

文章编号: 1000-7032(2021)10-1646-07

光斑调控对激光荧光材料性能评价的影响

黑玲丽, 李淑星*, 程 璇*, 解荣军*

(厦门大学 材料学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 激光照明光源具有高功率密度、高亮度、长寿命等优点, 逐渐成为固态照明领域新的研究热点。激光光斑大小对正确评价激光荧光材料的光学性能具有十分重要的影响, 然而一直以来领域内缺乏对这一问题的深刻而系统认知。本文以 $Y_3Al_5O_{12}: Ce^{3+}-Al_2O_3$ (YAG: Ce- Al_2O_3) 荧光薄膜为例, 通过对蓝光激光激发荧光薄膜的光斑尺寸的调控, 系统研究了激光荧光材料的最大输出光通量、发光饱和阈值、色温、色坐标、光均匀性等光学性能随光斑面积的变化情况, 揭示了光斑大小对最大输出光通量、发光饱和阈值以及光均匀性的显著影响, 这将对规范激光荧光材料的性能评价提供指导性思路。

关键词: 激光照明; 激光荧光材料; 光斑调控; 光学性能

中图分类号: O482.31 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20210132

Effect of Laser Spot Regulation on Evaluation of Laser Phosphors

HEI Ling-li, LI Shu-xing*, CHENG Xuan*, XIE Rong-jun*

(College of Materials, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

* Corresponding Authors, E-mail: lishuxing@xmu.edu.cn; xcheng@xmu.edu.cn; rxjie@xmu.edu.cn

Abstract: The newly-emerging laser lighting technology shows great advantages of high brightness, high luminous flux and long lifetime, which therefore attracts more attention for use in high-beam headlamps, cinema projectors and endoscopy. In this technology, the size of laser spots has a large effect on the proper evaluation of laser phosphors, but it is usually neglected and lack of deep investigations. In this paper, we conducted a survey on the influence of the spot size on the maximum output luminous flux, luminous saturation threshold, color temperature, color coordinates, and light uniformity of $Y_3Al_5O_{12}: Ce^{3+}-Al_2O_3$ (YAG: Ce- Al_2O_3) phosphor films for laser lighting. It reveals that the laser spot size does have a vital effect on optical properties of laser phosphors, and needs to be carefully considered. This work provides a general guideline for standardizing the performance evaluation of laser phosphors.

Key words: laser lighting; laser phosphor; laser spot regulation; optical performance

1 引 言

随着人们对更大功率、更高亮度、更高品质光源日益增长的需求, 固态照明光源正朝着高功率

密度和高亮度的方向发展^[1-2]。发光二极管(LED)在高功率密度下的效率滚降导致其难以实现高亮度发光, 而激光二极管(LD)却不存在效率滚降的问题^[3]。相比较而言, 基于蓝光激光激发

收稿日期: 2021-04-13; 修订日期: 2021-04-28

基金项目: 国家自然科学基金委员会重点项目(51832005); 国家自然科学基金委员会联合基金项目(U2005213)资助
Supported by National Natural Science Foundation of China(51832005, U2005213)

荧光材料的激光照明技术可以获得亮度高、准直性好、光衰低的白光^[4-6], 在高亮度照明(如汽车大灯、军民两用探照灯和搜索灯)和超大型显示(如巨幕电影、大尺寸电视和投影仪、大型拼接墙)等应用领域优势明显^[7-11]。

实现激光照明技术的关键在于设计耐高功率密度激光激发且光学性能优异的荧光材料, 即激光荧光材料^[12]。激光荧光材料主要包括荧光陶瓷和荧光薄膜两种材料形式。荧光陶瓷具有热导率高、微观结构易调控、光学性能优异等优点, 但其生产成本较高、制备工艺复杂^[13-17]。如经典的 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$ ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-YAG}:\text{Ce}$) 复合荧光陶瓷, 其可耐受蓝光激光的功率密度高达 50 W/mm^2 ^[16]。荧光薄膜是通过将高荧光粉含量的荧光玻璃薄膜烧结于高热导率的基板(如单晶、陶瓷、金属等)形成复合结构, 可以大幅提升玻璃薄膜耐激光辐照的性能^[18-21]。通过将 YAG:Ce 荧光玻璃薄膜烧结在镀有光子晶体的蓝宝石基板上获得的荧光薄膜, 可耐受的激光功率密度阈值高达 11.2 W/mm^2 , 输出光通量和光效分别为 $1\ 839\text{ lm}$ 和 210 lm/W , 实现了高光通量、高光效的白光光源^[20]。

