发 光 学 报
CHINESE JOURNAL OF LUMINESCENCE

文章编号：1000-7032(XXXX)XX-0001-19

无机荧光玻璃膜封装技术研究进展

叶美琪[1]，赵九洲[1]，王关凯[1]，张文浩[1]，陈明祥[2]，彭 洋[1*]

（1. 华中科技大学 航空航天学院，湖北 武汉 430074；
2. 华中科技大学 机械科学与工程学院，湖北 武汉 430074）

摘要：宽禁带半导体固态光源正朝着大电流、高功率、微型化等方向发展，传统有机荧光转换器因其固有的耐热性差、热导率低等问题，已成为制约大功率荧光转换发光二极管（Light-emitting Diode，LED）和激光二极管（Laser Diode，LD）光热性能与可靠性的核心瓶颈。荧光玻璃薄膜（Phosphor-in-Glass Film，PiGF）作为一种全无机荧光转换器，展现出热稳定性高、光色性能可调、成本低等优势，克服了传统有机转换器老化失效问题，在大功率荧光转换光电器件封装制造中具有良好的应用前景。本文综述了无机荧光玻璃膜封装技术的最新研究进展，涵盖PiGF转换器的材料组成、结构类型和制备工艺，探讨了大功率荧光转换LED用PiGF板级封装和芯片级封装技术以及高亮度荧光转换LD用PiGF透过型和反射型封装技术；同时，阐述了PiGF转换器及其封装技术的发展趋势与关键挑战，并对后续技术发展进行了展望。

关 键 词：固态光源；大功率光电芯片封装；荧光转换器；荧光玻璃膜
中图分类号：O482.31 **文献标识码：**A
DOI：10.3724/CJL.20260273 **CSTR：**32170.14.CJL.20260273

Research Progress in Inorganic Phosphor-in-Glass Film Packaging Technologies

YE Meiqi[1], ZHAO Jiuzhou[1], WANG Guankai[1], ZHANG Wenhao[1],
CHEN Mingxiang[2], PENG Yang[1*]

(1. *School of Aerospace Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan* 430074, *China*;
2. *School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan* 430074, *China*)

* *Corresponding Author, E-mail: ypeng@hust.edu.cn*

Abstract: Wide-bandgap semiconductor solid-state light sources are advancing toward higher drive currents, higher output powers, and further miniaturization. However, conventional organic phosphor converters suffer from intrinsic limitations such as poor thermal stability and low thermal conductivity, which have become major bottlenecks restricting the optical - thermal performance and long-term reliability of high-power phosphor-converted optoelectronic devices, including light-emitting diodes (LEDs) and laser diodes (LDs). Fluorescent glass film (Phosphor-in-Glass Film, PiGF), as an all-inorganic fluorescent converter, demonstrates advantages such as high thermal stability, tunable optical properties, and low cost. It overcomes the aging and failure issues of traditional organic converters and shows promising application prospects in the packaging and manufacturing of high-power fluorescent conversion optoelectronic devices. This review summarizes recent advances in inorganic PiGF packaging technologies, with particular emphasis on the material compositions, structural configurations, and fabrication processes of PiGF converters. The chip-on-board and chip-scale packaging technologies based on PiGF for high-power phosphor-converted LEDs are systematically discussed, together with transmissive and reflective PiGF packaging configurations for high-brightness phosphor-converted LDs. Furthermore, the development trends and key challenges of PiGF converters and their

收稿日期：XXXX-XX-XX；**修订日期：**XXXX-XX-XX
基金项目：国家自然科学基金（52475594）；湖北省自然科学基金（2026AFC0612）；武汉市重点研发计划（2025050102030007）
Supported by National Natural Science Foundation of China (52475594); Hubei Provincial Natural Science Foundation of China (2026AFC0612); Key Research and Development Program of Wuhan City (2025050102030007)

associated packaging technologies are analyzed, and perspectives on future technological developments are provided.

Keywords: solid-state light sources; high-power optoelectronic chip packaging; phosphor converter; phosphor-in-glass film

1 引 言

宽禁带半导体技术的发展推动固态光源向高功率、高亮度和微型化方向演进。以发光二极管(Light-emitting Diode, LED)和激光二极管(Laser Diode, LD)为代表的固态光源,已广泛应用于照明与显示[1-4]、生物医疗[5-6]及可见光通信[7-8]等领域。多数白光固态光源采用荧光转换发光方式,即通过蓝光或近紫外光激发荧光转换器,将部分短波光转换为长波荧光,并与剩余激发光混合形成白光。因此,荧光转换器的光学、热学和封装性能直接影响器件的发光效率、色度稳定性及服役寿命。传统荧光转换器多采用荧光粉与硅胶或环氧树脂复合的有机封装结构,具有工艺简单和易于成型等优势。然而,有机材料热导率较低,在高温和强光辐照下易发生黄化、老化、开裂甚至碳化[9-11]。同时,芯片焦耳热及荧光转换过程中的斯托克斯损耗和非辐射损耗会导致转换层内热量积聚和局部温升,进而引起荧光热猝灭、发光衰减及色坐标漂移。随着LED和LD功率密度不断提高,传统有机荧光转换器的热稳定性和封装可靠性已难以满足高功率器件需求,开发高导热、高稳定性的全无机荧光转换器成为重要研究方向[12-14]。

目前,全无机荧光转换材料主要包括荧光单晶、荧光陶瓷和荧光玻璃。荧光单晶具有较高的热导率和热稳定性,有利于高功率激发下的热耗散,但其制备周期长、工艺复杂且成本较高,难以实现大尺寸和复杂构型[15-17];荧光陶瓷具有良好的机械和化学稳定性,但通常需要高温或真空烧结,制备过程中易残留气孔并出现组分偏析,组分调控灵活性有限[18-20]。相比之下,荧光玻璃(Phosphor-in-Glass, PiG)具有组成可设计、成型工艺简单和制造成本较低等优势,可通过调节玻璃网络结构、软化温度和折射率,实现荧光粉含量、玻璃组成及光热性能的协同调控,并可在相对较低温度下与荧光粉共烧成型,因而受到广泛关注[21-23]。在荧光玻璃基础上,研究者进一步将其薄膜化,并与蓝宝石、玻璃、陶瓷或金属等高导热基片集成,形成荧光玻璃薄膜(Phosphor-in-Glass Film, PiGF)。与块体荧光玻璃相比,PiGF具有膜层薄、光程短、界面可设计和易于器件集成等特点,可在几十至数百微米厚度范围内兼顾光提取与热传输;与有机荧光转换层相比,其耐热性、抗光老化能力和尺寸稳定性更为突出,更适于高功率LED和LD的封装需求[24-28]。PiG及相关薄膜转换器的早期研究逐步拓展了材料制备与器件集成的应用范围。2013年,Yang等[29]采用丝网印刷制备YAG:Ce^{+3}荧光玻璃并用于白光LED封装;2014年,Zhang等[30]报道了用于大功率白光LED的透明YAG:Ce^{+3}荧光玻璃;2017年,Zhang等[31]将全无机PiG转换器应用于模块化高亮度白光LED和LD。2018年,Zheng等[32]通过将PiGF与具有一维光子晶体涂层的蓝宝石基片集成,实现导热与光学功能的结合;同期,Xu等[33]开展了SiO_2-YAG:Ce^{+3}无机复合厚膜的激光照明研究,分析了基片和膜厚对热猝灭及发光饱和的影响。上述研究推动了荧光转换材料、成膜工艺与封装结构的协同发展。

随着研究深入,PiGF已由单一荧光转换材料逐渐发展为兼具光谱调控、热管理和光提取功能的封装组件。在LED芯片封装中,PiGF主要用于板级封装(Chip-on-Board, CoB)和芯片级封装(Chip-Scale Packaging, CSP)。PiGF-CoB采用荧光玻璃膜覆盖多芯片阵列,具有流程相对简单、光通量高和成本较低等特点,但需解决多芯片热耦合、膜厚一致性和模块色度均匀性问题[34-37]。PiGF-CSP则将荧光玻璃膜缩小至接近芯片尺度,便于独立色度分选、高密度集成和标准化贴装,但对晶圆级制膜、精密切割及界面热阻控制提出了更高要求[38-39]。在高亮度LD芯片封装中,激光能量集中于较小区域,转换层的局部热积累与发光饱和问题更为突出。PiGF主要采用透过型和反射型封装:透过型结构光路简单、便于前向出光,但存在背向散射和界面反射损失;反射型结构可利用高反射界面回收背向光,并采用高导热非透明基片改善散热,但需降低多次传播引起的吸收和重吸收损耗。近年来,研究者通过高导热基片、高反射复合层、微结构界面、叠层结构和全向散热结构等设计,不断提升PiGF封装的发光效率、热稳定

性和高功率承载能力[40-43]。因此，从器件封装角度分析材料、界面与结构之间的联系，有助于理解不同PiGF封装方案的性能特点及适用条件。

本文主要围绕大功率光电芯片中的荧光玻璃膜转换器（PiGF）及其封装应用展开讨论。首先介绍PiGF的材料组成、结构形式和制备方法，重点说明玻璃基体、荧光粉、基片及界面结构对膜层性能和封装适配性的影响。随后结合LED和LD器件的应用需求，分析PiGF在板级封装、芯片级封装、透过型封装和反射型封装中的结构特点、光传播路径及热管理方式，并比较其光热性能。最后归纳PiGF转换器及其封装技术的研究进展，分析当前存在的关键问题，并讨论其未来发展方向。

2 荧光玻璃膜（PiGF）转换器

2.1 PiGF材料组成

荧光玻璃（PiG）是指荧光粉颗粒分散并固定于无机玻璃基体中形成的复合荧光转换材料，其结构形式包括块体、板状及薄膜状等。荧光玻璃膜是PiG的薄膜化形式，通常通过将荧光粉与玻璃基体复合形成膜层，并与支撑基片集成构成颜色转换器。因此，PiGF属于PiG的一种具体结构形式。PiGF转换器作为一种典型的全无机光转换器，由荧光玻璃膜层和高导热基片组成。荧光玻璃膜层一般由荧光粉和玻璃基体组成，如图1所示。作为荧光转换单元的荧光粉颗粒均匀镶嵌于致密的玻璃基体中，连续的玻璃相填充于颗粒间隙并形成紧密的包覆层，将荧光粉原位固结于基片之上。荧光粉颗粒与玻璃基体之间保持清晰的相界面，经烧结过程后无明显界面化学反应，荧光粉得以保持其原始晶体结构，从而确保了高效的光转换性能。

此外，荧光粉颗粒的粒径、形貌及其在玻璃基体中的分布状态也是影响PiGF光学性能的重要因素。由于荧光粉与玻璃基体之间存在折射率差异，激发光和转换光在颗粒与玻璃的界面处会发生散射，其散射行为与颗粒尺寸、形状及分布密切相关。当荧光粉粒径、体积分数或颗粒团聚程度发生变化时，光在膜层中的传播路径及有效光程也随之改变，进而影响激发光吸收、转换光提取和重吸收损耗。适当的散射有利于增加激发光与荧光粉的相互作用，提高激发光利用率；但过强的散射可能延长转换光在膜层中的传播路径，增加背向散射及重吸收损失，不利于光输出。

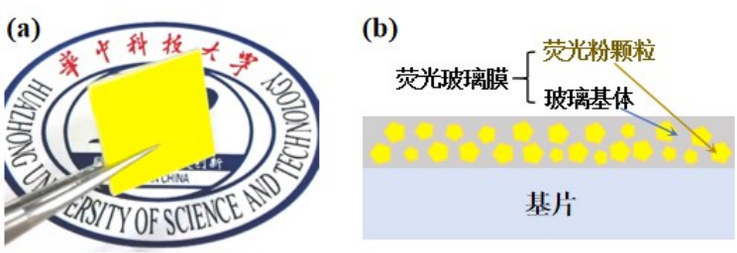


图1 （a）PiGF实物图；（b）PiGF示意图。

Fig. 1 （a） Photograph of PiGF；（b） Schematic diagram of PiGF.

