

文章编号: 1000-7032(2022)02-0161-13

# 基于无机材料体系连续激光驱动的全光谱白光研究进展

吴建红<sup>1\*</sup>, 韩琼瑶<sup>2</sup>, 田碧凝<sup>2</sup>, 田 跃<sup>2\*</sup>

(1. 太原理工大学 物理与光电工程学院, 山西 太原 030024;

2. 太原理工大学材料科学与工程学院 新型碳材料研究所, 山西 太原 030024)

**摘要:** 全光谱白光具有和太阳光光谱接近的覆盖可见到红外连续波段的光谱特征,对光学研究具有重要意义。连续激光驱动光学活性材料的全光谱白光因其特殊的发光性能及高效的发光效率吸引了研究者广泛的研究兴趣。本文首先从有无激活中心角度对可产生全光谱白光的无机材料进行了分类总结。然后从光谱性能、温度性能及光电性能三个方面对无机材料体系中的全光谱白光的光物理过程进行了归纳分析,并对全光谱白光的应用做出了展望。最后对这一非线性光学效应的全光谱白光发光现象未来的研究方向及发展趋势进行了总结。

**关键词:** 全光谱白光; 无机材料; 非线性光学效应

中图分类号: O482.31 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20210348

## Research Advances of Continuous-wave Laser Driven Full-spectrum White Light Based on Inorganic Material System

WU Jian-hong<sup>1\*</sup>, HAN Qiong-yao<sup>2</sup>, TIAN Bi-ning<sup>2</sup>, TIAN Yue<sup>2\*</sup>

(1. College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Institute of New Carbon Materials, College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

\* Corresponding Author, E-mail: wujh6629@163.com; tianyue@tyut.edu.cn

**Abstract:** Full-spectrum white light, covering visible to infrared, is of great significance to optical research due to its solar-like spectrum. The full-spectrum white light generated by a continuous-wave laser irradiation on different materials has attracted extensive research interest because of its special optical properties and high luminous efficiency. In this review, the inorganic materials emitting full spectrum white light are classified and summarized from the point of activation center. Then, the photophysical process of full spectrum white light in inorganic material system is summarized and analyzed from three aspects: spectral property, temperature property, and photoelectric property, and its application is promising. Finally, the future research direction and development trend of this nonlinear optical phenomenon are summarized.

**Key words:** full-spectrum white light; inorganic material; nonlinear optical process

收稿日期: 2021-11-05; 修订日期: 2021-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(12104336); 山西省基础研究计划项目(20210302124162)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China(12104336); Natural Foundation of Shanxi(20210302124162)

## 1 引 言

超宽带全光谱白光的波长范围能够覆盖可见到红外连续波段,其光谱特征接近太阳光,对光学研究具有重大意义。热辐射光是获得全光谱连续白光的一种方式,当物体温度高达 3 863 K 时,热辐射光辐射峰位于可见光波段(350 ~ 750 nm)的长波端(750 nm),而低温下物体热辐射的主要能量都在红外波段<sup>[1-5]</sup>。近年研究发现,连续激光辐照一些光学活性材料可以产生一种宽带全光谱连续白光,这种白光发光在低于其相对黑体辐射温度下即可产生高效全光谱白光。

早在 2002 年, Wu 等<sup>[6]</sup>用 978 nm 激光激发 Mo 掺杂的 TiO<sub>2</sub> 材料,观察到宽带上转换发光,并说明了 TiO<sub>2</sub>: Mo 体系的宽带白光发光中存在着光子雪崩机制。近些年来,连续激光驱动全光谱白光相继在多种不同材料中被观察到<sup>[7-10]</sup>,并作为一种新的上转换发光现象吸引了很多研究者的研究兴趣。连续激光驱动的全光谱白光不同于来自分立发光中心得到的三基色白光以及来自超快脉冲激光与不同材料相互作用得到的非线性超连续白光<sup>[11-16]</sup>。连续激光驱动的宽带白光不依赖于独立的发光中心,而是可有效吸收激发光能量的各类材料在相对低能量的连续波激光器作用下即可产生由可见到红外的全光谱白光,并且其具有比传统上转换发光高得多的上转换效率。2014 年, Wang 等<sup>[17]</sup>报道了连续激光驱动 ZrO<sub>2</sub>: 28% Yb<sup>3+</sup> 材料的白光发光效率高达 16%,使得连续激光驱动的全光谱宽带白光发光现象在固态照明、光学测温、提高太阳能电池效率等领域都存在潜在的应用价值。然而,由于这一现象具有特殊的发光

性能(例如,发光阈值效应、温度效应、光电效应等),研究者对不同材料中连续激光诱导的全光谱白光的机理解释往往因材料而异(包括黑体辐射、电荷迁移、光子雪崩发光等)<sup>[6,10,18-24]</sup>。因此,对这种白光发光现象从物理机制到实际应用还有很多亟待解决的问题,深入探究这一全光谱白光物理性能并更好地控制连续白光的产生将对加速其产业化应用具有重要意义。

基于大部分无机材料具有较高的热稳定性及化学稳定性,目前研究最广的连续激光驱动的全光谱白光材料为无机材料体系。本文将对发射这一白光的无机材料体系及其光物理过程进行归纳分析,并对这一光物理过程的未来研究方向及发展趋势做出总结展望。

## 2 连续激光驱动的全光谱白光无机材料体系

连续激光驱动的全光谱白光发光示意图如图 1 所示,该发光表现为暖白光。图 2 为部分不同无机材料体系中白光发光材料结构示意图及相应的发光照片,从图中可以看到不同类型无机材料体系在连续激光激发下均可产生类似的暖白光发光。根据已有报道,可获得连续激光驱动的全光谱白光的无机材料一般具有高热稳定性,并且在高熔点、低热导率材料中可获得更高效全光谱白光<sup>[17]</sup>。根据材料有无激活中心,这类无机材料可以分为激活离子掺杂材料和无激活离子掺杂材料。其中,激活离子掺杂材料又可细分为稀土离子掺杂材料、过渡金属离子掺杂材料以及纳米颗粒-氧化物复合纳米晶体;无激活离子掺杂材料可细分为纳米无机氧化物材料、碳基材料和半导体材料。

