文章编号：1000-7032(2026)10-1894-09

基于液体封装的近紫外正装LED光提取效率提升

李帅飞[1]，郝林波[2]，郭亚楠[3,4*]，苏栋梁[1]，雷 程[1]，梁 庭[1]，
刘乃鑫[3,4]，王军喜[3,4]，李晋闽[1,3,5*]，闫建昌[3,4*]

（1. 中北大学 宽禁带半导体超越照明材料与技术全国重点实验室，山西 太原 030051；
2. 山西大学 光量子技术与器件全国重点实验室，山西 太原 030006；
3. 中国科学院半导体研究所 宽禁带半导体研发中心，北京 100083；
4. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院，北京 100049；
5. 山西中科潞安紫外光电科技有限公司，山西省半导体深紫外技术创新中心，山西 长治 046000）

摘要：低光提取效率是制约近紫外正装LED性能的瓶颈因素。本文基于一种紫外高透、高黏度氟基油性封装材料，系统探讨了液体封装形式、蓝宝石衬底厚度及芯片尺寸对近紫外正装LED光输出特性的影响规律。仿真与实验结果表明，芯片级液体杯状封装形式能有效缓解芯片表面和衬底侧壁的全反射效应，并诱导逸出光线重新定向到石英半球透镜中心附近，从而使光提取效率最大化。此外，减薄蓝宝石衬底和增加芯片尺寸都有利于诱导芯片内部光线向上传播，从而减少封装支架的光吸收损耗，改善光提取效率。经系统优化，近紫外正装LED芯片的光输出功率密度和外量子效率分别提升了70.55%和70.25%。这些结果将为推动高效率近紫外正装LED器件的发展提供重要参考。

关 键 词：近紫外LED；正装芯片；液体封装；光提取效率；蓝宝石衬底
中图分类号：TN312.8 **文献标识码：**A
DOI：10.3724/CJL.20260137 **CSTR：**32170.14.CJL.20260137

Light Extraction Efficiency Enhancement of Near Ultraviolet Face-up LEDs Using Liquid Packaging

LI Shuaifei[1], HAO Linbo[2], GUO Yanan[3,4*], SU Dongliang[1], LEI Cheng[1], LIANG Ting[1],
LIU Naixin[3,4], WANG Junxi[3,4], LI Jinmin[1,3,5*], YAN Jianchang[3,4*]

(1. *State Key Laboratory of Widegap Semiconductor Optoelectronic Materials and Technologies, North University of China, Taiyuan* 030051, *China*;
2. *State Key Laboratory of Quantum Optics Technologies and Devices, Shanxi University, Taiyuan* 030006, *China*;
3. *Research and Development Center for Wide Bandgap Semiconductors, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100083, *China*;
4. *College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*;
5. *Shanxi Semiconductor Deep Ultraviolet Technology Innovation Center, Advanced Ultraviolet Optoelectronics Company Ltd, Changzhi* 046000, *China*)

* *Corresponding Authors, E-mail: ynguo@semi.ac.cn; jmli@semi.ac.cn; yanjc@semi.ac.cn*

Abstract: The low light extraction efficiency (LEE) has become a bottleneck factor limiting the performance of near ultraviolet (NUV) face-up light-emitting diodes (LEDs). In this study, we systematically investigated the influence of liquid encapsulation configuration, sapphire substrate thickness, and chip size on the optical output characteristics

收稿日期：2026-04-15；**修订日期：**2026-05-05
基金项目：国家重点研发计划(2023YFB3609700)；国家自然科学基金(62135013, 62274163, 62234001)；北京市科技新星计划(20230484466)；中国科学院青年创新促进会(2023123)；三晋英才计划“杰出人才项目”(1012502)
Supported by National Key R & D Program of China(2023YFB3609700); National Natural Science Foundation of China (62135013, 62274163, 62234001); Beijing Nova Program (20230484466); Youth Innovation Promotion Association CAS (2023123); The “Outstanding Talent Project” of the Sanjin Talent Program (1012502)

of NUV face-up LEDs utilizing a new kind of fluorine-based oil encapsulation material with high ultraviolet transmittance and high viscosity. Both simulation and experimental results demonstrate that the chip-level liquid cup packaging can effectively mitigate total internal reflection at the chip surface and substrate sidewalls, and redirect escaped light toward the center of the quartz hemispherical lens, thereby maximizing LEE. Furthermore, thin sapphire substrate and large chip size can facilitate upward propagation of light within the chip, thus reducing optical absorption losses in the bracket dam and enhancing LEE. After the systematic optimization, the light output power density and external quantum efficiency (EQE) of the NUV face-up LED chip are improved by 70.55% and 70.25%, respectively. These findings provide critical insights for developing high-efficiency NUV face-up LED devices.

Keywords: near ultraviolet light-emitting diode; face-up chip; liquid packaging; light extraction efficiency; sapphire substrate

1　引　　言

GaN 基紫外发光二极管(Light-emitting diode, LED)具有无汞污染、小巧便携、功耗低、寿命长、光谱纯净、开关速度快、易于集成等优点,依据不同的波长在工业制造、医疗卫生等领域有着广泛的应用,被视为替代汞灯等传统紫外光源的理想选择[1-3]。其中,365~370 nm 波段的近紫外 LED 可用于光固化[4]、水消毒[5]、圆锥角膜疾病治疗[6]等领域,受到了广泛关注。目前,该波段紫外 LED 的外量子效率(External quantum efficiency, EQE)报道值普遍在 30%~60%[7-11],与商业化 GaN 基蓝光 LED 超过 80% 的 EQE[12]相比还存在较大差距。决定 EQE 的因素包括内量子效率(Internal quantum efficiency, IQE)和光提取效率(Light extraction efficiency, LEE)。随着 GaN 和低 Al 组分 AlGaN 的外延生长技术[13-17]、掺杂方法[18-20]和量子阱结构设计[21-22]的研究突破,近紫外 LED 的 IQE 已得到显著提升。华南师范大学 He 等通过优化量子阱中最后一个势垒层的 Al 组分,研制的 365 nm 近紫外 LED 的 IQE 达到 80%[23]。因此,LEE 成为限制近紫外 LED 发光效率的瓶颈因素。一方面,p-GaN 空穴注入层和电极材料对有源区辐射的近紫外光有较强的光吸收;另一方面,GaN 基外延层与衬底、空气介质存在较大的折射率差,光在各界面上发生严重的全反射。这些问题共同导致近紫外 LED 的光提取效率低。