在早期探索中，Yang等[44]将$Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$（YAG:Ce^{3+}）荧光粉与硅酸钾粘结剂混合后涂覆于蓝宝石基片，并通过银胶贴合于激光芯片上方，首次实现荧光材料远离光源芯片的膜层封装，有效缓解热积累问题。在此基础上，Zheng等[32]引入低温硼硅酸盐玻璃粉取代无机粘结剂，将玻璃粉与荧光粉配制成浆料，经刮涂成型后在800℃下一体化共烧，在蓝宝石衬底上形成了界面结合优异的PiGF复合结构，真正建立了全无机玻璃基质PiGF构型。此后，研究者从材料体系、封装结构与热管理等方面展开了系统研究。Xu等[33]以胶体二氧化硅替代玻璃粉制备复合厚膜，在20 $W\cdot mm^{-2}$下未出现发光饱和。Wei等[45]系统优化了PiGF膜厚与荧光粉含量，并进一步引入双面功能化蓝宝石基片，其一侧设置减反射层、另一侧设置蓝光通滤光层，通过调控界面光传播将光通量提升至1709 lm，发光效率提高至211 $lm\cdot W^{-1}$。Xu等[46]聚焦红色$CaAlSiN_3:Eu^{2+}$荧光材料，通过优化玻璃组成并采用低温退火策略，显著提升了材料的饱和阈值。上述研究表明，通过玻璃基质组成、膜层厚度与界面结构的协同优化，PiGF可在保持高效光转换的同时，显著提升热稳定性和发光饱和阈值，为以PiGF为核心的荧光转换LED/LD封装技术实用化奠定了基础。

2.2 PiGF类型

根据荧光玻璃膜及其功能层在空间上的组织

方式，PiGF可分为单层结构、叠层结构和三维围合结构三类，如图2所示。单层结构以单一荧光玻璃膜层承担光转换、热传导、光提取和光色调控等功能；叠层结构通过不同组成或不同功能膜层沿厚度方向组合，实现光谱转换及热管理功能的空间分离；三维围合结构则进一步在荧光层顶部、底部及侧向构建功能界面或辅助结构，将热传输和光调控由传统厚度方向拓展至三维空间。三类结构体现了PiGF由单一膜层向多层功能分区及三维协同调控方向的发展趋势。

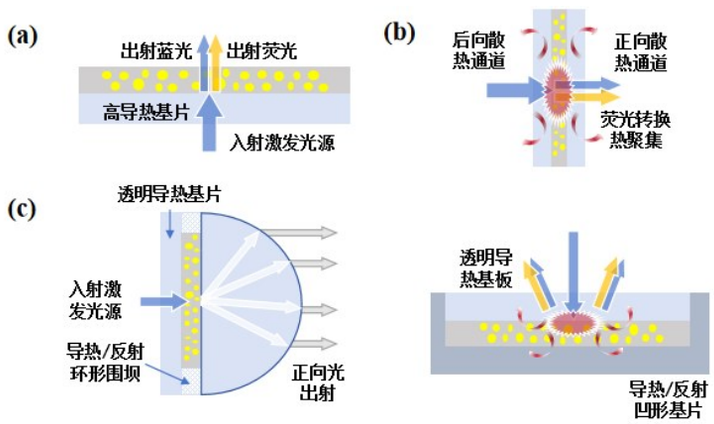


图2 PiGF类型：(a)单层结构；(b)叠层结构；(c)三维围合结构。

Fig. 2 Types of PiGFs: (a) Single-layer structure; (b) Laminated structure; (c) Three-dimensional enclosed structure .

单层结构是PiGF最广泛构型，通常将荧光粉与低熔点玻璃粉均匀混合，经丝网印刷、刮刀涂覆或旋涂等工艺沉积于蓝宝石、玻璃等基片表面，再通过低温烧结形成连续的薄膜。该结构具有制备流程简单、工艺成熟和界面数量少等优势，适用于规模化制备及基础性能研究。单层PiGF的荧光转换、热传导和光提取功能集中于同一荧光层内，且热量沿薄膜厚度方向向基片传递。在高功率激光激发条件下，局部热量难以及时耗散，容易引起温度升高、热猝灭及发光效率下降。单层结构的研究主要围绕提高材料本征热导率、降低界面热阻以及优化基片结构展开。通过调控玻璃基质组成、荧光粉含量及荧光粉-玻璃界面状态，单层PiGF的热学和发光性能已得到显著改善[47]。例如，Liu等[48]采用$Y_3Al_{3.5}Ga_{1.5}O_{12}:Ce^{3+}$(YAGG:$Ce^{3+}$)与硅酸盐玻璃体系制备单层PiGF，获得92%的最大内量子效率、8.32 $W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$的热导率和230.85 $lm\cdot W^{-1}$的发光效率。Xu等[49]采用高硅玻璃体系制备$La_3Si_6N_{11}:Ce^{3+}$ PiGF，使内量子效率和热导率分别达到98%和9.8 $W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$，并获得207.58 $lm\cdot W^{-1}$的发光效率。Wang等[50]进一步优化$La_3Si_6N_{11}:Ce^{3+}$ PiGF的材料组成与微观结构，使热导率提高至10.2 $W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$，并表现出良好的长期稳定性。除材料体系优化外，界面结构设计也为改善单层PiGF热传输和光场分布提供了有效途径。Ding等[51]引入图形化蓝宝石，增加荧光层与基片的有效接触面积，并调节界面光散射行为，使PiGF饱和功率密度提高91%，达到6.29 $W\cdot mm^{-2}$，同时保持约220 $lm\cdot W^{-1}$的发光效率。上述研究表明，材料本征热导率提升与界面传热强化能够有效缓解单层PiGF热积累问题，但其光谱调控自由度和散热路径仍有限。

为克服单层结构中光谱转换、光提取和热管理功能高度耦合的局限，研究者进一步发展了具有功能分区特征的叠层结构。叠层结构通常由两层或多层组成不同、功能各异的薄膜沿厚度方向堆叠，并通过低温共烧或逐层烧结形成复合结构。不同功能层可以分别承担蓝光吸收、绿光或红光转换、光场调控及热量传导等作用，从而提高光谱设计的灵活性，并减少不同荧光粉之间的非辐射能量传递和重吸收损失。在光谱调控方面，荧光层的组成、厚度和排列顺序会显著影响激发光利用率及不同波段光子的传输路径。Zhao等[52]通过调整红色和绿色荧光层的堆叠顺序，减少了绿光在红色荧光层中的二次吸收，使白光显色指数提高至85。Wang等[53]发现外绿内橙结构能够降低层间光谱损失，在蓝光激发下实现了基于美国国家电视系统委员会(National Television System Committee, NTSC)标准的107%色域和74.44 $lm\cdot W^{-1}$的发光效率。Liu等[54]将$CaAlSiN_3:Eu^{2+}$红色荧光玻璃膜与YAG:Ce^{3+}陶瓷片叠层，通过补充红光成分将显色指数由55提高至82，同时保持165

lm·W^{-1}的发光效率。这些结果表明，叠层设计可通过空间分离不同光谱转换过程，改善单层混合荧光体系中常见的光谱串扰与重吸收问题。除光谱优化外，叠层结构还可引入高导热中间层或双面散热界面，以缩短热量由发光区域向外部热沉传递的距离。Peng等[55]构建绿膜—蓝宝石—红膜三明治结构，利用蓝宝石中间层的双面导热作用降低局部热积累，获得163 lm·W^{-1}的发光效率和85.4的显色指数。Zhang等[56]设计蓝宝石@PiGF@蓝宝石（S@PiGF@S）夹层结构，通过上下蓝宝石层构建双向纵向散热通道，使饱和功率密度提高至46.47 W·mm^{-2}，最大光通量达到7602 lm。进一步结合动态旋转散热、窄带荧光粉及多层光谱分区设计（如图3a所示），叠层PiGF可在高功率激发条件下兼顾高色域、高亮度和较好的热稳定性[57]。Kuang等[58]则从光谱维度切入，将窄带绿粉β-SiAlON:Eu^{2+}和窄带红粉K_2SiF_6:Mn^{4+}分别制成荧光玻璃膜并集成于双面蓝宝石夹层中，利用玻璃化转变温度（glass transition temperature, T_g）为128 ℃的超低熔点玻璃和快速热压烧结（450 ℃，60 s）有效抑制了K_2SiF_6:Mn^{4+}的热分解和β-SiAlON:Eu^{2+}的界面扩散，使内量子效率分别高达96.1%和94.4%。总体而言，叠层结构实现了不同功能在厚度方向上的空间解耦，其热传输仍主要依赖薄膜上下表面的纵向路径，侧向散热能力及侧向逸出光的回收能力仍较为有限。

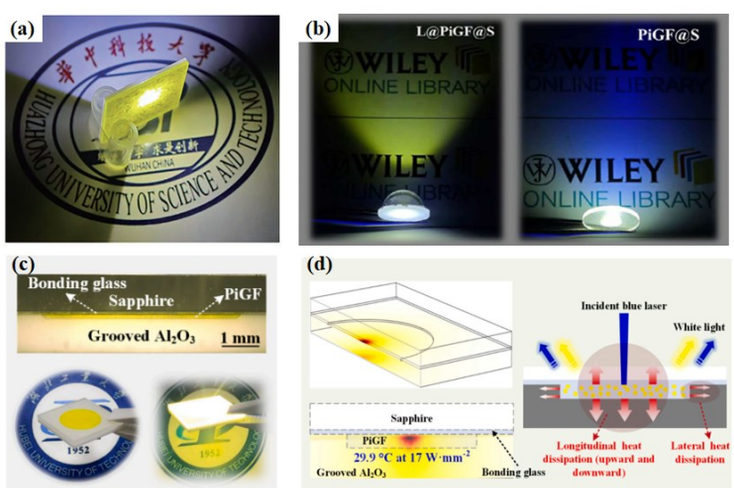


图3 （a）S@PiGF@S及其在激光激发下的实物图[57]；（b）激光激发后L@PiGF@S与常规PiGF@S对比图[60]；（c）MTC-PiGF横截面照片[59]；（d）MTC-PiGF仿真温度场分布及散热示意图[59]。

Fig. 3 （a）S@PiGF@S, along with their corresponding optical images under laser excitation[57]; （b）Comparison chart of L@PiGF@S and conventional PiGF@S after laser excitation[60]; （c）Photographs of cross-sectional MTC-PiGF[59]; （d）Simulation temperature filed distribution and heat dissipation schematic of MTC-PiGF[59].