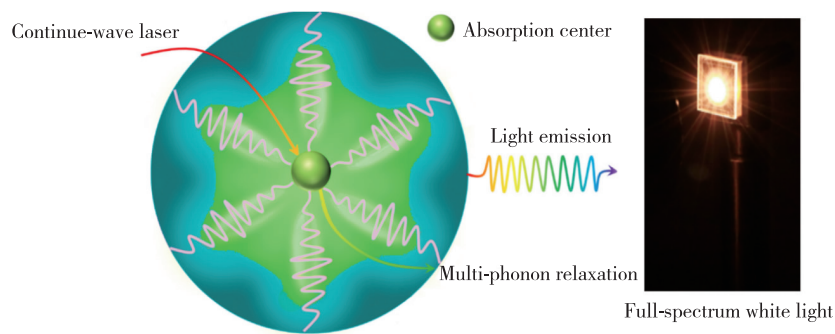


图 1 全光谱白光发射示意图

Fig. 1 Schematic diagram of full-spectrum white light emission

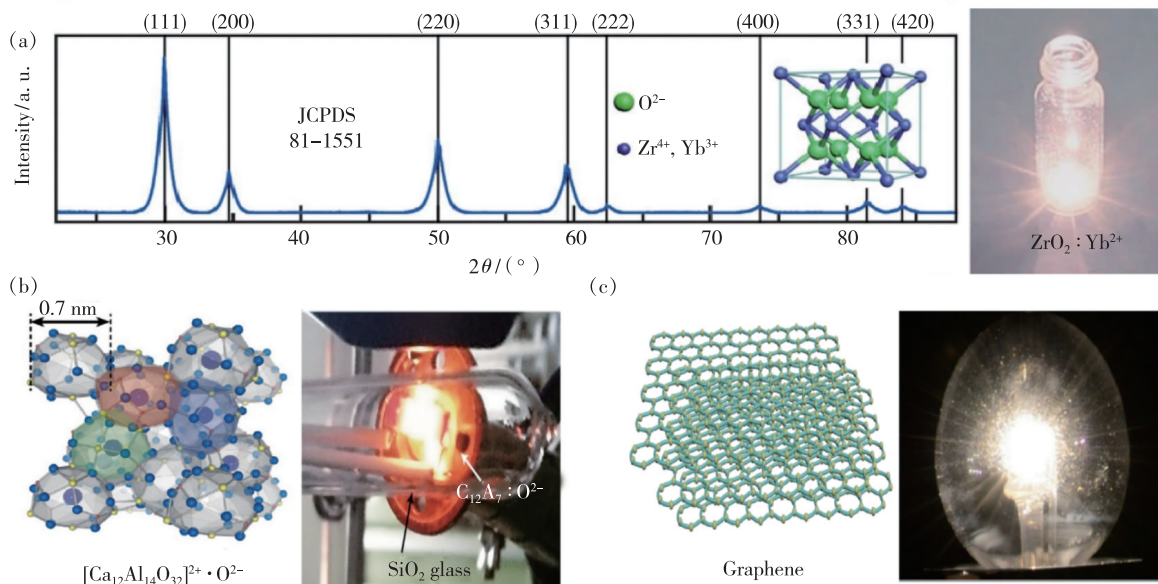


图 2 (a)  $\text{ZrO}_2:\text{Yb}^{3+}$  的 X 射线衍射谱, 发光照片是由准直 976 nm 激光束激发的粉末样品的照片 ( $1.6 \text{ W}$ ,  $760 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ; 比例尺, 5 mm)<sup>[17]</sup>; (b)  $\text{C}_{12}\text{A}_7:\text{O}^{2-}$  的晶胞示意图及其发光照片,  $\text{C}_{12}\text{A}_7:\text{O}^{2-}$  的立方晶胞包含 12 个笼, 笼的外径和内径分别约为 0.7 nm 和 0.4 nm<sup>[25]</sup>; (c) 石墨烯模型及石墨烯灯泡的白光发射照片<sup>[8,26]</sup>。

Fig. 2 (a) X-ray diffraction pattern of the  $\text{ZrO}_2:\text{Yb}^{3+}$ . Photograph of the powder sample excited by a collimated 976-nm laser beam ( $1.6 \text{ W}$ ,  $760 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ; scale bar, 5 mm). The sample glows<sup>[17]</sup>. (b) Schematic of a  $\text{C}_{12}\text{A}_7:\text{O}^{2-}$  unit cell and its white light emission photograph. The cubic unit cell of the  $\text{C}_{12}\text{A}_7:\text{O}^{2-}$  contains 12 cages. The outer and inner diameters of the cages are about 0.7 nm and 0.4 nm, respectively<sup>[25]</sup>. (c) Graphene model and photograph of the graphene bulb emitting white light<sup>[8,26]</sup>.

## 2.1 激活离子掺杂材料

氧化物具有优异的化学稳定性和热稳定性, 研究者已针对离子激活的无机氧化物材料在连续激光激发下产生宽带全光谱白光的发射现象进行了广泛研究。这类离子掺杂氧化物材料的基质主体包括二元金属氧化物<sup>[20,27]</sup>、铝酸盐<sup>[28]</sup>、硅酸盐<sup>[29-31]</sup>、钒酸盐<sup>[32-33]</sup>和其他复杂的氧化物(如  $\text{Sr}_2\text{CeO}_4$  和  $\text{Y}_4\text{Zr}_3\text{O}_{12}$ )<sup>[34-36]</sup>, 以及含有激活离子化学计量浓度的几种氧化物体系<sup>[37-38]</sup>, 例如钨铝钙钛矿、 $\text{Yb}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  和一些过渡金属化合物, 这类氧化物体系一般具有较强的光化学及光热稳定性。

除了基质主体, 产生全光谱白光的激活离子掺杂材料的光吸收离子主要包括稀土离子和过渡金属离子。对于典型的激活离子掺杂荧光粉材料, 较大的激活离子浓度会导致离子中心间的距离小于临界距离, 从而产生级联能量传递, 最终导致发光猝灭。而对于激活离子掺杂的连续激光驱动全光谱白光的无机氧化物材料, 较大的掺杂离子浓度可增强材料的光吸收及无辐射弛豫速率, 反而有利于全光谱白光的产生。

### 2.1.1 稀土离子掺杂材料

由于发光强度在很大程度上依赖于材料对激发发光能量的有效捕获, 因此需要选择其吸收带与激光波长共振的光吸收离子。已报道的可作为连续激光驱动产生全光谱白光的光吸收稀土离子包括  $\text{Yb}^{3+}$ 、 $\text{Nd}^{3+}$ 、 $\text{Er}^{3+}$ 、 $\text{Tm}^{3+}$ 、 $\text{Pr}^{4+}$ 、 $\text{Tb}^{4+}$  等<sup>[7,9,39-40]</sup>。目前最常用的驱动全光谱白光的泵浦源是技术成熟并已商业化应用的 980 nm 激光源, 而稀土离子中的  $\text{Yb}^{3+}$  能级结构简单(仅包含  $^2\text{F}_{5/2}$  和  $^2\text{F}_{7/2}$  能级), 并且其在 980 nm 表现出较大的吸收截面, 这与商用 980 nm 激光二极管的工作波长相匹配, 使得  $\text{Yb}^{3+}$  成为目前最有效的稀土离子激活剂<sup>[41-42]</sup>。对于其他稀土离子, 例如  $\text{Er}^{3+}$  也在 980 nm 附近具有吸收带, 因此  $\text{Er}^{3+}$  掺杂的无机氧化物材料体系中也产生较强的全光谱白光<sup>[38,43]</sup>。此外, 808 nm 连续激光器可泵浦  $\text{Nd}^{3+}$  或  $\text{Tm}^{3+}$  掺杂材料, 808 nm 激光激发的全光谱白光发射也已在许多材料中得到证实。

### 2.1.2 过渡金属离子掺杂材料

与稀土离子不同的是, 过渡金属离子对泵浦

光表现出典型的宽频带光吸收特征,因此部分过渡金属离子也可作为全光谱白光的高效光吸收离子。目前报道的可在连续激光驱动下产生全光谱白光的光吸收过渡金属离子主要包括  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$  等<sup>[44]</sup>。Chen 等<sup>[45]</sup>证明了具有层状结构的铜基硅酸盐(光吸收离子为  $\text{Cu}^{2+}$  过渡金属离子)在 980 nm 激发下会显示出明亮的全光谱白光发光。Chaika 等<sup>[46-47]</sup>在固相法制备的  $\text{Cr}^{3+}$  掺杂的  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  (YAG)透明陶瓷材料中观察到了激光诱导的全光谱白光发射现象,并说明了全光谱白光发光与温度的相互作用关系,也提出全光谱白光的产生是由于多光子电离导致了价间电荷转移。除 YAG 透明陶瓷材料外, $\text{Cr}^{3+}$  掺杂的 YAG 单晶材料中也同样可产生全光谱连续白光<sup>[45]</sup>。

### 2.1.3 金属纳米颗粒-氧化物复合纳米晶体

除上述稀土或过渡金属离子掺杂的无机氧化物材料体系外,在许多由贵金属纳米粒子和无机稀土氧化物组成的复合纳米晶体结构材料中也可有效地产生宽带全光谱白光发光,研究者认为这类材料中的宽带白光发光现象的产生是由于金属纳米离子的表面等离子体共振效应引起的。例如,宋宏伟教授团队<sup>[48-50]</sup>合成了一系列纳米复合材料,包括  $\text{Nd}_2\text{O}_3/\text{Au}$ 、 $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{Au}$  和  $\text{Ag-SiO}_2\text{-Er}_2\text{O}_3$ , 这些材料在近红外激光激发下观察到强烈的宽带白光发射。研究表明,金属纳米粒子的引入可以有效降低白光发射的激发阈值,并且由于贵金属纳米结构对激发光的有效捕获,全光谱白光的发射强度会大大提高。Debasu 等<sup>[51]</sup>在  $(\text{Gd}, \text{Yb}, \text{Er})_2\text{O}_3$  纳米棒表面附着 Au 纳米颗粒组成类似金属纳米颗粒-氧化物复合纳米晶体复合材料中同样获得了较强的宽带全光谱白光,并基于低激发密度下  $\text{Er}^{3+}$  离子的温度传感效应及高激发密度下的宽带白光的热辐射普朗克定律光谱拟合模型,将这类材料应用于 2 000 K 温度下的光学测温。