近紫外 LED 器件形式主要包括正装、倒装与薄膜三类。其中,正装器件凭借工艺成熟且简单、设计灵活、良率高、制造成本低等核心优势,在中低功率密度应用中保持显著竞争优势;但其光提取效率相对其他两种器件形式更低。研究人员发展了多种技术路线来提升近紫外正装 LED 的光提取效率。为减少 p 侧的光吸收,韩国高丽大学 Seong 等[24]采用薄 ITO/Ag 纳米线的组合替代传统 ITO 电极,电极透过率达到 97%,384 nm 近紫外 LED 器件的光输出功率(Light out power, LOP)提高了 14%。华南理工大学 Tan 等[25]制备了新型 ITO/Ag/Ga_2O_3 复合透明电极,其在 365 nm 处的透过率达到 86.7%,器件的 LOP 提高了 19.8%,同时正向工作电压降低 0.34 V。为缓解各界面的全反射问题,武汉大学 Zhou 等[10]制备了混合二氧化硅阵列的蓝宝石图形化衬底(Patterned sapphire with silica array, PSSA),与常规图形化蓝宝石器件相比,AlGaN/PSSA 的反射率和透射率分别提升了 10.2% 和 15.8%,有效改善了芯片顶部和底部逃逸光线的提取效率,368 nm 正装 LED 的 EQE 提高了 26.1%。中国科学院宁波材料所 Guo 等[26]采用侧壁全反射结构结合纳米图形化衬底或表面光子晶体微结构的设计方案,减少了器件内部高阶谐振模式的同时增强了 TM 模式偏振光提取,使器件光提取效率从 36% 提高到 57.3%。中国台湾中兴大学 Huang 等[27]在 p-GaN 层上继续外延了具有不同纹理结构的重掺杂 p-GaN 层,并对其进行表面粗化以增加光子逃逸概率,随着表面粗糙度从平面结构的 1.61 nm 增加到锥形凸起纹理结构的 181 nm,器件的 LOP 提升了 31.6%。西安电子科技大学 Yue 等[28]制备了 p-GaN 纳米柱阵来减少 p-GaN 层的光吸收,并利用纳米柱阵列的光导作用增加出光效率,器件 LOP 提高了 23.61%。在芯片周围引入折射率渐变材料来替代空气介质,也能有效改善全内反射问题[29-30]。厦门大学康闻宇等[31]设计了氟树脂紧密结合石英透镜的封装结构,有效缓解了光线出射时的全内反射损失问题,250 nm 深紫外倒装 LED 的出光强度提升了 28%。山西大学 Hao 等[32]发展了基于耐紫外辐照、高粘

度氟基油性材料的芯片级新型液体光反射杯封装技术，将 275 nm 波段深紫外倒装 LED 的 LOP 和电光转换效率（Wall-plug efficiency，WPE）分别提高了 62.9% 和 63.6%，峰值 WPE 达到 15%。通过氟基液体封装技术来提升器件出光效率的研究工作主要集中在深紫外倒装 LED 领域，由于正装、倒装 LED 器件在光传播路径上存在显著差异，该技术对于近紫外正装 LED 性能的影响尚未得到验证和讨论。

本文采用仿真和实验相结合的方法，系统研究了液体封装形式、蓝宝石衬底厚度和芯片尺寸对近紫外正装 LED 光提取效率的影响规律。发现采用液体光反射杯的封装形式可将光线重新定向到石英半球透镜的中心，从而将出光效率最大化；进一步减薄衬底和增加芯片尺寸，能降低经由衬底侧壁向下出射的光线比例，从而减少了封装支架的光吸收、增加出光效率。相较于环境介质为空气的器件，经过对衬底厚度和芯片尺寸优化后的液体封装近紫外正装 LED 芯片的 EQE 提高了 70.25%。

2 实 验

2.1 样品制备

采用金属有机化学气相沉积设备，在蓝宝石衬底上生长 GaN 基近紫外 LED 外延结构，自下而上包括 AlN 缓冲层、3 μm 的 n-$Al_{0.15}Ga_{0.85}N$、8 周期 GaN/AlGaN 多量子阱有源区，10 nm 的 p-$Al_{0.25}Ga_{0.75}N$ 电子阻挡层和 20 nm 的 p-GaN 层，中心发光波长为 365 nm。经过标准正装芯片工艺后，将蓝宝石衬底减薄至不同厚度（150 μm，200 μm，250 μm，300 μm，400 μm）并抛光，之后在衬底背面沉积 500 nm 厚的 Al 金属作为反射镜。采用皮秒激光隐形切割技术得到尺寸为 15 mil × 15 mil（1 mil=25.4 μm）的芯片，然后使用硅胶将芯片固定在 6.8 mm × 6.8 mm 的陶瓷基板上，并从芯片的 n、p 型加厚电极处引出金线到支架的对应电极上。在芯片正面滴涂一定体积的新型氟基油性封装材料，最后将石英半球透镜粘结在支架上。如图 1 所示，该氟基油性材料在 365 nm 以上近紫外波段的透过率超过 89%，在 365 nm 处的折射率约为 1.3。