为了提升光源的色彩饱和度, 研究者进一步研制了光谱中包含更多红光成分的新型激光荧光材料。如 $\text{La}_3\text{Si}_6\text{N}_{11}:\text{Ce}$ 荧光薄膜可以耐受的激光功率密度阈值为 12.91 W/mm^2 , 光通量和光效分别达到 $1\ 076\text{ lm}$ 和 166.05 lm/W , 显指可达 70 ^[21]; 基于固溶体策略设计制备的 $\text{Ca}_{1-x-y}\text{-Al}_{1-x-y}\text{-Li}_x\text{-Si}_{1+x+y}\text{O}_y\text{N}_{3-y}:\text{Ce}^{3+}$ (CALSON:Ce) 三元固溶体荧光粉, 其发射光谱峰位位于 580 nm , 半峰宽为 135 nm , 热稳定性大幅提升($200\text{ }^\circ\text{C}$ 时发光强度仅损失 9%), 其荧光玻璃薄膜可以耐受的激光功率密度阈值高达 17.8 W/mm^2 ^[22]。此外, 研究者还发现了新型 $\text{HP-CaSiN}_2:\text{Ce}^{3+}$ 红色荧光材料, 在 450 nm 蓝光激光激发下, 发射光谱峰位位于 610 nm , 半峰宽为 160 nm , 将其制备成荧光陶瓷并与色轮组合, 利用反射式激光测试装置测试其可耐受的蓝光激光功率密度达 10.89 W/mm^2 , 输出流明高达 $1\ 087\text{ lm}$, 优于商用 Eu^{2+} 激活红色荧光材料在激光激发下的光学性能^[23]。

除了荧光材料自身的光学性能, 荧光薄膜或荧光陶瓷的微观结构对光源的光效、亮度和准直性等都产生了直接的影响。如通过在 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$ (YAG:Ce) 荧光陶瓷里引入不同含量的气

孔作为散射因子, 当气孔含量为 15% 时, 光斑面积减小了 46% , 中心亮度增加了 1.56 倍^[24]。荧光薄膜或荧光陶瓷的微观结构直接影响入射蓝光激光与荧光材料相互作用之后的光斑面积, 进而影响白光光源的准直性、均匀性和亮度。目前, 国内外报道的诸多文献鲜有研究者关注光斑调控的问题, 但激光荧光材料进行光学性能评价时, 入射激光光斑的调控却是一个不容忽视的问题。忽视入射光光斑的调控无疑会导致激光与荧光材料相互作用后光源光束尺寸扩大, 无法发挥激光照明技术亮度高、准直性好的优势。为了阐明光斑调控对激光荧光材料性能评价和激光照明光源性能优化过程的作用, 本研究以 YAG:Ce- Al_2O_3 荧光薄膜为例, 通过改变 YAG:Ce- Al_2O_3 荧光薄膜在透射式测试中距透镜元件焦点的距离(文中距离透镜焦点的距离均为正离焦)进行光斑调控, 研究了不同光斑面积激发时荧光材料的光学性能, 揭示了光斑调控对激光荧光材料性能评价的影响, 为激光荧光材料的光斑调控提供了指导性思路。

2 YAG:Ce- Al_2O_3 荧光玻璃薄膜的光斑调控与光学性能

2.1 实验

2.1.1 样品制备

将 YAG:Ce 荧光粉、低熔点玻璃粉 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-CaO-TiO}_2$ 、纳米 Al_2O_3 和有机粘结剂充分混合均匀获得浆料; 利用刮涂法, 将浆料均匀刮涂在蓝宝石基底, 放置于 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 冷热台上使有机粘结剂固化; 随后在马弗炉中烧结使有机粘结剂挥发及荧光薄膜成型, 温度为 $650\text{ }^\circ\text{C}$, 保温时间为 10 min ; 之后随炉冷却, 制备得到 YAG:Ce- Al_2O_3 荧光薄膜。详细流程如图 1。