针对单层和叠层PiGF主要依赖厚度方向传热、侧向散热及侧向逸出光利用不足的问题，近年来研究者进一步发展了三维围合结构。该结构在传统PiGF膜层基础上，通过在顶部、底部及侧向引入高导热、高反射或光学调控单元，构建三维空间内的多路径热传输和光传播调控体系，从而突破传统平面结构主要依赖纵向热传导和光提取的局限。与叠层结构主要通过厚度方向增加功能层不同，三维围合结构更强调顶部、底部和侧向界面的协同作用，实现热量扩散、侧向光回收和正向光提取的综合调控。Cheng等[59]在反射式激光照明系统中设计了多通道导热荧光玻璃膜（multi-channel thermal conductive PiGF, MTC-PiGF），将YAG:Ce^{3+} PiGF嵌入开槽Al_2O_3陶瓷凹槽，并在顶部覆盖蓝宝石盖板。Al_2O_3凹槽侧壁一方面构建横向热传输路径，另一方面将侧向逸出的光重新反射至有效出射方向；在纵向上，蓝宝石盖板与Al_2O_3底部共同形成上下双向导热通道（如图3c、d所示）。该结构在50 W·mm^{-2}的功率密度下获得9398 lm的光通量，稳态工作温度控制在72.5 ℃，表明围合式侧壁结构能够同时改善热量扩散和光能利用。在此基础上，Zhang等[60]进一步将全向散热、侧向光回收和正向光提取集成于同一结构中，提出将半球形蓝宝石透镜集成于涂覆于蓝宝石基板上的、由氮化硼-玻璃复合层（BN-in-glass, BiG）层包覆的PiGF（L@PiGF@S）全方向封装构型。该

结构由顶部半球形蓝宝石透镜、底部蓝宝石衬底以及侧壁BiG复合层组成。顶部透镜通过折射和聚焦增强正向光提取，底部蓝宝石衬底承担纵向散热功能，BiG侧壁则依靠氮化硼的高热导率及约79%的反射率，同时实现横向散热和侧向光回收。在36 W·mm^{-2}的激发功率密度下，该结构获得6129lm的光通量和268 lm·W^{-1}的发光效率，工作温度较传统结构降低67%，并实现超过1000 m的准直照明距离。该研究表明，全向结构能够通过热传输路径、光反射边界和光学提取元件的协同设计，显著提升PiGF在高功率激光照明中的综合性能(如图3b)。

综上所述，单层结构、叠层结构和全向多维结构代表了PiGF结构设计的主要发展方向，但并非涵盖所有结构形式。三类结构在光谱调控、热传输及光提取方面各有侧重：单层结构主要通过荧光粉组成、膜厚及基片界面调节光转换性能；叠层结构利用不同功能层的组合实现光谱调控与热管理优化；全向多维结构则通过多方向光热传输路径的协同设计，进一步改善散热及光提取性能。此外，微结构与反射界面等设计可与上述结构相结合，实际应用中应根据器件需求进行合理选择。

2.3 PiGF制备工艺

PiGF的制备通常采用“浆料涂覆-低温烧结”工艺，通过浆料涂覆实现荧光粉在高导热基片上的均匀沉积，再经低温烧结使玻璃相软化流动，实现荧光粉包覆、薄膜致密化以及与基片的牢固结合[61]。由于PiGF需要同时满足高荧光粉负载、良好界面结合以及优异热稳定性的要求，该工艺已成为目前最常用的制备方法。在浆料制备过程中，通常将荧光粉与低熔点玻璃粉按照一定比例混合，并加入有机载体和粘接剂形成均匀浆料，如图4a所示。其中，荧光粉与玻璃粉比例、颗粒尺寸以及浆料黏度等参数会直接影响薄膜的厚度均匀性、孔隙率、光散射行为以及热传输性能，因此浆料体系优化是获得高性能PiGF的关键环节。



图4 PiGF的制备工艺：(a)浆料制备；(b)薄膜涂覆[62]；(c)低温烧结。

Fig. 4 Preparation process of fluorescent glass thin films: (a) Slurry preparation; (b) Film coating[62]; (c) Low-temperature sintering.

在浆料涂覆阶段，丝网印刷和刮刀涂覆是目前应用最广泛的两种方法，如图4b所示。丝网印刷法通过调节刮刀压力、丝网目数以及印刷次数，可实现薄膜厚度的精确控制，并适用于图案化制备和多层结构构筑。然而，多次印刷与干燥过程会增加制备复杂度，限制其大面积连续化生产。相比之下，刮刀涂覆法通过控制刮刀与基片之间的间隙调节膜厚，具有工艺简单、面积适应性强等优势，更适用于大面积PiGF制备。但由于受到浆料流变特性的限制，该方法在制备超薄薄膜(<40μm)时容易出现厚度均匀性不足的问题。此外，旋涂、喷涂等方法也被用于PiGF制备，以满足不同厚度、形貌及应用场景的需求[63]。总体而言，丝网印刷更适合复杂结构和多层薄膜制备，而刮刀涂覆则在规模化制造方面具有优势，但两者仍面临薄膜厚度精确控制和大面积均匀性提升等挑战。

低温烧结是决定PiGF致密性、界面结合强度以及发光稳定性的关键步骤，其核心是在促进玻璃相充分流动和致密化的同时，避免荧光粉晶格损伤及激活离子价态变化，如图4c所示。若烧结温度过低，玻璃相流动性不足，难以有效填充孔隙；若温度过高，则可能导致荧光粉热分解、氧化

或与玻璃基质发生界面反应，从而引起发光性能下降[64]。因此，研究者通常通过调控烧结温度、保温时间、压力以及玻璃体系组成，实现致密化过程与荧光粉稳定性的平衡。李等[65]发现，硼硅玻璃基YAG:Ce^{3+}荧光玻璃在700 ℃烧结时具有最佳发光性能，而温度超过850 ℃后，由于YAG晶格腐蚀以及Ce^{3+}向Ce^{4+}转变导致发光猝灭。Lee等[66]通过优化玻璃烧结温度和荧光粉含量改善PiGF的光学性能。研究发现，厚度为1 mm的不含荧光粉玻璃板在640 ℃烧结条件下，孔隙率降至0.02%，在400~700 nm波段的平均透过率达到53.97%，表明适宜的烧结温度有利于玻璃流动及孔隙填充，而过高的烧结温度可能导致气泡缺陷。在此基础上，研究者将荧光粉与玻璃粉复合制备厚度为120 μm的PiGF转换片，并发现当黄色荧光粉含量为20 wt%时，其发光性能较优。此外，针对PiGF致密化和多组分协同烧结需求，研究者还从先进烧结技术和低温共烧结体系两个方面对制备工艺进行了优化。Zhou等[67]采用放电等离子烧结(spark plasma sintering, SPS)技术，通过施加烧结压力促进薄膜致密化，降低孔隙率，并改善其热导率和热稳定性。另一方面，Jin等[68]采用ZnO-Li_2O-SiO_2低温玻璃作为基质，在600 ℃下实现三色荧光粉与Zn_2SiO_4纳米晶的共烧结，在7.08 W激发功率下获得1361 lm的光通量和84.5的显色指数，表明低温玻璃体系有利于多种功能相的协同烧结，并具有用于高性能PiGF制备的潜力。

除玻璃组成、荧光粉体系及烧结工艺外，膜层厚度也是决定PiGF光热性能的重要结构设计参数。由于PiGF属于薄膜型荧光转换结构，其厚度直接决定激发光在荧光层中的传播路径、蓝光吸收比例以及转换光的散射和再吸收过程。当膜层厚度增加时，荧光粉颗粒与激发光之间的作用距离延长，有利于提高蓝光吸收和颜色转换效率；然而，过厚的荧光层会增加转换光在膜内传播距离，增强光再吸收和散射损失，同时增加热传输路径，不利于高功率条件下的热扩散。因此，PiGF厚度并非单纯的制备参数，而是需要综合考虑光转换效率、光提取效率和热管理能力的关键光热设计变量。已有研究表明，PiGF膜厚存在最佳设计窗口，而非简单追求薄化。Yuan等[69]研究发现，PiGF厚度会同时影响热耗散、光吸收和光再吸收行为，并进一步决定发光效率和光致饱和阈值；在LuAG:Ce^{3+} PiGF体系中，78 μm厚度样品表现出31.9 W的光致饱和阈值，高于56 μm薄膜样品的28.0 W，同时获得约296 lm·W^{-1}的发光效率，说明适当增加膜厚能够改善高功率激发下的光热稳定性。此外，Xu等[70]通过构建双面导热BN@PiGF@Al_2O_3转换器，在80 μm厚PiGF条件下实现了30 W·mm^{-2}激光功率密度激发和4784 lm光通量，表明增强热管理可有效缓解高功率激发下的热积累，并说明膜厚需与激发功率和散热结构协同优化，而非简单追求薄化。

3 荧光玻璃膜(PiGF)封装技术

3.1 PiGF封装LED

传统白光LED通常采用蓝光芯片与荧光粉硅胶复合层结合的封装方式，其中硅胶承担荧光粉分散、光学耦合和环境保护等作用[71-73]。然而，在高功率工作条件下，芯片焦耳热与荧光转换产生的斯托克斯热容易在颜色转换层附近积聚，长期运行可能引起硅胶黄化、透光率下降、界面脱粘及色坐标漂移。荧光玻璃膜以无机玻璃网络固定荧光粉，在热稳定性、抗蓝光老化和结构可靠性方面优于传统荧光粉/硅胶体系，因而逐渐由独立颜色转换材料发展为LED器件中的功能封装组件[74]。PiGF进入LED器件后，其性能不仅取决于荧光粉种类、玻璃组成和膜层厚度，还受到芯片排布、荧光层位置、界面连接方式和散热基片结构的共同影响。根据PiGF与LED芯片的集成尺度，PiGF-LED主要可分为板级封装PiGF-CoB和芯片级封装PiGF-CSP两类。前者采用大面积PiGF覆盖多颗芯片，侧重于高光通量输出和模块级热管理；后者将PiGF缩小至单颗芯片尺度，强调小型化、独立色度控制和高密度集成，如图5所示。

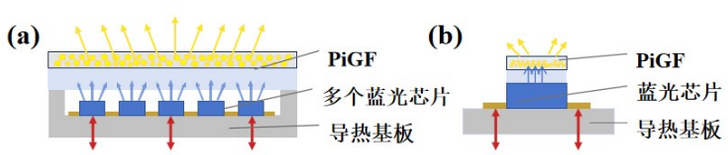


图5 PiGF-LED封装形式：(a)PiGF-CoB；(b)PiGF-CSP。

Fig. 5 Main packaging forms of PiGF-LED: (a) PiGF-CoB; (b) PiGF-CSP.