通过控制液体的用量，形成如图 1 所示的四种封装形式。作为对照，Device 1 不填充该液体封装材料，即芯片周围的环境介质为空气。当液体滴涂量较少时，它被限制在芯片的上表面和石英透镜之间，形成 Device 2 结构。随着液体滴涂量增加，它开始流向蓝宝石衬底的侧壁，在液-固界面附着力、液体表面张力、衬底侧壁激光改性微纳结构的毛细吸附力、液体内部粘性阻力及重力的共同作用下，形成杯状结构（Device 3）。当液体完全填充支架与石英透镜之间的空隙时，形成 Device 4 结构。

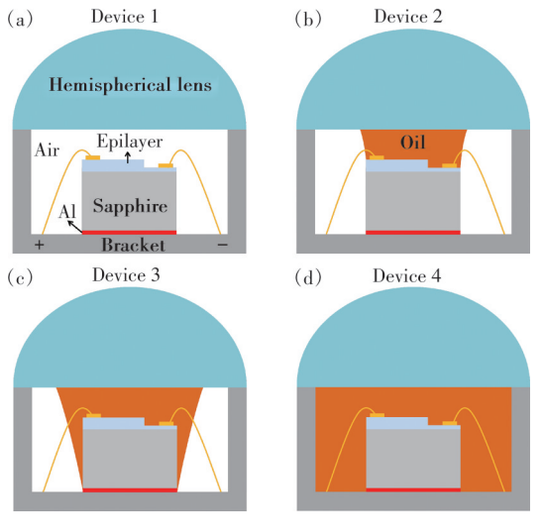

图 1 四种封装结构示意图：(a)无液体填充的 Device 1，(b)仅芯片上表面有液体的 Device 2，(c)液体环绕在芯片周围、呈现杯状外观的 Device 3，和(d)完全填充液体的 Device 4

Fig.1 Schematic diagrams of four packaging structures: (a) Device 1 without liquid, (b) Device 2 with liquid only on the chip top, (c) Device 3 with a liquid cup around the chip, and (d) Device 4 completely filled with liquid

2.2 样品表征

采用 PCE-2000UV 紫外 LED/模组辐射测试系统和 ATA-500LED 自动温控光电分析测量系统获得近紫外正装 LED 封装器件的光输出特性，波长采集范围为 200~450 nm，光谱分辨率 0.1 nm。采用 GO-SPEX200 紫外空间辐射分布测量系统测试近紫外正装 LED 封装器件的远场分布特性，采集电流设置为 40 mA。所有测试均在室温、电流连续注入下完成。

2.3 光学仿真

采用蒙特卡罗光线追迹法模拟近紫外正装 LED 封装器件的光提取特性。近紫外正装 LED 芯片的主流封装形式仍为半无机结构，其典型构成包括芯片、透明石英盖板（或半球透镜）以及两者之间的接触介质层[33]。当接触介质由空气变为氟基油性液体时，外延层与接触介质的逃逸光锥半角 θ_{top} 从 22.61° 增大到 30°，衬底侧壁的逃逸光锥半角 θ_{side} 从 34.18° 增加到 46.92°。因此，在近

紫外正装 LED 芯片的周围填充氟基油性液体可缓解全反射问题，有望大幅提升光提取效率。

根据芯片和封装支架的实际尺寸，1∶1 建立仿真模型。蓝宝石衬底背面设置 Al 反射镜，反射率为 90%；封装支架的围坝表面和底面表面分别设置为铜和金，反射率分别为 42% 和 36.7%，围坝深度为 500 μm。各主要功能层的厚度、折射率与光吸收系数设置如表 1 所示。光源设置为朗伯面光源，光提取效率定义为光源发射至自由空间的光通量与光源发出的总光通量之比。

表 1　仿真模型中设置的各层厚度、折射率与光吸收系数

Tab. 1　Thickness, refractive index and optical absorption coefficient for each layer in the simulation model

材料	厚度/nm	折射率	吸收系数/cm^{-1}
n/p 加厚电极	200	0.398 7	1.51×10^{6}
ITO	70	2.098 7	1
p-GaN	20	2.73	10
电子阻挡层	10	2.51	0
有源区薄层	130	2.9	100
n-AlGaN 层	1 000	2.52	0
蓝宝石衬底	2.5×10^{5}~4×10^{5}	1.78	0
Al 反射镜	500	0.398 7	1.51×10^{6}
石英半球透镜	2.8×10^{6}	1.43	0
氟基油性液体	—	1.3	0

3　结果与讨论

3.1　液体封装形式的影响

图 2 展示了四种封装形式的光提取效率仿真结果，其中近紫外正装 LED 芯片的蓝宝石衬底的厚度统一设置为 400 μm。对于 Device 1，由于外延层、蓝宝石与空气介质之间存在较大的折射率差，光线被限制在芯片内部无法出射，光提取效率仅 22.81%。在近紫外正装 LED 芯片的正面以及侧壁分别覆盖氟基油性液体后，界面全反射效应缓解，Device 2、3 和 4 的光提取效率分别达到 30.51%、32.13% 和 31%，相较于 Device 1 分别提升了 33.75%、40.86% 和 35.9%。此外，Device 4 以大角度出射光线的比例明显增加，远场更为发散。

