] ZHAO Y, XU S R, ZHANG J C, *et al.*. Optical properties evolution of GaN film grown *via* lateral epitaxial overgrowth [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2020, 513: 145816.
- [2] HE X G, ZHAO D G, JIANG D S, *et al.*. GaN high electron mobility transistors with AlInN back barriers [J]. *J. Alloys Compd.*, 2016, 662: 16-19.
- [3] TARAUNI Y U, THIRUVADIGAL D J, JOSEPH H B. Characterization and optimization of MIS-HEMTs device of high $\sim k$ dielectric material on quaternary barrier of Al_{0.42}In_{0.03}Ga_{0.55}N/UID-AIN/GaN/GaN heterostructure for high power switching application [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2019, 488: 427-433.
- [4] 刘卫华, 李有群, 方文卿, 等. Si 衬底 GaN 基 LED 的结温特性 [J]. *发光学报*, 2006, 27(2): 211-214.
LIU W P, LI Y Q, FANG W Q, *et al.*. The Junction-temperature characteristic of GaN light-emitting diodes on Si substrate [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2006, 27(2): 211-214. (in Chinese)
- [5] 陈耀, 王文新, 黎艳, 等. 国产 SiC 衬底上利用 AlN 缓冲层生长高质量 GaN 外延薄膜 [J]. *发光学报*, 2011, 32(9): 896-901.
CHEN Y, WANG W X, LI Y, *et al.*. High quality GaN layers grown on SiC substrates with AlN buffers by metalorganic

- chemical vapor deposition [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2011,32(9):896-901. (in Chinese)
- [6] ABELL J, MOUSTAKAS T D. The role of dislocations as nonradiative recombination centers in InGa_N quantum wells [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008,92(9):091901-1-3.
- [7] YOU J H, LU J Q, JOHNSON H T. Electron scattering due to threading edge dislocations in n-type wurtzite GaN [J]. *J. Appl. Phys.*, 2006,99(3):033706-1-10.
- [8] XU Y, SU X J, CAO B, et al.. In-plane misfits' localization in GaN via graphene-ELOG technology [J]. *CrystEngComm*, 2019,21(5):902-907.
- [9] WIERER J J, KRAMES M R, EPLER J E, et al.. InGa_N/Ga_N quantum-well heterostructure light-emitting diodes employing photonic crystal structures [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004,84(19):3885-3887.
- [10] FUJII T, GAO Y, SHARMA R, et al.. Increase in the extraction efficiency of GaN-based light-emitting diodes via surface roughening [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004,84(6):855-857.
- [11] WU H Y, XU S R, FENG L S, et al.. Patterned sapphire substrates cause a wavelength shift of green InGa_N light-emitting diodes [J]. *Opt. Mater. Express*, 2020,10(9):2045-2053.
- [12] LEE Y J, HWANG J M, HSU T C, et al.. Enhancing the output power of GaN-based LEDs grown on wet-etched patterned sapphire substrates [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2006,18(10):1152-1154.
- [13] LEE Y C, YE H S C, CHOU Y Y, et al.. High-efficiency InGa_N-based LEDs grown on patterned sapphire substrates using nanoimprinting technology [J]. *Microelectron. Eng.*, 2013,105:86-90.
- [14] LIN Y S, YE H J A. GaN-based light-emitting diodes grown on nanoscale patterned sapphire substrates with void-embedded cortex-like nanostructures [J]. *Appl. Phys. Express*, 2011,4(9):092103-1-3.
- [15] UEDA K, TSUCHIDA Y, HAGURA N, et al.. High performance of GaN thin films grown on sapphire substrates coated with a silica-submicron-sphere monolayer film [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008,92(10):101101-1-3.
- [16] LI Q M, FIGIEL J J, WANG G T. Dislocation density reduction in GaN by dislocation filtering through a self-assembled monolayer of silica microspheres [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009,94(23):231105-1-3.
- [17] HEYING B, WU X H, KELLER S, et al.. Role of threading dislocation structure on the X-ray diffraction peak widths in epitaxial GaN films [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996,68(5):643-645.
- [18] SRIKANT V, SPECK J S, CLARKE D R. Mosaic structure in epitaxial thin films having large lattice mismatch [J]. *J. Appl. Phys.*, 1997,82(9):4286-4295.
- [19] WANG M T, LIAO K Y, LI Y L. Growth mechanism and strain variation of GaN material grown on patterned sapphire substrates with various pattern designs [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2011,23(14):962-964.
- [20] GRADEČAK S, STADELMANN P, WAGNER V, et al.. Bending of dislocations in GaN during epitaxial lateral overgrowth [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004,85(20):4648-4650.
- [21] SCHENK H P D, VENNÉGUÈS P, TOTTEREAU O, et al.. Three-dimensionally nucleated growth of gallium nitride by low-pressure metalorganic vapour phase epitaxy [J]. *J. Cryst. Growth*, 2003,258(3-4):232-250.
- [22] WANG H Y, XU H, HUANG T T, et al.. Thermodynamics of wurtzite GaN from first-principle calculation [J]. *Eur. Phys. J. B*, 2008,62(1):39-43.
- [23] WEBER M J. *Handbook of Optical Materials* [M]. Florida: CRC Press, 2003.
- [24] PALIK E D. *Handbook of Optical Constants of Solids* [M]. Washington: Academic Press, 1985.
- [25] BENISTY H, STANLEY R, MAYER M. Method of source terms for dipole emission modification in modes of arbitrary planar structures [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1998,15(5):1192-1201.



李思宏(1996-),男,福建漳州人,硕士研究生,2018年于福建工程学院获得学士学位,主要从事半导体光电子材料和器件的研究。
E-mail: Lisihongxmu@163.com



罗学涛(1964-),男,湖北麻城人,博士,教授,博士研究生导师,1996年于西北工业大学获得博士学位,主要从事半导体光电子材料和器件的研究。
E-mail: xuetao@xmu.edu.cn