## 2.2 无激活离子掺杂材料

除了激活离子掺杂无机材料,没有掺杂任何激活离子的无机材料在连续激光激发下也表现出宽带全光谱白光发射,主要包括纳米无机氧化物材料、碳基材料以及半导体材料。

### 2.2.1 纳米无机氧化物材料

连续激光激发一些未引入激活中心的纳米无机氧化物材料可以产生全光谱宽带白光发光,但

这些材料对激发光没有明显的共振吸收波带。目前报道的这类材料主要包括  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 、 $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ 、 $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ 、 $\text{Y}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Y}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  等<sup>[39,52-54]</sup>。例如, Toda 等<sup>[25]</sup>合成了由纯主族氧化物构成的无掺杂的多面体笼型  $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$  氧化物粉末,当太赫兹波激光光功率达到几十瓦时,  $[\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{32}]^{2+} \cdot \text{O}^{2-}$  ( $\text{C}_{12}\text{A}_7: \text{O}^{2-}$ ) (部分  $\text{O}^{2-}$  被困在 Ca-Al-O 多面体笼中)材料产生了强烈的全光谱白光发射,并给出多面体笼密闭空间中氧原子的电子激发、电离以及再复合过程导致明亮的可见光发射的解释。Bilir 团队<sup>[55-57]</sup>合成了一系列无掺杂的  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 、 $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ 、 $\text{Y}_2\text{O}_3$  和  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  纳米粉末,并且观察到了 450 ~ 900 nm 的宽带白光发射,他们认为这类白光发射是激光加热诱导的热辐射发光。尽管这些粉体材料呈现明显的白色,但材料制备过程中少量残留的 OH 基团或低浓度的晶格缺陷是否也能引起高泵浦激发密度下材料对激光能量的有效吸收,从而导致发光过程中这些氧化物材料出现显著的温升,我们认为这一推测需要进一步验证。

### 2.2.2 碳基材料

一些对不同波长光可产生明显共振吸收的碳基材料在一定连续波激光作用下同样可以产生强烈的全光谱宽带白光发光,比如碳纳米管、石墨烯和单层石墨烯<sup>[26,58-62]</sup>。为了避免这类材料与空气中的氧气接触反应,对其宽带白光的研究需要在真空仓中进行。另外,由于这类碳基材料较上述氧化物材料的光吸收带较宽且较强,碳基材料可在不同波长连续激光激发下产生具有更低激发阈值的宽带全光谱白光。例如,Strek 等研究了不同波长连续激光器(975, 808, 514 nm 等)激发石墨烯材料的连续白光<sup>[8,26,63-64]</sup>,并观察到白光阈值效应及发光强度与压强的明显依赖性。碳基材料的多波长选择性激发及其低全光谱白光激发阈值使得这类材料在宽带全光谱材料的研究中具有广泛的潜在应用价值。

### 2.2.3 半导体材料

除上述材料外,激光诱导宽禁带半导体 GaN 纳米陶瓷材料同样产生了明亮的全光谱白光。Stefanski 等<sup>[65]</sup>研究了 1 064, 975, 808 nm 连续激光激发 GaN 纳米陶瓷材料,可产生可见光到红外光区域全光谱白光发光,并且白光性能相对于激发功率密度及压强存在明显的依赖关系,结合其对时间的发光动力学过程,说明了这种白光

的产生与激光诱导光电流的密切关系,并给出了全光谱白光的产生与电子电离过程相关的机理解释。Tomala 等<sup>[44]</sup>用 266 nm 和 975 nm 连续激光激发宽禁带半导体 ZnSe: Yb 材料,同样观察到明亮的白光发光,并证明了激光激发功率密度与白

光发光强度的依赖关系。

综合目前的研究报道,如表 1 所示,连续激光驱动的全光谱白光不特定于任何氧化物基质,而是只要材料对泵浦光能量可有效吸收即可发射强烈白光的一般光物理过程。

表 1 连续激光驱动全光谱白光无机材料体系

Tab. 1 Full spectrum white light generated by a continuous-wave laser irradiation in inorganic material system

材料	基质	掺杂离子	$\lambda_{ex}^a/\text{nm}$	参考文献	
激活离子掺杂材料	ZrO <sub>2</sub>	Yb <sup>3+</sup>	976	[20]	
	稀土离子掺杂材料	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Yb <sup>3+</sup> , Er <sup>3+</sup>	975, 803.5	[19]
	Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	Yb <sup>3+</sup>	975	[9]	
	Y <sub>4</sub> Zr <sub>3</sub> O <sub>12</sub>	Yb <sup>3+</sup> , Tm <sup>3+</sup>	980	[34]	
	YVO <sub>4</sub>	Yb <sup>3+</sup> , Er <sup>3+</sup>	980	[7]	
	Sr <sub>2</sub> CeO <sub>4</sub>	Nd <sup>3+</sup> /Yb <sup>3+</sup> /—	808, 975	[40]	
	PrO <sub>2</sub>	—	980	[37]	
	过渡金属离子掺杂材料	Gd <sub>3</sub> Ga <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	Cr <sup>3+</sup>	803.5	[56]
	Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	Cr <sup>3+</sup>	1 064	[47]	
	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Au	—	980, 808	[50]	
金属纳米颗粒-氧化物复合纳米晶体	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Au	Yb <sup>3+</sup> , Er <sup>3+</sup>	980	[51]	
Ag-SiO <sub>2</sub> -Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	980	[48]		
无激活离子掺杂材料	纳米无机氧化物材料	Gd <sub>3</sub> Ga <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	—	803.5	[56]
	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	803.5, 975	[54]	
	碳基材料	石墨烯	—	975, 808, 476, 488, 514	[26]
	碳纳米管	—	532, 632, 663, 1 064	[59]	
	半导体材料	GaN	—	1 064	[55]

<sup>a</sup> $\lambda_{ex}$ 是激发波长。

### 3 连续激光驱动无机材料体系产生的全光谱白光光学性能

这种连续白光与普通荧光发光的光学性能又存在明显的不同,以下我们将从光学性能、温度性能、光电性能三方面对连续激光驱动的全光谱宽带白光性能进行汇总分析。

#### 3.1 光谱性能

##### 3.1.1 发射光谱

连续激光驱动全光谱白光需要材料对激发光能量的有效吸收,目前已报道的这类发光现象的发射光谱主要包含两种类型:一种是表现为峰值中心位于 600 ~ 700 nm 的宽带光谱(I 型),一种

是光强由可见短波长到长波长逐渐增强的类似热辐射光谱特征的连续光谱(II 型)。图 3 给出了不同类型无机材料体系在连续激光激励下产生的连续白光光谱,图 3(a) ~ (d) 表现为 I 型光谱,图 3(e) ~ (h) 表现为 II 型光谱。对于激活离子掺杂无机材料,如图 3(a)、(b) 和 (e) 所示,相同稀土离子(Yb<sup>3+</sup>)掺杂的基质材料在连续激光激发下产生的白光既有 I 型光谱又有 II 型光谱,但是同为 Yb<sup>3+</sup> 离子掺杂的无机氧化物材料体系却存在两种类型发射光谱(图 3(b)、(e)),不同掺杂离子和基质材料又表现为相似的光谱特征(图 3(b)、(e),图 3(a)、(b)、(c))。同时,如图 3(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)、(g)、(h) 所示,对

于不同材料体系,激活离子掺杂以及无掺杂材料体系均又可观察到形似的光谱特征。由此说明,不同激发波长驱动同类型以及不同类型材料同样表现出相似的光谱特征,并且包含了 I 型和 II 型