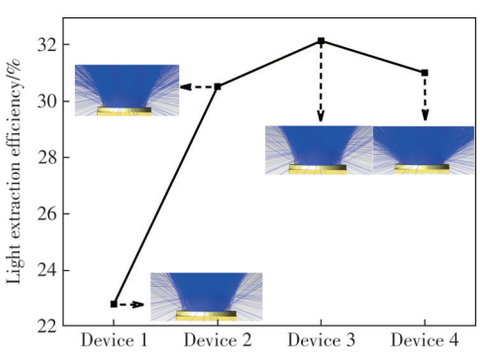

图 2　采用蒙特卡罗光线追迹法仿真的 Device 1~4 的光提取效率和光线出射图

Fig.2　Simulated light extraction efficiency and light ray diagrams of Device 1–4 using the Monte Carlo ray tracing method

图 3(a)呈现了采用不同封装形式的近紫外正装 LED 器件的 LOP 和电压随注入电流的变化规律，衬底厚度均为 400 μm。当注入电流为 70 mA 时，Device 1~4 的 LOP 分别为 12.87 mW、15.49 mW、19.36 mW 和 17.25 mW，对应的 EQE 分别为 5.58%、6.68%、8.33% 和 7.42%。与 Device 1 相比，Device 2~4 的 LOP 分别提升了 20.35%、50.43%、34.03%。四种封装形式下，各器件的 *I-V* 特性曲线基本重合，70 mA 下的工作电压均为 3.8 V。由于四种器件的外延结构、芯片工艺及驱动方式完全一致，LOP 和 EQE 的差异源于封装形式引起的 LEE 变化。实验的 LOP 与仿真的 LEE 随封装形式的变化趋势一致，证实了仿真模型的可信度。图 3(b)为四种器件的远场分布特性，Device 1~4 的发散角分别为 60.3°、65°、62.7°、81.4°，即采用液体封装后器件的远场发散角均有不同程度的增加。图 3(c)给出了 Device 3 与 4 内部的典型光线传播示意图，Device 3 的液体杯状封装结构在缓解界面全反射效应的同时，还能引导逃逸光线向透镜中心汇聚，因此发射角相对于 Device 1 有所增加但又小于 Device 2 和 Device 4；而 Device 4 的全液体介质使得衬底侧壁出射的光线更偏离透镜中心，传播方向更为发散，这一定程度上也增加了出射光线被封装支架侧壁吸收的概率以及在透镜外表面发生全反射的概率，因此出光效率相较于 Device 3 略有下降。图 3(d)展示了四种封装器件在 2 mA 下点亮的光学显微镜图像，可以看到，Device 3 芯片周围的光强明显高于其他三种器件，形成了“光反射杯”。

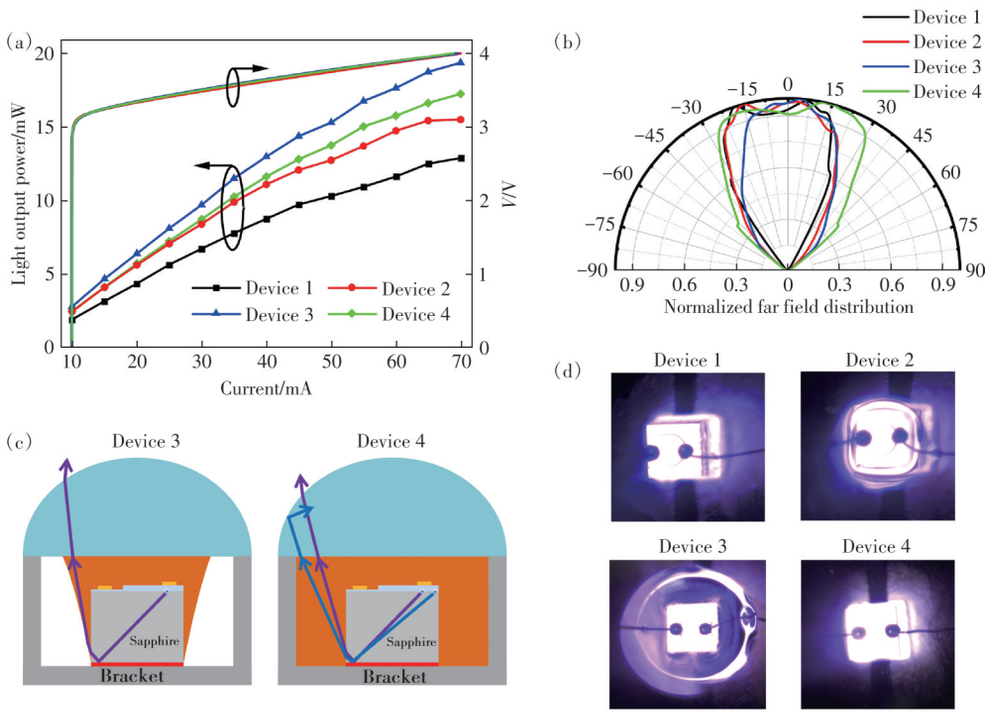

图 3 四种封装形式的近紫外正装 LED 的(a)实测器件 LOP、电压与电流的关系，衬底厚度均为 400 μm；(b)四种封装结构的归一化远场分布；(c)Device 3 与 Device 4 内部的典型光传播示意图；(d)在 2 mA 注入电流下的四种器件发光显微镜图

Fig.3 (a)Experimentally measured LOP and voltage as a function of the injection current for near-ultraviolet face-up LEDs with four packaging structures, all with a chip size of 15 mil × 15 mil × 400 μm. (b)Normalized far-field distributions of four packaging structures. (c)Schematic diagrams of representative light propagation in Device 3 and Device 4. (d)Light emission microscopy images of four devices under an injection current of 2 mA