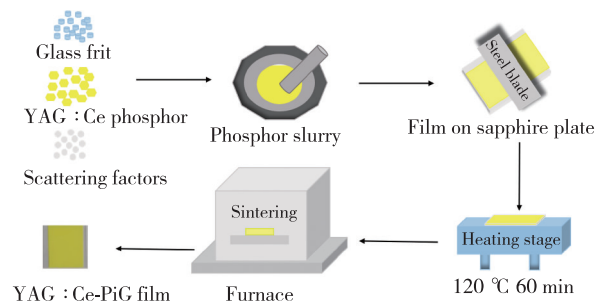


图 1 YAG:Ce- Al_2O_3 荧光玻璃薄膜制备流程

Fig. 1 Fabrication process of the phosphor-in-glass film (PiG) on sapphire plate

2.1.2 样品表征

采用课题组自主搭建的透射式测试装置表征 YAG: Ce-Al₂O₃ 荧光薄膜的光学性能。透射式激光测试系统包括蓝光激光器(功率 50 W, 发射波

长 445 nm)、积分球(直径 30 cm)、光纤光谱仪等。此外,采用成像亮度计和照度计等表征光源的亮度以及光源不同角度的色温和照度。透射式激光测试装置示意图如图 2 所示。

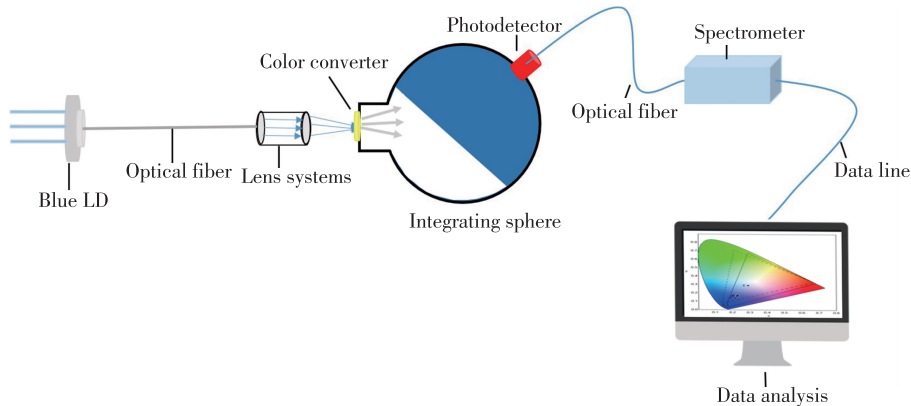


图 2 透射式激光测试装置

Fig. 2 Measurement setup for a transmission configuration

2.2 结果与讨论

2.2.1 光斑调控对光通量的影响

激光具有能量密度高和准直性好等优点。在激光测试装置中(图 2),为了充分发挥激光的上述优势,利用透镜元件对光路进行调控和聚焦。评价荧光材料在激光激发下的光学性能时,应将其放置在入射激光光斑面积最小处,即透镜焦点处。为了研究激光激发材料受激光激发的光斑面积对荧光材料输出光通量的影响,我们调控了 YAG: Ce-Al₂O₃ 荧光薄膜距透镜焦点的距离。同时,为了验证该研究的普适性,我们制备了不同 Al₂O₃ 添加量(10%, 20%, 30%)的 YAG: Ce-Al₂O₃ 荧光薄膜开展研究。图 3(a)~(b)为荧光薄膜处于透镜焦点时测得的光通量与光效,此时,荧光薄膜受蓝光激发的光斑面积最小。图 3(c)~(d)为荧光薄膜置于距透镜焦点 0.2 mm 处测得的光通量与光效,此时,荧光薄膜受蓝光激发的光斑面积增大为 0.74 (10%), 1.11 (20%), 0.92 mm² (30%)。结果表明,随着荧光薄膜受蓝光激发的光斑面积的增大,荧光材料的输出光通量、光效和耐受的最大激光功率密度阈值(饱和阈值)均增大。以 YAG: Ce-10% Al₂O₃ 荧光薄膜为例,当荧光薄膜受蓝光激发的光斑面积从 0.5 mm² 增大到 0.74 mm², 输出光通量从 935 lm 增大到 1 264.2 lm, 光效从 134.5 lm/W 增大到 139.8 lm/W(增幅较小), 饱和阈值从 13.9 W/mm² 增大到 18.08 W/mm²。显然,光斑调控对于荧光材料在激光激发下的光学性能(尤其是光通