3.1.1 PiGF-CoB LED

芯片板上封装(CoB)通过将多颗LED裸芯片直接集成于高导热基板,并采用引线键合或倒装互连实现高密度封装,可有效缩短热传输路径,提高单位面积光通量,广泛应用于高功率LED领域。然而,多芯片集成带来的热耦合效应使传统荧光粉/硅胶转换层易发生热老化和光衰减,限制了器件长期稳定运行。PiGF利用无机玻璃网络固定荧光粉,具有优异的热稳定性和抗光老化能力,因此逐渐应用于高功率CoB封装。其中,PiGF-CoB通常采用大面积荧光玻璃膜覆盖芯片阵列,使多个蓝光芯片共用同一颜色转换层,在提高封装效率和光通量输出的同时,也对膜层均匀性、热管理及界面可靠性提出了更高要求。

PiGF-CoB通常采用“基板制备—芯片阵列组装—PiGF膜板集成”的工艺路线,如图6所示。根据器件功率和光学需求,在高导热基板上完成芯片阵列构建,并将制备或切割后的PiGF膜板覆盖于芯片上方,实现多芯片共用颜色转换层。在荧光玻璃转换片与LED封装集成方面,李栋才等[75]提出了一种由透明玻璃衬底及其表面荧光玻璃层构成的无机颜色转换片,通过将荧光粉与基础玻璃粉复合并烧结成膜,为荧光玻璃转换片在大功率白光LED封装中的应用提供了早期技术基础。徐涛[76]进一步提出了包含荧光体玻璃转换板的LED光源结构,将玻璃转换板与倒装LED芯片、无机接合层及玻璃透镜相结合,并通过多个光源单元的阵列布置实现集成。上述发明专利从荧光玻璃转换层制备及器件结构集成两个方面,为无机颜色转换材料在LED封装中的应用提供了技术参考。

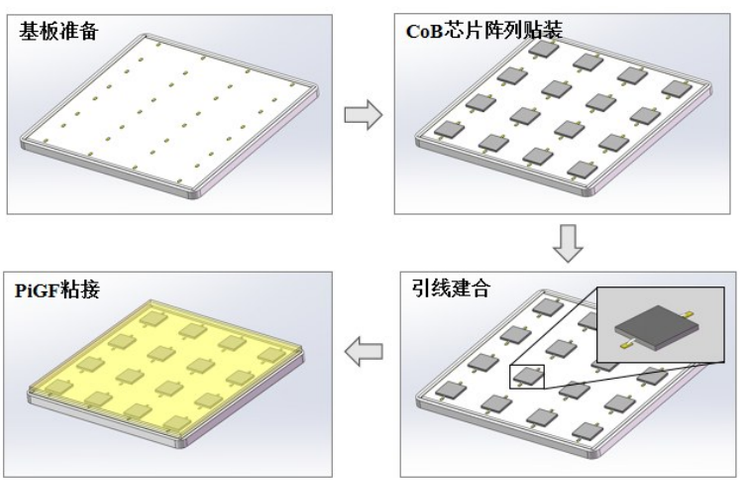


图6 PiGF-CoB工艺流程。

Fig. 6 Process flow of PiGF-CoB.

由于PiGF需要经历玻璃相软化、烧结和致密化过程,其制备温度往往高于传统有机封装材料,而CoB中芯片、电极、焊点及荧光粉均存在一定温度耐受上限,因此低温烧结成为PiGF-CoB实现器件级集成的关键问题。过高的烧结温度不仅可能引起芯片焊层和电极结构退化,还可能造成部分荧光粉发生热猝灭、氧化或界面反应,降低颜色转换效率。Yoon等[77]采用Sn-P-F-O低熔点玻璃体系实现高功率CoB白光LED的on-chip PiG封装,在285 ℃下仅需1 min即可完成玻璃相形成,降低了烧结过程对红色氮化物和绿色硅酸盐荧光粉的热损伤,同时避免高温对封装结构产生明显破坏。所得器件发光效率达到70.9 - 86.0 lm·W^{-1},显色指数为94 - 97,相关色温覆盖2700 - 10000 K,表明低温玻璃体系能够兼顾PiGF成形与高功率CoB的封装温度要求。

除烧结温度外,大面积PiGF膜层的一致性也是影响CoB光学性能的重要因素。对于多芯片阵列,不同位置芯片之间存在明显的热耦合和光场叠加,如果PiGF膜厚、荧光粉浓度或孔隙率分布不均,各区域蓝光吸收和荧光转换比例将产生差异,最终表现为局部亮度和色温不一致。为提高大面积PiGF膜层的均匀性,可在浆料制备过程中通过充分混合与分散荧光粉和玻璃粉、调控浆料黏度及稳定性,减少颗粒团聚和沉降;在成膜及烧结过程中,通过优化涂覆参数和控制烧结收缩一致性,降低膜厚及孔隙率的区域差异。此外,可结合膜层厚度检测和多位置光色测试,评价不同芯片区

域的颜色一致性，并据此优化制备工艺。李等[78]针对传统CoB封装中的光热耦合问题，通过优化芯片排布、荧光粉分层近场涂覆及固化工艺，提高了CoB器件的光色一致性和工作可靠性。与此同时，高功率工作条件下芯片产生的大量热量会进一步升高结温，使荧光材料转换效率下降并加速器件光衰，因此还需通过高导热基板、合理芯片间距和热扩散结构降低整体热阻、减弱局部热积累。

3.1.2 PiGF-CSP LED

芯片级封装（CSP）通常采用倒装LED芯片结构，将电极直接布置于芯片底部并与外部电路及散热基板连接，从而减少传统支架和键合线带来的热阻和尺寸限制，具有封装尺寸小、热传输路径短以及适用于高密度集成等优势。在此基础上，PiGF-CSP进一步将荧光玻璃颜色转换层缩小至单颗芯片尺度，使每颗LED芯片具有独立的无机颜色转换结构。相比PiGF-CoB中多个芯片共用大面积转换膜，PiGF-CSP可对单颗器件进行独立光色测试与分选，有利于提高器件间的色度一致性，并满足标准化制造和高密度集成需求。然而，独立光色分选并不意味着器件具有良好的空间光色均匀性。随着转换层尺寸缩小至毫米甚至亚毫米尺度，膜厚偏差、切割损伤及贴装误差的影响更加显著，膜层边缘的蓝光泄漏和散射变化可能导致不同出射方向的蓝光与荧光比例发生差异，进而引起空间色温分布不均。因此，PiGF-CSP还需关注边缘完整性、芯片与膜层的对位精度及侧壁光场调控。

PiGF-CSP通常采用“晶圆级制膜—减薄切割—芯片贴装—PiGF粘接”的工艺路线，如图7所示。首先将荧光粉与低熔点玻璃粉制备为均匀浆料，通过丝网印刷或模板印刷在晶圆基底上形成荧光玻璃膜，并经预处理和烧结获得致密PiGF。该阶段需兼顾膜层厚度、组成均匀性及烧结收缩一致性，以保证后续芯片级转换片的光色一致性。随后通过减薄、研磨、抛光及机械或激光切割，将晶圆级PiGF加工为与LED芯片尺寸匹配的转换片。在器件装配过程中，倒装LED芯片首先固定于封装基板，再采用高耐热透明硅胶作为粘接介质，将芯片级PiGF对位粘接于LED芯片上表面，从而实现PiGF与芯片之间的机械连接和器件集成[79]。PiGF的对位精度及粘接界面状态会进一步影响界面接触、光传播及器件可靠性。在此过程中，切割边缘完整性和贴装精度也会直接影响界面接触及器件可靠性。与常规PiGF制备工艺相比，PiGF-CSP不仅需要保证膜层的厚度和组成均匀性，还需重点控制晶圆级加工过程中的切割完整性、贴装精度及芯片与PiGF之间的界面匹配。

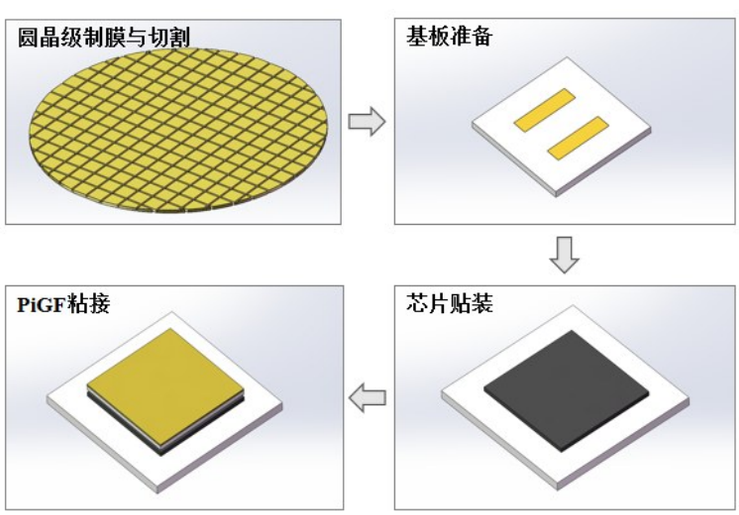


图7 PiGF-CSP工艺流程[80]。

Fig. 7 Process flow of PiGF-CSP[80].

晶圆级PiGF的厚度和组成均匀性是影响CSP器件光色一致性的关键因素。PiGF颜色转换过程依赖于蓝光在膜层中的吸收、散射及荧光再发射，因此膜厚、荧光粉浓度、孔隙率和界面状态的微小变化均可能改变蓝光透过比例和荧光转换效率。其中，膜厚不仅决定单个转换片的颜色转换性能，也是晶圆级制造过程中影响器件批量一致性的重要参数。已有研究表明，荧光转换层厚度及荧光粉浓度变化会改变蓝光吸收程度、转换光谱分布和色坐标，从而影响器件光效和相关色

温。因此，在晶圆级PiGF制造过程中，不仅需要优化目标膜厚，还需提高膜层面内厚度和组成均匀性，以降低切割后单颗转换片之间的光色差异。在实际晶圆级批量制造过程中，浆料固含量、印刷参数以及烧结制度的波动会导致不同区域膜层收缩程度和致密化程度差异，并进一步造成器件间光效、色温和色坐标离散。因此，厚度精密控制以及后续减薄、切割和边缘完整性控制成为PiGF-CSP区别于传统PiGF膜板制备的重要环节。Zhang等[80]采用印刷-烧结工艺制备晶圆级PiGF，并进一步切割为芯片尺寸颜色转换片，与高功率倒装LED进行集成，建立了较完整的PiGF-CSP制造路线。当PiGF膜厚约为88 μm时，器件发光效率达到108.8 lm·W^{-1}，相关色温为5796 K，表明合理膜厚设计能够在蓝光吸收、荧光转换效率和光输出性能之间实现良好平衡。