光谱。因此,综合不同无机材料体系以及不同激发发光波长驱动的全光谱白光的发光特征,这种全光谱白光的发射光谱与激发波长、基质材料以及激活离子无关。

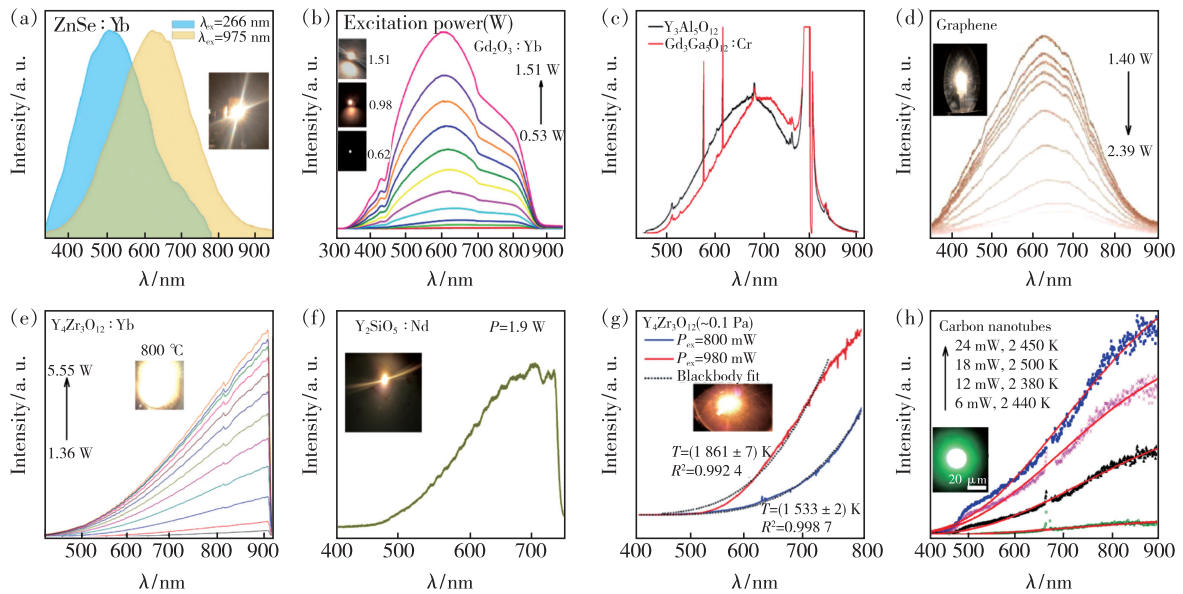


图 3 不同无机材料的白光发射光谱。(a)  $\text{ZnSe:Yb}^{3+}$  [44]; (b)  $\text{Gd}_2\text{O}_3:\text{Yb}^{3+}$  [66]; (c)  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  和  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}:\text{Cr}^{3+}$  [55]; (d) 石墨烯 [8]; (e)  $\text{Y}_4\text{Zr}_3\text{O}_{12}:\text{Yb}^{3+}$  [67]; (f)  $\text{Y}_2\text{SiO}_5:\text{Nd}^{3+}$  [68]; (g)  $\text{Y}_4\text{Zr}_3\text{O}_{12}$  [34]; (h) 碳纳米管 [59]。插图为各类材料分别对应的白光发光照片。

Fig. 3 White light emission spectra of different inorganic materials. (a)  $\text{ZnSe:Yb}^{3+}$  [44]. (b)  $\text{Gd}_2\text{O}_3:\text{Yb}^{3+}$  [66]. (c)  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  and  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}:\text{Cr}^{3+}$  [55]. (d) Graphene [8]. (e)  $\text{Y}_4\text{Zr}_3\text{O}_{12}:\text{Yb}^{3+}$  [67]. (f)  $\text{Y}_2\text{SiO}_5:\text{Nd}^{3+}$  [68]. (g)  $\text{Y}_4\text{Zr}_3\text{O}_{12}$  [34]. (h) Carbon nanotubes [59]. The insets are the photographs of various types of materials.

考虑到目前实现可见光谱测试的探测器一般多为硅基探测器,而硅基探测器对波长长于 700 nm 的波段的探测效率明显下降,所以对于大多数的商用光谱仪一般采用基于标准光源获取的校正函数对所测量的光谱进行校正。如图 4 所示,我们研究了 980 nm 激光激发  $\text{Yb}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  时探测器响应校正前后的连续白光的发射光谱,插图为相应的白光发射照片,其发光现象同样表现为暖白光发光。在光谱被校正前,发射光谱曲线为峰值约为 600 nm 的 I 型光谱;当光谱被校正后,光谱峰值消失,发射光谱转变为光强由短波长到长波长逐渐增强的 II 型光谱。因此,对探测器灵敏度的校正直接影响白光发射光谱的谱型,为避免因探测器响应效率问题造成的光谱谱型的变化 (I 型和 II 型光谱) 而影响实验结果的理论分析,对于连续白光的光谱测试中应使用校正函数对发射光谱进行校正。

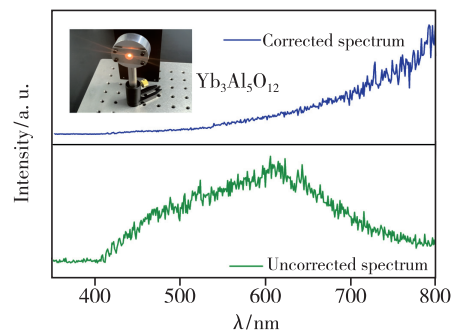


图 4 探测器校正前后的 980 nm 激光激发  $\text{Yb}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  的白光发射光谱,插图为相应的白光发光照片。

Fig. 4 White light emission spectra with before and after detector efficiency correction of  $\text{Yb}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  microcrystals under excitation by a 980 nm laser, and the corresponding white light emission photograph is inset.

### 3.1.2 光谱性能影响因素

连续激光驱动的宽带白光发光属于非线性发光,通过对多种不同材料的宽带白光的发光性能的研究可以总结出发射光谱性能与外界环境及材

料本身物理特性有关,比如激光激发密度、激发波长、环境压强以及材料熔点、热导、光吸收性能等因素(如图 5 所示)。图 5(a)给出了 Stefanski 等<sup>[36]</sup>报道的  $\text{Sr}_2\text{CeO}_4$  材料在不同激发功率密度 808 nm 激光器泵浦下的宽带白光的发射光谱,从图中可以看到,当激光功率密度超过一定阈值时可产生宽带白光发光,并且随着激光泵浦功率密度的增大发光强度逐渐增强,这个激发阈值的大小取决于材料本身的物理属性以及实验条件的限制。图 5(b)为全光谱宽带白光发射光谱随不同激发波长的变化,相同激发条件下不同波长激光泵浦的材料白光发射光谱的谱型不变,但随着激发能量的增大发光强度增强<sup>[58]</sup>。除此之外,这种连续白光发光的最大发光特征是外界大气压强对发光强度的猝灭性,改变材料所处环境的压强可以影响全光谱白光的发光强度。图 5(c)给出随着外界压强的降低,发光强度明显增强。研究者认为这种全光谱白光的发光强度与大气压强的依赖性可以通过热传导来解释,大气压强的降低

限制了材料的热传导,从而使得激光激发下样品的温度明显升高,最终导致发光强度增强,也进一步说明了全光谱连续白光发光受温度影响,属于热辅助发光<sup>[36]</sup>。这种宽带白光发光除了受激发以及大气环境等实验条件影响外,材料本身的物理属性同样影响全光谱白光的产生,比如材料的光吸收性能、熔点以及热导率等。 $\text{Yb}^{3+}$  离子由于其 $^2F_{5/2}$ 到 $^2F_{7/2}$ 的跃迁使其在 980 nm 处可表现出较大的吸收截面,图 5(d)给出了通过改变材料中  $\text{Yb}^{3+}$  离子浓度调整材料对激发光的光吸收性能,从图中可以看到,随着材料中  $\text{Yb}^{3+}$  离子浓度的增大(即对激发光光吸收性能的增强),白光发光强度逐渐增强<sup>[9]</sup>。图 5(e)、(f)分别为不同浓度  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂的  $\text{ZrO}_2$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  材料中的白光发光强度对比和四种氧化物基质的熔点和导热系数,可以看到,具有较高熔点和较低导热系数的氧化物基质材料具有更强的白光发光强度。也就是说,激发密度、激发波长、环境压强以及材料的物理属性均可以影响这种全光谱白光的发光性能,