量和饱和阈值)产生显著影响,从获得高亮度和高准直性光源的初衷出发,应确保荧光材料位于受蓝光激发的光斑面积最小处。

为了进一步研究荧光材料在透镜焦点不同距离时的各项光学性能指标,我们以 YAG: Ce-20% Al₂O₃ 荧光薄膜为例,将其分别置于透镜焦点处、距透镜焦点 0.2 mm 和 0.4 mm 处,相对应的光斑面积分别为 0.5, 1.11, 2.99 mm²。结果表明,样品与透镜焦点距离越远,光通量和饱和阈值越大,而光效值几乎保持不变。具体来说,从透镜焦点处(光斑面积 0.5 mm²)到距透镜焦点 0.4 mm(光斑面积 2.99 mm²)处,最大输出光通量从 926 lm 增大到 1 654.8 lm(增量为 728.8 lm);饱和阈值从 13.9 W/mm² 增大到 24.3 W/mm²(增量为 10.4 W/mm²);光效几乎保持不变,约为 133.2~136.1 lm/W,如图 4(a)~(b)。除了最大光通量和饱和阈值,发现光斑面积大小对其他光学参数(如色温、显色指数、色坐标)的影响也较小,具体如表 1 所示。随着光斑面积增大,参与光转换的荧光材料的面积增大,且入射激光能量密度的减小又会极大地缓解热量集中效应,进而增大最大输出光通量和饱和阈值。研究结果表明,评价荧光材料在激光激发下的光学性能时,光斑面积的调控将对最大输出光通量和饱和阈值的评价结果产生巨大影响。因此,研究中应高度重视光斑测量,并明确给出荧光材料受激光激发的光斑面积大小,这是正确评价激光荧光材料的关键所在。