研究进一步发现，PiGF相对于芯片的贴装方向会改变芯片—PiGF界面处的反射、散射及蓝光吸收过程，从而显著影响器件的颜色转换效率。根据PiGF膜层与透明基片相对于LED芯片的位置关系，可将其分为PiGF-up和PiGF-down两种结构。PiGF-up结构中，PiGF膜层位于透明基片的出光侧，自LED芯片向外依次为LED芯片、透明基片和PiGF膜层；PiGF-down结构中，PiGF膜层位于靠近LED芯片的一侧，自LED芯片向外依次为LED芯片、PiGF膜层和透明基片。与PiGF-up结构相比，PiGF-down结构使颜色转换层更加靠近LED芯片，可减少蓝光在进入荧光层前的侧向逸出。在1200 mA驱动电流下，PiGF-down器件的光效达到81.88 lm·W^{-1}，高于PiGF-up结构的66.17 lm·W^{-1}[81]。Zhang等[80]在400 mA驱动下同样获得了118.5 lm·W^{-1}、4884 K的Down-PiGF-CSP性能，优于PiGF-up结构的108.8 lm·W^{-1}和5796 K。由此可见，除PiGF材料本身外，芯片与转换层之间的空间位置及界面结构也是影响CSP颜色转换效率的重要因素。

然而，传统PiGF-CSP主要在芯片顶部设置单面颜色转换层，芯片侧壁发出的部分蓝光可直接逸出，导致不同出射角度下蓝光和荧光比例发生变化，进而产生角度相关色温偏移。针对这一问题，PiGF-CSP的结构设计逐渐由顶部膜层厚度和贴装方向调控发展到侧壁光场管理。Zhang等[82]在芯片及PiGF外围构筑BN/硅胶复合高反射围坝，当BN含量为7.5 wt%时，器件发光效率由67.0 lm·W^{-1}提高至104.7 lm·W^{-1}，相关色温降低至5714 K，光束角收窄至118.5°，说明高反射围坝能够将部分侧向蓝光重新引导至颜色转换区域，从而降低蓝光泄漏并提高光利用率。进一步地，Huang等[83]于2024年采用精密激光加工，将YAG基PiGF晶圆制备为同时覆盖芯片顶部和四个侧面的五面颜色转换结构，使芯片侧壁发出的蓝光也能够经过PiGF完成颜色转换。该器件获得401 lm光通量和5488 K±110 K的平均相关色温，并显著降低了大视角范围内的色温离散。由此表明，PiGF-CSP已经由单一顶部颜色转换逐步发展为侧壁反射和三维多面颜色转换，如图8所示，其核心目标是提高不同方向蓝光的利用率并改善空间光色一致性。

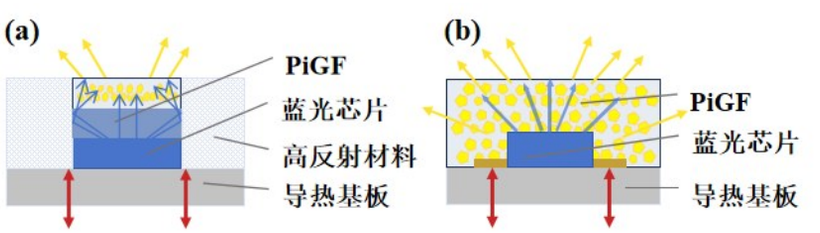


图8 PiGF-CSP结构演变及侧壁蓝光调控：(a)PiGF与高反射围坝[82]；(b)顶部和四侧面覆盖的五面PiGF[83]。

Fig. 8 Evolution of PiGF-CSP structure and sidewall blue light regulation: (a) PiGF with high-reflectivity surrounding wall[82]; (b) Five-sided PiGF covered on the top and four side faces[83].

3.2 PiGF封装LD

激光二极管(LD)具有高亮度、高功率密度和优异方向性，在汽车照明、激光投影及可见光通信等领域具有广泛应用前景[84-86]。白光LD通常采用蓝光LD激发荧光转换材料，通过蓝光吸收、波长转换及光谱混合实现白光输出。由于LD激发功率密度高，荧光转换层不仅需要具备高效光转换能力，还需优化激光、散射光和荧光的传播路径，以降低局部热积累。因此，封装结构对PiGF-LD器件的光热性能具有重要影响。

根据激光入射与白光输出方向的差异，PiGF-LD主要分为透过型和反射型结构，如图9所示。透过型结构具有光路简单、前向出光效率高等优势，但存在背向光损失的问题；反射型结构通过背部反射层回收向基板传播的光，可提高光的利用率，并便于采用高导热非透明基板。Mou等[87]对这两种结构进行了比较，发现透过型具有更高光效，而反射型表现出更优的散热能力。因此，如何协调激光耦入、光回收和热管理，是PiGF-LD封装结构优化的关键。

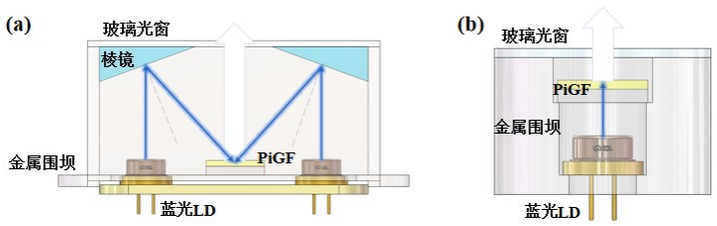


图9 PiGF-LD器件的典型封装结构及光传播路径示意图：(a)透过型封装；(b)反射型封装。

Fig. 9 Schematic diagram of the typical packaging structure and light propagation path of the PiGF-LD device: (a) Transmission-type package; (b) Reflection-type package.

3.2.1 PiGF透过型封装(PiGF-TP)LD

PiGF透过型封装通常由蓝光LD、PiGF和透明基片组成，PiGF制备于蓝宝石等透明基片表面。蓝光从PiGF一侧入射，在膜层内部发生散射、吸收和波长转换，未被吸收的蓝光与转换荧光随后穿过透明基片并形成白光输出[88-89]。由于激光入射方向与主要白光输出方向基本一致，透过型封装具有较为直接的光传播路径，结构紧凑，且便于与准直透镜等后续光学系统集成。与反射型封装相比，转换光不需要经底部反射后再次穿过荧光转换层，可减少由反射界面吸收、多次散射和荧光重吸收引起的附加损耗。然而，荧光粉颗粒对入射蓝光具有较强的散射作用，转换荧光又具有较宽的空间发射角，因此部分散射蓝光和转换荧光会向激光入射侧传播。对于传统透过型结构，这部分背向光通常难以进入前向光学系统，造成有效光通量损失。此外，PiGF与透明基片以及基片与空气之间的折射率差异还会产生界面反射，进一步降低有效光提取效率。因此，降低界面光损耗并提高背向光利用率成为透过型PiGF封装优化的重要研究方向。

针对界面反射和背向光损失，研究者通过引入具有光谱选择性的光学薄膜结构，调控激发蓝光与转换荧光的传播行为。Zheng等[32]将PiGF直接烧结于具有一维光子晶体结构的蓝宝石基片上，利用其波长选择性透射与反射特性，在保证蓝光有效耦入的同时改善转换光的提取，使封装效率达到90%。此处封装效率是指该PiGF转换结构的光转换效率与原始荧光粉光转换效率之比，用于表征荧光粉经玻璃复合及封装后的光转换性能保持程度。Wei等[45]则通过优化PiGF的荧光粉含量与膜层厚度，并额外引入双面功能化蓝宝石基片，在其两侧分别设置减反射层和蓝光通滤光层，以降低界面反射损失并改善不同波段光的传播与利用。在10.3 W·mm^{-2}蓝光激光激发下，该器件获得1709 lm的光通量和211 lm·W^{-1}的发光效率。上述研究表明，通过光谱选择性薄膜设计与PiGF材料参数的协同优化，可以有效改善激发光利用和转换光提取，提高透过型PiGF器件的光学性能。

除了利用光学膜层调控背向光传播，对已经从PiGF背面和侧面逸出的光进行二次收集也能够有效改善透过型封装的光提取性能。Mou等[90]针对传统透过型PiGF背向发光损失较大的问题，在转换器外围引入反射结构，对从PiGF背面和侧面逸出的光重新进行收集并导向有效出光区域。通过回收背向发射光，器件的饱和光通量由传统结构的398.6 lm提高至1925.3 lm，表明背向光回收对提高透过型PiGF的光利用率具有显著作用。与外部反射结构相比，界面微结构能够直接调节激光在PiGF内部的传播行为。Zhao等[91]在PiGF与蓝宝石之间构筑微结构界面，通过增强局部光场并改变蓝光在膜层中的反射和传播路径，提高蓝光被荧光粉吸收和转换的概率。在膜厚为80 μm、激光功率为3.15 W时，微结构PiGF器件获得249.1 lm·W^{-1}的发光效率，较相同膜厚的常规PiGF提高约11%。因此，透过型封装的光路优化已逐渐由传统的平面界面发展至选择性光学膜、

外部反射结构和界面微结构等多种方式，通过调控光在PiGF及其周围空间中的传播实现更高效的光利用。

3.2.2 PiGF反射型封装(PiGF-RP)LD

与透过型封装不同，反射型PiGF器件的蓝光激光和白光主要从PiGF的同一侧传播。蓝光入射PiGF后，部分能量被荧光粉吸收并转换为长波荧光，其余蓝光以及向基片方向传播的荧光到达PiGF背面后，经反射结构重新返回膜层，并最终由激光入射侧输出[92-93]。因此，在透过型结构中构成光损失的背向发射光，在反射型结构中可以通过底部反射界面重新参与白光输出。与此同时，由于光不需要穿过基片，反射型器件不再要求基片具有较高的可见光透过率，可以采用Al和AlN等具有较高热导率的材料作为封装基片，从而降低PiGF的工作温度并提高其高功率承载能力。这也是Mou等[87]研究中反射模式工作温度明显低于透射模式的重要原因。但是，反射型封装中的光需要经过反射界面并再次穿过PiGF，如果基片或界面对蓝光和转换荧光存在明显吸收，则会降低背向光回收效率；多次传播还可能增加散射和重吸收损耗。因此，提高PiGF背面界面的反射率，同时避免反射结构产生额外吸收，是反射型封装光路设计的核心问题。

早期反射型PiGF主要采用金属反射层实现背向光回收。Peng等[94]将PiGF制备在蓝宝石表面，并在蓝宝石背面沉积Al反射层，使向后传播的蓝光和荧光经Al层反射后重新返回PiGF，从而将光反射与基片导热功能集成于同一封装结构中。当PiGF厚度为120 μm时，该器件在1.12 W蓝光激光激发下获得129 lm的光通量，同时工作温度保持在较低水平。然而，金属Al无法实现理想反射，部分蓝光和荧光仍会被吸收并转化为热量，而且在制备过程中金属表面的反射性能容易受到玻璃和荧光粉层影响。针对这一问题，Mou等[95]在PiGF与Al基片之间引入BN玻璃复合反射层。BN颗粒具有较强的光散射能力，可以在光进入金属基片之前将其重新散射至PiGF，从而降低Al基片产生的吸收损耗。该结构在3.15 W蓝光激光激发下获得458.6 lm的光通量，较未设置BN反射层的结构提高约70%，同时保持较低的表面温度。这一结果表明，在PiGF与散热基片之间增加独立的高反射功能层，可以有效改善反射型封装中光提取与散热之间的矛盾。

