

激光驱动近红外光源用荧光块材的研究进展与应用

刘高超, 夏志国*

(华南理工大学 发光材料与器件全国重点实验室, 物理与光电学院, 广东 广州 510641)

摘要: 近红外(700–2500 nm)光源具有强生物组织穿透、低环境光干扰、匹配众多分子基团振动的倍频和合频吸收等特点,在非视觉补光、医疗成像和有机成分无损定量检测等领域应用前景广阔。大功率近红外补光源能够弥补探测器在灵敏度和暗噪声方面的不足,大幅提升成像分辨率和探测信噪比,实现“看得深、看得远、看得清、测得准”的核心需求。然而,现有的商用近红外光源在发射波长、发射带宽、发光效率和器件输出功率等方面仍存在显著不足,难以满足高功率长期服役场景。激光驱动荧光光源以大功率激光二极管为泵浦源,通过透镜聚焦形成高能量密度的定向激光束,实现对高导热荧光块材的远程非接触激发,从根本上突破了传统近红外光源的功率瓶颈。本文综述了激光驱动近红外光源用荧光块材的研究进展,并对其在非视觉补光、实时无损穿透成像、生理信号监测、有机成分定量分析及光通信等领域的应用前景进行了总结与展望,相关讨论将有助于新型高效近红外发光材料的理性设计及大功率光源器件的应用探索。

关键词: 近红外发光材料; 激光驱动荧光光源; 掺杂; 荧光块体材料

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260232

CSTR: 32170.14.CJL.20260232

Research progress and applications of fluorescent bulk materials for laser-driven near-infrared light sources

LIU Gaochao, XIA zhiguo*

(The State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, School of Physics and Optoelectronics,
South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

* Corresponding Author, E-mail: xiazg@scut.edu.cn

Abstract: Near-infrared (NIR, 700–2500 nm) light sources exhibit strong penetration through biological tissues, low susceptibility to ambient light interference, and matching with the overtone and combination absorption of vibrational modes of numerous molecular groups. They hold broad application prospects in fields such as non-visual lighting, medical imaging, and non-destructive quantitative detection of organic components. High-power NIR light sources can compensate for the limitations of detectors in sensitivity and dark noise, significantly improving imaging resolution and detection signal-to-noise ratio, thereby fulfilling the core requirements of “seeing deeper, farther, clearer, and more accurately.” However, commercially available NIR light sources still suffer from notable deficiencies in emission wavelength, emission bandwidth, luminescence efficiency, and device output power, making them inadequate for long-term high-power operation. Laser-driven light sources utilize high-power laser diodes (LDs) as pump sources, form high-energy-density directional laser beams through lens focusing, enabling remote non-contact excitation of high-thermal-conductivity fluorescent bulk materials. This approach fundamentally overcomes the power bottlenecks of conventional NIR light sources. This review systematically summarizes the research progress in fluorescent bulk materials for laser-driven high-power broadband NIR light source, and discusses the application prospects of such light sources in non-visual lighting, real-time non-destructive penetration imaging, physiological signal monitoring, quantitative analysis of organic components, and optical communications. The related discussion is expected

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(52425206)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(52425206)

to facilitate the rational design of novel high-efficiency NIR luminescent materials and the application of high-power light source devices.

Keywords: near-infrared luminescent materials; laser-driven fluorescent light sources; doping; fluorescent bulk materials

1 引 言

近红外(Near-infrared, NIR, 700-2500 nm)光谱技术对社会发展和科技变革产生了深远影响,其应用范围已从夜视成像、安防监控、植物生长照明等传统领域,逐步拓展至光纤通讯、激光雷达、生物成像、虹膜识别、靶向治疗和有机成分分析等前沿交叉领域^[1-4]。这种低能量光子不仅对肉眼无刺激、隐蔽性强,同时具备优异的抗散射能力,在夜间及恶劣天气条件下仍能提供高清晰度成像效果与较高的探测信噪比^[5];其良好的组织穿透性与低生物损伤性为精准医疗技术的发展提供了关键支撑^[6];与此同时,有机物中O-H、C-H及N-H等官能团的倍频与合频吸收峰主要分布于近红外波段,且吸收强度与有机物含量正相关,这一特性使得利用近红外吸收光谱技术快速定量分析食品中的水分、蛋白质、脂肪等成分成为可能,为食品质量与有机成分的实时监控及无损鉴别提供了技术基础^[7]。

近红外成像与分析技术的快速发展,依赖于高性能近红外光源与探测器件的性能突破。明亮的近红外光源能够实现更远的照明距离与更大的穿透深度,同时提高成像信噪比和空间分辨率,如图1(a)所示^[8]。相比窄带近红外光,宽带光源能够提供更丰富的谱带信息,有助于提高探测成像的准确性和分辨率(图1(b))。例如在光谱分析领域,宽带近红外光可同时覆盖多种物质的特征吸收峰,实现多组分的同步检测,显著提升分析效率^[9];在生物成像领域,其宽光谱特性能够提供更清晰、更全面的组织结构细节,为疾病的早期诊断与治疗效果评估提供关键依据^[10]。高灵敏红外探测器能够捕捉并放大微弱的红外信号,从而获得高质量图像。典型的商用Si基、Ge基、PbS胶体量子点和InGaAs光电探测器的外量子效率(External Quantum Efficiency, EQE)光谱如图1(c)~(d)所示^[11,12]。其中Si基探测器成本最低,但受限于材料带隙,无法有效探测1000 nm以后的近红外光^[13];Ge基光电探测器虽然在NIR范围内具有良

好响应,但其暗电流较大,弱光照条件下成像与探测能力大幅降低;InGaAs材料在400-1700 nm范围内具有良好的响应特性,但制备成本较高;而PbS胶体量子点虽成本低廉,但其对近红外光的响应灵敏度远低于InGaAs材料。近红外检测系统的信噪比取决于有效光信号强度与背景噪声强度的比值,低功率近红外光源仅能激发光探测器产生微弱的光电流,易受电路噪声、环境杂光干扰,需延长信号积分时间以累积信号,导致响应速度慢、无法实时动态检测、信噪比低、检测精度差等问题,而大功率宽带近红外光源能弥补探测器在灵敏度等方面的缺陷,进一步提升探测信噪比与成像质量。因此,研制新型高效大功率宽带近红外光源对于推动近红外成像与分析技术向新兴领域发展至关重要。

目前,商用宽带近红外光源(卤钨灯、碳化硅热辐射源、发光二极管阵列等)在应用于大功率场景时存在能效比低、寿命短、光谱稳定性差等问题^[14]。近年来,基于商用紫外或蓝光芯片的近红外荧光粉转换型发光二极管(NIR Phosphor-converted Light-emitting Diode, NIR pc-LED),因具备体积小、稳定性高、谱带可调、寿命长、可与微型智能设备集成等优势而得到了较多关注。这种光源的光效主要受制于相应荧光粉,因此,研究者们提出了机器学习与第一性原理计算辅助的新型近红外荧光材料筛选、添加助熔剂并控制烧结气氛、电荷补偿、离子取代与共取代、陷阱工程、多格位能量传递等手段提升荧光粉的近红外发光性能^[15]。例如,吴明梅团队在 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4:\text{Cr}^{3+}$ 体系中引入 Li^+ 离子平衡电荷,促使结构中的 Cr^{4+} 向 Cr^{3+} 转变,并实现了 Cr^{3+} 从具有反演对称性的 $\text{Mg}(1)$ 位向低对称性的 $\text{Mg}(2)$ 位迁移,增强了 $d-d$ 禁戒跃迁的吸收截面^[16]。最终,荧光粉对蓝光的吸收效率从26%大幅提升至69%,EQE达到了创纪录的48%(发射峰值960 nm)。董斌团队在 $\text{Ca}_3\text{MgSb}_2\text{Al}_2\text{O}_{12}:\text{Cr}^{3+}$ 体系中,通过 $[\text{Na}^+-\text{Al}^{3+}]$ 共取代 $[\text{Ca}^{2+}-\text{Mg}^{2+}]$ 使 Cr^{3+} 的占位从 Sb^{5+} 位点向 Al^{3+} 位点转变,导致其位于蓝光区的 $^4\text{A}_2 \rightarrow ^4\text{T}_1(^4\text{F})$ 激发强度增强了25.6倍^[17]。与此

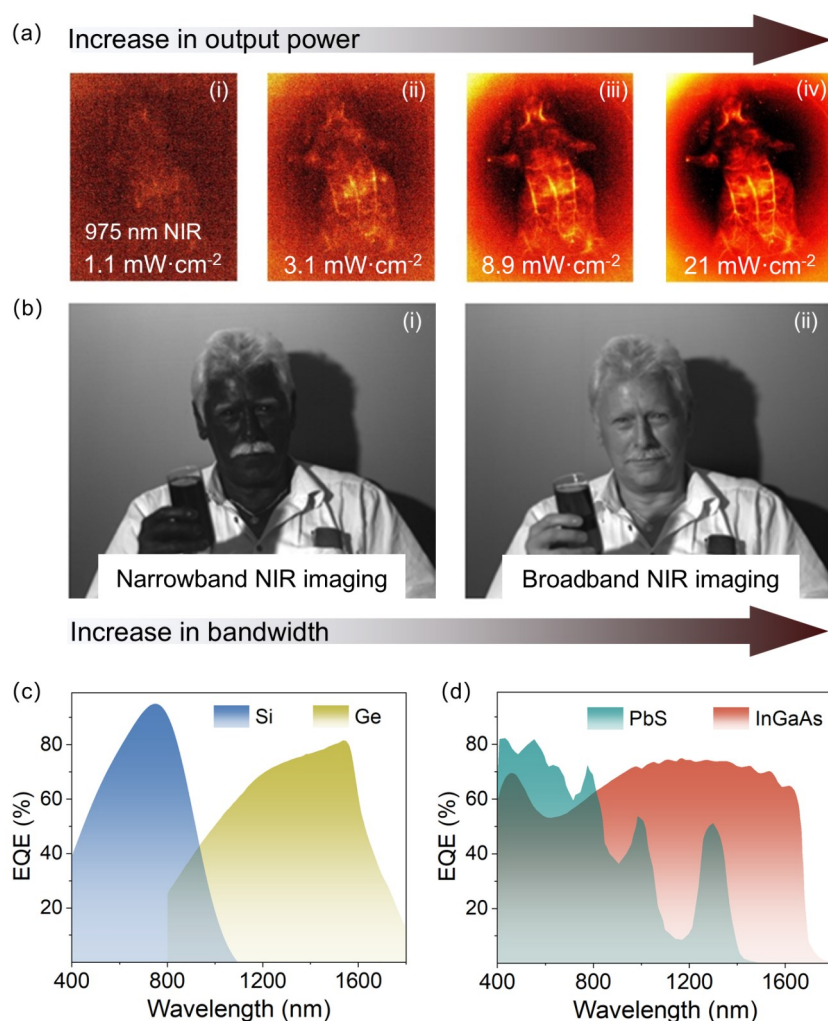


图1 (a)不同功率975 nm光激发下的荧光成像^[8]; (b)窄带和宽带近红外成像结果对比图; (c)~(d)商用Si基、Ge基、PbS胶体量子点和InGaAs光电探测器的EQE光谱^[11, 12]

Fig.1 (a) Fluorescence imaging under 975 nm excitation at different powers^[8]. (b) Comparison of narrowband and broadband NIR imaging results. (c)~(d) EQE spectra of commercial Si-based, Ge-based, PbS colloidal quantum dot, and InGaAs photodetectors^[11, 12]

同时,共取代还增强了晶格刚性,减小了斯托克斯位移和电子-声子耦合效应,使最优样品在423 K下的热稳定性达到了97%,内量子效率(Internal Quantum Efficiency, IQE)为90.6%。宿彦京团队采用多目标机器学习优化(三重目标优化)策略,建立了对发射波长、内量子效率和热稳定性三个关键性能指标的预测模型,从14751种无机氧化物中高效筛选出综合性能最优的候选体系。最终成功通过实验合成了LaGa_{0.5}Sb_{1.5}O₆:Cr³⁺近红外荧光粉,实现了850 nm宽带发射、55.4%的内量子效率以及393 K下保持65%发光强度的优异平衡性能^[18]。尽管研究者们基于上述技术手段,已经研制出了一系列高量子效率、高热稳定性的近红外荧光粉,但封装光源使用的LED芯片和有机树

脂分别存在“效率滚降”和“热导率低”等本征短板,导致器件在大电流驱动下易产生严重热积累,加速荧光材料热猝灭与器件老化,使得器件输出功率难以突破0.5 W,无法满足高功率长期服役需求^[19]。此外,有机树脂还会对1100-1500 nm范围的近红外光产生特征吸收,降低pc-LED器件的输出光强,并导致其发射光谱出现失真,进一步限制了实际应用^[20]。

有鉴于此,激光驱动荧光光源的出现为突破这一瓶颈提供了全新路径。这种器件以大功率激光二极管(Laser Diode, LD)作为泵浦源,通过透镜聚焦形成高能量密度定向激光束,实现对高导热荧光块体材料的远程非接触激发^[21]。这一架构不仅规避了LED芯片的本征效率缺陷和有机树脂

对近红外光的吸收,更通过泵浦源与荧光材料的空间分离设计大幅提升了散热效率,从根本上突破了 NIR pc-LED 的功率限制^[22]。同时,LD 凭借受激辐射发光特性,能够有效避免内部电子-空穴对的俄歇复合效应,在高输入功率密度下无效率滚降现象,且具有发光面积小、光束发散角小、输出能量密度高等优势,在大功率与特种应用领域具有不可替代的竞争力^[23]。

对于激光驱动荧光光源,发光饱和现象是制约其实现超高亮度输出的核心瓶颈,其失效机理主要分为热致饱和与光致饱和两类。热致发光饱和源于高功率密度激光激发下材料内部的严重热积累——荧光材料吸收激光能量后,部分能量通过非辐射弛豫转化为热量,导致局部温度急剧升高;温度上升会加剧晶格振动,增强电子-声子耦合,促进激发态电子通过非辐射通道返回基态(即热猝灭);热猝灭使发光效率降低,又进一步加剧非辐射热量的产生,形成“热失控效应”^[24]。热致饱和的严重程度与材料的 IQE、斯托克斯位移、热导率以及热稳定性等本征参数密切相关。光致发光饱和则是高光子通量激发下的本征物理过程,主要源于激活离子基态能级的粒子数耗尽——当泵浦速率超过激发态衰减速率时,大量激活离子被泵浦至激发态,基态粒子数显著减少,导致材料对后续激发的吸收能力下降,发光强度偏离与激发功率密度之间的线性关系。此外,高密度激发下还可能发生激发态吸收、能量传递上转换等非线性过程,为激发能量提供了额外的非辐射损耗通道,进一步加剧光致饱和^[25]。光致饱和的阈值与激活离子的能级寿命密切相关,寿命越长、基态恢复越慢、饱和阈值越低。当热致饱和与光致饱和的协同作用达到临界点时,极端的热积累会使荧光材料温度超过耐受极限,发生不可逆的物理或化学损伤。对于采用有机硅脂或玻璃封装的荧光体,高温会引发碳化和烧蚀,使转光层发黑失效^[26];对于无机荧光玻璃和陶瓷,剧烈的温度梯度和热膨胀失配会产生巨大的热应力,当其超过材料的断裂强度时,将导致样品开裂。因此,设计研发高量子效率、高热导率的荧光块体材料,构建激光驱动的近红外光源器件,并结合先进热管理技术抑制热量积累,是实现大功率近红外光输出的可靠策略和研究热点。

本文结合激光驱动大功率宽带近红外光源的

最新研究进展,首先分析了近红外荧光块材在激光驱动光源中的作用机理,然后从荧光单晶、荧光玻璃、荧光玻璃基复合材料和荧光陶瓷四个方面,综述了大功率宽带近红外荧光块体材料研制的关键挑战及解决方案,对其潜在应用领域与未来发展方向进行了总结和展望,以期新型高效近红外发光材料及其激光驱动大功率光源器件的理性设计与应用探索提供参考。

2 近红外荧光块材在激光驱动光源中的作用原理与分类

在激光驱动荧光光源的构建中,荧光材料的形态与性能对器件整体表现具有决定性影响。传统粉末状荧光颗粒因自身结构特性存在显著局限性:一方面,颗粒间的界面散射与内部晶格缺陷会导致入射光发生多次无规律的散射,不仅降低光能量的有效利用率,还会因散射损耗产生额外热量;另一方面,粉末颗粒的低堆积密度使其热导率通常低于 $0.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,在高功率激光持续激发下,热量难以快速扩散,导致材料表面形成局部高温区,极易引发荧光热猝灭效应,显著降低发光饱和阈值。为突破这些瓶颈,激光荧光光源体系普遍采用激光二极管泵浦高热导率荧光块体材料的技术路线,通过封装器件结构与材料形态优化实现光-热性能的协同提升。