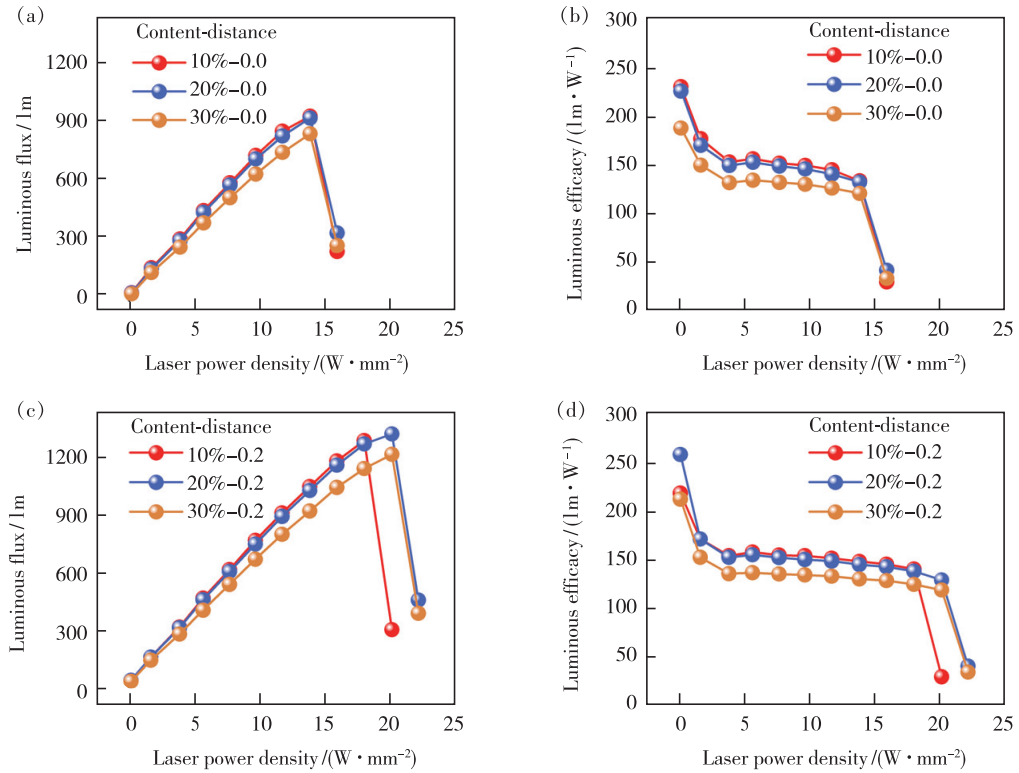


图 3 不同 Al₂O₃ 添加量(10% ,20% ,30%) 的 YAG: Ce-Al₂O₃ 荧光薄膜的光通量和光效。位于透镜焦点处的光通量(a)和光效(b);距离焦点 0.2 mm 处的光通量(c)和光效(d)。

Fig. 3 Luminous flux and luminous efficacy of YAG: Ce-Al₂O₃ phosphor-in-glass films with different concentration of Al₂O₃ additives. Luminous flux (a) and luminous efficacy (b) of phosphor film located at the focus of the lens. Luminous flux (c) and luminous efficacy (d) of phosphor film located 0.2 mm away from the focus of the lens.

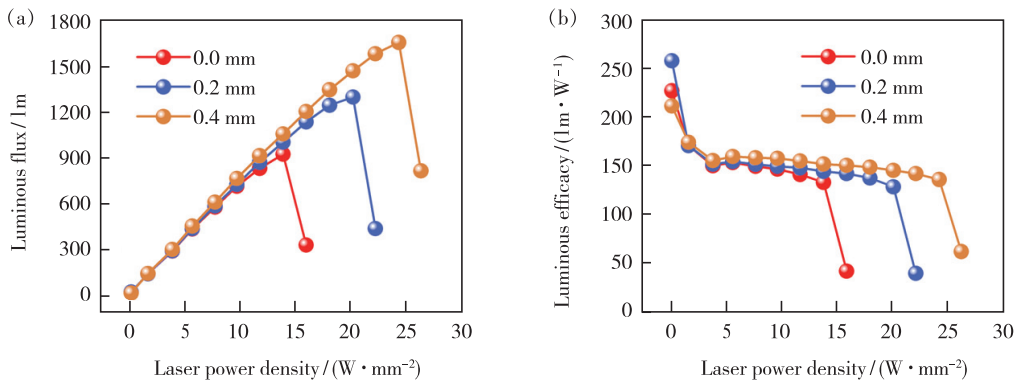


图 4 YAG: Ce-20% Al₂O₃ 荧光薄膜位于离透镜焦点不同距离时的光通量(a)和光效(b)

Fig. 4 Luminous flux (a) and luminous efficacy (b) of YAG: Ce-20% Al₂O₃ phosphor film located at different distances away from the focus of the lens

表 1 YAG: Ce-20% Al₂O₃ 荧光薄膜的各项光学性能参数(透射式激光测试装置结果)

Tab. 1 Optical properties of YAG: Ce-20% Al₂O₃ phosphor film (Results of measurement setup for a transmission configuration)

距透镜焦点的距离/ mm	光通量/ lm	光效/ (lm·W ⁻¹)	饱和阈值/ (W·mm ⁻²)	CCT/ K	CRI	(x, y)
0.0	926.0	133.2	13.9	7 219	71	(0.303 4, 0.314 6)
0.2	1 297.7	128.5	20.2	7 081	71	(0.305 1, 0.317 0)
0.4	1 654.8	136.1	24.3	7 408	72	(0.301 5, 0.311 0)