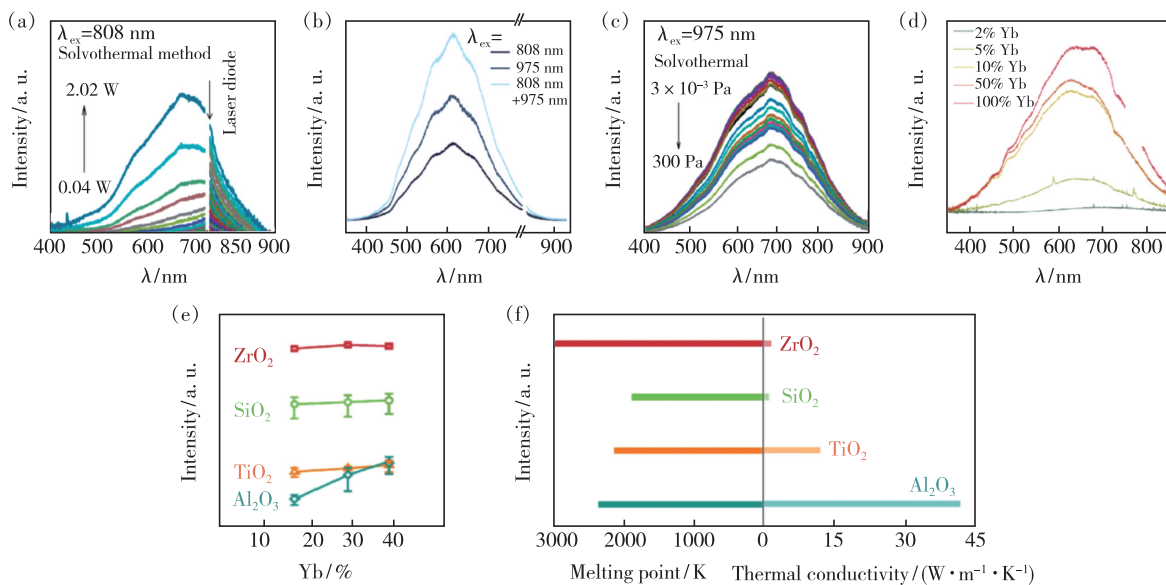


图 5 (a)不同激发功率密度的 808 nm 激光激发  $\text{Sr}_2\text{CeO}_4$  的白光发射光谱<sup>[36]</sup>; (b)不同激发波长激发石墨烯材料的白光发射光谱<sup>[58]</sup>; (c) $\text{Sr}_2\text{CeO}_4$  在 975 nm 激光激发下发光光谱与外界压强的依赖关系<sup>[36]</sup>; (d)975 nm 激光激发不同浓度  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂的  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  纳米陶瓷材料的白光发射光谱<sup>[9]</sup>; (e)不同浓度  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂的  $\text{ZrO}_2$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  材料中的白光发光强度对比<sup>[17]</sup>; (f) $\text{ZrO}_2$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  氧化物基质的熔点和导热系数<sup>[17]</sup>。

Fig. 5 (a) Power-dependent white light spectra of  $\text{Sr}_2\text{CeO}_4$  under 808 nm laser excitation<sup>[36]</sup>. (b) Emission spectra of graphene upon irradiation at various excitation wavelengths<sup>[58]</sup>. (c) Dependence of white light emission of  $\text{Sr}_2\text{CeO}_4$  excited by 975 nm laser on pressure<sup>[36]</sup>. (d) Emission spectra of different concentrations of  $\text{Yb}^{3+}$  doped  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  nanoceramics under the excitation of 975 nm laser<sup>[9]</sup>. (e) Comparison of white light emission intensity in  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  doped with different concentrations of  $\text{Yb}^{3+}$ <sup>[17]</sup>. (f) Melting points and thermal conductivities of  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oxide hosts<sup>[17]</sup>.

这是这类全光谱白光发光区别于普通上转换发光的不同之处。基于这些特征,我们是否可以考虑通过对外界环境及材料本身物理属性的改变对全光谱白光发光性能进行调控,比如通过纳米级微结构“量身定制”材料的热导率或发射率对白光发射光谱进行定向调制,或者通过封装技术改变真空度结合材料微结构的调控实现更高效的全光谱白光?对全光谱白光性能的进一步探索将为加速全光谱白光产业化具有重要的意义,也为寻找更高效热白光光源的研究提供了新的设计思路。

### 3.1.3 光谱动力学过程

对于连续激光驱动的全光谱宽带白光,其与

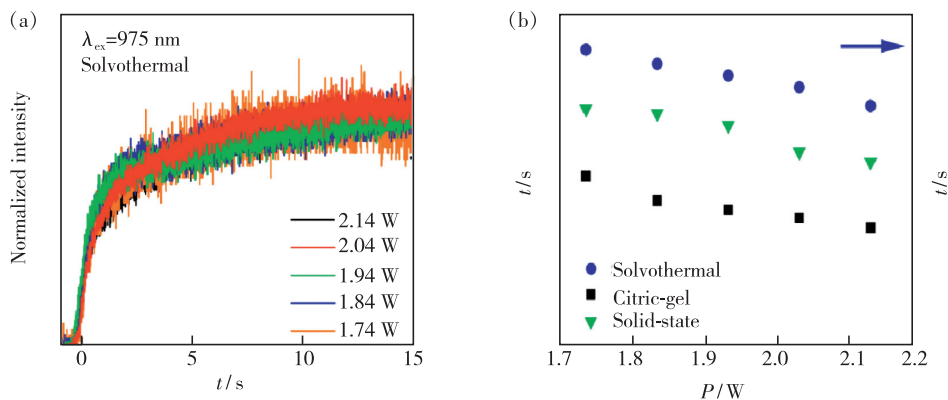


图 6 (a)不同激发功率的 975 nm 激光激发  $\text{Sr}_2\text{CeO}_4$  荧光粉的白光发光强度随时间的演化动力学曲线;(b)演化时间对激发功率的依赖性<sup>[36]</sup>。

Fig. 6 (a) The kinetics of laser induced white emission generated from  $\text{Sr}_2\text{CeO}_4$  phosphor obtained with various techniques recorded under 975 nm excitation line. (b) Dependence of the rise time on the excitation power<sup>[36]</sup>.

## 3.2 温度性能

全光谱宽带白光是一类具有温度效应的热辅助发光,其 II 型发射光谱是一种类似热辐射光谱特征的连续光谱,这类光谱可以通过普朗克定律很好地拟合。例如,Wang 等<sup>[17]</sup>对 980 nm 激光激发的  $\text{ZrO}_2:\text{Yb}^{3+}$  材料的连续白光发射光谱曲线根据普朗克定律进行拟合,证明了样品发光温度高达 2 400 K。因此,部分研究者将无机材料中这类发光的发光机理解释为黑体辐射发光<sup>[17,69-70]</sup>。除此之外,热雪崩发光也被用来解释全光谱连续白光发光现象<sup>[71-73]</sup>。热雪崩发光特征表现为当激发功率密度超过一定阈值时发光强度迅速上升,并且其发光强度对激发功率的对数依赖关系拟合斜率值往往大于 2(甚至大于 10)。这一发光机制最早被 Wang 等<sup>[72]</sup>用来解释连续激光激发各类稀土氧化物产生的宽带白光发光现象,当激光超过一定阈值时产生能量类似雪崩态的白光发

普通的光致发光现象另外的不同之处在于其在激光激发后光谱强度变化趋于稳定的时间跨度一般大于 1 s<sup>[36]</sup>。图 6 为  $\text{Sr}_2\text{CeO}_4$  在不同激发功率的 975 nm 激光激发下发光强度随时间的演化图,从图中可以看到激光激发后发光强度趋于稳定的时间大约为 5 s。同时,不同材料的光谱强度的演化时间不同,一般低热导率及高光吸收率的材料更有利于激发过程中材料的快速热积累,从而这类材料的光谱强度演化时间更短。也就是说,材料中激活离子的掺杂浓度、基质材料的元素组成以及激发密度等因素也可以影响全光谱宽带白光的光谱发光动力学过程。

光。也就是说,温度影响全光谱白光发光的同时也影响对其内在光物理机理的解释。因此,准确确定连续激光驱动材料的激光光斑焦点的温度将对全光谱宽带白光的研究具有重要意义。而激光焦点的光斑大小仅约为 1 mm × 1 mm,同时激光激发瞬间又伴随着由样品激发焦点中心到边缘的快速温度耗散,这对全光谱宽带白光发光过程中焦点温度的高精度测量带来一定难度。目前报道的连续激光驱动的宽带白光发光过程中激光光斑焦点温度的测量方式有三种:一是使用热像仪,通过接收被测样品辐射出的红外光而形成能量分布图来反映样品温度,比如 Fotric 227s 红外热像仪根据 8 ~ 14  $\mu\text{m}$  红外辐射自动捕获 0.1 mm × 0.1 mm 焦点的最高温度<sup>[74]</sup>;二是假设观测光谱来自于热辐射,利用普朗克黑体辐射定律拟合光谱曲线得到样品温度<sup>[17,34,67,75]</sup>;三是基于  $\text{Er}^{3+}$  离子的绿光发光比值法作为温度探针实时监测样品温



度<sup>[52,76]</sup>。但是,这三种测温方法得到的全光谱宽带白光发光焦点的温度有很大差别(几百摄氏度与几千摄氏度),对于这种全光谱白光发光过程中材料激光焦点温度的精确测量有待进一步研究。

### 3.3 光电性能

对于连续激光驱动无机材料产生的全光谱宽带白光发光过程,除了其特殊的光谱性能以及发光过程中的温度效应,这类白光发光过程还伴随着材料电阻以及光电流随激光激发功率的变化。通过对连续激光驱动过程中材料的光电导测试,研究者认为连续激光驱动全光谱白光发光与材料中多光子吸收过程有关,使得金属与配体间发生电荷转移<sup>[77-79]</sup>。例如,Strek 等<sup>[80]</sup>发现 976 nm 激光激发  $\text{LiYbP}_4\text{O}_{12}$  纳米晶产生宽带白光发光的过程伴随电子的转移,他们认为该发光过程中存在从  $\text{O}^{2-}$  到  $\text{Yb}^{3+}$  的电子转移,从而形成了  $\text{Yb}^{3+}-\text{Yb}^{2+}$  对,使得电荷迁移带被激发,并将这一发光过程解释为电荷迁移发光。对于连续激光驱动的全光谱白光的具体发光机理有待研究者进一步研究。