根据封装结构中激光入射方向与荧光出射方向的相对关系,可将激光荧光光源的封装模式分为透射式封装与反射式封装两大类,二者的核心设计逻辑与性能特点存在显著差异。透射式封装核心原理是利用激光穿透荧光层时的“同步激发效应”:激光经光学透镜聚焦后,以垂直或小角度方式穿透荧光功能层,在穿透过程中激发荧光物质产生特征荧光,最终未被吸收的剩余激光和激发出的荧光混合后从同一侧出射(图 2(a))^[27]。该模式的优势在于架构紧凑性:无需额外反射结构,器件整体尺寸可控制在毫米级,适合对空间要求严苛的场景(如微型内窥镜、便携式光谱仪)。但其性能高度依赖荧光层的透明度控制——通过大量实验验证,荧光层对激发光的透过率需优化至 20%~40%^[28-30]。若透过率过高,会导致激光未被充分吸收即穿透荧光层,入射光利用率降至 60% 以下;若透明度过低,激发出的荧光会在荧光层内部发生多次散射,部分荧光被基质或缺陷吸收,荧光提取效率会下降 30% 以

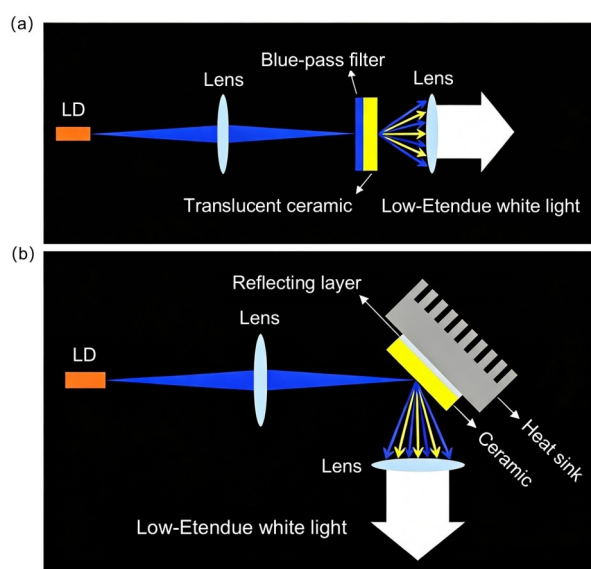


图2 (a)透射模式和(b)反射模式下的激光驱动荧光光源的结构示意图^[27]

Fig.2 Schematic structure of the laser-driven fluorescent light source in (a) transmission configuration and (b) reflection configuration.^[27]

上,因此40%左右的透明度是平衡入射光吸收与荧光提取的临界值^[28]。反射式封装使激光先入射至荧光层激发荧光,未被吸收的激光与激发出的荧光经反射后,与入射激光呈垂直角度出射,如图2(b)所示。与透射式相比,反射式的核心优势体现在适用性与稳定性:一方面,其荧光出射不依赖荧光层的透光性,即使是不透明的荧光陶瓷或粉末复合材料也可适用,大幅拓宽了荧光材料的选择范围;另一方面,反射结构可与金刚石或金属基板直接集

成,激光辐照产生的热量能通过荧光层快速传递至散热器,因此在高功率场景下,仍能保持荧光层温度控制在200℃以下,避免热猝灭导致的光效下降^[31]。但其劣势在于器件尺寸较大,需预留反射层与散热器空间,且反射层可能引入10%~15%的光损耗,因此更适合对功率与稳定性要求高、对尺寸不敏感的场景(如汽车前照灯、工业照明)。

因此,根据器件中所用块体材料微观结构与制备工艺的差异,近红外荧光块体材料可分为四大类:荧光单晶、荧光玻璃、荧光玻璃基复合材料及荧光陶瓷,各类材料在光学性能与实用化潜力上呈现出独特的技术特征。

2.1 近红外荧光单晶材料

荧光单晶材料凭借原子级有序排列的晶体结构,成为块体材料中性能最为优异的体系之一。其突出优势体现在:(1)晶体内部无晶界、气孔等宏观缺陷,光散射损耗极低,有利于实现高透明度与高内量子效率(理论上可接近100%);(2)连续的晶格结构为声子传输提供高效通道,热导率通常比粉末材料高1-2个数量级,具备优异的热稳定性;(3)化学均匀性高,发光中心离子分布均匀,可有效避免浓度猝灭效应。这些特性使荧光单晶成为早期激光驱动光源研究的重点方向。

徐军团团队利用边缘限定薄膜生长方式制备了不同 Cr^{3+} 含量的高透明度 $\text{GdScO}_3:\text{xCr}^{3+}$ ($x = 0.1\%$ 和 0.5%)晶体,并在446 nm激发下获得了峰值位于767 nm的宽带近红外发光,如图3(a)所示^[32]。实验测得单晶的热导率达到了 $4.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,

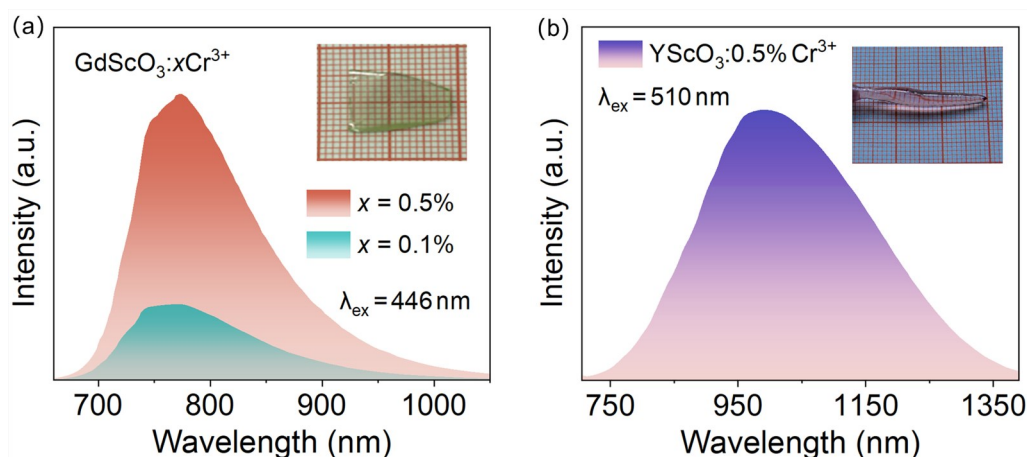


图3 (a) $\text{GdScO}_3:\text{xCr}^{3+}$ ($x = 0.1\%$ 和 0.5%)单晶在446 nm激发下的发射光谱^[32]; (b) $\text{YScO}_3:0.5\%\text{Cr}^{3+}$ 单晶在510 nm激发下的发射光谱;插图为相应单晶在自然光下的照片^[33]

Fig.3 (a) Emission spectra of $\text{GdScO}_3:\text{xCr}^{3+}$ ($x = 0.1\%$ and 0.5%) single crystals under 446 nm excitation^[32]. (b) Emission spectrum of $\text{YScO}_3:0.5\%\text{Cr}^{3+}$ single crystal under 510 nm excitation. The inserts show the photos of corresponding single crystals under natural light^[33]

但并未将其应用于激光驱动荧光光源。在此之后,他们课题组还采用四椭球水平光学浮区法晶体生长炉,制备出了长度约3 cm的棒状 $\text{YScO}_3:0.5\%\text{Cr}^{3+}$ 晶体(图3(b)),其在510 nm激发下的发射峰值位于998 nm,半峰宽达到了318 nm,有望应用于可调谐的超快红外激光器^[33]。值得注意的是,当前激光驱动近红外荧光单晶的研究重心仍集中于 Yb^{3+} 、 Nd^{3+} 等稀土离子掺杂体系。这类材料通过4f电子能级跃迁产生锐线近红外发光,可在短波长激光泵浦下实现高效率的长波激光输出,已广泛应用于固体激光器领域。然而,作为激光照明的光转换材料,荧光单晶存在难以规避的局限性:(1)光提取效率瓶颈,单晶内部缺乏晶界、气孔等光散射中心,导致激发光在晶体内部形成导波模式,绝大部分激发光会从晶体中透过而并没有被充分吸收,因此厘米级单晶的EQE甚至低于微米级晶体^[34,35];(2)制备成本高昂,高质量单晶的生长需严格控制温度梯度、气氛环境等参数,生长周期通常长达数天至数周,且多组分晶体与共掺杂体系易出现成分偏析,难以实现高浓度均匀掺杂;(3)机械加工难度大,单晶材料脆性高,切割、抛光等工艺易产生表面缺陷,进一步降低光学性能。这些因素共同限制了荧光单晶在激光驱动照明光源中的规模化应用^[36]。

2.2 近红外荧光玻璃材料

荧光玻璃是通过将激活离子与玻璃基质原料均匀混合后,经高温熔融、快速淬火冷却制备而成的一类功能玻璃材料,其微观结构表现为激活离子以掺杂形式均匀分散于连续玻璃网络中,整体呈现结构致密、光学透明度高的特征。该制备工艺的核心优势在于:(1)高效量产能力,通过熔融-淬火工艺可在数小时内制备出大尺寸荧光玻璃,且材料均匀性优异;(2)高度定制化,可通过调整原料配比、掺杂元素种类(稀土离子、过渡金属离子或缺陷中心)及熔制工艺参数,实现发光波长、强度及热稳定性的定向调控;(3)加工灵活性,成型后的荧光玻璃可像普通光学玻璃一样进行切割、研磨、抛光及精密成型,制备出透镜、棒状、片状等不同规格的器件,满足多样化应用场景需求。

董国平团队在铬酸盐玻璃熔融过程中添加金属铝粉,成功构筑了熔融态下的强还原性环境。该策略发挥了双重作用:一方面,铝粉将高价态的 Bi^{3+} 还原为具有近红外发光活性的低价态铋离子;

另一方面,反应生成的铝离子优先进位形成 $[\text{AlO}_4]$ 四面体,这种网络形成体通过补充非桥氧并与 $[\text{GeO}_4]$ 网络骨架紧密结合,显著提升了玻璃局域网络结构的刚性^[37]。这一金属还原策略不仅大幅提升了近红外发光强度(在460 nm激发下,积分强度提升约66倍),更关键的是诱导出了位于922 nm和1480 nm的新型近红外发光中心。多中心的协同发光将材料的发光半高宽展宽至约600 nm,成功实现了覆盖整个光通信窗口的超宽带近红外发射,展现出极大的器件应用潜力。然而,这种荧光玻璃并不适合用作大功率激光荧光光源,核心原因是其热导率低、高温稳定性差、抗光损伤阈值较低。大功率激光激发产生的大量热量无法快速导出,导致内部温度急剧升高,降低荧光玻璃的发光强度,并且荧光玻璃对高强度激光的耐受能力较弱,长期大功率照射易出现“光致暗化”等损伤,缩短使用寿命。

2.3 近红外荧光玻璃基复合材料

近红外荧光玻璃基复合材料是将荧光功能单元与玻璃基质结合,既保留了玻璃材料易加工、化学稳定性高的特点,又能通过调控发光中心实现多样化的光学性能。按照制备工艺特征与内部发光中心的存在形态,可将其细分为三大类:荧光粉-玻璃复合块体材料、荧光玻璃陶瓷材料及荧光粉-玻璃复合薄膜,各类材料在结构设计与性能优化上呈现出独特的技术路径。

2.3.1 荧光粉-玻璃复合块体材料

荧光粉-玻璃复合块体材料(Phosphor-in-Glass, PiG)的出现,针对性地解决了荧光玻璃因网络结构刚性不足和发光中心价态不稳定导致的发光效率瓶颈。其核心设计思路在于:保留荧光粉晶体的高发光活性结构,同时利用玻璃基质的优良稳定性。与荧光玻璃将激活离子直接掺杂于玻璃网络不同,PiG是先通过固相反应烧结获得高结晶度的荧光粉,再将荧光粉与低熔点玻璃粉末按比例均匀混合,经高温熔融后快速淬冷成型,最终形成荧光粉晶体均匀分散于玻璃基质中的复合结构。这种工艺借助玻璃基质的致密性与化学惰性,有效保护荧光粉发光中心,从而实现发光效率的提升。

张家骅团队发现传统pc-LED封装时所使用的有机树脂在1200 nm和1450 nm存在吸收峰,导致器件的电致发光光谱失真。为解决这一问题,

团队将 $\text{Zn}_3\text{Ga}_2\text{GeO}_8:\text{Cr}^{3+}, \text{Ni}^{2+}$ 荧光粉与硅酸盐玻璃粉末混合后,经熔融淬冷制备成 PiG 复合材料,基于该材料的转换型 LED (PiG-converted LED, PiGe-LED) 器件的电致发光光谱与荧光粉末的光致发光光谱完全一致,在 200 mA 驱动电流下实现了 17 mW 的宽带近红外输出功率,但电光转换效率仅为 2%^[38]。在激光驱动的宽带近红外 PiG 材料方面,解荣军团队将 $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Cr}^{3+}$ 荧光粉与商用玻璃粉混合烧制成块状 PiG 材料,然后与 100 mW 蓝光激光二极管组合,实现了 3.4 mW 的近红外光输出,光转换效率为 3.4%,如图 4 所示^[39]。该工作验证了块状 PiG 材料用于激光驱动近红外荧光光源的可行性,也揭示了其在效率优化上的提升空间。

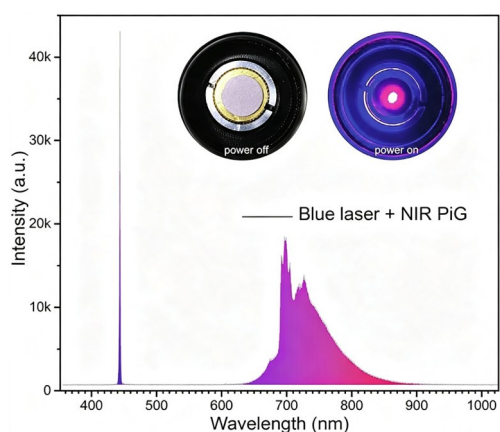


图 4 $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Cr}^{3+}$ PiG 材料在蓝光激光激发下的发射光谱。插图为近红外光源在关闭和开启状态下的照片^[39]

Fig.4 Emission spectrum of $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Cr}^{3+}$ PiG material under blue laser excitation. The insets show photographs of the NIR light sources with power off and on^[39]

2.3.2 荧光玻璃陶瓷材料

尽管 PiG 材料在光谱稳定性与制备成本上展现出显著优势,但其热导率通常仅为 $1\sim 2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,难以满足高功率激光激发场景的散热需求,这直接导致材料激光饱和阈值偏低(通常 $< 3 \text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$),严重限制了近红外输出功率。为突破这一瓶颈,科研人员以玻璃为基质,通过调控保温温度与保温时间等热处理参数,促使玻璃内部均匀析出结晶相(比例 0~99% 可控),形成“玻璃基质-晶体骨料”的复合结构,得到荧光玻璃陶瓷(Glass-ceramic, GC),在保留玻璃易加工特性的同时,借助晶体相的高导热性与高发光效率实现性能跃升^[40]。

Yasushi Nanai 团队通过熔融淬冷及后续热处理,制备出了 $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-CaO-GeO}_2$ 体系的透明玻璃及

$\text{Ca}_2\text{Ge}_7\text{O}_{16}:\text{Cr}^{3+}$ 玻璃陶瓷。研究发现原始玻璃在 700~1300 nm 范围内展现出 Cr^{3+} 的 ${}^4\text{T}_2\rightarrow{}^4\text{A}_2$ 宽带发射,而经过热处理后,随着 $\text{Ca}_2\text{Ge}_7\text{O}_{16}$ 纳米晶的择优生长, Cr^{3+} 进入晶格格位,晶体场增强使发射峰蓝移,并与 Si 探测器的探测窗口高度匹配,但发光量子效率仅有 19%^[41]。我们团队通过高温急冷制备出了锗酸盐玻璃前驱体,并以全析晶的方式制备出了外量子效率达 49.2% 的 $\text{Na}_2\text{SrGe}_6\text{O}_{14}:\text{Cr}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ 近红外荧光玻璃陶瓷,借助 $\text{Cr}^{3+}\rightarrow\text{Yb}^{3+}$ 能量传递实现了 NIR-I 和 NIR-II 的共同发射以及热稳定性的改善。将其与商用蓝光芯片封装,得到的荧光玻璃陶瓷转换型 LED (GC-converted LED, GCc-LED) 器件的光电效率高达 19.1%,在 600 mA 下可以实现 0.92 W 的输出^[42]。李杨教授团队首先采用熔融-淬冷法制备出均匀透明的锗酸盐前驱体玻璃,随后通过优化热处理工艺,在玻璃基质中析出了尺寸均一的 Cr^{3+} 掺杂 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 纳米晶体,其在近红外波段的光透过率高达 80% 以上, EQE 最高可达 50%,这得益于纳米晶体尺寸 ($< 50 \text{ nm}$) 远小于可见光波长,有效避免了明显的光散射损耗^[43]。将该玻璃陶瓷与蓝光 LED 芯片集成封装后,所制备的 GCc-LED 器件在 500 mA 电流驱动下,近红外输出功率达到了 568 mW,电-光转换效率为 13%,是传统 pc-LED 器件的 4 倍,充分验证了 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$ 玻璃陶瓷在高功率场景下的应用优势。