2.2.2 光斑调控对亮度的影响

我们利用亮度计研究了距透镜焦点不同距离处, 荧光材料的亮度和光斑大小。固定入射蓝光功率为 0.015 W, 如图 5, 随着 YAG: Ce-20% Al₂O₃ 荧光薄膜距透镜焦点处距离增大, 荧光薄膜中心的最大亮度逐渐减小, 荧光薄膜的光斑面积逐渐增大。为了估算真实的光斑面积, 我们对亮度曲线进行归一化, 定义直线 1/e² 与归一化的亮度曲线两端交

点的横坐标之差即为光斑直径大小。随着荧光薄膜与焦点的距离从 0 增大到 0.4 mm, 光斑直径从 0.792 mm 增大到 1.95 mm, 相应地, 光斑面积从 0.49 mm² 增大到 2.99 mm²。光斑面积的扩大会导致光源中心的亮度大幅降低和准直性下降, 显然, 这与激光照明获得超高亮度和高准直性光源的初衷是相悖的。因此, 为了获得高亮度和高准直性光源, 必须保证足够小的激光光斑面积。

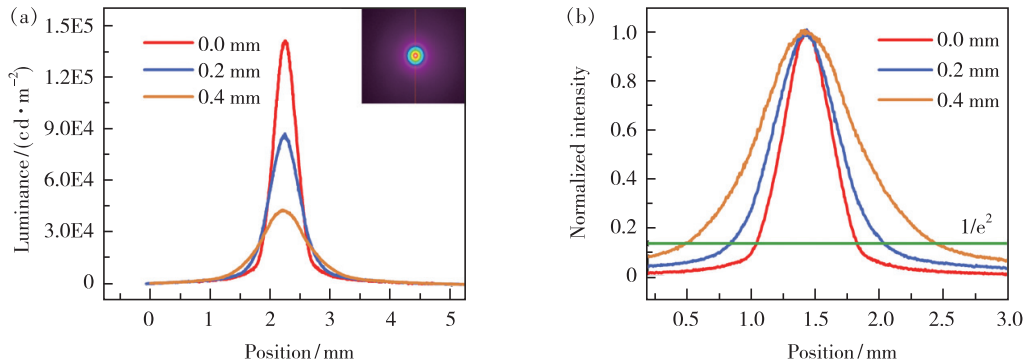


图 5 YAG: Ce-20% Al₂O₃ 荧光薄膜与透镜焦点不同距离的亮度曲线 (a) 以及亮度归一化曲线 (b)

Fig. 5 Luminance of the YAG: Ce-20% Al₂O₃ phosphor film located at different distances away from the focus of lens. (a) Luminance curves. (b) Normalized luminance curves.

2.2.3 光斑调控对光均匀性的影响

进一步地, 我们研究了距透镜焦点的距离对光均匀性的影响, 分别利用不同角度的色温均匀性和照度均匀性来评价白光光源的均匀性。首先, 我们通过计算不同角度色温的标准偏差来表征色温的均匀性, 色温标准偏差为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}, \quad (1)$$

其中 x_i 表示不同角度色温, \bar{x} 表示平均色温。如图 6(a) 和表 2, 随着 YAG: Ce-20% Al₂O₃ 荧光薄膜距透镜焦点的距离增大, 不同角度的色温标准偏差 σ 增大, 且最大色温和最小色温之间的差值也不断增大, 表明色温均匀性变差。另一方面, 我们对不同角度的照度进行了测量, 结果表明, 随着距离的增大, 余弦照度曲线非常接近, 照度值几乎无变化, 即照度均匀性几乎不变。