为了直观反映衬底侧壁出射光线相对于半球透镜中心的偏移程度对光提取效率的影响，我们将近紫外正装 LED 芯片固定在封装支架的不同位置(图 4 插图)并分别进行类似 Device 3 和 Device 4 的封装，透镜也分别采用半球透镜和平板透镜做对比。如图 4 所示，当使用半球透镜时，随着芯片与透镜中心的水平距离增加，LOP 迅速减小，且 Device 3 的 LOP 总是高于 Device 4，这些现象主要源于半球透镜外表面全反射几率增加。当使用平板透镜时，随着芯片与透镜中心的水平距离增加，Device 3 的 LOP 基本不受影响，而 Device 4 的 LOP 略有下降，表明封装支架引起的光吸收损耗略有增加。因此，使用液体杯状封装形式和半球透镜组合，能将逸出光线汇聚至半球透镜中心附近，从而显著提升紫外 LED 正装器件的光提取效率。

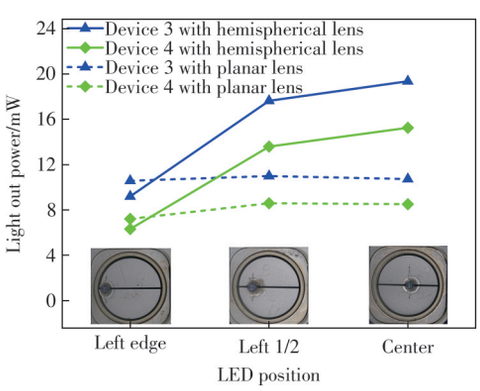

图 4 采用半球透镜或平板透镜封装器件的 LOP 随芯片-支架中心距离的变化，工作电流为 70 mA

Fig.4 Variation of LOP at 70 mA with the chip-bracket center distance for devices packaged with hemispherical lens or planar lens

3.2 蓝宝石衬底厚度的影响

考虑到衬底减薄后较难控制形成稳定的 Device 3 杯状外观结构，本节基于 Device 4 封装形式继续探究蓝宝石衬底厚度对器件光输出特性的影响规律。如图 5(a)所示，随着蓝宝石衬底减薄，LOP 呈上升趋势。当注入电流为 70 mA 时，衬底厚度为 150 μm 的近紫外正装 LED 器件的 LOP 和 EQE 分别为 23.19 mW、9.96%，与衬底厚度为 400 μm 的器件相比分别提升了 34.46% 和 34.95%。随着衬底厚度减薄，各器件的 *I*-*V* 特性曲线基本重

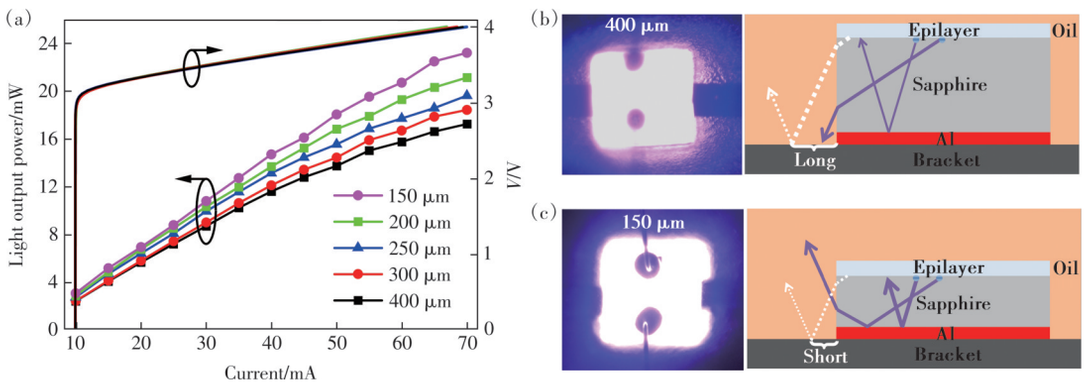

图 5　不同蓝宝石厚度的近紫外正装 LED：(a)实测 LOP、电压与电流的关系，(b)厚蓝宝石和(c)薄蓝宝石结构的发光图像和光传播路径示意图

Fig.5　Near-ultraviolet face-up LEDs with different sapphire thicknesses: (a)Experimentally measured LOP and voltage as function of current. Light emission microscopy images and schematic diagrams of light propagation paths in LEDs with (b) thick and (c)thin sapphire substrates

合，70 mA 下的工作电压均为 3.8 V。因此，器件薄芯片性能的改善主要归因于衬底内部光传播路径的改变。如图 5(b)、(c)所示，对于厚衬底芯片，从有源区向下辐射的光线经由衬底侧壁向下逸出的几率较高，被底部支架部分反射，且更加远离半球透镜的中心，进一步降低光提取效率；对于薄衬底芯片，从有源区向下辐射的光线经由衬底背面 Al 反射镜反射后，转向外延层正面或从衬底侧壁向上出射的概率增加，衬底支架的吸收相对较少，且逸出光线与半球透镜中心的距离更近。从紫外 LED 的点亮图像可以清楚地观察到，衬底厚度为 150 μm 的器件在支架底部的亮区范围和光强度均明显小于衬底厚度为 400 μm 器件。这意味着采用薄的衬底厚度可有效减少支架底面金属材料的光吸收，从而提高光提取效率。如图 6 所示，随着衬底厚度从 400 μm 减薄至 150 μm，器件远场发散角从 81.4°小幅增加至 89.6°，远场强度也逐渐升高。此外，随着衬底厚度减薄，芯片散热能力也会得到改善。