在激光驱动的宽带近红外荧光玻璃陶瓷领域,肖文戈团队采用气动悬浮炉制备技术合成了 $\text{Y}_2\text{CaAl}_4\text{SiO}_{12}:\text{Cr}^{3+}$ 玻璃前驱体^[44]。该技术通过气体浮力实现熔体无容器凝固,有效避免了传统坩埚接触导致的杂质污染,保证了前驱体玻璃的高纯度与成分均匀性。随后,团队将玻璃前驱体置于还原气氛中进行退火处理,成功制备出了峰值位于 760 nm 的 $\text{Y}_2\text{CaAl}_4\text{SiO}_{12}:\text{Cr}^{3+}$ 玻璃陶瓷,如图 5(a) 所示。在 440 nm 激发下,该玻璃陶瓷的 EQE 约 60%,虽然热导率只有 $3.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,最终仍在 $184 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的蓝色激光激发下获得了 0.66 W 的宽带近红外输出功率(图 5(b))。在此基础上,该团队进一步采用 Ba^{2+} 取代部分 Ca^{2+} 离子,采用类似的工艺制备了 EQE 为 45% 的 $\text{Y}_2\text{Ca}_{0.3}\text{Ba}_{0.7}\text{Al}_4\text{SiO}_{12}:\text{Cr}^{3+}$ (YCBAS: Cr^{3+}) 玻璃陶瓷,在 450 nm LED 激发下获得了 183 mW 的近红外输出功率^[45]。当采用 450 nm LD 作为激发源时,激光饱和阈值和近红

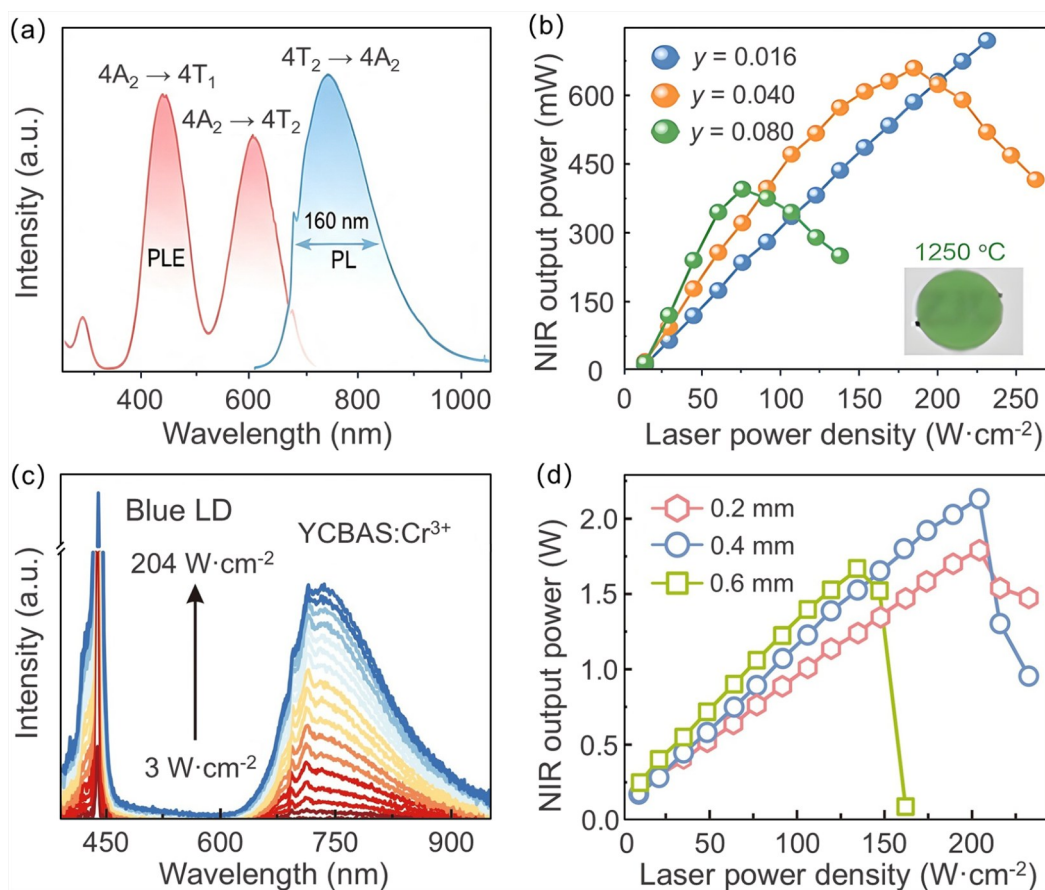


图5 (a) Y2CaAl3.96SiO12:0.04Cr3+玻璃陶瓷的荧光光谱^[44]; (b) Y2CaAl4-ySiO12:yCr3+(y = 0.016~0.08)玻璃陶瓷的近红外输出功率与入射的450 nm激光功率密度的关系, 插图为1250 °C退火析晶后的Y2CaAl3.96SiO12:0.04Cr3+玻璃陶瓷在日光下的照片^[44]; (c) 厚度为0.4 mm的YCBAS:0.04Cr3+陶瓷在不同功率密度下激光激发下的发光光谱^[45]; (d) 不同厚度YCBAS:0.04Cr3+陶瓷的近红外输出功率随激光功率密度的变化关系^[45]

Fig.5 (a) Fluorescence spectrum of Y2CaAl3.96SiO12:0.04Cr3+ GC^[44]. (b) The relationship between the NIR output power of Y2CaAl4-ySiO12:yCr3+(y = 0.016-0.08) GC with the incident 450 nm laser power density. The insert shows a photo of Y2CaAl3.96SiO12:0.04Cr3+ GC in sunlight that annealed and crystallized at 1250 °C^[44]. (c) Emission spectra of YCBAS:0.04Cr3+ ceramic with a thickness of 0.4 mm at different input laser power densities^[45]. (d) NIR output power of YCBAS:0.04Cr3+ ceramics with different thicknesses as a function of the laser power density^[45]

外输出功率分别提高到了204 W·cm⁻²和2.1 W, 如图5(c)~(d)所示, 具有良好的应用前景。

此外, 叶信宇团队采用熔融淬火析晶工艺得到了发射峰值位于785 nm、EQE为65%的AlP3O9:Cr³⁺-AlPO4复相玻璃陶瓷, 其在423 K时的发光强度仍有室温的93%, 但热导率仅有2.78 W·m⁻¹·K⁻¹。在9 W·mm⁻²的激光激发下, 复相玻璃陶瓷表现出了0.7 W的宽带近红外输出功率^[46]。

2.3.2 荧光粉-玻璃复合薄膜

玻璃陶瓷受限于制备工艺的热力学平衡特性, 其内部仍不可避免残留少量玻璃相, 并形成“热阻瓶颈”大幅限制玻璃陶瓷整体的热导率, 使之通常难以突破5 W·m⁻¹·K⁻¹, 进而制约激光饱和阈值与近红外输出功率的提升。为从结构设计层

面彻底解决这一问题, 荧光粉-玻璃复合薄膜(Phosphor-in-Glass Film, PiGF)应运而生。这类材料通过“荧光功能层+高热导衬底”的异质集成结构, 将热量快速导出路径与荧光转换功能分离, 从根本上优化了热管理效率, 其热导率可以与致密的荧光陶瓷甚至是单晶材料相媲美。PiGF的制备工艺具有明确的工业化适配性, 典型流程如下: 首先, 将荧光粉粉体、低熔点玻璃粉末与有机树脂按特定质量比混合, 形成均匀的浆料体系; 随后, 采用丝网印刷技术将浆料涂覆于AlN或Al2O3等高导热陶瓷衬底表面, 控制湿膜厚度为10~100 μm; 最后, 将涂覆后的衬底置于马弗炉中进行阶梯式热处理: 先在300~400 °C保温使有机树脂完全氧化分解并排除; 再升温至玻璃软化温度保温

30-60 分钟, 促使玻璃粉熔融并形成致密的粘结相, 将荧光粉颗粒牢固包覆并与衬底结合, 最终得到微米级厚度的 PiGF 功能层^[47]。这种结构设计的核心优势在于: PiGF 功能层厚度极薄, 激光激发产生的热量可通过玻璃粘结相快速传递至下方高热导衬底, 有效避免热量在荧光粉颗粒内部积累, 显著提升材料的激光耐受能力。

2023 年, 王静课题组报道了激光驱动宽带近红外 PiGF 光源的实用化验证^[48]。该团队以蓝宝石为衬底, 采用上述工艺制备出了半透明的 MgO:Cr³⁺, Ni²⁺ PiGF (图 6(a)), 其中荧光粉用量为 80wt%, 最高 EQE 达到了 33.5%, 热导率达到了 34.5 W·m⁻¹·K⁻¹。随着丝网印刷层数(Ls)的增加, PiGF 在相同功率激发下的输出功率在 2-3 Ls 时达到最佳, 然后因为较厚的荧光层阻碍了近红外光提取以及热量传递到蓝宝石衬底, 导致输出功率在 4 Ls 时出现降低。最终在 8 W·mm⁻² 的蓝色激光激发下获得了 5.3 mW 的宽带近红外输出功率, 是相应 pc-LED 的 5 倍(图 6(b)~(c))。这一研究成果不仅拓展了 PiGF 的材料体系, 更开创了激

光驱动宽带近红外荧光光源的新技术路线。在此基础上, 林航研究员进一步深化了 NIR PiGF 的性能调控研究。该团队同样以蓝宝石为衬底, 设计并制备出 Ce³⁺-Cr³⁺共掺杂且加入 Li⁺离子补偿电荷的 Ca₃Sc₂Si₃O₁₂:Ce³⁺, Cr³⁺, Li⁺ PiGF。通过引入 Ce³⁺作为敏化离子, 有效提升了 Cr³⁺的近红外发光强度。为优化器件性能, 团队系统探究了 PiGF 功能层厚度(20~100 μm)与荧光粉:玻璃粉质量比(1:2~10:1)对激光荧光性能的影响规律, 结果如图 7 所示^[49]。实验发现, 随着膜厚增加, 荧光转换效率先提升后趋于稳定(80 μm 时达到最优), 过厚的膜层会导致光散射损耗增加; 而荧光粉比例的提高虽能增强发光强度, 但过高比例(>6:1)会导致玻璃粘结相不足, 影响膜层致密性与散热效率。当功能层厚度为 80 μm、荧光粉与玻璃粉质量比为 6:1 时, 该 PiGF 展现出最优性能。采用静态透射式光路测试得到其在 18 W·mm⁻² 的蓝色激光激发下, 具有 0.7 W 的宽带近红外输出功率; 而采用静态反射式光路测试得到其在 20 W·mm⁻² 的蓝色激光激发下, 实现了 1.02 W 的输出功率。

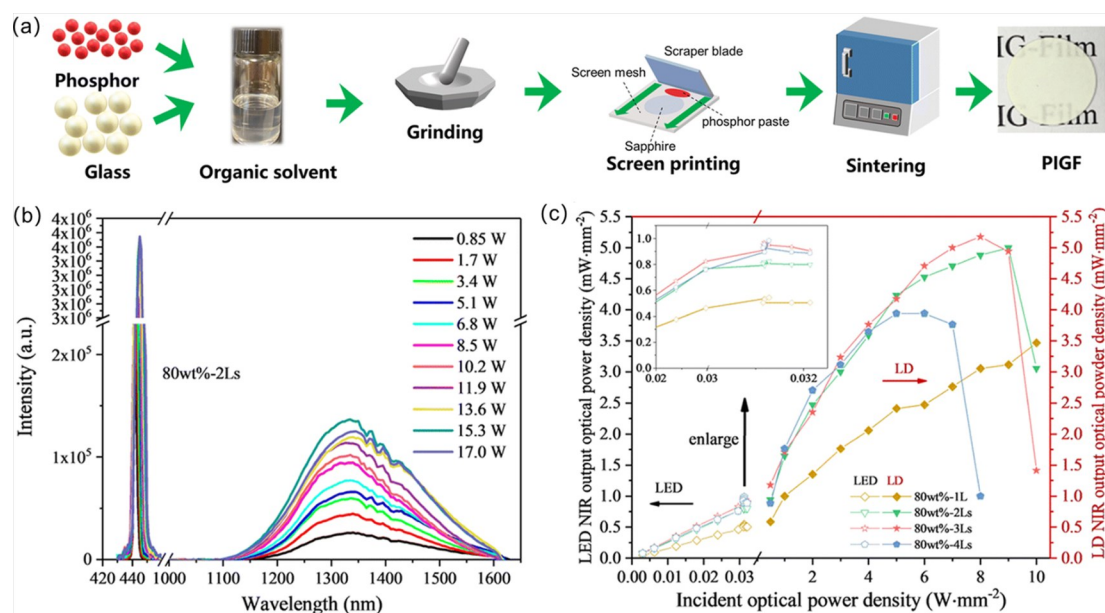


图 6 (a)采用丝网印刷技术制备半透明 MgO:Cr³⁺, Ni²⁺ PiGF 的流程; (b)2 层丝网印刷的 MgO:Cr³⁺, Ni²⁺ PiGF 在不同功率蓝光激光下的发射光谱; (c)不同丝网印刷层数的 MgO:Cr³⁺, Ni²⁺ PiGF 和传统 pc-LED 在不同激发功率下的近红外输出功率, 插图为近红外 pc-LED 输出功率的放大图^[48]

Fig.6 (a) Screen-printing technique to fabricate MgO:Cr³⁺, Ni²⁺ PiGF combination. (b) Emission spectra of MgO:Cr³⁺, Ni²⁺ PiGF with 2 Ls under different excitation powers of blue laser. (c) The NIR output powers of MgO:Cr³⁺, Ni²⁺ PiGF with different Ls and traditional pc-LED under different excitation powers. The inset shows an enlarged view of the NIR pc-LED output power^[48]

尽管荧光粉-玻璃复合薄膜通过“微米级功能层+高热导衬底”的结构创新, 解决了传统块体材料

的热阻瓶颈, 同时兼具备成本低和工艺兼容性强等优势, 但高热基板的选择一直受到限制, 因为

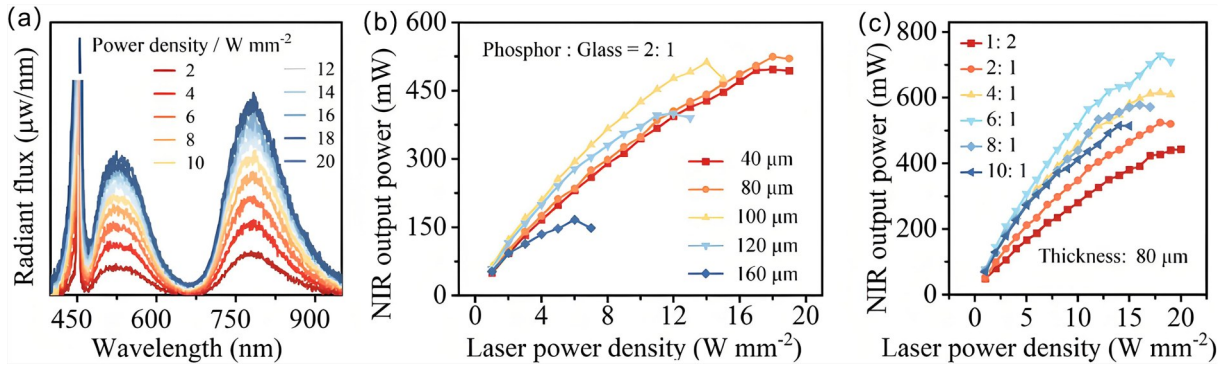


图7 (a)厚度为80 μm且荧光粉:玻璃=6:1时的Ca₃Sc₂Si₃O₁₂:Ce³⁺,Cr³⁺,Li+ PiGF在不同功率密度蓝光激光照射下的发射光谱;(b)不同厚度的Ca₃Sc₂Si₃O₁₂:Ce³⁺,Cr³⁺,Li+ PiGF在不同功率密度蓝光激发下的近红外输出功率;(c)不同荧光粉含量的PiGF在不同功率密度蓝光激发下的近红外输出功率^[49]

Fig.7 (a) Emission spectra of Ca₃Sc₂Si₃O₁₂:Ce³⁺,Cr³⁺,Li+ PiGF (with a thickness of 80 μm and phosphor:glass ratio of 6:1) under blue laser irradiation with different optical power densities. (b) NIR output powers of Ca₃Sc₂Si₃O₁₂:Ce³⁺,Cr³⁺,Li+ PiGF with different thicknesses under blue light excitation at different power densities. (c) NIR output powers of the PiGF with different phosphor contents under blue light excitation at different power densities^[49]

需要匹配基板与玻璃的热膨胀系数,以避免器件制备或服役过程中因热应力导致的PiGF开裂^[50,51]。Hansang Kwon教授等人提出了一种荧光粉-铝复合材料,该材料在荧光粉与铝之间设置了热梯度层,从而减小了热膨胀系数的差异,避免了裂纹和分层现象^[52]。然而,具有高反射率的铝表面在烧结过程中易被氧气和玻璃腐蚀,进而对PiGF的光提取效率产生负面影响。为突破这一限制,有研究者提出了向PiGF内部直接引入高导热填料的策略。例如,Al₂O₃的热膨胀系数($8.4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)与Y₃Al₅O₁₂($8.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)等石榴石结构氧化物材料接近,常被用于提升复相陶瓷热导率和激光荧光性能^[53]。叶信宇团队通过添加高导热Al₂O₃提升了石榴石结构Gd₃Al₃Ga₂O₁₂:Cr³⁺陶瓷的热导率和光提取率,加快了大功率激光激发下的热量耗散,保障了器件在10 W·mm⁻²高功率密度下仍能稳定工作,近红外输出功率达到了1.52 W^[30]。然而,该方案对填料的综合性能要求极为苛刻:填料需具有较高的热导率,且在泵浦光和发射光波段具备大于80%的透光率以避免光损耗,还需耐受PiGF烧结过程的高温而不氧化、不与基体产生化学反应,同时在长期使用中具备优异的抗老化性以防止性能衰减^[54]。目前能同时满足这些条件的填料种类极少(如Al₂O₃和MgO),因此该策略的应用范围受限。