在此基础上，反射型PiGF逐渐由金属反射层向高反射界面和高导热基片相结合的多层封装结构发展。Mou等[96]采用AlN作为高导热基片，并在PiGF与AlN之间引入BN玻璃反射层。由于BN复合层能够减少光进入AlN基片造成的损耗，而AlN主要承担热传输和结构支撑作用，该器件在3.15 W蓝光激光激发下获得214.2 $lm\cdot W^{-1}$的发光效率，显著改善了传统反射型PiGF发光效率较低的问题。随后，Zhang等[97]采用TiO_2玻璃复合层作为PiGF与AlN之间的高反射界面，利用TiO_2较高的折射率和较强的散射作用提高背向光反射能力。当反射层厚度优化至100 μm时，器件光通量达到2053 lm，约为未采用高反射界面结构器件的1.9倍。这些研究表明，反射型封装的发展重点已由单纯利用基片反射逐渐转向了对PiGF背面光场的主动调控。通过将荧光转换、光反射和热传输功能分别配置于不同结构层，可以兼顾较高的背向光回收效率和良好的散热性能。

除高功率激发下的光热性能外，PiGF-LD器件在长期激光照射下的可靠性同样值得关注。尽管无机玻璃基体具有较好的热稳定性，但持续高功率激光激发产生的局部热积累仍可能导致荧光粉热猝灭及光转换效率下降。长期热负荷和温度梯度还可能引起荧光粉与玻璃基体之间的界面退化，甚至产生膜层微裂纹或界面脱粘，从而影响器件的光输出稳定性。需要指出的是，短时高温引起的可逆热猝灭与长期运行造成的不可逆性能退化存在区别，因此，仅依据短时测试获得的光通量、发光效率及饱和功率密度，尚不足以全面评价器件的长期服役性能。未来还需通过持续激光老化、功率循环及热循环测试，结合光通量保持率、光转换效率和光谱变化等指标，进一步评估PiGF-LD器件的长期可靠性。

为便于比较不同PiGF封装形式的组成与性能，表1汇总了代表性研究中的荧光转换器、玻璃组成、光通量、光效及饱和阈值。相关研究通过基片选择、界面光学调控、双面散热及全向封装等设计，协同提升荧光转换器的光提取与热传输性能，缓解高功率条件下的热积累和光色不均问题，为高功率LED和LD器件的封装设计提供了参考。

表1 不同PiGF荧光转换器的玻璃组成、光学性能及封装形式比较

Table. 1 Comparison of glass compositions, optical performance, and packaging configurations of different PiGF phosphor converters

荧光转换器	玻璃组成	光通量[lm]	光效[lm·W^{-1}]	饱和阈值[蓝宝石基片，并通过银胶贴合]	封装形式	文献
YAG@蓝宝石	硼硅酸盐 B_2O_3-SiO_2-Al_2O_3-BaO-ZnO	1839	210	11.2	LD透过	[32]
YAG@玻璃	硼硅酸盐 B_2O_3-SiO_2-ZnO	—	111.79	—	PiGF-CSP	[81]
LSN@蓝宝石	硼硅酸盐 B_2O_3-SiO_2-ZnO	1925.3	140.6	15	LD透过+背向光回收	[90]
LSN+CASN@蓝宝石	硼硅酸盐 B_2O_3-Na_2O-SiO_2-ZnO	476.6	199.4	—	LD反射	[87]
YAG@蓝宝石	硼硅酸盐	129	115	—	LD反射	[94]
YAG@铝	硼硅酸盐+BN	458.6	—	—	LD反射	[95]
LSN@氮化铝	硼硅酸盐+BN	674.7	214.2	—	LD反射	[96]
YAG@玻璃	D263 B_2O_3-Sb_2O_3-SiO_2-Ta_2O_5	401	—	—	五面PiGF-CSP	[83]
YAG@蓝宝石	K_2O-Na_2O-Al_2O_3-SiO_2	1709	211	10.30	LD透过PODS	[45]
YAG@蓝宝石	硼硅酸盐 25B_2O_3-10SiO_2-35ZnO-6Na_2O-12La_2O_3-12WO_3	507.6	249.1	—	LD透过；微结构界面	[91]
YAGG+CASN@氮化铝	硼硅酸盐 25B_2O_3-10SiO_2-35ZnO-6Na_2O-12La_2O_3-12WO_3	2053	—	35.7	LD反射	[97]
YAG@玻璃	硼硅酸盐	522.9	118.5	—	PiGF-CSP	[80]
YAG@氮化铝	硼硅酸盐	—	104.7	—	PiGF-BN-CSP	[82]
YAG@氧化铝	硼硅酸盐	9398	—	50	LD反射；多通道热导	[59]
YAG@蓝宝石	硼硅酸盐	7602	164	46.47	LD透过；双面蓝宝石	[56]
YAG@蓝宝石	硼硅酸盐+BiG	6129	268	36	LD全向封装	[60]
BSSO+SCASN@玻璃	SnO-SnF_2-P_2O_5(Sn-P-F-O)	—	70.9 - 86.0	—	PiGF-CoB	[77]

4 PiGF封装技术发展趋势

随着高功率固态照明和激光照明技术的发展，荧光玻璃膜(PiGF)已经由传统颜色转换材料逐渐发展成为了兼具光转换、热管理和光场调控功能的无机封装结构，并在高功率LED和LD器件中展现出良好的应用潜力。相比传统有机荧光转换器，PiGF具有优异的耐热性和抗光老化能力，可以有效缓解高温、高光通量条件下的材料衰减问题。然而，在高功率激发条件下，局部热积累、光转换效率下降及光色不均等问题仍限制其性能进一步提升，同时复杂结构设计和规模化制造仍需进一步优化。未来PiGF材料设计需围绕低温烧结、高热稳定玻璃体系开发及光散射行为优化展开，通过调控荧光粉含量、颗粒特性、玻璃基体组成和膜层厚度，合理平衡激发光吸收、光散射与转换光提取之间的关系，并结合高导热基片、多层/梯度结构及微结构光场调控，提高光转换效率和光热协同管理能力。

PiGF-LED器件将进一步向高功率、高集成和高光品质方向发展。现有PiGF封装已显著提升LED的耐热性和长期光色稳定性，但随着芯片功率密度和集成程度提高，多芯片热耦合、膜层均匀性、界面热阻以及侧壁蓝光泄漏等问题日益突出。因此，未来需发展晶圆级、芯片级及薄膜化PiGF封装工艺，并结合高反射围坝、多面颜色转换和梯度光谱结构，提高蓝光利用率和空间光色一致性。同时，随着Mini LED的发展，PiGF还需解决微尺度图形化、阵列化制造及批量一致性问题，以拓展其在高品质照明和新型显示领域的应用。

PiGF-LD器件则面向更高功率密度和更高亮度应用，其核心挑战在于激光集中激发导致的局部热积累和光热失衡。未来应通过PiGF与蓝宝石、陶瓷及金属散热结构结合，降低热阻并优化热传输路径，同时发展透射、反射及多方向散热结

构,实现激光能量均匀分布。此外,通过微结构光提取、多层转换和光束调控设计,可进一步提高光利用效率和色彩稳定性。随着激光照明技术的发展,PiGF-LD有望由单一颜色转换元件向集颜色转换、热管理、光束整形和封装于一体的集成化模块发展,并有望进一步拓展至汽车照明、激光投影、可见光通信以及高亮度特种光源等应用领域。

5 结束语

荧光玻璃膜(PiGF)结合了无机玻璃优异的热稳定性与荧光粉高效的光谱转换能力,是提升高功率固态光源性能和封装可靠性的重要技术途径。近年来,随着低熔点玻璃体系、浆料成膜及低温烧结技术的发展,PiGF在膜层致密化、界面结合和荧光粉稳定性等方面不断优化,其结构也由传统单层膜向多层、复合及多面转换结构演变。本文系统总结了PiGF材料制备、结构设计及器件封装的发展进展,重点分析了PiGF-CoB、PiGF-CSP和PiGF-LD等封装形式的结构特点与性能调控策略。其中,PiGF-CoB适用于多芯片高光通量LED模块,PiGF-CSP满足微型化和高密度集成需求,而PiGF-LD则通过优化光传播与热管理结构提升高功率激光照明性能。尽管PiGF封装在替代传统有机颜色转换层、提高器件耐热性和长期稳定性方面展现出明显优势,并已在部分高功率LED/LD器件中得到应用验证,但其进一步产业化推广仍面临低温烧结与荧光粉稳定性协同优化困难、膜层均匀性控制不足、界面热阻较高以及复杂结构制造难度较大等问题。未来需进一步发展低温高稳定玻璃体系、低热阻无机连接技术、晶圆级制造工艺及光热协同设计方法,完善器件可靠性评价体系,推动PiGF封装由器件验证和工程应用逐步向高功率、高集成和规模化应用方向发展,为高性能LED、LD及新型固态光源提供技术支撑。

参 考 文 献:

[1] SONG Y H, JI E K, JEONG B W, *et al*. High power laser-driven ceramic phosphor plate for outstanding efficient white light conversion in application of automotive lighting [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6:31206.

[2] HAGEMANN V, SEIDL A, WEIDMANN G. Static ceramic phosphor assemblies for high power, high luminance SSL-light sources for digital projection and specialty lighting [C]. *Light-Emitting Devices, Materials, and Applications XX-IV.*, 2020 :11302.

[3] CHEN X, LIU M, ZHOU C, *et al*. High luminous efficiency and excellent thermal performance in rod-shaped YAG:Ce phosphor ceramics for laser lighting [J]. *Optics Express*, 2024, 32(2):1465-1477.

[4] WANG J, TANG X, ZHENG P, *et al*. Thermally self-managing YAG:Ce-Al_2O_3 color converters enabling high-brightness laser-driven solid state lighting in a transmissive configuration [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(13):3901-3908.

[5] ZHANG X J, ZHANG J L, MA W T, *et al*. From nonluminescence to bright blue emission: boron-induced highly efficient Ce3+-doped hydroxyapatite phosphor [J]. *Inorganic Chemistry*, 2019, 58(19):13481-13491.

[6] KANG T, PARK K, RYU J, *et al*. Strong thermal stability of $Lu_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$ single crystal phosphor for laser lighting [J]. *Journal of Luminescence*, 2017, 191(A):35-39.

[7] ELAMRAWY M F, AZIZ E A A, KHAMIS S, *et al*. Performance analysis of an indoor visible light communication system using LED configurations and diverse photodetectors [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1):16064.

[8] ZHOU Z, TIAN P, LIU X, *et al*. Hydrogen peroxide-treated carbon dot phosphor with a bathochromic-shifted, aggregation-enhanced emission for light-emitting devices and visible light communication [J]. *Advanced Science*, 2018, 5(8):1800369.

[9] HOQUE A M, BRADLEY K R, FAN J, *et al*. Effects of humidity and phosphor on silicone/phosphor composite in white light-emitting diode package [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2019, 30(23):20471-20478.

[10] FAN J, WANG Z, ZHANG X, *et al*. High moisture accelerated mechanical behavior degradation of phosphor/silicone composites used in white light-emitting diodes [J]. *Polymers*, 2019, 11(8):1277.

[11] PAN Y, ZHU F, FAN J, *et al*. Investigation of mechanical properties of silicone/phosphor composite used in light emitting diodes package [J]. *Polymers*, 2018, 10(2):195.