## 4 无机材料体系全光谱连续白光的潜在应用

全光谱连续白光因其特殊的发光性能受到不同领域研究者的关注,并且其在固态照明、光伏系统、光学测温等领域都具有潜在待开发的应用价值。激光照明具有高亮度及高方向性,已成为现在的研究热点。透明陶瓷材料化学性能稳定,具有优异的光学性能,在激光照明领域表现出一定的应用价值。Chaika 等<sup>[9,46-47]</sup>证明将  $\text{Cr}^{3+}$  和  $\text{Yb}^{3+}$  等离子掺杂到  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  透明陶瓷材料中可产生宽带连续白光发光。因此,连续激光驱动透明陶瓷材料有望在白光激光照明领域发挥其潜在的价值。同时,结合这一连续白光的特殊发光性能,这类材料实现的激光照明又具有明显的潜在优势:激发功率密度依赖的色温可调白光光源;通过发光介质反射率和发射率实现波长调制白光发射光谱等。除此之外,连续激光驱动宽带白光发光可以将不被太阳能电池吸收的红外光转换为可见光,其另外的潜在应用价值表现为有望提高商业光伏电池效率。Wang 等<sup>[17]</sup>将激光激发  $\text{ZrO}_2:\text{Yb}^{3+}$  材料产生的连续白光驱动太阳能电池,发现其光电转换效率高达 90%。此外,连续激光驱动

产生的全光谱连续白光具有明显的温度效应,通过普朗克定律拟合其发射光谱可以确定其辐射温度,研究者将这类发光的这一特性应用于高温光学测温。例如,Debasu 等<sup>[51]</sup>将  $(\text{Gd},\text{Yb},\text{Er})_2\text{O}_3$  纳米颗粒与 Au 纳米颗粒覆合,基于  $\text{Er}^{3+}$  的光学温度传感效应及连续白光的高温黑体辐射发光特性实现了 2 000 K 以下温度的光学测温。全光谱连续白光的更多潜在应用价值还有待研究者进一步开发。

## 5 总结与展望

本文对连续激光驱动的全光谱白光无机材料体系进行了分类汇总并对其光物理过程进行了总结分析。产生全光谱白光的无机材料体系可以具体分为激活离子掺杂材料和无激活离子掺杂材料,激活离子掺杂材料又具体包括稀土或过渡金属离子掺杂材料以及金属纳米颗粒-氧化物复合纳米晶体,无激活离子掺杂材料又包括纳米无机氧化物材料、碳基材料及半导体材料。总的来说,连续激光驱动的全光谱宽带白光不局限于某种氧化物基质,而是只要材料可有效吸收激发光即可产生强烈的宽带白光,并且这种发光过程伴随明显的温度效应及光电效应,同时具有高熔点低热导的无机材料可以产生更强的白光发光。但是,研究者对不同体系材料中的相似光物理过程还没有给出统一解释,其内在光与物质相互作用机制还有待进一步研究。

目前来看,对连续激光驱动的全光谱白光的研究还有很大的空间值得深入探索:首先是对这一现象的内在物理机制的深入研究将有助于更好地控制全光谱连续白光的产生;其次是寻找更高效的全光谱宽带连续白光发光材料,从而扩展其发展空间;最终将高效白光发光材料与先进的材料结构调控技术相结合,有望实现光谱的选择性调控,进而开拓这一发光在精密光谱学等领域的应用。我们期待对连续激光驱动的全光谱连续白光的更充分理解和掌握,使其在越来越多的研究领域发挥作用并带来重大突破,最终开拓出全光谱白光更深层次的应用。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:  
<http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20210348>.

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] PLANCK M. On the law of distribution of energy in the normal spectrum [J]. *Ann. Phys.*, 1901,4:533-1-6.
- [ 2 ] CENTINI M, BENEDETTI A, LARCIPRETE M C, *et al.* Midinfrared thermal emission properties of finite arrays of gold dipole nanoantennas [J]. *Phys. Rev. B*, 2015,92(20):205411-1-9.
- [ 3 ] PETEV M, WESTERBERG N, MOSS D, *et al.* Blackbody emission from light interacting with an effective moving dispersive medium [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2013,111(4):043902-1-5.
- [ 4 ] 符义兵, 何锦华, 梁超, 等. 全光谱照明 LED 中的蓝绿色荧光粉研究 [J]. *发光学报*, 2018,39(9):1220-1224.  
FU Y B, HE J H, LIANG C, *et al.* Blue-green phosphors in full spectrum lighting LEDs [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2018,39(9):1220-1224. (in Chinese)
- [ 5 ] 袁金阳, 陈磊, 王新中, 等. 全光谱 LED 技术研究进展 [J]. *发光学报*, 2020,41(2):199-207.  
QIU J Y, CHEN L, WANG X Z, *et al.* Research progress of full spectrum LED [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020,41(2):199-207. (in Chinese)
- [ 6 ] WU C F, QIN W P, QIN G S, *et al.* Near-infrared-to-visible photon upconversion in Mo-doped rutile titania [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2002,366(3-4):205-210.
- [ 7 ] STEFANSKI M, LUKASZEWICZ M, HRENIK D, *et al.* Broadband laser induced white emission observed from Nd<sup>3+</sup> doped Sr<sub>2</sub>CeO<sub>4</sub> nanocrystals [J]. *J. Lumin.*, 2017,192:243-249.
- [ 8 ] STREK W, OLESZKO M, WIEWIÓRSKI P, *et al.* Coherent white emission of graphene [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2020,116(17):171105-1-5.
- [ 9 ] LUKASZEWICZ M, STREK W. Co-occurrent white emission and photoconductivity in Yb<sup>3+</sup> doped YAG nanoceramics induced by infrared laser excitation [J]. *J. Lumin.*, 2018,199:251-257.
- [ 10 ] 吴长锋, 秦伟平, 秦冠仕, 等. TiO<sub>2</sub>:Mo 体系的光子雪崩上转换 [J]. *物理学报*, 2003,52(6):1540-1544.  
WU C F, QIN W P, QIN G S, *et al.* Photon avalanche upconversion in TiO<sub>2</sub>:Mo [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2003,52(6):1540-1544. (in Chinese)
- [ 11 ] COEN S, CHAU A H L, LEONHARDT R, *et al.* White-light supercontinuum generation with 60-ps pump pulses in a photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2001,26(17):1356-1358.
- [ 12 ] 夏李斌, 王林生, 杨东彪, 等. 白光 LED 用 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MO (M = Mg, Ca, Sr, Ba) 红光发射荧光玻璃的结构与发光性能 [J]. *发光学报*, 2017,38(4):415-422.  
XIA L B, WANG L S, YANG D B, *et al.* Structure analysis and optical properties of B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MO (M = Mg, Ca, Sr, Ba) red light glasses for white LED [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017,38(4):415-422. (in Chinese)
- [ 13 ] 王巍, 李一, 宁平凡, 等. 广色域钙钛矿量子点/荧光粉转换白光 LED [J]. *发光学报*, 2018,39(5):627-632.  
WANG W, LI Y, NING P F, *et al.* Perovskite quantum dot/powder phosphor converted white light LEDs with wide color gamut [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2018,39(5):627-632. (in Chinese)
- [ 14 ] 张伟杰, 魏钦华, 高唐, 等. 用于白光 LED 的 GGAG:Ce 复合荧光膜制备和性能 [J]. *发光学报*, 2021,42(4):478-485.  
ZHANG W J, WEI Q H, GAO T, *et al.* Preparation and properties of GGAG:Ce composite fluorescent film for white LED [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021,42(4):478-485. (in Chinese)
- [ 15 ] 张玉红, 何蕙羽, 刘航, 等. KLa(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>:Yb<sup>3+</sup>, Ho<sup>3+</sup>, Tm<sup>3+</sup> 白光荧光粉的制备及性能研究 [J]. *发光学报*, 2017,38(11):1469-1474.  
ZHANG Y H, HE H Y, LIU H, *et al.* Preparation and properties of KLa(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>:Yb<sup>3+</sup>, Ho<sup>3+</sup>, Tm<sup>3+</sup> white phosphors [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017,38(11):1469-1474. (in Chinese)
- [ 16 ] WU M D, GUAN G J, YAO B Q, *et al.* Upconversion luminescence of Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Ln<sup>3+</sup> nanorods for white emission and cellular imaging via surface charging and crystallinity control [J]. *ACS Appl. Nano Mater.*, 2019,2(3):1421-1430.
- [ 17 ] WANG J X, MING T, JIN Z, *et al.* Photon energy upconversion through thermal radiation with the power efficiency reaching 16% [J]. *Nat. Commun.*, 2014,5:5669-1-9.
- [ 18 ] MARCINIAK L, STREK W, HRENIK D, *et al.* Temperature of broadband anti-Stokes white emission in LiYbP<sub>4</sub>O<sub>12</sub>:Er nanocrystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2014,105(17):173113-1-4.