2.4 荧光陶瓷材料

荧光陶瓷作为基于透明陶瓷烧结技术发展的新型光功能多晶材料,凭借其多维度性能优势,成为突破PiGF瓶颈、适配激光高功率泵浦需求的核心材

料。与传统荧光粉、玻璃陶瓷、PiGF相比,荧光陶瓷的核心竞争力体现在以下方面:(1)高热导率与抗热冲击性:基体多为氧化物,热导率可达5~50 W·m⁻¹·K⁻¹,可快速疏散激光泵浦产生的局部高温;同时抗弯强度较高,能承受骤冷骤热的温度变化,避免热应力开裂;(2)高发光效率:荧光陶瓷刚性的晶体结构为发光离子提供了更稳定的晶体场,同时具有高结晶度和低缺陷密度,因而发光效率较高且热稳定性较强;(3)结构设计灵活性:可通过复相复合、界面改性、孔隙优化等手段进一步优化性能,例如引入高导热第二相可将热导率提升50%以上,通过表面镀膜(如SiO₂、TiO₂增透膜)可减少光反射损耗,从而提升发光饱和阈值;(4)制备成本优势:采用放电等离子体烧结或焦耳热烧结可将荧光陶瓷的制备时间缩短至数十分钟,同时也避免了荧光玻璃“熔融-成型-退火”过程中因形状和裂纹控制难而导致的废品率。荧光陶瓷自身作为“功能层+散热层”一体化结构,省去了与高热导衬底复合的工艺与材料成本。正是这些优势,使得荧光陶瓷在激光照明、生物成像、安防监控等领域展现出巨大应用潜力。

根据荧光层的“能量承载方式”,可将激光驱动荧光光源分为静态封装与动态转轮封装两大类。两类方案的核心差异在于荧光材料与激光辐照点的相对运动状态,这直接决定了材料的热负荷承载能力与高功率适配性。静态封装的本质是激光辐照点与荧光层固定接触,荧光材料某一特定区域持续承受激光能量,热量易在辐照点累积,导致局部温度可达200℃以上;而动态转轮封装通过“荧光

层旋转”打破这一局限,将大尺寸荧光样品通过高温导热胶贴合在无刷电机驱动的金属转盘上,电机带动转盘高速旋转。当激光聚焦于荧光层时,辐照点不再固定于某一位置,而是随转盘旋转在荧光层环形区域形成“动态扫描轨迹”,实现两大核心功能:(1)脉冲激发效应:激光与荧光层的相对运动使荧光材料某一区域“受激-散热-再受激”循环进行,等效形成脉冲式激发(脉冲频率与转速正相关,如3000 rpm对应50 Hz脉冲),可匹配高速成像系统的快门频率;(2)高效热扩散:辐照点产生的热量在旋转过程中,一方面通过金属转盘快速传导至周围区域,另一方面与转盘周围的冷却气流快速交换,使荧光层平均温度控制在80~120 °C,远低于静态封装时的200~300 °C,大幅降低热猝灭风险。

2.4.1 静态模式激发近红外荧光陶瓷

2022年,蒋俊研究员团队采用热等静压技术烧结出了不同Al/Ga比的 $\text{Gd}_3\text{Al}_x\text{Ga}_{5-x}\text{O}_{12}:0.025\text{Cr}^{3+}$ ($x = 0\sim 4$)透明陶瓷^[55],发现当 $x = 2$ 时的 $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:0.025\text{Cr}^{3+}$ 陶瓷具有最高的宽带近红外发光强

度,其发射峰值位于730 nm,EQE达到了65%且热稳定性为95.6%@150 °C,室温下的热导率为 $8\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,在5.5 W蓝光激光激发下具有1.65 W的近红外输出功率^[56]。在此基础上,他们进一步采用 Sc^{3+} 取代部分 Al^{3+} 离子,并结合热等静压烧结制备了EQE为47%的 $\text{Gd}_3\text{Al}_{2-x}\text{Sc}_x\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Cr}^{3+}$ ($x = 0\sim 1.95$)透明陶瓷,发射峰值红移到了754 nm,但并未对其进行大功率激光激发下的输出功率测试,而是封装到蓝光LED芯片上,获得了924 mW的宽带近红外输出功率和13%的电-光转换效率^[57]。

我们团队采用放电等离子体烧结(Spark Plasma Sintering, SPS)技术制备了 Cr^{3+} 离子掺杂的 MgO 透明陶瓷,在460 nm激发下获得了峰值位于810 nm的宽带近红外发光^[58]。其中 Cr^{3+} 离子在 Mg^{2+} 格位的异价取代诱导晶格中产生了镁空位以平衡电荷。随着 Cr^{3+} 离子含量的增加,镁空位的存在形式从[100]方向逐渐向[110]方向转变,进一步降低了 Cr^{3+} 发光中心的局域对称性(图8(a)~(b)),导致其激发态能级出现分裂,从而使得发射光谱由

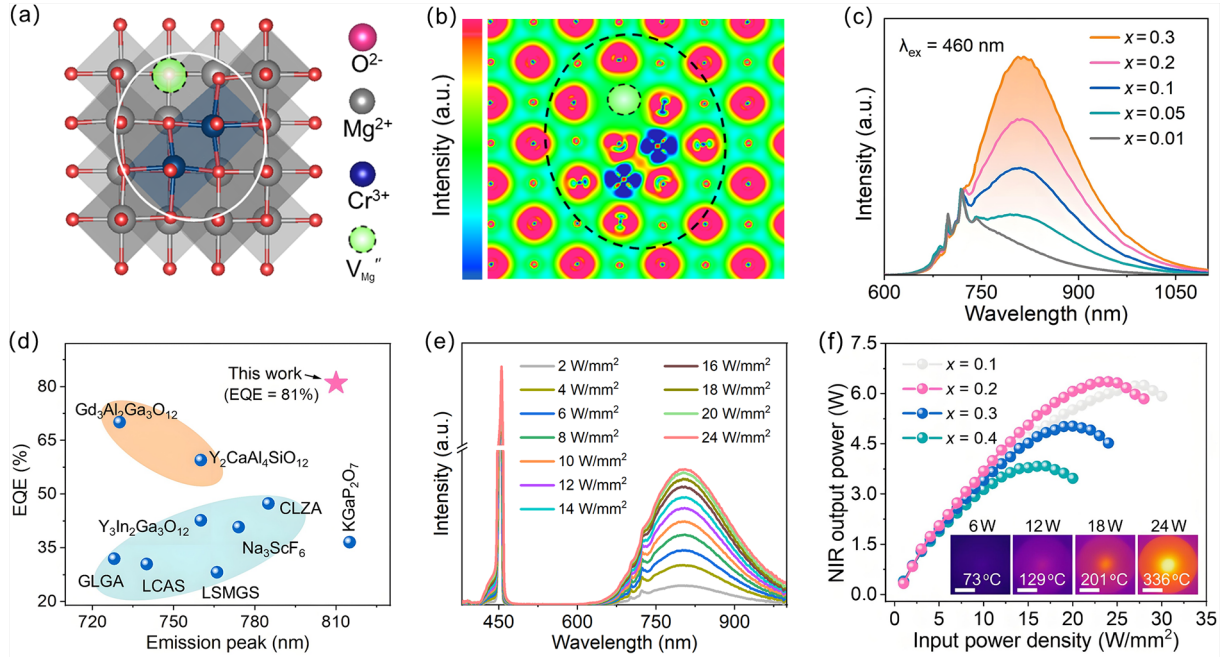


图8 (a-b) $\text{MgO}:\text{Cr}^{3+}$ 陶瓷的晶体结构和电荷密度分布二维切片;(c) $\text{MgO}:\text{x}\%\text{Cr}^{3+}$ ($x = 0.01\sim 0.3$)陶瓷的光致发光光谱;(d) $\text{MgO}:2\%\text{Cr}^{3+}$ 陶瓷的外量子效率与文献报导结果的对比图;(e) $\text{MgO}:0.2\%\text{Cr}^{3+}$ 陶瓷的激光驱动荧光光谱随450 nm激发功率密度变化情况;(f)输入功率密度依赖的 $\text{MgO}:\text{x}\%\text{Cr}^{3+}$ 陶瓷($x = 0.1\sim 0.4$)的近红外输出功率,插图为不同功率蓝光激光激发下 $\text{MgO}:0.2\%\text{Cr}^{3+}$ 透明陶瓷的热成像照片,比例尺为5 mm^[58]

Fig.8 (a-b) Crystal structure and two-dimensional charge density distribution slices of $\text{MgO}:\text{Cr}^{3+}$ ceramics.(c) Photoluminescence spectra of $\text{MgO}:\text{x}\%\text{Cr}^{3+}$ ($x = 0.01\sim 0.3$) ceramics.(d) EQEs of $\text{MgO}:2\%\text{Cr}^{3+}$ ceramic compared with literature results.(e) Laser-driven fluorescence spectra of $\text{MgO}:0.2\%\text{Cr}^{3+}$ ceramic as a function of 450 nm excitation power density.(f) NIR output power of $\text{MgO}:\text{x}\%\text{Cr}^{3+}$ ceramics ($x = 0.1\sim 0.4$) as a function of input power density. The inset demonstrates thermal images of $\text{MgO}:0.2\%\text{Cr}^{3+}$ transparent ceramic under different blue laser powers. Scale bar: 5 mm^[58]

锐线逐渐展宽(图8(c))。实验测得 $\text{MgO:0.2\%Cr}^{3+}$ 陶瓷的外量子效率达到了81%(图8(d)),且室温热导率高达 $52 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。不同 Cr^{3+} 离子间存在着声子辅助的能量传递过程,使得陶瓷的荧光热稳定性达到了 $87.5\% @ 423 \text{ K}$ 。在 $22 \text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$ 的蓝色激光激发下, $\text{MgO:0.2\%Cr}^{3+}$ 陶瓷表现出创纪录的 6.36 W 的宽带 NIR 输出功率(图8(e)~(f)),光转换效率达到了29%。采用这种激光驱动近红外荧光光源搭建的原型器件,可穿透10 cm厚的上臂和3 mm厚的不透明硬纸板,实现血管分布和剪刀轮廓的实时成像,分辨率为 $6 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。为进一步探究阳离子空位对 Cr^{3+} 离子发光的影响,同时拓展其发射波段,我们团队设计合成了 $\text{MgAl}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$ 透明陶瓷,在450 nm激发下获得了峰值686~928 nm 宽带可调、最高外量子效率73%的近红外发光,发射半峰宽可达 $315 \text{ nm}^{[59]}$ 。不同于 MgO:Cr^{3+} 陶瓷的 Cr^{3+} - Cr^{3+} 离子对发光,EPR测试发现 $\text{MgAl}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$ 中的发光中心主要以孤立 Cr^{3+} 离子的形式存在。随着 Cr^{3+} 和 Al^{3+} 含量增加,形成的富铝尖晶石结构中的阳离子空位数量增加,诱导 Cr^{3+} 发光中心结构畸变和能级分裂,从而使得发射光谱产生显著红移和展宽。 $\text{MgAl}_2\text{O}_4:6\% \text{ Cr}^{3+}$ 透明陶瓷的发射峰值位于890 nm,热导率达到了 $19.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,在 $10 \text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$ 蓝光激光泵浦下的近红外输出功率超过了2 W,比相应 NIR pc-LED 提高了一个数量级。采用这种激光驱动近红外荧光光源搭建的原型器件,可实现人体心率和鸡蛋气室的实时监测,夜视照明距离可达100 m,充分展示了激光驱动近红外荧光光源在大功率输出和远距离非视觉补光方面的应用优势。

在此基础上,王静团队进一步制备出了 $\text{MgO:Ni}^{2+},\text{Cr}^{3+}$ 半透明陶瓷^[60]。其中 Cr^{3+} 的引入在 Ni^{2+} 占据的八面体格位诱导了局部晶格畸变,打破了 Ni^{2+} 的 $d-d$ 跃迁宇称禁阻限制,同时实现了 $\text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Ni}^{2+}$ 的高效能量传递,使该陶瓷在450 nm激发下呈现峰值约1330 nm的宽带近红外二区(Near-infrared-II, NIR-II, 1000-1700 nm)发射,内/外量子效率分别达到了61.06%和39.69%,热导率为 $31.28 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,478 K下发射强度保持率高达92.11%。将该陶瓷与蓝光激光二极管集成后,在 $21.43 \text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$ 的蓝光激光激发下实现了214 mW的 NIR-II 输出功率,为高性能 Ni^{2+} 激活 NIR-II 发光陶瓷的设计及其在无损伤检测和高级成像领域的应

用提供了新思路。另外,陈大钦等采用真空烧结技术制备了 $\text{Gd}_2\text{Sc}_2\text{Al}_2\text{O}_{12}:\text{Cr}^{3+}$ 近红外荧光陶瓷,在460 nm激发下获得了峰值762 nm的宽带近红外发射,在423 K下发射强度保持室温的79.8%,展现出优异的热稳定性^[61]。将该陶瓷与蓝光 LD 组合后,在2.3 A驱动下实现484 mW的最大输出功率,并成功验证了其在水果和谷物检测中的应用潜力。

2.4.2 动态模式激发近红外荧光陶瓷

为解决传统近红外荧光粉在激光驱动光源中热导率低、量子效率损耗大及高温稳定性差等问题,我们团队设计了一种荧光粉-陶瓷(Phosphor-in-Ceramic, PiC)复合材料,其核心策略是将具有优异发光性能的 $\text{Ca}_3\text{MgHfGe}_3\text{O}_{12}:\text{Cr}^{3+}$ 荧光粉嵌入由 $3\text{CaO-Ga}_2\text{O}_3-3\text{GeO}_2$ 玻璃原位结晶生成的同构 $\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ 石榴石陶瓷基质中,利用两相晶体结构的高度匹配(晶面间距差异 $<0.6\%$),实现了对荧光粉的“无损”封装,从而在保持高达90.6%内量子效率的同时,将材料对蓝光的吸收效率从粉体的23.6%大幅提升至63.7%,并获得了57.7%的外量子效率和 $17.1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 的高热导率。我们进一步将这种 PiC 材料安装在高速旋转轮盘上,发现激光辐照点的温度随激光光斑面积增大而略有增加,如图9(a)所示。在这种动态模式激发下,即使把激光功率密度增加到 $50 \text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$,PiC 的表面温度仍然低于 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ (图9(b))。最终在 $10 \text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$ 的蓝色激光激发下(激光功率为50 W,光斑面积为 5 mm^2)实现了超过5 W的宽带 NIR 输出,如图9(c)~(d)所示。封装得到的电驱动 pc-LD 器件的输出功率达到了1.6 W,并被成功应用于200米夜视成像和古书画辨识,充分证明了 PiC 设计在构建高性能、高稳定性激光驱动 NIR 光源方面的显著优势。

此外,我们团队还采用 SPS 技术制备了 $\text{Mg-Ga}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+},\text{Ni}^{2+}$ 尖晶石结构半透明陶瓷,其在405 nm激发下呈现发射峰值1280 nm的宽带 NIR-II 发光,EQE 达到了81.4%^[62]。基于该陶瓷构建的动态 NIR-II 光源,通过高速旋转实现了1.86 W的宽带近红外输出功率。借助导向滤波网络(Guided Filter Network, GFN) Filter Network, GFN) 图像算法的辅助,该激光驱动荧光光源可在高浓度雾霾环境中实现精准目标成像与识别。该研究不仅为 Cr^{3+} - Ni^{2+} 共掺杂半透明陶瓷的研制提供了技术方

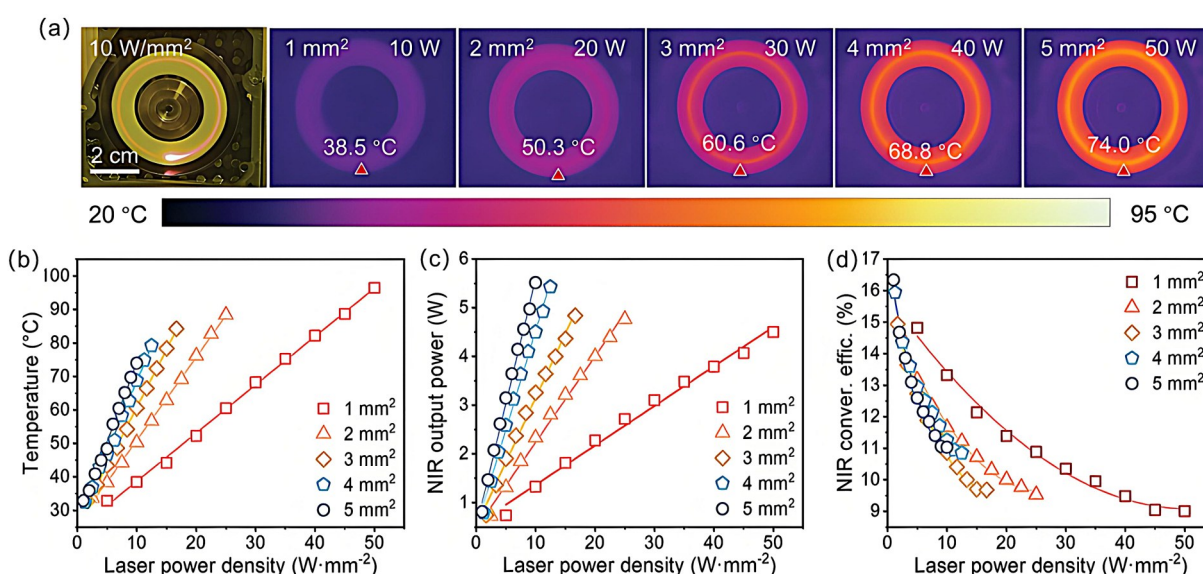


图9 (a) $\text{Ca}_3\text{MgHfGe}_3\text{O}_{12}:\text{Cr}^{3+}$ PiC 轮在 $10 \text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$ 蓝光激光辐照下的照片及热成像图(激光光斑面积分别为 $1\text{--}5 \text{ mm}^2$); (b)~(d) PiC 轮在不同功率密度和不同光斑面积蓝光激光辐照下的峰值温度(b)、输出功率(c)和光转换效率(d)^[63]