[12] LI S, ZHU Q, TANG D, *et al*. Al_2O_3 - YAG: Ce composite phosphor ceramic: a thermally robust and efficient color con-

verter for solid state laser lighting [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, 4(37): 8648-8654.

[13] SAWADA T, FUJI H, YAGASAKI K, *et al*. Thermal properties of AlN - Ce: YAG composite ceramic phosphor for laser lighting [J]. *Optical Review*, 2022, 29(3): 276-285.

[14] LIU X, CHEN H, WANG J, *et al*. Trap engineering for improved thermal stability and optical properties of Ce: LuAG phosphor ceramics [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2025, 13(33): 17020-17030.

[15] 赵斌宇，梁晓娟，陈兆平，等. 白光LED用Ce:YAG单晶的光学性能与掺杂浓度分析 [J]. 高等学校化学学报，2014, 35(2): 230-236.
ZHAO B Y, LIANG X J, CHEN Z P, *et al*. Studies on optical properties and Ce concentration of Ce: YAG single crystal for WLEDs [J]. *Chemical Research in Chinese Universities*, 2014, 35(2): 230-236. (in Chinese)

[16] YAO Q, HU P, SUN P, *et al*. YAG: Ce^{3+} transparent ceramic phosphors brighten the next-generation laser-driven lighting [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(19): 1907888.

[17] KIM H Y, VISWANATH M S N, UNITHRATTIL S, *et al*. Review—phosphor plates for high-power LED applications: challenges and opportunities toward perfect lighting [J]. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2017, 7(1): R3134-R3147.

[18] 周军，潘裕柏，李江，等. 无水乙醇注浆成型制备YAG透明陶瓷 [J]. 无机材料学报，2011, 26(3): 254-256.
ZHOU J, PAN Y B, LI J, *et al*. Fabrication of YAG transparent ceramics using slip casting with ethanol [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2011, 26(3): 254-256. (in Chinese)

[19] 王靖涛，王茗，王森宇，等. 无压烧结制备 $Y_2MgAl_4SiO_{12}:Ce^{3+}$ 荧光陶瓷及光学性能 [J]. 发光学报，2024, 45(03): 434-442.
WANG J T, WANG M, WANG S Y, *et al*. Preparation and optical properties of $Y_2MgAl_4SiO_{12}:Ce^{3+}$ fluorescent ceramics by pressureless sintering [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2024, 45(03): 434-442. (in Chinese)

[20] ZORENKO Y, ZORENKO T, GORBENKO V, *et al*. Peculiarities of luminescent and scintillation properties of YAG: Ce phosphor prepared in different crystalline forms [J]. *Optical Materials*, 2012, 34(8): 1314-1319.

[21] 张琦，迟宏毅，吴海洋，等. YAG:Ce玻璃陶瓷选择性激光烧结制备及其发光性能 [J]. 发光学报，2023, 44(09): 1581-1587.
ZHANG Q, CHI H Y, WU H Y, *et al*. Luminescence properties of selective laser sintered YAG: Ce glass ceramic phosphors [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2023, 44(09): 1581-1587. (in Chinese)

[22] ZHANG T, LIU Y, WANG X, *et al*. The YAG: Ce phosphor glass prepared by a low-temperature stirring technique for WLED: achieving high luminous efficiency of the phosphor [J]. *ACS Omega*, 2025, 10(51): 63426-63433.

[23] LIU X, CHEN M, ZHAO J, *et al*. Unique composite architecture of phosphor-in-glass film coated on different heat-conducting substrates for high-brightness laser lighting [J]. *Journal of Advanced Ceramics*, 2025, 14(2): 9221027.

[24] HARSANYI G, POPPE A, HEGEDUS J, *et al*. Climatically accelerated material processes determining the long-term reliability of light-emitting diodes [J]. *Materials*, 2024, 17(7): 1643.

[25] ZHANG Y Q, LIU J M, ZHANG Y J, *et al*. Robust YAG: Ce single crystal for ultra-high efficiency laser lighting [J]. *Journal of Rare Earths*, 2022, 40(5): 717-724.

[26] LI Q, LIANG F, WANG J, *et al*. Regulation of the sintering trajectory of Ho, Pr: Y_2O_3 ceramics for 2.9μm mid-infrared lasers by atmospheric sintering [J]. *Journal of Advanced Ceramics*, 2025, 14(1): 9221006.

[27] WANG L, ZHANG J, XU L, *et al*. Ce: GdYAG phosphor-in-glass: An innovative yellow-emitting color converter for solid-state laser lighting [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, 134: 42-49.

[28] WANG P, LIN H, CHEN G, *et al*. Rapid sintering of high-efficiency phosphor-in-glass films for laser-driven light source [J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 2807.

[29] YANG L, CHEN M X, LV Z C, *et al*. Preparation of a YAG: Ce phosphor glass by screen-printing technology and its application in LED packaging [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(13): 2240-2243.

[30] ZHANG R, LIN H, YU Y, *et al*. A new-generation color converter for high-power white LED: transparent Ce^{3+}: YAG phosphor-in-glass [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(1): 158-164.

[31] ZHANG X J, YU J B, WANG J, *et al*. All-inorganic light convertor based on phosphor-in-glass engineering for next-generation modular high-brightness white LEDs/LDs. [J] *ACS Photonics*, 2017, 4(4): 986 - 995.

[32] ZHENG P, LI S, WANG L, *et al*. Unique color converter architecture enabling phosphor-in-glass (PiG) films suitable

for high-power and high-luminance laser-driven white lighting [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(17): 14930-14940.

[33] XU J, LIU B, LIU Z, *et al*. Design of laser-driven SiO_2-YAG: Ce composite thick film: Facile synthesis, robust thermal performance, and application in solid-state laser lighting [J]. *Optical Materials*, 2018, 75:508-512.

[34] 傅志红, 武宁杰, 田有锵, 等. 双层荧光粉涂覆对COB封装LED出光的影响 [J]. 应用光学, 2020, 41(5):1053-1059.
FU Z H, WU N J, TIAN Y Q, *et al*. Effect of double-layer phosphor coating on LED light output of COB encapsulation [J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(5):1053-1059. (in Chinese)

[35] YOO H, KOUHARA Y, YOON H C, *et al*. Sn - P - F containing glass matrix for the fabrication of phosphor-in-glass for use in high power LEDs [J]. *RSC Advances*, 2016, 6(133):111640-111647.

[36] 兰海, 邓种华, 刘著光, 等. LED的COB封装热仿真设计 [J]. 发光学报, 2012, 33(5):535-539.
LAN H, DENG Z H, LIU Z G, *et al*. Thermal simulation for design of LED COB package [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2012, 33(5):535-539. (in Chinese)

[37] 杨呈祥, 李欣, 孔亚飞, 等. 纳米银焊膏封装大功率COB LED模块的性能研究 [J]. 发光学报, 2016, 37(1): 94-99.
YANG C X, LI X, KONG Y F, *et al*. High power COB LED modules attached by nanosilver paste [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, 37(1):94-99. (in Chinese)

[38] 李宏, 乐毅, 王鹏, 等. B_2O_3-ZnO-SiO_2系梯度折射率荧光玻璃的制备及其光学性能 [J]. 硅酸盐学报, 2022,50(4):919-928.
LI H, LE Y, WANG P, *et al*. Preparation and optical properties of B_2O_3-ZnO-SiO_2 gradient index fluorescent glass [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 50(4):919-928. (in Chinese)

[39] JIANG C, FAN J, QIAN C, *et al*. Effects of voids on mechanical and thermal properties of the die attach solder layer used in high-power LED chip-scale packages [J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2018, 8(7):1254-1262.

[40] HUANG X. Phosphor-in-glass film on transparent diamond: an emerging new-generation color converter for high-brightness laser lighting [J]. *Science China Materials*, 2025, 68(4):1292-1293.

[41] YANG Z, ZHENG S, XI G, *et al*. Patterned phosphor-in-glass films with efficient thermal management for high-power laser projection displays [J]. *Journal of Advanced Ceramics*, 2023, 12(11):2075-2086.

[42] YU Z, ZHAO J, WANG Q, *et al*. Laser spot associated high-saturation phosphor-in-glass film for transmissive and reflective high-brightness laser lighting [J]. *Journal of Advanced Ceramics*, 2023, 12(9):1821-1832.

[43] LIU Z H, HU P, JIANG H J, *et al*. $CaAlSiN_3:Eu^{2+}/Lu_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$ phosphor-in-glass film with high luminous efficiency and CRI for laser diode lighting [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2021, 9(10):3522 - 3530.

[44] YANG Y, ZHUANG S, KAI B. High brightness laser-driven white emitter for Etendue-limited applications [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(30):8321-8325.

[45] WEI R, WANG L, ZHENG P, *et al*. On the luminance saturation of phosphor-in-glass (PiG) films for blue-laser-driven white lighting: Effects of the phosphor content and the film thickness [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39(5):1909-1917.

[46] XU J, YANG Y, GUO Z, *et al*. Design of a $CaAlSiN_3$: Eu/glass composite film: Facile synthesis, high saturation-threshold and application in high-power laser lighting [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2020, 40(13):4704-4708.

[47] 王桂录, 郑喜贵, 曹安港, 等. 固态照明用荧光玻璃的研究进展 [J]. 陶瓷学报, 2023, 44(1):38-57.
WANG G L, ZHENG X G, CAO A G, *et al*. Research progress in phosphor-in-glass for solid-state lighting [J]. *Journal of Ceramics*, 2023, 44(1):38-57. (in Chinese)

[48] LIU J, WANG L, BAO S, *et al*. Vigorous high-efficiency YAGG: Ce phosphor-in-glass film for next-generation laser lighting applications [J]. *Ceramics International*, 2023, 49(11):18836-18843.

[49] XU L, WANG X, WANG L, *et al*. Design of a novel $La_3Si_6N_{11}:Ce^{3+}$ phosphor-in-glass film for high power laser lighting: luminous efficiency toward 200 lmW^{-1} [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2022, 10(38):12817-12825.

[50] WANG X, XU L, WANG L, *et al*. High efficiency and stable $La_3Si_6N_{11}$: Ce phosphor-in-glass film for high power laser lighting [J]. *Journal of Luminescence*, 2024, 266:120294.

[51] DING W, YANG S, HOU X, *et al*. High performance composite phosphor-in-glass film for laser-driven warm white light on patterned sapphire substrate [J]. *Journal of Materiomics*, 2025, 11(3): 100892.

[52] ZHAO Z, WU X, ZHANG Y, *et al*. Laminated structure of phosphor-in-glass films on sapphire with high color rendering index and heat-conducting properties for high-power white LEDs/LDs [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 908: 164597.

[53] WANG L, WEI R, ZHENG P, *et al*. Realizing high-brightness and ultra-wide-color-gamut laser-driven backlighting by using laminated phosphor-in-glass (PiG) films [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(5): 1746-1754.

[54] LIU Z, HU P, FENG D, *et al*. Laminated composite of ceramic/glass films to realize high luminous efficiency and high color quality in laser-driven white lighting [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2024, 12(31): 11898-11906.

[55] PENG Y, YU Z, ZHAO J, *et al*. Unique sandwich design of high-efficiency heat-conducting phosphor-in-glass film for high-quality laser-driven white lighting [J]. *Journal of Advanced Ceramics*, 2022, 11: 1889 - 1900.