- [19] REDMOND S, RAND S C, RUAN X L, *et al.* Multiple scattering and nonlinear thermal emission of  $\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$ :  $\text{Y}_2\text{O}_3$  nanopowders [J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, 95(8):4069-4077.
- [20] RYABOCHKINA P A, KHRUSHCHALINA S A, YURLOV I A, *et al.* Blackbody emission from  $\text{CaF}_2$  and  $\text{ZrO}_2$  nanosized dielectric particles doped with  $\text{Er}^{3+}$  ions [J]. *RSC Adv.*, 2020, 10(44):26288-26297.
- [21] SINGH A K, SINGH S, KUMAR D, *et al.* Light-into-heat conversion in  $\text{La}_2\text{O}_3$ :  $\text{Er}^{3+}$ - $\text{Yb}^{3+}$  phosphor; an incandescent emission [J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(5):776-778.
- [22] STREK W, TOMALA R, MARCINIAK L, *et al.* Broadband anti-Stokes white emission of  $\text{Sr}_2\text{CeO}_4$  nanocrystals induced by laser irradiation [J]. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2016, 18(40):27921-27927.
- [23] CINKAYA H, ERYUREK G, DIBARTOLO B. White light emission based on both upconversion and thermal processes from  $\text{Nd}^{3+}$  doped yttrium silicate [J]. *Ceram. Int.*, 2018, 44(4):3541-3547.
- [24] ZHU Y S, HAI T, JI X X, *et al.* Highly effective upconversion broad-band luminescence and enhancement in  $\text{Dy}_2\text{O}_3/\text{Au}$  and  $\text{Sm}_2\text{O}_3/\text{Au}$  composites [J]. *J. Lumin.*, 2017, 181:352-359.
- [25] TODA Y, ISHIYAMA S, KHUTORIAN E, *et al.* Rattling of oxygen ions in a sub-nanometer-sized cage converts terahertz radiation to visible light [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(12):12358-12364.
- [26] STREK W, CICHY B, RADOSINSKI L, *et al.* Laser-induced white-light emission from graphene ceramics-opening a band gap in graphene [J]. *Light:Sci. Appl.*, 2015, 4(1):e237-1-8.
- [27] MIAO C, LIU T, ZHU Y S, *et al.* Super-intense white upconversion emission of  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  polycrystals and its application on luminescence converter of dye-sensitized solar cells [J]. *Opt. Lett.*, 2013, 38(17):3340-3343.
- [28] STREK W, MARCINIAK L, GLUCHOWSKI P, *et al.* Infrared laser stimulated broadband white emission of  $\text{Yb}^{3+}$ : YAG nanoceramics [J]. *Opt. Mater.*, 2013, 35(11):2013-2017.
- [29] ERDEM M, TABANLI S, ERYUREK G, *et al.* Crystalline phase effect on the up-conversion processes and white emission of  $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ :  $\text{Y}_2\text{Si}_2\text{O}_7$  nanocrystals [J]. *Dalton Trans.*, 2019, 48(19):6464-6472.
- [30] CINKAYA H, ERYUREK G, DI BARTOLO B. The anomalous luminescent behaviors of the  $\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  co-doped yttrium silicate at different physical conditions [J]. *Laser Phys.*, 2019, 29(6):065701-1-9.
- [31] ERDEM M, SITT B. Up conversion based white light emission from sol-gel derived  $\alpha$ - $\text{Y}_2\text{Si}_2\text{O}_7$  nanoparticles activated with  $\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$  ions [J]. *Opt. Mater.*, 2015, 46:260-264.
- [32] KHRUSHCHALINA S A, RYABOCHKINA P A, ZHARKOV M N, *et al.* Broadband emission from Er-contained yttrium orthophosphate and orthovanadate nanopowders excited by near infrared radiation [J]. *J. Lumin.*, 2019, 205:560-567.
- [33] KUNTI A K, GHOSH L, SHARMA S K, *et al.* Synthesis and luminescence mechanism of white light emitting  $\text{Eu}^{3+}$  doped  $\text{CaZnV}_2\text{O}_7$  phosphors [J]. *J. Lumin.*, 2019, 214:116530-1-7.
- [34] SOARES M R N, FERRO M, COSTA F M, *et al.* Upconversion luminescence and blackbody radiation in tetragonal YSZ co-doped with  $\text{Tm}^{3+}$  and  $\text{Yb}^{3+}$  [J]. *Nanoscale*, 2015, 7(45):19958-19969.
- [35] STEFANSKI M, LUKASZEWICZ M, HRENIAK D, *et al.* Laser induced white emission generated by infrared excitation from  $\text{Eu}^{3+}$ :  $\text{Sr}_2\text{CeO}_4$  nanocrystals [J]. *J. Chem. Phys.*, 2017, 146(10):104705-1-7.
- [36] STEFANSKI M, LUKASZEWICZ M, HRENIAK D, *et al.* Impact of the synthesis procedure on the spectroscopic properties of anti-Stokes white emission obtained from  $\text{Sr}_2\text{CeO}_4$  phosphor [J]. *J. Photoch. Photobio. A:Chem.*, 2019, 382:111855-1-7.
- [37] FILHO C I S, OLIVEIRA A L, PEREIRA S C F, *et al.* Bright thermal (blackbody) emission of visible light from  $\text{LnO}_2$  ( $\text{Ln} = \text{Pr}, \text{Tb}$ ), photoinduced by a NIR 980 nm laser [J]. *Dalton Trans.*, 2019, 48(8):2574-2581.
- [38] TABANLI S, ERYUREK G, DI BARTOLO B, *et al.* White light emission from  $\text{Er}_2\text{O}_3$  nano-powder excited by infrared radiation [J]. *Opt. Mater.*, 2017, 69:207-213.
- [39] CHAIKA M, TOMALA R, STREK W. Laser induced broadband Vis and NIR emission from  $\text{Yb}$ : YAG nanopowders [J]. *J. Alloys Compd.*, 2021, 865:158957-1-9.
- [40] STEFANSKI M, HRENIAK D, STREK W. Broadband white emission from  $\text{Yb}^{3+}$  doped  $\text{Sr}_2\text{CeO}_4$  nanocrystals [J]. *Opt. Mater.*, 2017, 65:95-98.
- [41] CAÑIBANO H, BOULON G, PALATELLA L, *et al.* Spectroscopic properties of new  $\text{Yb}^{3+}$  doped  $\text{K}_3\text{Bi}(\text{MoO}_4)_4$  crystals [J]. *J. Lumin.*, 2003, 102-103:318-326.