Fig.9 (a) Photograph and thermal images of $\text{Ca}_3\text{MgHfGe}_3\text{O}_{12}:\text{Cr}^{3+}$ PiC wheel under $10 \text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$ blue laser irradiation with laser spot areas of $1\text{--}5 \text{ mm}^2$. (b)~(d) The peak temperature (b), NIR output power (c), and light conversion efficiency (d) of the PiC wheel under blue laser irradiation with different power densities and spot areas.^[63]

案,更促进了激光驱动 NIR-II 光源与图像处理算法在强散射介质成像检测中的应用,为环境监测、安全检测等应用领域提供参考。

2.4.3 近红外荧光复相陶瓷

近红外荧光复相陶瓷是一种由发光晶相与基质相复合而成的全无机块体发光材料,其典型特征在于发光中心均匀分散于高热导率的陶瓷基质(如 Al_2O_3 、 MgAl_2O_4 或玻璃晶化相)中,两相在微观尺度上协同共存并分别承担光转换与热管理功能。该类材料的制备通常采用“粉体+基质”复合烧结路线:首先通过高温固相法合成目标近红外荧光粉,将其与基质前驱体(如 Al_2O_3 纳米粉、低熔点玻璃粉或可晶化玻璃组分)按比例混合,经成型后在特定温度下进行无压烧结、热压烧结或放电等离子烧结,使基质相致密化的同时将发光晶相“锁”在陶瓷体内,形成具有连续基质骨架和弥散发光中心的复相结构。与传统单相荧光陶瓷相比,近红外荧光复相陶瓷的核心优势在于其组分可分别设计、功能协同优化——发光相负责高量子效率的光转换,基质相则提供高热导率(如 Al_2O_3 相可达 $32 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)和机械支撑,有效解决了单相陶瓷中高发光效率与高热导率难以兼得的矛盾;同时,复相结构中两相之间的折射率差异可引入可控光散射,提升光提取效率;此外,该材料体系对荧光粉的晶体结构无严

格限制(不要求荧光粉与基质同构),极大拓展了发光材料的选择范围,使得原本难以烧结成单相陶瓷的高性能粉体也能通过复相设计实现块体化,为高功率激光驱动近红外光源提供了兼具高效率、高导热和良好可加工性的理想转换材料方案。

我们团队采用 SPS 技术制备了直径为 54 mm 的 $x\text{MgO-Li}_2\text{SrGeO}_4:\text{Cr}^{4+}$ ($x\text{MgO-LSGO}:\text{Cr}^{4+}$, $x = 0\text{--}0.8$) 复相陶瓷(图 10(a)~(b)),在 638 nm 激发下获得了发射峰值位于 1160 nm 的宽带 NIR-II 发射^[64]。MgO 颗粒在填充 $\text{Li}_2\text{SrGeO}_4$ 结构孔隙的同时起到了导光通道的作用,并抑制了真空高温环境下石墨模具对 Cr^{4+} 离子的还原,使复相陶瓷的外量子效率和室温热导率分别提高到了 53% 和 $17.8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,大幅度降低了陶瓷在静态激光激发下的表面温度,同时提高了近红外输出功率,如图 10(c)~(d) 所示。利用 $0.4\text{MgO-Li}_2\text{SrGeO}_4:\text{Cr}^{4+}$ 陶瓷封装得到的动态荧光陶瓷轮,在 $20 \text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$ 激光泵浦下展现出 1.94 W 的宽带 NIR-II 输出功率(图 10(e)),这一强烈的近红外发光有利于提高商用 PbS 胶体量子点光探测器的光电流和信噪比,最终结合导向滤波算法实现了高分辨 NIR-II 成像,峰值信噪比从 8.4 提升到了 13.2 。目前已经报导的激光驱动近红外荧光块材的发射峰值及输出功率等光学特性如表 1 所示。

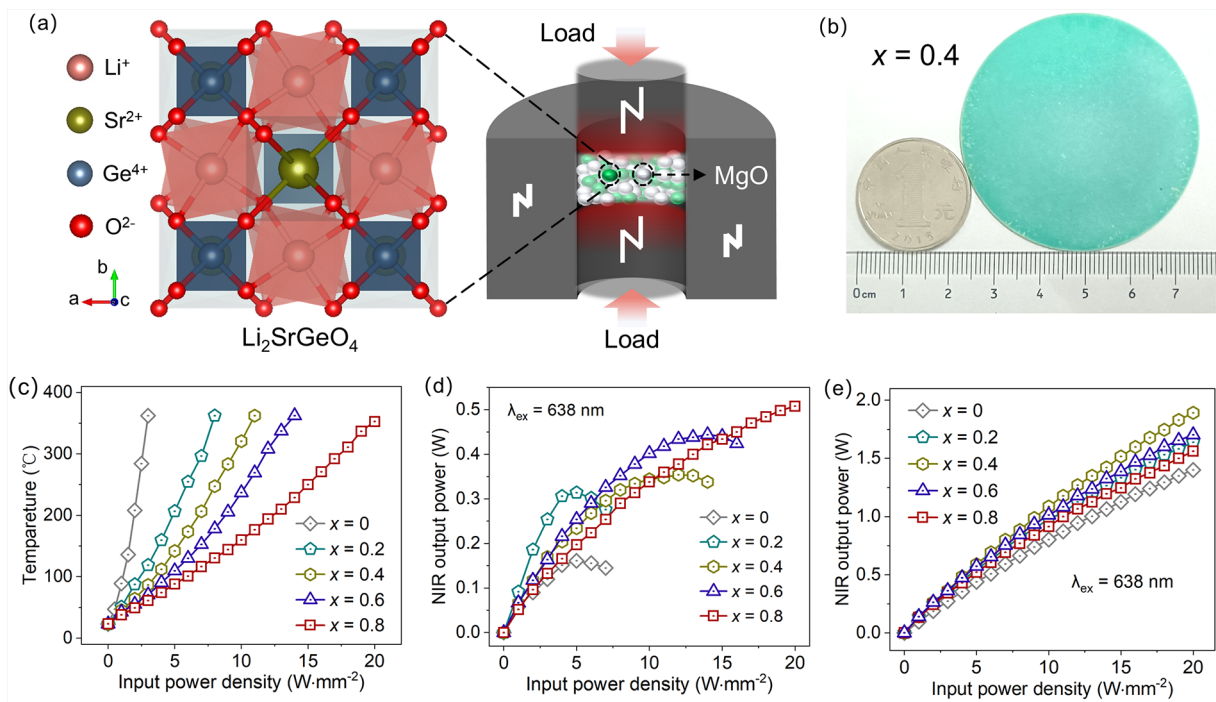


图 10 (a)LSGO 的晶体结构图及晶圆级 MgO-LSGO:Cr4+复相陶瓷的 SPS 制备工艺图;(b)0.4MgO-LSGO:Cr4+复相陶瓷的实物照片及其尺寸与硬币的对比图;(c)xMgO-LSGO:Cr4+(x=0~0.8)复相陶瓷的静态辐照点温度随入射激光功率密度变化情况;(d)~(e)激光驱动 xMgO-LSGO:Cr4+(x=0~0.8)复相陶瓷的静态(d)和动态(e)NIR-II输出功率^[64]

Fig.10 (a)Crystal structure diagram of LSGO and SPS process for sintering wafer-scale MgO-LSGO:Cr4+ composite ceramics. (b)Photograph of the 0.4MgO-LSGO:Cr4+ composite ceramic alongside a coin for size comparison.(c)Temperature increase of the static irradiation spot in xMgO-LSGO:Cr4+(x=0-0.8) composite ceramics as a function of incident laser power density.(d)-(e) Laser-driven NIR-II output powers of static(d)and dynamic(e) composite ceramics^[64]

表 1 目前已经报导的激光驱动近红外荧光块材的光学特性

Tab. 1 Optical properties of reported laser-driven NIR fluorescent bulk materials to date

化学组成	发射峰	IQE/EQE	热稳定性	热导率	输出功率	文献
BaMgAl ₁₀ O ₁₇ :Cr ³⁺ PiG	700 nm	94%/--	63%@423 K	/	3.4 mW@100 mW	[39]
Y ₂ CaAl ₄ SiO ₁₂ :Cr ³⁺ GC	760 nm	90%/60%	91%@423 K	3.5 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	0.66 W@184 W·cm ⁻²	[44]
Y ₂ Ca _{0.3} Ba _{0.7} Al ₄ SiO ₁₂ :Cr ³⁺ GC	730 nm	97%/45%	99%@423 K	~3.5 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	2.1 W@204 W·cm ⁻²	[45]
AlP ₃ O ₉ :Cr ³⁺ -AlPO ₄ GC	785 nm	87%/65%	93%@423 K	2.78 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	0.7 W@9 W·mm ⁻²	[46]
MgO:Cr ³⁺ , Ni ²⁺ PiGF	1330 nm	78%/33%	76%@423 K	34.5 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	5.3 mW@8 W·mm ⁻²	[48]
Ca ₃ Sc ₂ Si ₃ O ₁₂ :Ce ³⁺ , Cr ³⁺ , Li ⁺ PiGF	780 nm	55%/35%	70%@423 K	/	*1.7 W@22 W·mm ⁻²	[49]
Ca ₂ YScAl ₂ Si ₂ O ₁₂ :Cr ³⁺ PiGF	805 nm	52%/--	63%@423 K	/	*2.6 W@21.7 W·mm ⁻²	[65]
Gd ₃ Al ₂ Ga ₃ O ₁₂ :Cr ³⁺ PiGF	725 nm	81%/--	99%@423 K	/	1.3 W@9 W·mm ⁻²	[66]
CaLu ₂ Mg ₂ Si ₃ O ₁₂ :Ce ³⁺ , Cr ³⁺ , Nd ³⁺	753 nm	59%/32%	67%@423 K	/	*0.7 W@17 W·mm ⁻²	[67]
Gd ₃ Al ₃ Ga ₂ O ₁₂ -Al ₂ O ₃ :Cr ³⁺ 陶瓷	715 nm	97%/46%	94%@423 K	/	1.52 W@10 W·mm ⁻²	[30]
Gd ₃ Al ₂ Ga ₃ O ₁₂ :Cr ³⁺ 陶瓷	730 nm	97%/70%	97%@423 K	8 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	1.65 W@5.5 W	[56]
MgO:Cr ³⁺ 陶瓷	810 nm	99%/81%	88%@423 K	52 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	6.36 W@22 W·mm ⁻²	[58]
Ga _{1.2} Sc _{0.8} O ₃ :Cr ³⁺ 陶瓷	820 nm	98%/80%	72%@423 K	8.76 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	0.89 W@3 W·mm ⁻²	[68]
MgAl ₂ O ₄ :Cr ³⁺ 陶瓷	890 nm	88%/73%	80%@423 K	19.4 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	2.13 W@10 W·mm ⁻²	[59]
MgO:Cr ³⁺ , Ni ²⁺ 陶瓷	1330 nm	61%/40%	97%@423 K	31.28 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	0.2 W@21 W·mm ⁻²	[60]
Gd ₃ Sc ₂ Al ₃ O ₁₂ :Cr ³⁺ 陶瓷	762 nm	--/--	80%@423 K	/	0.48 mW@2.3 A	[61]
Ca ₃ MgHfGe ₃ O ₁₂ :Cr ³⁺ PiC	798 nm	91%/58%	90%@423 K	17.1 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	*5.5 W@10 W·mm ⁻²	[63]
MgGa ₂ O ₄ :Cr ³⁺ , Ni ²⁺ 陶瓷	1280 nm	97%/81%	74%@423 K	13 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	*1.86 W@18 W·mm ⁻²	[62]
MgO-Li ₂ SrGeO ₄ :Cr ⁴⁺ 陶瓷	1160 nm	64%/53%	67%@423 K	17.8 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	*1.9 W@20 W·mm ⁻²	[64]

*代表对应的输出功率是在动态激发模式下测得的。

3 大功率激光驱动宽带近红外荧光光源的应用

近红外光具有人眼不可见、深层组织穿透、

低光子能量以及可与有机官能团(O-H、C-H、N-H等)发生特征性振动吸收等物理特性,使其在众多领域展现出不可替代的应用价值。特别是随着蓝光/红光 LED 和激光二极管技术的成熟,以及宽带

近红外荧光材料性能的持续突破,基于荧光材料转换模式的近红外光源逐步从实验室走向实际应用场景,为传统光源无法覆盖的领域提供了全新的解决方案。江苏博睿光电股份有限公司开发的商用近红外荧光粉兼具高量子效率、低热猝灭和谱带灵活可调等优势,发射峰波长覆盖 710-1026 nm^[69]。此外,深圳旭宇光电、美国 PhosphorTech、德国 OSRAM 等公司也在积极布局研发荧光转换型宽带近红外光源及其应用场景^[70]。

3.1 非视觉补光

近红外光不会被肉眼感知,使其在安防监控、夜视成像和工业视觉等需要“照明但不被察觉”的场景中具有不可替代的应用价值。相比于依赖目标自身热辐射的被动热成像,这种主动近红外补光能获得更接近可见光效果的高分辨率灰度图

像,可清晰分辨目标的轮廓、纹理乃至文字,如图 11(a)所示^[71]。尤其是采用激光驱动近红外荧光光源时,其高亮度和方向性可实现远达数百米甚至更远的有效补光(图 11(b))^[63]。除此之外,近红外光在植物生长调控中也发挥着独特且不可替代的生物学作用——植物体内的光敏色素能够吸收 730 nm 附近的短波长近红外光,调控种子萌发、幼苗去黄化、避荫反应、开花诱导及营养生长等关键阶段^[72]。雷炳富团队采用 $Gd_3Ga_2Al_3O_{12}:Cr^{3+}$ 荧光粉与低熔点玻璃粉共烧结,在蓝宝石衬底上制备出了 40%EQE 的荧光玻璃薄膜,且在 150 °C 下能够保持 96.7% 的发光强度。以意大利生菜为对象的补光实验表明,增加该 NIR 光源 21 天后,植株鲜重与干重分别提升 26.8% 和 30%(图 11(c)),表明该材料在植物照明领域具有良好应用前景^[73]。

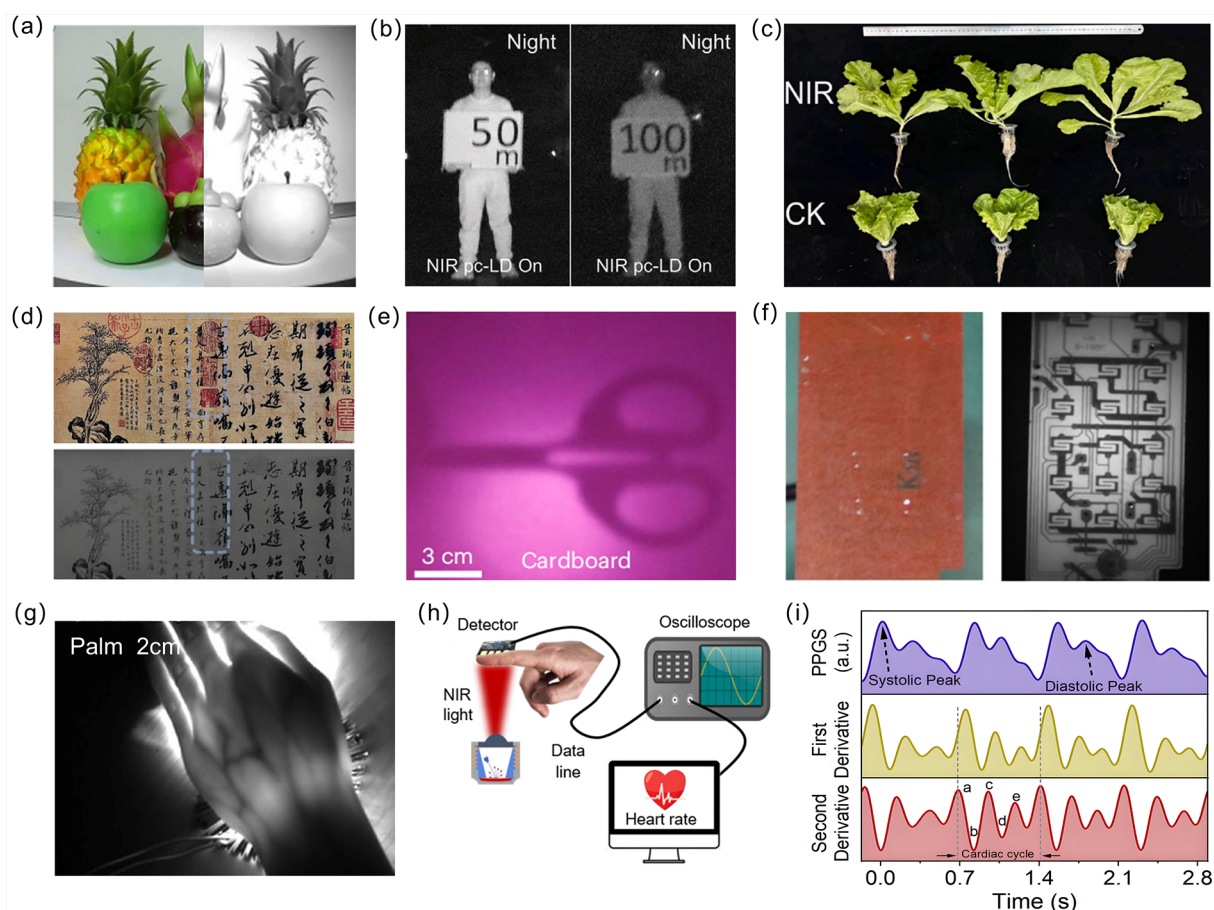


图 11 (a)~(c)近红外光用于夜视照明(a)、远距离补光(b)和植物照明领域(c)^[63, 71, 73]; (d)近红外光用于防伪与信息加密领域^[63]; (e)~(g)近红外光无损穿透硬纸板(e)、电路板(f)和人体手掌(g)^[58, 75, 76]; (h)~(i)近红外光用于心率等生理信号监测领域的示意图(h)和测试结果(i)^[59]