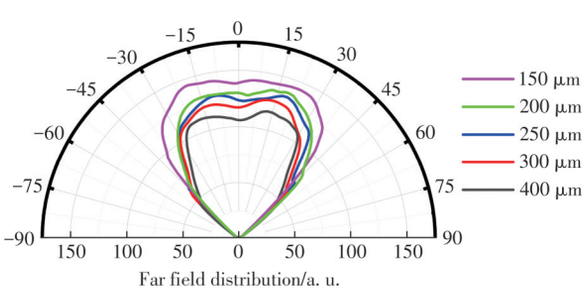

图 6　不同衬底厚度的远场分布测试

Fig.6　Characterization of the far-field distribution as a function of substrate thickness

图 7 模拟了支架底面覆盖材料的反射率对近紫外正装 LED 器件光提取效率的影响。随着支架表面材料的光吸收系数增加，LED 器件的光提取效率快速降低，且具有厚衬底的器件的光提取效率下降幅度更大。当支架表面材料为完美反射镜时，衬底厚度对器件光提取效率的影响几乎可以忽略。这些趋势证实了我们的猜测。薄的衬底以及衬底背面、封装支架表面的高反射镜策略，有利于最大化光提取效率。

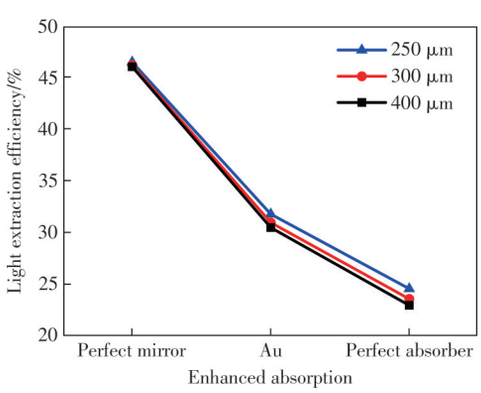

图 7　模拟的具有不同支架底面覆盖材料的 LED 光提取效率

Fig.7　Simulated LEEs of LEDs with different cover materials on the bracket bottom

3.3　芯片尺寸的影响

前文的分析表明，封装形式和衬底厚度的变化主要影响有源区向下辐射光线的传播路径，将有源区向下辐射的光线更多地引导到蓝宝石衬底底部的反射镜、而不是衬底侧壁是提高正装芯粒光提取效率的关键。增加芯片的尺寸，如图 8(a)所示，理论上也可以达到类似的效果。随着芯片

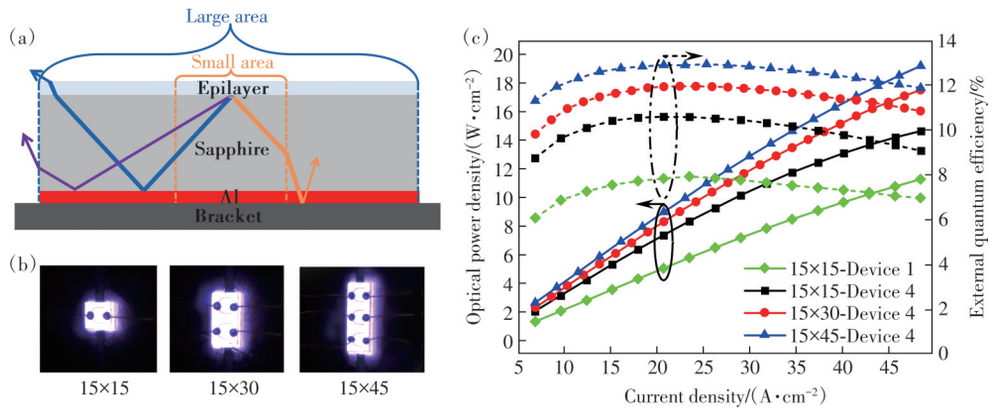

图 8 (a)光线随芯粒面积增大的传播路径示意图;(b)不同物理尺寸的近紫外正装 LED 点亮图,器件尺寸分别为 15 mil × 15 mil × 250 μm、15 mil × 30 mil × 250 μm 和 15 mil × 45 mil × 250 μm;(c)不同芯片尺寸对应的光功率密度、EQE 与电流密度的关系。

Fig.8 (a) Schematic diagram of light propagation paths as the chip area increases. (b) Light emission images of near-ultraviolet face-up LEDs with different physical dimensions, specifically 15 mil × 15 mil × 250 μm, 15 mil × 30 mil × 250 μm, and 15 mil × 45 mil × 250 μm, respectively. (c) Measured optical power density and EQE as a function of the current density for LEDs with different sizes

尺寸增大,有源区向下辐射的光线直接抵达底部反射镜的概率增加。这些光线经底部反射镜二次定向后转变为向上传输,最终从芯片正面或衬底侧壁出射的几率增加,从而显著提升芯片的出光效率。将衬底厚度固定为 250 μm,封装了尺寸等效为 15 mil × 15 mil 的单颗芯片和 15 mil × 30 mil、15 mil × 45 mil 的并联芯片。各封装器件点亮后的光学显微镜图像如图 8(b)所示。图 8(c)展示了各封装器件的光功率密度、EQE 与注入电流密度的关系。随着芯片尺寸增加,三种器件的峰值 EQE 分别为 10.57%、11.93% 和 12.91%,对应光功率密度分别为 7.33,8.97,10.96 W/cm^2。15 mil × 45 mil 的并联正装芯片展现出最高的光功率密度和 EQE。当注入电流密度为 48.47 A/cm^{2}时,光功率密度、EQE 从无液体填充单颗芯片(15 mil × 15 mil-Device 1)的 11.24 W/cm^2、6.96% 提高到液体全填充封装并联芯片的 19.17 W/cm^2、11.85%,提升幅度达到 70.55%、70.25%。继续减薄衬底厚度及采用方形大尺寸芯片设计,将有助于进一步改善器件的发光效率。