- [42] CAMPOS S, DENOYER A, JANDL S, *et al.* Spectroscopic studies of  $\text{Yb}^{3+}$ -doped rare earth orthosilicate crystals [J]. *J. Phys. : Condens. Matter*, 2004, 16(25):4579-4590.
- [43] WANG J W, HAO J H, TANNER P A. Persistent luminescence upconversion for  $\text{Er}_2\text{O}_3$  under 975 nm excitation in vacuum [J]. *J. Lumin.*, 2015, 164:116-122.
- [44] TOMALA R, GERASYMCHUK Y, HRENIAK D, *et al.* The influence of excitation density on laser induced white lighting of wide-band-gap semiconductor  $\text{ZnSe}:\text{Yb}$  polycrystallite ceramics [J]. *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, 2020, 9(1):016020-1-4.
- [45] CHAIKA M, TOMALA R, VOVK O, *et al.* Upconversion luminescence in  $\text{Cr}^{3+}:\text{YAG}$  single crystal under infrared excitation [J]. *J. Lumin.*, 2020, 226:117467-1-6.
- [46] CHAIKA M, TOMALA R, STREK W. Surface related laser induced white emission of  $\text{Cr}:\text{YAG}$  ceramic [J]. *Sci. Rep.*, 2021, 11(1):14063-1-6.
- [47] CHAIKA M A, TOMALA R, STREK W. Infrared laser stimulated broadband white emission of transparent  $\text{Cr}:\text{YAG}$  ceramics obtained by solid state reaction sintering [J]. *Opt. Mater.*, 2021, 111:110673-1-8.
- [48] XU W, MIN X L, CHEN X, *et al.*  $\text{Ag-SiO}_2\text{-Er}_2\text{O}_3$  nanocomposites: highly effective upconversion luminescence at high power excitation and high temperature [J]. *Sci. Rep.*, 2014, 4:5087-1-9.
- [49] LIU T, BAI X, MIAO C, *et al.*  $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{Au}$  upconversion nanocomposites with broad-band excitation for solar cells [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2014, 118(6):3258-3265.
- [50] CHEN X, XU W, ZHU Y S, *et al.*  $\text{Nd}_2\text{O}_3/\text{Au}$  nanocomposites: upconversion broadband emission and enhancement under near-infrared light excitation [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2014, 2(29):5857-5863.
- [51] DEBASU M L, ANANIAS D, PASTORIZA-SANTOS I, *et al.* All-in-one optical heater-thermometer nanoplatform operative from 300 to 2 000 K based on  $\text{Er}^{3+}$  emission and blackbody radiation [J]. *Adv. Mater.*, 2013, 25(35):4868-4874.
- [52] TOMALA R, HRENIAK D, STREK W. Laser induced broadband white emission of  $\text{Y}_2\text{Si}_2\text{O}_7$  nanocrystals [J]. *J. Rare Earths*, 2019, 37(11):1196-1199.
- [53] ZHU S Q, WANG C H, LI Z, *et al.* High-efficiency broadband anti-Stokes emission from  $\text{Yb}^{3+}$ -doped bulk crystals [J]. *Opt. Lett.*, 2016, 41(10):2141-2144.
- [54] CESARIA M, COLLINS J, DI BARTOLO B. On the efficient warm white-light emission from nano-sized  $\text{Y}_2\text{O}_3$  [J]. *J. Lumin.*, 2016, 169:574-580.
- [55] BILIR G, OZEN G, BETTINELLI M, *et al.* Broadband visible light emission from nominally undoped and  $\text{Cr}^{3+}$  doped garnet nanopowders [J]. *IEEE Photon. J.*, 2014, 6(4):2201211-1-10.
- [56] BILIR G, OZEN G, COLLINS J, *et al.* Unconventional production of bright white light emission by Nd-doped and nominally un-doped  $\text{Y}_2\text{O}_3$  nano-powders [J]. *IEEE Photon. J.*, 2014, 6(4):8200518-1-17.
- [57] BILIR G K, LIGUORI J. Laser diode induced white light emission of  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  nano-powders [J]. *J. Lumin.*, 2014, 153:350-355.
- [58] STREK W, TOMALA R, LUKASZEWICZ M, *et al.* Laser induced white lighting of graphene foam [J]. *Sci. Rep.*, 2017, 7:41281-1-9.
- [59] LIM Z H, LEE A, LIM K Y Y, *et al.* Systematic investigation of sustained laser-induced incandescence in carbon nanotubes [J]. *J. Appl. Phys.*, 2010, 107(6):064319-1-7.
- [60] LIM Z H, LEE A, ZHU Y W, *et al.* Sustained laser induced incandescence in carbon nanotubes for rapid localized heating [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 94(7):073106-1-3.
- [61] HUANG D, JIANG T, ZHANG Y, *et al.* Gate switching of ultrafast photoluminescence in graphene [J]. *Nano Lett.*, 2018, 18(12):7985-7990.
- [62] KIM Y D, GAO Y D, SHIUE R J, *et al.* Ultrafast graphene light emitters [J]. *Nano Lett.*, 2018, 18(2):934-940.
- [63] BOIKO V, TOMALA R, POSUDIEVSKY O, *et al.* Laser induced anti-Stokes emission from graphene nanoparticles infiltrated into opal based photonic structure [J]. *Opt. Mater.*, 2020, 101:109744-1-5.
- [64] STREK W, MISTA W, WIEWIORSKI P, *et al.* Laser induced hydrogen emission from ethanol with dispersed graphene particles [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2021, 775:138649.
- [65] STEFANSKI M, GŁUCHOWSKI P, STREK W. Laser induced emission spectra of gallium nitride nanoceramics [J].

- Ceram. Int.*, 2020, 46(18):29060-29066.
- [66] ZHENG W, SUN B Y, LI Y M, *et al.* Warm white broadband emission and tunable long lifetimes in  $\text{Yb}^{3+}$  doped  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  nanoparticles [J]. *Ceram. Int.*, 2020, 46(14):22900-22906.
- [67] GONZÁLEZ F, KHADKA R, LÓPEZ-JUÁREZ R, *et al.* Emission of white-light in cubic  $\text{Y}_4\text{Zr}_3\text{O}_{12}:\text{Yb}^{3+}$  induced by a continuous infrared laser [J]. *J. Lumin.*, 2018, 198:320-326.
- [68] RAKOV N, MACIEL G S. Broadband light emission induced by laser absorption and optimized by thermal injection in  $\text{Nd}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$  ceramic powder [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2020, 103(3):1782-1788.
- [69] ROURA P, COSTA J. Radiative thermal emission from silicon nanoparticles: a reversed story from quantum to classical theory [J]. *Eur. J. Phys.*, 2002, 23:191-203.
- [70] CHEN Z, JIA H, SHARAFUDEEN K, *et al.* Up-conversion luminescence from single vanadate through blackbody radiation harvesting broadband near-infrared photons for photovoltaic cells [J]. *J. Alloys Compd.*, 2016, 663:204-210.
- [71] MARCINIAK L, STREK W, BEDNARKIEWICZ A, *et al.*  $\text{LiLa}_{1-x}\text{Nd}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$  nanocrystalline powders [J]. *Opt. Mater.*, 2011, 33(10):1492-1494.
- [72] WANG J W, TANNER P A. Upconversion for white light generation by a single compound [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2010, 132(3):947-949.
- [73] ZHU Y S, CUI S B, LIU M, *et al.* Observation of upconversion white light and ultrabroad infrared emission in  $\text{YbAG}:\text{Ln}^{3+}$  ( $\text{Ln} = \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Tb}, \text{Er}$ ) [J]. *Appl. Phys. Express*, 2015, 8(7):072602-1-4.
- [74] WU J H, XU C, QIU J R, *et al.* Conversion of constant-wave near-infrared laser to continuum white light by Yb-doped oxides [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2018, 6(28):7520-7526.
- [75] CINKAYA H, ERYUREK G, BILIR G, *et al.* Effect of pressure and temperature on the white light produced by ytterbium (III) doped and undoped yttrium silicate nanopowders excited by a laser diode [J]. *J. Lumin.*, 2017, 181:321-326.
- [76] WU J H, SUN X Y, XIAO W G, *et al.* Understanding near infrared laser driven continuum white light emission by graphene and its mixture with an oxide phosphor [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2019, 7(20):1900899-1-8.
- [77] YAVETSKIY R P, DOBROTVORSKAYA M V, DOROSHENKO A G, *et al.* Fabrication and luminescent properties of  $(\text{Y}_{0.99}\text{Eu}_{0.01})_2\text{O}_3$  transparent nanostructured ceramics [J]. *Opt. Mater.*, 2018, 78:285-291.
- [78] STREK W, TOMALA R, LUKASZEWICZ M. Laser induced white lighting of tungsten filament [J]. *Opt. Mater.*, 2018, 78:335-338.
- [79] CHAIKA M A, DULINA N A, DOROSHENKO A G, *et al.* Influence of calcium concentration on formation of tetravalent chromium doped  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  ceramics [J]. *Ceram. Int.*, 2018, 44(12):13513-13519.
- [80] STREK W, MARCINIAK L, BEDNARKIEWICZ A, *et al.* White emission of lithium ytterbium tetraphosphate nanocrystals [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(15):14083-14092.



吴建红(1988 -),女,河北唐山人,博士,讲师,2020年于浙江大学获得博士学位,主要从事新型超宽带连续白光光功能材料与性能的研究。

E-mail: wujh6629@163.com



田跃(1985 -),男,安徽固镇人,博士,讲师,硕士生导师,2013年于大连海事大学获得博士学位,主要从事光电功能材料与性能的研究。

E-mail: tianyue@tyut.edu.cn