Fig.11 (a)-(c) NIR light for night-vision illumination(a), long-distance fill light(b), and plant lighting(c)^[63, 71, 73]. (d) NIR light for anti-counterfeiting and information encryption^[63]. (e)-(g) NIR light non-destructively penetrates cardboard(e), circuit board(f), and human palm(g)^[58, 75, 76]. (h)-(i) Schematic diagram(h) and test results(i) of NIR light for physiological signal monitoring such as heart rate^[59]

3.2 近红外防伪与信息加密

近红外光肉眼不可见的物理特性赋予其在高端防伪与信息加密领域的独特优势。相较于传统紫外-可见荧光防伪材料易被仿制的缺点,基于近红外荧光粉的防伪技术可利用激发与发射均位于近红外波段的模式,实现信息的“全隐蔽”读写——只有配备专用近红外探测器的设备才能获取加密内容。大功率近红外光源在防伪应用中的价值体现在两个方面:其一,高功率输出可有效穿透表面覆盖层或较厚的加密介质,确保隐蔽信息能够被可靠读取;其二,大功率激发可使加密图案获得足够的发光强度,满足快速、远距离验证的需求。例如,我们团队将PiC块材与450 nm激光二极管集成,构建的电驱动近红外pc-LD器件在3 A驱动电流下实现了1.6 W的近红外输出功率。在防伪/文物鉴定演示中,该光源可清晰揭示古书画中被印章覆盖或年久褪色的原始笔迹与墨迹细节(图11(d))^[63],成像分辨率达5 lp/mm,为文物真伪鉴别、字迹修复和古代文献解读提供了一种无损、高分辨的实时近红外成像方案。

基于近红外长余辉荧光粉的陷阱储能与热释光特性,还可实现时间维度上的多重加密——信息仅在特定温度或特定时间窗口内可被读取,进一步提升了防伪的安全性层级。例如,Guna Doke等人在 $\text{Mg}_4\text{Ga}_8\text{Ge}_2\text{O}_{20}:\text{Cr}^{3+},\text{Mn}^{2+}$ 中实现了基质蓝光、 Mn^{2+} 红光和 Cr^{3+} 近红外光的同步发射^[74]。由于不同发射中心的余辉衰减速率存在显著差异——基质蓝光衰减最快, Mn^{2+} 红光次之, Cr^{3+} 近红外衰减最慢,其发光颜色在紫外停止后随时间动态演变,从蓝/紫色逐渐过渡至红色并最终呈现肉眼不可见的近红外余辉,实现了时间维度的光学编码。此外,波长分辨的热释光测量表明,蓝光、红光和近红外光分别在低温、中温和高温区被选择性释放,为同一材料提供了温度维度的额外加密通道。基于三种不同组分构建的防伪标签在紫外激发、余辉和热释光模式下呈现截然不同的可见/近红外响应,证实了该材料在多级、动态、高安全性防伪中的应用潜力。

3.3 近红外实时无损穿透成像

近红外光在700~1300 nm波段具有组织散射系数低、自发荧光背景弱、穿透深度大的显著优势,是生物组织成像和工业无损检测的理想光源。传统穿透成像往往依赖同步辐射或超连续谱激光

器等大型设备,难以实现小型化和普及化。大功率宽带近红外光源的出现,使得便携式、高亮度、光谱连续的穿透成像成为可能。我们团队设计的 $\text{MgO}:\text{Cr}^{3+}$ 激光驱动近红外光源,可穿透3 mm厚的不透光硬纸板实现剪刀模型成像,成像分辨率达6 lp/mm,如图11(e)所示^[58]。在工业探伤领域,大功率近红外光源可穿透硅基芯片等不透明材料,用于内部缺陷检测(图11(f))^[75]。在生物医学成像方面,基于 $\text{Y}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}:\text{Cr}^{3+},\text{Yb}^{3+}$ 荧光陶瓷的近红外光源已展现出在生物医学成像和无损检测中的应用潜力,如图11(g)所示^[76]。与荧光显微镜等实验室设备不同,大功率近红外穿透成像面向的是工业探伤、医疗器械检测、安检等实际工程场景——要求光源具备足够的功率以穿透数厘米厚的实际样品,同时保持足够的分辨率以识别内部缺陷。这一方向的核心价值在于将大型设备的穿透能力迁移至便携式终端的实时检测,是近红外技术普惠化的重要路径。

对于近红外荧光透明玻璃/陶瓷,除了采用紫外/可见光作为激发源之外,还可以采用具有更高能量的X射线作为激发源,实现具有一定组织穿透性的近红外闪烁成像。Keita Miyajima团队系统评估了 $\text{Y}_3\text{A}_5\text{O}_{12}:\text{Nd}$ 和 $\text{Y}_3\text{A}_5\text{O}_{12}:\text{Nd,Ce}$ 透明陶瓷的近红外闪烁体性能,通过Ce共掺杂显著增强了 $\text{Y}_3\text{A}_5\text{O}_{12}:\text{Nd}$ 陶瓷在近红外波段的闪烁发光强度,实现了低至0.036 mGy/h的辐射剂量率检测下限,达到了远程高辐射场监测所需的0.1 mGy/h指标要求^[77]。更为重要的是,该团队利用InGaAs相机成功探测到穿透19 mm厚猪肉组织的近红外闪烁光信号,并保留了空间分辨成像能力,而可见光闪烁体在10 mm厚度时信号已完全衰减。这项工作验证了近红外闪烁光在生物组织中具备高穿透深度且可保持空间分辨成像能力,为X射线诱导光动力学治疗中的实时体内剂量监测和深层组织生物成像提供了全新的技术路径——通过检测穿透组织后的近红外闪烁光强度,可实时反推体内辐照剂量,有效避免放疗中的过度照射或剂量不足问题,对推动精准放射治疗和深层组织生物成像技术的发展具有重要意义。我们团队通过SPS技术成功制备了晶圆级(直径45 mm) $\text{MgO}:\text{Li}^+,\text{Cr}^{3+}$ 近红外透明陶瓷闪烁体^[78]。 Li^+ 作为电荷补偿剂调控了 Cr^{3+} 周围的局域晶体场,使该陶瓷在460 nm蓝光及X射线激发下均呈现以722 nm窄峰为

主、750 nm 宽峰为辅的近红外发射。该闪烁体具有 25683 Ph/MeV 的光产额,检测限低至 0.84 $\mu\text{Gy/s}$,有效原子序数(~ 10.8)接近人体软组织。尤为重要的是,氧空位相关深陷阱赋予该陶瓷超过 120 分钟的持续余辉发光能力。基于该材料,我们成功实现了 X 射线与近红外双模融合成像,有效消除了不透明介质引起的散射伪影,空间分辨率达 14 $\text{lp}\cdot\text{mm}^{-1}$;并通过 5 mm 厚猪肉组织验证了 X 射线激发余辉用于软机器人原位定位的可行性。

3.4 生理信号监测

近红外光在生理信号监测领域已经实现广泛应用。在 650~950 nm 的光学窗口内,氧合血红蛋白与脱氧血红蛋白展现出显著差异化的吸收特性,而水等主要组织成分的吸收则相对较弱,使得近红外光能够有效穿透头皮、颅骨等表层组织,到达肌肉和大脑皮层等深层部位^[79]。基于这一原理,通过检测透射光或反射光的衰减变化,即可实时反演组织内部的血流动力学参数,为无创生理监测提供了物理基础。在技术应用层面,近红外光谱技术已衍生出一系列成熟的监测手段,覆盖从外周循环到中枢神经系统的多尺度生理信号监测。光电容积描记法利用近红外光穿透手指、耳垂等外周组织时随心动周期变化的吸收信号,实现心率、血氧饱和度的连续监测^[80]。功能性近红外光谱技术则通过捕捉大脑皮层中氧合与脱氧血红蛋白浓度的实时变化,间接反映局部神经活动,已成为研究脑功能连接、认知过程及神经疾病的重要工具^[81]。在运动科学领域,近红外光谱技术被用于监测骨骼肌氧合状态,评估运动过程中的代谢阈值和肌肉疲劳程度^[82]。

光源的输出功率是决定近红外生理监测性能的关键参数之一。低功率红外光源在穿透深层组织或应对高散射介质时,受限于光通量不足,往往导致检测信噪比降低,难以满足高精度、实时性的监测需求。大功率近红外光源的引入,从根本上提升了入射光通量,使探测器能够接收到更强的组织散射信号,有效抑制电路噪声和环境杂光干扰,从而获得更稳定的光电容积描记信号,在心率、血氧饱和度等参数的估算精度上具有显著优势。

我们团队将发射峰值位于 890 nm 的 $\text{MgAl}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$ 陶瓷封装成蓝光激光驱动的大功率近红外光

源,照射人体手指后通过光电探测器采集光电容积描记信号 (Photoplethysmography Signals, PPGS),如图 11(h) 所示^[59],成功计算出了约 83 次/分钟的心率,与医学诊断结果一致;从 PPGS 信号二阶导数获得的加速脉搏波中清晰分辨出收缩期和舒张期的多个特征波峰,能够为动脉僵硬评估提供重要参考(图 11(i))。该工作证明了 $\text{MgAl}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$ 近红外陶瓷在心率监测等非侵入式生理传感领域的应用潜力。大功率近红外光源与先进光电探测技术的协同发展,有望进一步提升生理信号监测的穿透深度、时间分辨率和信噪比。结合人工智能算法的信号处理与图像重建,将推动近红外监测技术在精准医疗、可穿戴健康设备及脑机接口等前沿领域发挥更大作用。

3.5 有机成分定量分析与鉴别

近红外光谱分析技术是一种快速、无损、无需化学试剂的绿色分析方法,其物理基础在于不同有机官能团在近红外波段具有特征性的倍频和合频吸收峰,构成对物质组成和结构的“光谱指纹”,如图 12(a) 所示^[83]。在食品安全领域,近红外成分分析仪可在 950~1650 nm 范围内快速测定蛋白质、纤维素、脂肪、水分等指标。在药品质量控制方面,近红外分光光度法不仅能进行离线分析,还能直接进行在线过程控制,测定原料和制剂中的活性成分及水分、脂肪类化合物的理化性质。大功率宽带近红外光源在定量分析中的核心优势在于:足够高的输出功率可确保穿透不透明或高散射样品后仍能获得可检测的信号强度,从而将分析对象从透明溶液拓展至固体粉末、浑浊液体甚至生物组织等复杂基质,能够显著拓展近红外定量分析的适用范围。

我们团队将 $\text{CaScAlSiO}_6:\text{Cr}^{3+}$ 荧光粉与磷酸盐玻璃复合,采用远程封装方式构建了 NIR PiGe-LED 光源^[9]。基于该光源对乙醇/水混合溶液进行透射光谱测试,发现 930 nm 和 970 nm 处分别存在乙醇和水的特征吸收峰,如图 12(b) 所示。通过建立吸光度与酒精浓度的线性拟合模型($R^2 = 96\%$),我们成功实现了混合溶液中酒精含量的定量分析,为宽带近红外光源在有机成分快速定量检测中的应用阐明了可行性(图 12(c))。此外,激光驱动的宽带近红外光源在有机成分检测和远距离海上安全等场景中也展现出应用前景。例如大豆和细小石子对近红外光的吸收和散射特性存

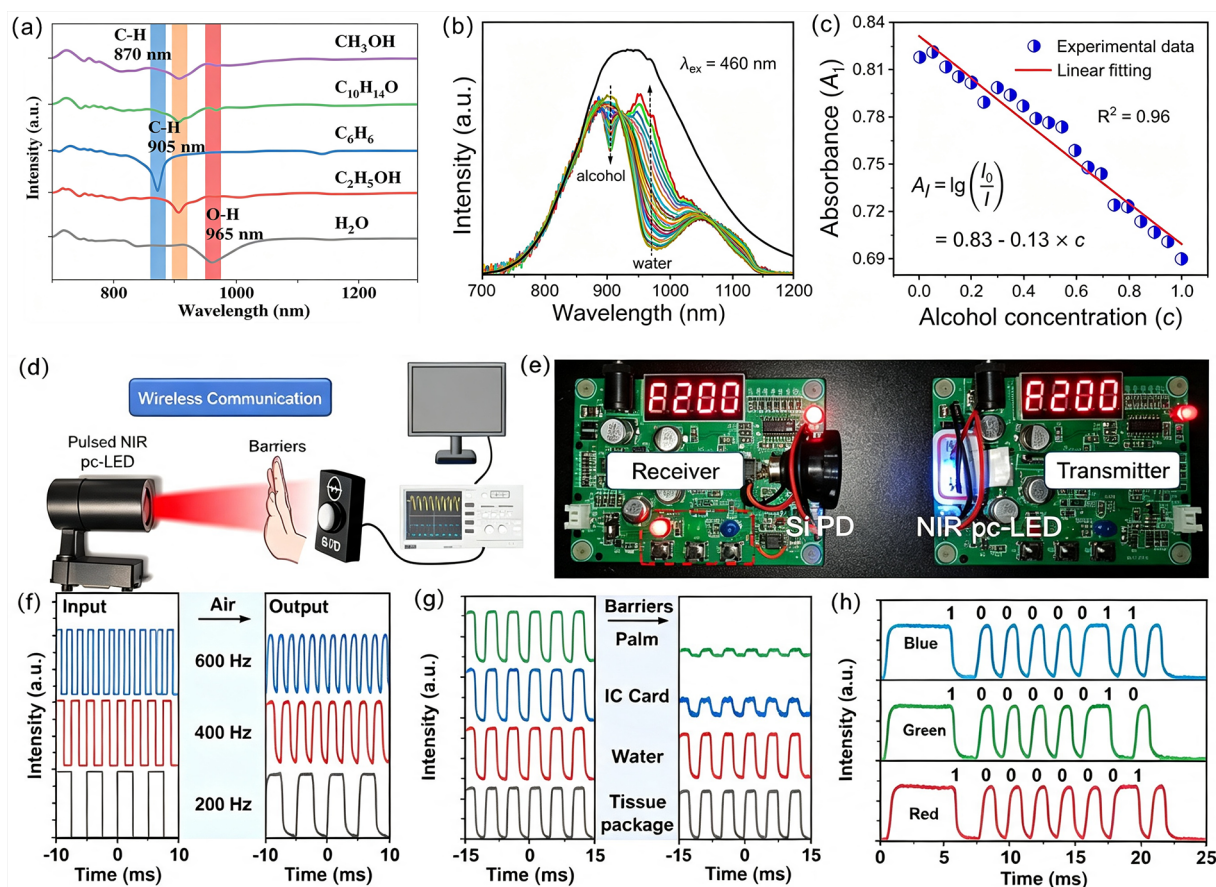


图 12 (a) 近红外光谱穿透不同溶液后的透射光谱变化情况^[83]; (b) 近红外光穿透不同比例酒精和水的混合溶液后的透射光谱变化情况^[9]; (c) 酒精浓度与 NIR 吸光度之间的函数关系^[9]; (d) 基于所制备的近红外光源的无线通信示意图^[89]; (e) 用于无线光通信的发射器和接收器照片^[89]; (f) 不同频率下的输入和输出信号信息^[89]; (g) 200 Hz 下穿透不同屏障后输出信号强度的衰减情况^[89]; (h) 编码无线通信, 此处为载频 500 Hz 的信号添加了曼彻斯特编码^[89]

Fig.12 (a) Changes in transmission spectra of NIR light after penetrating different solutions^[83]. (b) Transmission spectral changes of NIR light after passing through alcohol-water mixtures with varying proportions^[9]. (c) Functional relationship between alcohol concentration and NIR absorbance^[9]. (d) Schematic illustration of the wireless communication based on the fabricated NIR light source^[89]. (e) Photos of transmitter and receiver used for wireless light communication^[89]. (f) Input and output signal information at different frequencies^[89]. (g) Attenuation of output signal intensity after penetration of different barriers at 200 Hz^[89]. (h) Coded wireless communication, herein Manchester coding was added to a signal with a frequency of 500 Hz^[89]