如前文所述,近紫外正装 LED 器件的发光效率随衬底减薄和芯片尺寸增加而增大,这与深紫外倒装 LED 的发光效率随衬底加厚和芯片尺寸减小而增加的变化趋势[32]截然相反。这是因为对于正装 LED,调控衬底厚度和芯片尺寸主要影响从有源区直接向下辐射到底部反射镜和经衬底侧壁向下辐射光线占比,减小衬底的厚度和增加芯片的尺寸有助于增强前者的占比,进而增强光子被反射到芯片正面逃逸的几率,并减少封装支架的光吸收;而对于倒装 LED,调控衬底厚度和芯片尺寸主要影响从有源区直接向衬底背面辐射和经衬底侧壁向上辐射光线占比,增加衬底的厚度和减小芯片的尺寸有助于增加后者的占比,在液体封装的作用下提高衬底侧壁的光子逃逸几率,并有效缓解衬底背面的全内反射。

4 结 论

本工作系统地研究了氟基液体封装形式、蓝宝石衬底厚度和芯片面积对近紫外正装 LED 芯片光输出特性的影响。仿真和实验结果证实,采用芯片级液体杯状封装形式可有效提升近紫外正装 LED 芯片的光提取效率,与无液体填充器件相比,LOP 和 EQE 分别提高了 50.43% 和 49.28%。这主要得益于芯片上表面与侧壁全内反射效应的缓解,且液体杯状结构的倾斜侧壁可使光线重定向到石英半球透镜的中心附近。而采用全油填充封装形式的正装 LED 芯片的 EQE 因封装支架的表面光吸收损耗和透镜表面全反射几率的增加而略有下降。此外,薄且大尺寸的芯片设计能促使从有源区向下辐射的光线被有效反射到正面出射,从而减少封装支架的光吸收。经优化,芯片尺寸为 15 mil × 45 mil × 250 μm 的近紫外正装 LED 芯片在 48.47 A/cm^{2}电流密度下的光功率密度和

外量子效率分别提高了 70.55% 和 70.25%。这些结果将为推动高效率近紫外正装 LED 器件的发展提供了重要参考。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址：http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.3724/CJL.20260137

参 考 文 献：

[1] SORO A B, SHOKRI S, NICOLAU-LAPEÑA I, *et al*. Current challenges in the application of the UV-LED technology for food decontamination [J]. *Trends Food Sci. Technol.*, 2023, 131: 264-276.

[2] SHARMA V K, DEMIR H V. Bright future of deep-ultraviolet photonics: emerging UVC chip-scale light-source technology platforms, benchmarking, challenges, and outlook for UV disinfection [J]. *ACS Photonics*, 2022, 9(5): 1513-1521.

[3] 李晋闽，闫建昌，郭亚楠，等. 紫外LED研究进展 [J]. 科技导报, 2021, 39(14): 30-41.
LI J M, YAN J C, GUO Y N, *et al*. Recent progress of ultraviolet light-emitting diodes [J]. *Sci. Technol. Rev.*, 2021, 39(14): 30-41. (in Chinese)

[4] MURAMOTO Y, KIMURA M, NOUDA S. Development and future of ultraviolet light-emitting diodes: UV-LED will replace the UV lamp [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2014, 29(8): 084004.

[5] SONG K, MOHSENI M, TAGHIPOUR F. Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: a review [J]. *Water Res.*, 2016, 94: 341-349.

[6] FAN L, JUNG O, HERRMANN M, *et al*. Deciphering UVA/riboflavin collagen crosslinking: a pathway to improve biomedical materials [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(33): 2401742.

[7] MORITA D, YAMAMOTO M, AKAISHI K, *et al*. Watt-class high-output-power 365 nm ultraviolet light-emitting diodes [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2004, 43(9R): 5949.

[8] OH J T, MOON Y T, KANG D S, *et al*. High efficiency ultraviolet GaN-based vertical light emitting diodes on 6-inch sapphire substrate using *ex-situ* sputtered AlN nucleation layer [J]. *Opt. Express*, 2018, 26(5): 5111-5117.

[9] LIN B C, CHIU C H, LEE C Y, *et al*. Performance enhancement of GaN-based flip-chip ultraviolet light-emitting diodes with a RPD AlN nucleation layer on patterned sapphire substrate [J]. *Opt. Mater. Express*, 2014, 4(8): 1632-1640.

[10] HU H P, TANG B, WAN H, *et al*. Boosted ultraviolet electroluminescence of InGaN/AlGaN quantum structures grown on high-index contrast patterned sapphire with silica array [J]. *Nano Energy*, 2020, 69: 104427.

[11] SUN X J, LIU J X, ZHAN X N, *et al*. Watt-class 368 nm UVA light-emitting diode grown on Si with a polarization-doped electron blocking layer [J]. *Opt. Express*, 2026, 34(4): 6941-6947.

[12] NARUKAWA Y, ICHIKAWA M, SANGA D, *et al*. White light emitting diodes with super-high luminous efficacy [J]. *J. Phys.* D: *Appl. Phys.*, 2010, 43(35): 354002.

[13] ZHANG Z Y, WANG J M, XU F J, *et al*. Stacking Ⅲ-nitride ultraviolet-B light emitters with high efficiency *via* a lattice-engineered architecture [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37(42): e08380.

[14] LI Y F, HU X T, SONG Y M, *et al*. The influence of temperature of nitridation and AlN buffer layer on N-polar GaN [J]. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 2022, 141: 106423.

[15] MEHNKE F, FISCHER A M, XU Z Y, *et al*. Realizing crack-free high-aluminum-mole-fraction AlGaN on patterned GaN beyond the critical layer thickness [J]. *J. Appl. Phys.*, 2022, 131(7): 073103.