[56] ZHANG H, ZHAO J, YU Z, *et al*. A novel sapphire@PiGF@sapphire color converter with high luminescence saturation threshold for laser lighting [J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(4): 2414023.

[57] 章宏进，赵九洲，余子康，等. 高亮度激光荧光光源用双面蓝宝石基荧光玻璃膜制备及其光热性能 [J]. 发光学报, 2026, 47(04): 613-620.
ZHANG H J, ZHAO J Z, YU Z K, *et al*. Fabrication and photothermal performances of double-sided phosphor-in-glass film for high-brightness laser lighting [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2026, 47(04): 613-620. (in Chinese)

[58] KUANG Y, SUN Y, CHEN W, *et al*. Integrating high efficiency and thermal reliability photoluminescence in double-sapphire-sandwiched phosphor-in-glass film for laser projection displays [J]. *Advanced Functional Materials*, 2026, 36(12): e20133.

[59] CHENG H, WANG Y, ZHAO J, *et al*. Multi-channel thermal conductive phosphor-in-glass film with a record laser power density threshold for laser lighting [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 521: 166737.

[60] ZHANG H, ZHAO J, YU Z, *et al*. Omnidirectionally encapsulated phosphor-in-glass film converter for laser-driven lighting source [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2026, 20(12): e03165.

[61] 黄敏航，郭强强，孟遥，等. 激光照明用 $La_3Si_6N_{11}:Ce^{3+}$ 荧光玻璃薄膜合成及其性能调控 [J]. 发光学报, 2021, 42(10): 1482-1492.
HUANG M H, ZHU Q Q, MENG Y, *et al*. Synthesis and performance of $La_3Si_6N_{11}:Ce^{3+}$ phosphor-in-glass films for laser lighting applications [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2021, 42(10): 1482-1492. (in Chinese)

[62] LIU B, PANG S, CHEN X, *et al*. Pore-existing phosphor-in-glass film realizing ultra-efficient and uniform laser lighting [J]. *Journal of Luminescence*, 2024, 266: 120337.

[63] XU L, ZHAO G, MENG S, *et al*. Enhanced luminescent performance for remote LEDs of Ce: YAG phosphor-in-glass film on regular textured glass substrate by using chemical wet-etching [J]. *Ceramics International*, 2018, 44(18): 22283-22288.

[64] YUE X, XU J, LIN H, *et al*. β-SiAlON: Eu^{2+} phosphor-in-glass film: an efficient laser-driven color converter for high-brightness wide-color-gamut projection displays [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(11): 2100317.

[65] 李杨，胡丽丽，杨波波，等. 烧结温度对硼硅基质荧光玻璃发光性能影响 [J]. 无机材料学报, 2017, 32(3): 257-262.
LI Y, HU L L, YANG B B, *et al*. Effect of sintering temperature on luminescence properties of color conversion glasses in borosilicate glasses [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2017, 32(3): 257-262. (in Chinese)

[66] LEE I J, NOH H S, ELAYAPPAN V, *et al*. High luminous efficiency of a phosphor-in-glass plate by optimization of the glass and phosphor content for high-power LED applications [J]. *Ceramics International*, 2023, 49(9): 14505-14511.

[67] ZHOU J L, ZHU W, HUANG F F, *et al*. Effect of porosity on optical performance and thermal stability of LuAG: Ce phosphor-in-glass for laser lighting [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1018: 179206.

[68] JIN C, SHEN D, HUA Y, *et al*. Highly crystalline ceramic-composite tricolor phosphor-in-glass film for high-performance laser-driven lighting [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2026, 46(9): 118237.

[69] YUAN S, CHEN X, JIANG Z, *et al*. Performance improvement of reflective phosphor film via adjusting the thickness realizing bright and efficient laser lighting [J]. *Optics Letters*, 2024, 49(14): 3938-3941.

[70] XU T Y, ZHANG H J, LIANG M X, *et al*. Development of a double-sided heat-conducting BN@PiGF@Al_2O_3 color con-

verter for high-brightness laser lighting [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2025, 13(29): 14924 - 14930.

[71] 曾照明, 万垂铭, 肖国伟, 等. 大功率白光LED荧光胶和荧光片玻璃封装的光热性能 [J]. 发光学报, 2024, 45(3): 516-523.
ZENG Z M, WAN C M, XIAO G W, *et al*. Photothermal performance of high-power white LED packaged with phosphor-in-silicone and phosphor-in-glass [J]. *Chinese Journal of Luminescence*. , 2024, 45(03): 516-523. (in Chinese)

[72] 樊嘉杰, 王珍, 罗潇, 等. 湿热环境下LED荧光粉的性能退化规律及机理研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(1): 153-160.
FAN J J, WANG Z, LUO X, *et al*. Degradation mechanism analysis for LED phosphors under hygrothermal environment [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49(1): 153-160. (in Chinese)

[73] HUANG K C, HUANG Y R, TING S Y, *et al*. Facile fabrication of spherical silicone encapsulant with Pt nanoparticles for applications as white light-emitting diode [J]. *Materials Letters*, 2014, 134: 244-247.

[74] ZHANG R, WANG B Y, WANG H. Advances in phosphor-in-glass for white LED [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2017, 32(4): 337-345.

[75] 李栋才, 储昭学. 一种白光led用荧光玻璃片及其制备方法: 中国, CN103396007B [P]. 2015.

[76] 徐涛. 具有位于包含荧光体的玻璃转换板上的玻璃透镜的汽车LED光源: 中国, CN109461805B [P]. 2021.

[77] YOON H C, KOUHARA Y, YOO H, *et al*. Low-yellowing phosphor-in-glass for high-power chip-on-board white LEDs by optimizing a low-melting Sn-P-F-O glass matrix [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 7412.

[78] 李蕾, 苏佳槟, 李春莲. COB LED器件封装工艺优化研究及应用 [J]. 中国照明电器, 2020, (6): 22-30.
LI L, SU J B, LI C L. Research and application of the optimizing of chip on board LED device encapsulation process [J]. *China Light & Lighting*, 2020, (6): 22-30. (in Chinese)

[79] AHN S H, NAM Y H, HAN K, *et al*. Phosphor-in-glass thick film formation with low sintering temperature phosphosilicate glass for robust white LED [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2017, 100(4): 1280 - 1284.

[80] ZHANG X W, LIU J X, LIU J L, *et al*. Reliable and efficient phosphor-in-glass-based chip-scale packaging for high-power white LEDs [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2021, 68(9): 4473 - 4477.

[81] 张稀雯, 余子康, 牟运, 等. 荧光玻璃封装芯片级白光 LED 光热性能 [J]. 发光学报, 2021, 42(12): 1961-1968.
ZHANG X W, YU Z K, MOU Y, *et al*. Photothermal performance of phosphor-in-glass packaged chip-scale white LED [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2021, 42(12): 1961-1968. (in Chinese)

[82] ZHANG X W, YU Z K, LI J J, *et al*. Enhancing optical performance of chip-scale packaged white LEDs by phosphor-in-glass with high-reflective dam [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2022, 69(12): 6799-6803.

[83] HUANG H W, HUANG C W, CHEN Y C, *et al*. Five-surface phosphor-in-glass for enhanced illumination and superior color uniformity in large-view scale LEDs [J]. *Micromachines*, 2024, 15(8): 946.

[84] WIERER J J JR, TSAO J Y, SIZOV D S. Comparison between blue lasers and light-emitting diodes for future solid-state lighting [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(6): 963-993.

[85] CHEN H, ZHANG X Y, ZHOU C M, *et al*. High luminous efficiency and high saturation threshold in highly transparent LuAG: Ce phosphor ceramics for laser diodes lighting [J]. *Optics Express*, 2024, 32(2): 2644-2657.

[86] GEORGE A F, AL-WAISAWY S, WRIGHT J T, *et al*. Laser-driven phosphor-converted white light source for solid-state illumination [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(8): 1899-1905.

[87] MOU Y, WANG Q, GUO Z Y, *et al*. Nitride phosphor-in-glass films enabling high-performance white light in transmissive and reflective laser lighting [J]. *Ceramics International*, 2023, 49(8): 11821-11828.

[88] 孟遥, 郗强强, 黄敏航, 等. 激光照明应用钇铝石榴石荧光玻璃显色性能优化 [J]. 发光学报, 2021, 42(10): 1619-1626.
MENG Y, ZHU Q Q, HUANG M H, *et al*. Yttrium aluminum garnet phosphor-in-glass with improved color-rendering for laser lighting [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2021, 42(10): 1619-1626. (in Chinese)

[89] XU F C, LIANG Y Y, ZHANG J D, *et al*. High efficiency green-emitting phosphor-in-glass films for high-power solid-state laser lighting [J]. *Ceramics International*, 2022, 48(14): 20817-20824.

[90] MOU Y, CHEN D Y, TIAN B, *et al*. High-quality laser-driven white lighting enabling by collecting backward emission light of phosphor-in-glass film [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2024, 71(2): 1139-1144.

[91] ZHAO J Z, MOU Y, YU Z K, *et al*. Microstructured interface modification of laser-driven phosphor-in-glass-film for ul-

tra-high-efficiency white lighting [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 960: 170744.

[92] 翟月利, 徐坚. 面向荧光材料研究的光度学基础[J]. 发光学报, 2023, 44(11): 1894-1903.
ZHAI Y L, XU J. Fundamentals of photometry for luminescent materials [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2023, 44(11): 1894-1903. (in Chinese)

[93] 孙炳恒, 姜本学, 范金太, 等. 高显色激光照明用宽光谱远程荧光转换材料 [J]. 发光学报, 2021, 42(10): 1585-1618.
SUN B H, JIANG B X, FAN J T, *et al*. Broadband-emitting remote color convertors for high color rendering laser-driven lighting [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2021, 42(10): 1585-1618. (in Chinese)

[94] PENG Y, SUN Q L, LIU J X, *et al*. Reflective phosphor-in-glass color converter for laser-driven white lighting [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(16): 983-986.

[95] MOU Y, YU Z K, LEI Z Y, *et al*. Enhancing opto-thermal performances of white laser lighting by high reflective phosphor converter [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 918: 165637.

[96] MOU Y, ZHAO J Z, YU Z K, *et al*. Highly reflective interface design for phosphor-in-glass converter enabling ultrahigh efficiency laser-driven white lighting [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2022, 42(16): 7579-7586.

[97] ZHANG H J, YU Z K, ZHAO J Z, *et al*. Bicolor phosphor-in-glass film with highly reflective interface design for high-quality laser-driven white lighting [J]. *Ceramics International*, 2024, 50(17): 30802-30809.



叶美琪(2003—)，女，湖南醴陵人，硕士研究生，2026年于华中农业大学获得学士学位，主要从事光电芯片封装集成技术的研究。
E-mail: m202672133@hust.edu.cn



彭洋(1989—)，男，安徽六安人，博士，副教授，博士生导师，2017年于华中科技大学获得博士学位，主要从事宽禁带半导体芯片制造与封装集成的研究。
E-mail: ypeng@hust.edu.cn