在显著差异, 在近红外光照射下很容易将二者区分开来^[46]; 近红外光还可以穿透果皮表面, 有助于观察水果在运输和储存过程中产生的变质情况^[68]。随着荧光材料发射光谱向近红外二区 (> 1000 nm) 拓展, 可检测的分子种类覆盖范围正进一步扩大, 为多组分同时定量分析提供了更丰富的光谱信息。

3.6 近红外传感与探测

近红外荧光材料在传感与探测领域的应用基于两大原理: 一是荧光强度、寿命或峰位对温度、压力等物理量的灵敏响应, 可用于非接触式光学传感; 二是特定化学环境对荧光信号的猝灭或增

强效应, 可用于气体或特定离子的选择性检测。大功率宽带近红外光源在传感与探测中的关键作用在于提供足够强的激发和信号输出, 以满足远距离、大范围或恶劣环境下的探测需求。在力致发光传感方面, Cr^{3+} 掺杂的近红外力致发光材料近年来取得了重要进展。索浩团队报道了 $\text{ScBO}_3:\text{Cr}^{3+}$ 晶体能在单一机械力下产生高亮度、可高度自恢复的宽带近红外力致发光, 半高宽达 273 nm。基于该材料构建的触觉交互笔响应时间约 20 ms、阈值低至 kPa 级别, 结合机器学习算法在复杂光照和湿度环境下仍能实现高精度笔迹认证^[84]。该团队还提出了 Cr^{3+} 、 Yb^{3+} 等多发光中心协同策略以

实现宽带近红外外力致发光,并成功将其应用于自供能的无损吸收光谱分析和应力可视化成像,为力学驱动的光发射技术在生物医学检测和智能传感领域的无源化发展开辟了新范式^[85]。 Cr^{3+} 掺杂尖晶石氧化物中缺陷与晶格畸变的协同作用驱动了自供电弹性近红外外力致发光,在人机交互和智能传感领域展现出应用前景^[86]。此外,基于 Cr^{3+} 掺杂 CaScAlSiO_6 等体系的近红外发射荧光粉具备无序结构和较高的结构刚性,实现了对光学传感性能的显著提升,具备作为光学传感器的可逆性、结构稳定性和优异的灵敏度^[87]。这些进展将大功率近红外光源的应用从单纯的照明和成像拓展到了多维度的物理量与化学量探测,是智能传感技术的重要组成部分。

3.7 近红外光通信

近红外波段是光纤通信的“黄金窗口”——石英光纤在850 nm、1310 nm和1550 nm附近具有极低的传输损耗。大功率近红外光源在光通信中的应用主要集中在无线光通信和特种光纤通信两个方向。在无线光通信(Optical Wireless Communication, OWC)领域,研究者已利用高功率850 nm LED阵列作为光源,设计并实现了基于现场可编程门阵列平台的全双工实时近红外光无线通信系统^[88]。近红外光无线通信系统不仅消除了可见光通信中的视觉干扰,还确保了人眼不可见性,是智能家居和物联网等室内应用极具前景的无线通信解决方案。在光纤通信方面,近红外垂直腔面发射激光器(Vertical-cavity Surface-emitting Laser, VCSEL)具有超宽调制带宽和高光功率输出能力,可用于多模光纤的高功率光发射。在宽带近红外光源器件的研制及其光通信应用方面,宋恩海团队在 $\text{Cr}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ 共掺杂的氟化物体系中,提出并验证了由“ $\text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ 正向共振能量传递与 $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Cr}^{3+}$ 单声子辅助反向能量传递”构成的双向能量补偿机制,实现了宽带近红外发光的抗热猝灭效应^[89]。进而利用该材料封装出在20~100 °C宽温区内输出功率波动小于5%、光电转换效率高达到19.13%的近红外LED,并成功将其用于编码式光无线通信系统,验证了近红外光穿透手掌、水和卡片等障碍物的通信可靠性(图12(d)~(h))。这项研究不仅为破解宽带近红外荧光材料面临的高温热猝灭瓶颈提供了普适性的微观调控策略,也为近红外光源在隐蔽通信、物联网传感及高功

率光电器件中的实际应用开辟了极具潜力的新方向。虽然当前荧光转换型近红外光源的调制带宽(通常<10 MHz)尚不及激光二极管,但其面发光、低成本、易阵列化等特性使其在短距离、多节点光互连场景中仍具独特竞争力。

4 展 望

激光驱动近红外光源用荧光块体材料的技术发展路径与激光照明用白光光源类似,本质上是提高材料在高密度激光激发下的光转换效率,需要荧光材料具有尽可能高的EQE、热稳定性和热导率。近年来已有众多科研学者围绕高导热荧光玻璃/陶瓷的设计制备、激光驱动发光性能调控及光源器件应用开展了系统性研究,为激光驱动近红外光源的实用化提供了理论支撑与技术参考。然而,结合当前材料科学与光电子器件领域的发展趋势,在高效近红外发光材料设计与性能优化、发射谱段拓展、器件集成封装及实际应用探索中仍存在以下共性挑战:(1)宽光谱调控难,过渡金属离子(如 Cr^{3+} 、 Ni^{2+})的d轨道电子关联效应强、基质与激活剂相互作用复杂,导致发射谱段的设计调控存在瓶颈,发射光谱的红移和展宽往往伴随着严重的发光骤降和热猝灭;(2)NIR-II波段效率偏低,由于能隙定律(Energy gap law)的限制,长波发射(>1000 nm)的非辐射弛豫速率显著增大,EQE普遍低于NIR-I波段;(3)高导热材料体系匮乏,满足高功率激光激发要求的高导热陶瓷种类有限。添加 MgO 和 Al_2O_3 等第二相功能颗粒虽然能够提升复相陶瓷热导率,却容易引发界面反应从而影响发光性能。荧光转轮模式能够大幅度减少热量积累、提升光源输出功率,但同时也使得器件体积增大了数十倍;(4)规模化制备成本高,高质量荧光陶瓷的烧结工艺复杂、后处理周期长、对粉末原料纯度粒径和烧结设备的依赖程度高,制约了从实验室向产业化的转化;(5)热应力匹配难题,荧光体与散热基板之间热膨胀系数差异导致的界面热应力,易引发裂纹或脱落,影响器件长期可靠性;(6)应用展示缺乏创新,封装得到的光源器件的应用展示停留在夜视照明、血管穿透、信息加密等基础功能验证阶段,且同质化严重,没有发挥出大功率宽带近红外光源的核心优势。针对上述挑战,未来研究可从以下几个方向重点突破:

(1)在材料设计与性能优化方面,数据驱动与

物理机制深度融合的研发范式正在成为突破“试错法”瓶颈的关键路径。机器学习方法已在近红外发光材料的发现中展现出令人瞩目的潜力。例如, Jakoah Brgoch教授开发了基于193个实验Dq/B值的机器学习回归模型,实现了对 Cr^{3+} 基近红外荧光粉晶体场参数的准确预测^[90]。在 Mo^{4+} 激活的卤化物近红外荧光粉中,机器学习指导的共掺杂策略成功构建了 $\text{Cs}_2\text{Zr}(\text{Cl}_{0.46}\text{Br}_{0.54})_6:12\%\text{Mo}^{4+},3.6\%\text{Sb}^{3+}$ 荧光粉,实现了峰值920 nm的宽带近红外发光,IQE和EQE分别达到了92.4%和65.9%^[91]。在此基础上,未来可进一步将DFT计算获得的关键物理参数(如缺陷形成能、晶体场分裂能、能带结构等)作为机器学习模型的输入特征,构建物理约束和数据驱动混合框架,对现有高性能近红外发光材料的结构特征与发光特性进行对比,发掘新型高效近红外发光结构基因,实现从“经验试错”向“按需设计”转变。这不仅能够大幅缩短新型高效近红外发光材料的研发周期,还有望在发射波长预测、热稳定性评估和量子效率优化等维度实现精准的定量指导。

(2)在高导热陶瓷材料烧结方面,选用高纯度粉体为原料,添加LiF等助熔剂和MgO等高导热第二相,结合球磨和冷等静压工艺制备先驱体,再利用热压烧结、放电等离子烧结、焦耳热烧结等快速烧结设备抑制第二相与主晶相之间的不良反应,从而制备出高致密度的导热荧光陶瓷。另外,未来还可以发展基于AlN和BN基板的高导热叠层荧光陶瓷,借助缓冲层解决不同陶瓷层之间热膨胀系数不匹配的问题。对于荧光转轮导致器件体积增大的问题,需要结合应用场景与需求,差异化定制光源器件:对光源输出功率要求较高而对光源尺寸不敏感的固定场所,可以采用基于反射式光路的荧光转轮;而对于要求结构紧凑、集成便携的应用场景,需要重点研发基于透射式光路的近红外荧光陶瓷。

(3)在光源发射谱带拓展方面,当前大功率近红外光源的发射谱段集中于700~1400 nm,虽能满足远距离夜视照明和穿透成像探测等需求,但在高光谱成像、有机成分分析等场景中,仍然存在谱段覆盖不足的问题。为实现发射谱段的宽谱拓展,一项行之有效的技术是设计高速荧光转轮,将不同发射带的荧光材料分区布置于转轮之上,通过高速旋转实现多波段发射的时序叠加,从而获

得覆盖700~1700 nm的连续宽带输出。该方案不仅能够显著提升光源的光谱覆盖范围,还能有效缓解荧光材料在高功率密度激发下的热积累,同时避免不同荧光材料之间的重吸收问题,为定量分析检测提供高功率、宽谱段且热稳定的光源保障。在应用层面,宽带近红外光源的优势远非单一波段的照明或成像所能比拟。例如,在夜视照明场景中,传统方案仅利用光源的亮度信息,而宽谱段输出使得结合多波段成像成为可能——通过采集不同材质在NIR-I与NIR-II窗口下差异化光谱响应的图像,可实现多色夜视成像,从而有效区分具有相似形貌但不同成分的目标物体,显著提升夜视系统的目标识别能力。因此,未来激光驱动近红外光源的发展应高度重视宽谱段发射的材料设计,充分发挥其在多元应用场景中的核心价值。

(4)在光源器件封装技术方面,当前激光驱动近红外光源的研究重心集中于荧光材料自身的性能提升,包括量子效率、热导率及热稳定性等关键参数的优化,而对于光学系统层面的设计考量则相对不足。在实际应用中,光源的工程化价值不仅取决于其本征光转换能力,更依赖于发光输出与目标场景之间的有效耦合。例如在远距离夜视照明场景下,若缺乏聚焦或准直光学元件的配合,即便光源具有较高的输出功率,其有效照明距离仍将受到显著制约;而在近距离成像或探测应用中,由蓝色激光的高斯空间分布与荧光转换光的朗伯分布之间的本质差异所导致的光斑照度不均匀问题,亦亟待通过匀光镜组、复眼透镜或衍射光学元件等手段进行有效调控。值得指出的是,荧光体的微观结构特征(如晶粒尺寸、气孔率及第二相分布)直接影响其散射特性与发光空间角分布,进而决定后续光学系统的收集效率与设计边界,二者之间构成相互制约的耦合关系。因此,未来激光驱动近红外光源的研究应从单一的材料性能优化拓展至材料-热学-光学协同设计的系统层面,才能充分发挥大功率宽带近红外光源在实际应用中的核心优势。

(5)在应用拓展方面,近红外成像分辨率受到光源亮度、拍摄环境、相机参数等多重因素影响,借助人工智能图像算法(如导向滤波、超分辨率重建)能显著提升弱光或者雨雾天气下近红外成像的清晰度与分辨率,但当前研究中光源性能与算

法优化的协同设计不足。此外,在自由空间光通信领域,近红外发光中心的荧光寿命普遍在数十微秒以上,这严重限制了调制带宽和信号传输速率。未来一方面需要系统筛选荧光寿命在纳秒级的新型发光材料(比如 CuInSe₂量子点),另一方面可借鉴 O 波段(1260-1360 nm)光纤通信的发展思路,研制大功率 O 波段近红外光源并与波分复用

技术结合,利用 O 波段的低色散特性实现远距离、大容量信号传输,有望突破当前 C 波段(1530-1565 nm)光通信的容量瓶颈。

本文(补充文件及)专家审稿意见和作者回复内容
下载地址: [http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.2024****\(2024****为文章稿号\)](http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.2024****(2024****为文章稿号))

参 考 文 献:

- [1] LIU W S, DENG W Y, WANG W P, *et al.* Ultrahigh-radiance near-infrared organic light-emitting diodes [J]. *Nat. Photonics*, 2025, 19(6):650-657.
- [2] XIE Y, LIU W S, DENG W Y, *et al.* Bright short-wavelength infrared organic light-emitting devices [J]. *Nat. Photonics*, 2022, 16(11):752-761.
- [3] ZHAO Y Y, PILVAR A, TANK A, *et al.* Shortwave-infrared meso-patterned imaging enables label-free mapping of tissue water and lipid content [J]. *Nat. Commun.*, 2020, 11(1):5355.
- [4] CHEN Y, WANG S F, ZHANG F. Near-infrared luminescence high-contrast in vivo biomedical imaging [J]. *Nat. Rev. Bioeng.*, 2023, 1(1):60-78.
- [5] LIU D J, DANG P P, ZHANG G D, *et al.* Near-infrared emitting metal halide materials: Luminescence design and applications [J]. *InfoMat*, 2024, 6(5):e12542.
- [6] HUANG W T, RAJENDRAN V, CHAN M H, *et al.* Near-infrared windows I and II phosphors for theranostic applications: Spectroscopy, bioimaging, and light-emitting diode photobiomodulation [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2022, 11(11):2202061.
- [7] WANG L, SUN D W, PU H, *et al.* Quality analysis, classification, and authentication of liquid foods by near-infrared spectroscopy: A review of recent research developments [J]. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 2017, 57(7):1524-1538.
- [8] GU Y Y, GUO Z Y, YUAN W, *et al.* High-sensitivity imaging of time-domain near-infrared light transducer [J]. *Nat. Photonics*, 2019, 13(8):525-531.
- [9] LIU G C, MOLOKEEV M S, XIA Z G. Structural rigidity control toward Cr³⁺-based broadband near-infrared luminescence with enhanced thermal stability [J]. *Chem. Mater.*, 2022, 34(3):1376-1384.
- [10] HUANG D, SWANSON E A, LIN C P, *et al.* Optical Coherence Tomography [J]. *Science*, 1991, 254(5035):1178-1181.
- [11] VISION A. Short-wave infrared (SWIR) cameras with InGaAs sensor technology [EB/OL]. [2021-08-03]. <https://www.alliedvision.com/en/camera-selector/detail/goldeye/g-130-vswir-tec1/>.
- [12] LIU P L, LU S C, LIU J, *et al.* Double-ended passivator enables dark-current-suppressed colloidal quantum dot photodiodes for CMOS-integrated infrared imagers [J]. *InfoMat*, 2023, 6(1):e12497.
- [13] YANG W B, WANG W P, XIAO Z H, *et al.* High-detectivity self-powered NIR organic photodetectors beyond 1050 nm enabled by an A- π -D- π '-A-type non-fullerene acceptor [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 36(16):e20517.
- [14] WANG S W, PANG R, TAN T, *et al.* Achieving high quantum efficiency broadband NIR Mg₄Ta₂O₉: Cr³⁺ phosphor through lithium-ion compensation [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(22):2300124.
- [15] WEI G H, LI P L, LI R, *et al.* How to achieve excellent luminescence properties of Cr ion-doped near-infrared phosphors [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2023, 11(24):2301974.
- [16] ZHONG L, XIANG Y F, LIU S W, *et al.* Valence and site engineering enable efficient broadband near-infrared emission at 960 nm in Cr³⁺-activated forsterite [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37(39):e2508768.
- [17] LI Z W, ZHU G, LI S S, *et al.* High-performance NIR emission in chromium-doped garnet phosphors enabled by structure and excitation regulation [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2024, 18(1):2300732.
- [18] JIANG L P, JIANG X, YANG M, *et al.* Developing and optimizing novel Cr³⁺-activated inorganic NIR phosphors by combining triple-objective optimization and crystal field engineering [J]. *Inorg. Chem. Front.*, 2024, 11(2):487-497.