[16] STANISHEV V, ARMAKAVICIUS N, GOGOVA D, *et al*. Low Al-content *n*-type $Al_xGa_{1-x}N$ layers with a high-electron-mobility grown by hot-wall metalorganic chemical vapor deposition [J]. *Vacuum*, 2023, 217: 112481.

[17] ZHAO Y, XU S R, FENG L S, *et al*. The performance improvement of AlGaN/GaN heterojunction by using nano-patterned sapphire substrate [J]. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 2022, 143: 106535.

[18] HE R, LIU N X, GAO Y Q, *et al*. Monolithically integrated UVC AlGaN-based multiple quantum wells structure and photonic chips for solar-blind communications [J]. *Nano Energy*, 2022, 104: 107928.

[19] JIANG K, SUN X J, SHI Z M, *et al*. Quantum engineering of non-equilibrium efficient p-doping in ultra-wide band-gap nitrides [J]. *Light Sci. Appl.*, 2021, 10(1): 69.

[20] WANG J M, WANG M X, XU F J, *et al*. Sub-nanometer ultrathin epitaxy of AlGaN and its application in efficient doping [J]. *Light Sci. Appl.*, 2022, 11(1): 71.

[21] USMAN M, MUSHTAQ U, MUNSIF M, *et al*. Enhancement of the optoelectronic performance of p-down multiquantum

well N-GaN light-emitting diodes [J]. *Phys. Scr.*, 2019, 94(10): 105808.

[22] SAHAR M A A ZMD, HASSAN Z, NG S S, *et al*. Highly efficient near ultraviolet LEDs using InGaN/GaN/$Al_xGa_{1-x}N$/GaN multiple quantum wells at high temperature on sapphire substrate [J]. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 2023, 156: 107298.

[23] HE L F, ZHAO W, ZHANG K, *et al*. Performance enhancement of AlGaN-based 365 nm ultraviolet light-emitting diodes with a band-engineering last quantum barrier [J]. *Opt. Lett.*, 2018, 43(3): 515-518.

[24] PARK J S, KIM J H, KIM J Y, *et al*. Hybrid indium tin oxide/Ag nanowire electrodes for improving the light output power of near ultraviolet AlGaN-based light-emitting diode [J]. *Curr. Appl. Phys.*, 2016, 16(5): 545-548.

[25] WANG H, XIE Z J, LIANG S W, *et al*. Improving in light power of AlGaN-based UV-LED with ITO/Ag/Ga_2O_3 as transparent conductive electrode [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2021, 33(5): 251-254.

[26] LI B M, XIA S H, GUO W, *et al*. Optimizing light extraction efficiency in inclined sidewall type ultraviolet light-emitting diodes with nanopatterned sapphire substrates and photonic crystals [J]. *Opt. Quantum Electron.*, 2024, 56(7): 1203.

[27] HUANG S C, WUU D S, WU P Y, *et al*. Improved output power of 400-nm InGaN/AlGaN LEDs using a novel surface roughening technique [J]. *J. Cryst. Growth*, 2009, 311(3): 867-870.

[28] YUE W K, LI P X, ZHOU X W, *et al*. Improvement in the output power of near-ultraviolet LEDs of p-GaN nanorods through SiO_2 nanosphere mask lithography with the dip-coating method [J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(8): 2009.

[29] 彭洋, 陈明祥, 罗小兵. 深紫外LED封装技术现状与展望 [J]. 发光学报, 2021, 42(4): 542-559.
PENG Y, CHEN M X, LUO X B. Status and perspectives of deep ultraviolet LED packaging technology [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(4): 542-559. (in Chinese)

[30] YAMADA K, FURUSAWA Y, NAGAI S, *et al*. Development of underfilling and encapsulation for deep-ultraviolet LEDs [J]. *Appl. Phys. Express*, 2015, 8(1): 012101.

[31] 康闻宇, 尹君, 黄家新, 等. 用于高效光提取的深紫外LED封装体设计与优化 [J]. 发光学报, 2025, 46(4): 553-564.
KANG W Y, YIN J, HUANG J X, *et al*. Design and optimization of highly efficient light extraction encapsulation for deep ultraviolet LEDs [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(4): 553-564. (in Chinese)

[32] HAO L B, GUO Y N, SU D L, *et al*. Effects of the substrate thickness and chip area on the light extraction efficiency of chip-scale liquid cup encapsulated AlGaN-based deep-ultraviolet light-emitting diodes [J]. *Opt. Express*, 2025, 33(23): 48299-48307.

[33] PENG Y, LIANG R L, MOU Y, *et al*. Progress and perspective of near-ultraviolet and deep-ultraviolet light-emitting diode packaging technologies [J]. *J. Electron. Packag.*, 2019, 141(4): 040804.

李帅飞(1999-),男,河南平顶山人,硕士研究生,2022年于许昌学院获得学士学位,主要从事氮化物材料生长和器件制备的研究。
E-mail: sz202319035@st. nuc. edu. cn

李晋闽(1957-),男,山西长治人,博士,研究员,1991年于中国科学院西安光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事氮化物宽禁带半导体材料与器件、深紫外LED材料与器件的研究。
E-mail: jmli@semi. ac. cn

郭亚楠(1989-),女,河南济源人,博士,副研究员,2017年于中国科学院半导体研究所获得博士学位,主要从事AlGaN基深紫外发光材料和器件的研究。
E-mail: ynguo@semi. ac. cn

闫建昌(1982-),男,山东菏泽人,博士,研究员,2009年于中国科学院半导体研究所获得博士学位,主要从事氮化物宽禁带半导体材料和器件、高效/新型紫外发光器件的研究。
E-mail: yanjc@semi. ac. cn