- [19] YANG Z Y, DE BOER T, BRAUN P M, *et al.* Thermally stable red-emitting oxide ceramics for laser lighting [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(30):2301837.
- [20] LIU S Q, GUO Y, ZHAO M, *et al.* NIR-II luminescence with a recorded 76% EQE through energy extraction from dark Cr^{3+} [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2024, 18(12):2400475.
- [21] 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 converters for high color rendering laser-driven lighting [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(10):1585-1618. (in Chinese)
- [22] HU D H, LIN S S, PANG T, *et al.* Ultra-narrowband green-emitting transparent composite ceramics for laser-driven display [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37(7):e2414957.
- [23] WIERER J J, TSAO J Y, SIZOV D S. Comparison between blue lasers and light-emitting diodes for future solid-state lighting [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2013, 7(6):963-993.
- [24] YUE X M, XU J, LIN H, *et al.* β - $\text{SiAlON}:\text{Eu}^{2+}$ phosphor-in-glass film: An efficient laser-driven color converter for high-brightness wide-color-gamut projection displays [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2021, 15(11):2100317.
- [25] 郑鹏, 丁国真, 解荣军. Ce^{3+} 和 Eu^{2+} 掺杂荧光材料的光猝灭机理研究进展 [J]. *发光学报*, 2021, 42(10):1447-1457.
- ZHENG P, DING G Z, XIE R J. Research progress on optical quenching of Ce^{3+} - and Eu^{2+} -doped luminescent materials [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(10):1447-1457. (in Chinese)
- [26] MA Y P, LAN W, XIE B, *et al.* An optical-thermal model for laser-excited remote phosphor with thermal quenching [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2018, 116:694-702.
- [27] XU J, THORSETH A, XU C, *et al.* Investigation of laser-induced luminescence saturation in a single-crystal $\text{YAG}:\text{Ce}$ phosphor: Towards unique architecture, high saturation threshold, and high-brightness laser-driven white lighting [J]. *J. Lumin.*, 2019, 212:279-285.
- [28] LI S X, GUO Y Q, XIE R-J. Laser phosphors for next-generation lighting applications [J]. *Acc. Mater. Res.*, 2022, 3(12):1299-1308.
- [29] SUN P, HU P, LIU Y F, *et al.* Luminescence-refrigeration module: Addressing luminescence saturation challenges in laser-driven lighting [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2023, 18(3):2300969.
- [30] XIAO Y H, HAN L, XIAO Z L, *et al.* Near-unity and near-zero-thermal-quenching luminescent $\text{GAGG}-\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$ ceramic via containerless solidification and glass crystallization methods for NIR spectroscopy application [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2025, 19(12):2500165.
- [31] YU Z K, ZHAO J Z, YANG Z Z, *et al.* A novel $\text{PiGF}@\text{diamond}$ color converter with a record thermal conductivity for laser-driven projection display [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(39):e2406147.
- [32] WANG D H, HOU W T, LI N, *et al.* Growth, spectroscopic properties and crystal field analysis of Cr^{3+} doped GdScO_3 crystal [J]. *Opt. Mater. Express*, 2019, 9(11):4218-4227.
- [33] LI J D, HOU W T, XUE Y Y, *et al.* A new near-infrared broadband laser crystal: Cr^{3+} doped YScO_3 [J]. *J. Lumin.*, 2023, 257:119710.
- [34] LI S X, WANG L, HIROSAKI N, *et al.* Color conversion materials for high-brightness laser-driven solid-state lighting [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2018, 12(12):1800173.
- [35] PARK K W, LIM S G, DERESSA G, *et al.* High power and temperature luminescence of $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$ bulky and pulverized single crystal phosphors by a floating-zone method [J]. *J. Lumin.*, 2015, 168:334-338.
- [36] 庞庆乐. 激光照明用 $\text{Ce}:\text{YAG}$ 荧光透明陶瓷的热压烧结制备与性能研究 [D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2022.
- PANG Q L. *Preparation and properties of hot pressingsintered $\text{Ce}:\text{YAG}$ phosphor transparent ceramicsfor laser-driven lighting* [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [37] CHEN W W, WANG Y F, ZHANG J, *et al.* Ultra-broadband and thermally stable NIR emission in Bi-doped glasses and fibers enabled by a metal reduction strategy [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2023, 106(7):4128-4141.
- [38] ZHENG L W, WU H J, ZHAO K P, *et al.* Ultrabroadband near-infrared $\text{Zn}_3\text{Ga}_2\text{GeO}_8:\text{Cr}^{3+}$, Ni^{2+} phosphor for PiG pc-LED [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2024, 12(32):2401521.
- [39] YOU L, TIAN R D, ZHOU T L, *et al.* Broadband near-infrared phosphor $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Cr}^{3+}$ realized by crystallographic

- site engineering [J]. *Chem. Eng. J.*, 2021, 417:129224.
- [40] 尤凤奎, 王少雄, 郑嵩, 等. 三维立体显示用稀土掺杂纯红色上转换发光氟氧化物玻璃陶瓷 [J]. *硅酸盐学报*, 2024, 52(8): 2455-2462.
- YOU F L, WANG S X, ZHENG S, *et al.* Rare-earth doped pure red upconversion luminescent oxyfluoride glass ceramics for three-dimensional stereoscopic displays [J]. *J. Chin. Ceram. Soc.*, 2024, 52(8):2455-2462.
- [41] NANAI Y, SATAKE Y, KITAZAWA N. Synthesis and luminescence properties of Cr_2O_3 -CaO- GeO_2 glass and glass ceramics for broadband NIR-LEDs [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2023, 62(8):082001.
- [42] WANG T Z, WANG Y Z, CHEN W B, *et al.* Crystallization of $\text{Na}_2\text{SrGe}_6\text{O}_{14}:\text{Cr}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ glass ceramics enabling a Watt-level output power NIR-I/NIR-II lighting source [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2024, 18(1):2033784.
- [43] ZHANG S A, LONG Y, ZHANG P H, *et al.* Ultra-transparent β - $\text{Ga}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$ glass-ceramics enabling high-efficiency true-transmission near-infrared light-emitting diodes [J]. *J. Adv. Ceram.*, 2025, 14(5):9221075.
- [44] ZHENG G J, XIAO W G, WU J H, *et al.* Glass-crystallized luminescence translucent ceramics toward high-performance broadband NIR LEDs [J]. *Adv. Sci.*, 2022, 9(8):2105713.
- [45] YANG L, ZHENG G J, LIAO C, *et al.* Glass-crystallized far-red-emitting ceramics for high-power, spectrally matched plant-growth light sources [J]. *J. Adv. Ceram.*, 2025, 14(10):9221158.
- [46] WU X Z, HUANG D C, ZOU W Z, *et al.* Efficient and stable metaphosphate composite ceramics for high-power-driven near-infrared light sources [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2026, 20(8):e02522.
- [47] YU Z K, MOU Y, PENG Y, *et al.* Toward high-brightness laser lighting: Progress and perspectives on phosphor-in-glass films [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2025, 10(13):2402050.
- [48] GU S M, LIU B M, SI S C, *et al.* Laser-driven NIR light source based on $\text{MgO}:\text{Cr}^{3+}, \text{Ni}^{2+}$ phosphor-in-glass film for NIR spectroscopy application [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2023, 11(26):9014-9022.
- [49] SUI P, ZHANG W, LIN H, *et al.* A $\text{Ca}_3\text{Sc}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}, \text{Cr}^{3+}, \text{Li}^+$ phosphor-in-glass film for high-power laser-driven near-infrared lighting [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2024, 12(38):15596-15606.
- [50] YANG Z Z, ZHENG S, ZHUO S F, *et al.* Toward laser-driven lighting with high overall optical performance: Thermally robust composite phosphor-in-glass film [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2025, 19(10):2401798.
- [51] WANG H, MOU Y, PENG Y, *et al.* Fabrication of phosphor glass film on aluminum plate by using lead-free tellurite glass for laser-driven white lighting [J]. *J. Alloys Compd.*, 2020, 814:152321.
- [52] PARK J, KIM J, KWON H. Phosphor - aluminum composite for energy recycling with high-power white lighting [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2017, 5(19):1700347.
- [53] LI S X, ZHU Q Q, TANG D M, *et al.* Al_2O_3 -YAG:Ce composite phosphor ceramic: a thermally robust and efficient color converter for solid state laser lighting [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2016, 4(37):8648-8654.
- [54] CHENG Z Q, LIU X, CHEN X R, *et al.* Composition and luminescence properties of highly robust green-emitting LuAG:Ce/ Al_2O_3 composite phosphor ceramics for high-power solid-state lighting [J]. *J. Adv. Ceram.*, 2023, 12(3):625-633.
- [55] JIANG H J, CHEN L Y, WU X H, *et al.* Spectral regulation and efficiency optimization in Cr^{3+} -doped gadolinium aluminum gallium garnet near-infrared ceramic phosphors via crystal-field engineering [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2022, 7(12):2200519.
- [56] JIANG H J, CHEN L Y, ZHENG G J, *et al.* Ultra-efficient GAGG: Cr^{3+} ceramic phosphor-converted laser diode: A promising high-power compact near-infrared light source enabling clear imaging [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2022, 10(11):2102741.
- [57] WU X H, LUO Z H, ZHUANG Y J, *et al.* The co-optimization of efficiency and emission bandwidth in GSAGG: Cr^{3+} NIR ceramic phosphors [J]. *Ceram. Int.*, 2023, 49(13):21688-21694.
- [58] LIU G C, CHEN W B, XIONG Z, *et al.* Laser-driven broadband near-infrared light source with watt-level output [J]. *Nat. Photonics*, 2024, 18(6):562-568.
- [59] LIU G C, XIONG Z, CHEN W B, *et al.* $\text{MgAl}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$ translucent ceramics with tunable broadband near-infrared luminescence for laser-driven light source detection [J]. *InfoMat*, 2025, 7(8):e70020.
- [60] GU S M, LIAN H W, KUANG R Y, *et al.* Laser-driven luminescent ceramic-converted near-infrared II light source for advanced imaging and detection techniques [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2025, 14(1):317.
- [61] MA Y L, SHAO C Y, WU L, *et al.* Cr^{3+} activated $\text{Gd}_3\text{Sc}_2\text{Al}_3\text{O}_{12}$ garnet phosphor ceramic with broadband emissions and

- enhanced thermal stability toward high-power near-infrared LED/LD [J]. *Ceram. Int.*, 2024, 50(15):26624-26633.
- [62] LI C J, LIU G C, WANG H, *et al.* Laser-driven spinel-type ceramics enabling NIR-II light sources for penetration optical imaging assisted by a guided filter network algorithm [J]. *Mater. Today*, 2025, 91:196-203.
- [63] CHEN W B, WANG Y Z, LIU G C, *et al.* Phosphor-in-Ceramic-converted laser-driven near-infrared light sources for multiple intelligent spectroscopy applications [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(52):2413857.
- [64] LIU G C, ZHANG S, WANG Y Z, *et al.* Integrated NIR-II light sources via Cr^{4+} -doped wafer-scale composite ceramics for enhanced image sensing [J]. *J. Materiomics*, 2026, 12(3):101199.
- [65] LIN Y, DONG G M, LIN H, *et al.* $\text{Ca}_2\text{YScAl}_2\text{Si}_2\text{O}_{12}:\text{Cr}^{3+}$ phosphor-in-glass film for laser-driven high-power near-infrared lighting [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2025, 13(8):4020-4030.
- [66] ZHAO J Y, WANG Y Y, ZHAI Y, *et al.* High-brightness laser-driven near-infrared light source enabled by $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Cr}^{3+}$ PiG film for multifunctional applications [J]. *Ceram. Int.*, 2026, 52(14):26022-26028.
- [67] LIN Y, LIN H, WANG P F, *et al.* $\text{CaLu}_2\text{Mg}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}, \text{Cr}^{3+}, \text{Nd}^{3+}$ phosphor-in-glass film for laser-driven ultra-broad-band near-infrared lighting with watt-level output [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2024, 18(12):2400995.
- [68] XIONG Z, LIU G C, CHEN W B, *et al.* Laser-driven $(\text{Ga/Sc})_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$ luminescent ceramics enabling near-infrared light source for noninvasive imaging and detection [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2024, 19(2):2401248.
- [69] 吴斌, 刘乐, 姚乐琪, 等. 具有石榴石结构的高效近红外荧光粉 $\text{Y}_3(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Cr}^{3+}$ 发光性能 [J]. *发光学报*, 2025, 46(6):1067-1074.
- WU B, LIU L, YAO L Q, *et al.* Luminescent properties of efficient near-infrared phosphors $\text{Y}_3(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Cr}^{3+}$ with garnet structure [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(6):1067-1074. (in Chinese)
- [70] TRAGL S, EISERT D, LANGE S, *et al.* Radiation-emitting optoelectronic component: *Germany*, WO 2016/174236 A1 [P/OL]. 2016-03-11.
- [71] QIAO J W, ZHOU G J, ZHOU Y Y, *et al.* Divalent europium-doped near-infrared-emitting phosphor for light-emitting diodes [J]. *Nat. Commun.*, 2019, 10(1):5267.
- [72] NÜRNBERG D J, MORTON J, SANTABARBARA S, *et al.* Photochemistry beyond the red limit in chlorophyll f-containing photosystems [J]. *Science*, 2018, 360(6394):1210-1213.
- [73] LAI X Y, LYU M Q, TANG B L, *et al.* Employing high efficiency $\text{Gd}_3\text{Ga}_2\text{Al}_3\text{O}_{12}:\text{Cr}^{3+}$ phosphor glass films to enhance the long-term operating stability of high-power LED plant lighting device [J]. *J. Lumin.*, 2025, 280:121101.
- [74] DOKE G, RODIONOV S, ANTUZEVIC S, *et al.* $\text{Mg}_4\text{Ga}_8\text{Ge}_2\text{O}_{20}:\text{Cr}^{3+}, \text{Mn}^{2+}$ phosphors with multicolor persistent luminescence for advanced anti-counterfeiting applications [J]. *Opt. Mater.*, 2026, 170:117727.
- [75] LI X, ZHU Y C, YAN J M, *et al.* Unlocking high external quantum yield for broadband near-infrared emission from lead-free perovskite variant solid solutions $\text{Cs}_2\text{Te}_{1-x}\text{Mo}_x\text{Cl}_6$ [J]. *Adv. Mater.*, 2026, 38(10):e20149.
- [76] YANG X Y, CHEN S Y, LIU Y F, *et al.* High-performance and high-power NIR light sources based on $\text{Y}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}:\text{Cr}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ ceramics: Luminescence from macro statistics to micro diagnostics [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2026, 20(13):e03071.
- [77] MIYAJIMA K, NISHIKAWA A, KATO T, *et al.* Evaluation of Nd:YAG and Nd,Ce:YAG transparent ceramics as near-infrared scintillators for remote high-radiation field monitoring and bioimaging [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2026, 65(12):126002.
- [78] LIU G C, TANG B L, ZHANG S, *et al.* Wafer-scale $\text{MgO}:\text{Li}^+, \text{Cr}^{3+}$ transparent ceramic scintillators with NIR emission for X-ray dual-mode fusion and time-lapse imaging [J]. *Angew. Chem., Int. Ed. Engl.*, 2026, 65(21):e3481276.
- [79] GUO R H, GONG W Y, SONG E H, *et al.* High-quality photoplethysmography signal enabled by narrowband red phosphor converted light-emitting diodes for accurate blood-pressure monitoring [J]. *Adv. Mater.*, 2026:e21971.
- [80] YIN B Y, ZHOU X, YUYANG LI, *et al.* Sensitive organic photodetectors with spectral response up to 1.3 microm using a quinoidal molecular semiconductor [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(19):2310811.
- [81] NOTTE C, ALIONTE C, STRUBAKOS C D. The efficacy and methodology of using near-infrared spectroscopy to determine resting-state brain networks [J]. *J. Neurophysiol.*, 2024, 131(4):668-677.
- [82] PERREY S, QUARESIMA V, FERRARI M. Muscle oximetry in sports science: An updated systematic review [J]. *Sports Med.*, 2024, 54(4):975-996.
- [83] QIAN D, JIN Y H, YUAN L F, *et al.* Accessing energy-efficient broadband near-infrared luminescence in Cr^{3+} -doped

- disordered garnet with near-zero thermal quenching and an EQE of 50.26 % [J]. *Ceram. Int.*, 2025, 51(18):26050-26058.
- [84] SUO H, LI L, SUN J, *et al.* A self-powered tactile sensor resistant to environmental interference [J]. *Adv. Mater.*, 2026, 38(6):e16596.
- [85] SUO H, WANG Y, ZHANG X, *et al.* A broadband near-infrared nanoemitter powered by mechanical action [J]. *Matter*, 2023, 6(9):2935-2949.
- [86] XIAO Y, XIONG P X, LIU G C, *et al.* Synergistic optimization between chromium local coordination states toward self-powered high-repeatability near-infrared mechanoluminescence [J]. *Adv. Sci.*, 2026, 13(4):e18364.
- [87] SU K, MEI L F, LIU Z Q, *et al.* Customized Cr^{3+} -doped disordered structures enhance optical manometry [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(48):2507563.
- [88] YAO B, SUN M Y, GAO D R, *et al.* Real-time near-infrared optical wireless communication system for indoor multi-user access [J]. *Chinese Optics Letters*, 2026, 24(3):030602.
- [89] HE F Q, SONG E H, ZHANG C, *et al.* $\text{Cr}^{3+} \leftrightarrow \text{Fe}^{3+}$ energy transfer offset enabling anti-thermal quenching near-infrared emission for coded wireless-communication applications [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2023, 18(3):2300668.
- [90] KUMAR A, AKBAR A, LESMES H, *et al.* Machine-learning-assisted discovery of Cr^{3+} -based near-infrared phosphors [J]. *Chem. Mater.*, 2025, 37(19):7762-7770.
- [91] HUANG T, WANG B Z, YANG L N, *et al.* Machine-learning guided engineering of Mo^{4+} activated halide near-infrared phosphors for AI-augmented medical imaging [J]. *Nat. Commun.*, 2026, 17(1):6476.



刘高超(1997-),男,河南驻马店人,博士,助理研究员,2025年于华南理工大学获得博士学位,主要从事大功率近红外光源的设计制备与应用研究。
Email: lgc@scut.edu.cn



夏志国(1979-),男,湖北黄陂人,博士,教授,2008年于清华大学获得博士学位,主要从事稀土掺杂固体发光材料和新型金属卤化物发光材料的研究。
Email: xiazg@scut.edu.cn