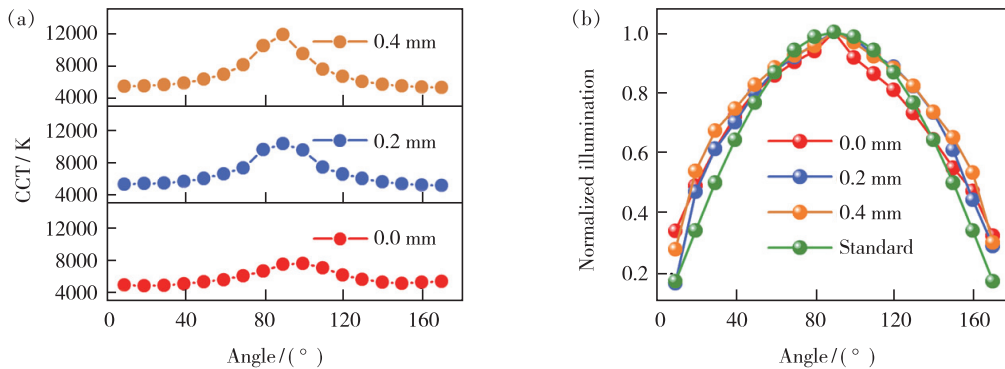


图 6 YAG: Ce-20% Al₂O₃ 荧光薄膜距透镜焦点不同距离时的色温和照度评价。(a) 不同角度的色温; (b) 不同角度的照度。

Fig. 6 Color temperature and illuminance of different angles of YAG: Ce-20% Al₂O₃ phosphor-in-glass films at different distances from the focus of lens element. (a) Color temperature at different angles. (b) Illuminance at different angles.

表 2 YAG:Ce-20%Al₂O₃ 荧光薄膜距透镜焦点不同距离的色温分布情况(照度计测试结果)

Tab.2 Color temperature of YAG:Ce-20%Al₂O₃ phosphor films at different distances(Results of illuminometer)

Distance/mm	Max/K	Min/K	Ave/K	σ
0.0	8 008	4 772	6 910	1 009.8
0.2	10 660	5 433	7 622	1 644.9
0.4	12 077	5 369	7 806	1 931.3

本文研究表明,光斑调控对激光荧光材料的光学性能评价有巨大影响。光斑面积增大,输出光通量和饱和阈值远远高于实际值,且光源中心亮度降低,色温均匀性变差。显然,光斑调控是激光荧光材料性能评价的关键环节,也是获得高亮度光源的核心所在。

3 总结与展望

综上所述,光斑调控对激光荧光材料光学性能评价有显著影响。激光荧光材料受蓝光激发的光斑面积越大,输出光通量和饱和阈值越大,光源中心亮度越暗,色温均匀性也越差。这与激光照明获得高亮度光源的初衷是相悖的。通过光斑调控来减小光

斑面积,是获得高光学品质光源的关键。研究中应高度重视激光荧光材料的光斑测量,并明确给出荧光材料受激光激发的光斑面积大小,这也是正确评价激光荧光材料光学性能的关键所在。目前国内国外激光荧光材料的文献报道中,光通量、饱和阈值及光效等光学性能参数值偏高。从本文的研究可知,荧光材料受蓝光激发光斑面积大小不仅影响激光荧光材料光源的准直性和亮度,还会影响激光荧光材料光学性能的真实评价,但鲜有文献对光斑的调控以及光斑面积大小进行详细说明,造成了激光荧光材料的光学性能评价参数值虚高的现象。本文对光斑调控的研究为规范激光荧光材料的光学性能评价提供了指导性思路。激光照明领域的光学性能评价存在光斑调控的问题,还存在只在研究白光显色指数、但未给出色坐标或者色坐标偏离白光等其他问题。激光照明领域的光学性能评价对于激光照明技术的发展起着至关重要的作用,因此规范激光荧光材料的光学性能评价势在必行。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20210132>.

参 考 文 献:

- [1] SCHUBERT E F, KIM J K. Solid-state light sources getting smart [J]. *Science*, 2005, 308(5726):1274-1278.
- [2] PUST P, SCHMIDT P J, SCHNICK W. A revolution in lighting [J]. *Nat. Mater.*, 2015, 14(5):454-458.
- [3] WIERER JR 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.
- [4] PIMPUTKAR S, SPECK J S, DENBAARS S P, et al. Prospects for LED lighting [J]. *Nat. Photon.*, 2009, 3(4):180-182.
- [5] STEIGERWALD D A, BHAT J C, COLLINS D, et al. Illumination with solid state lighting technology [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2002, 8(2):310-320.
- [6] HUMPHREYS C J. Solid-state lighting [J]. *MRS Bull.*, 2008, 33(4):459-470.
- [7] SONG Y H, JI E K, JEONG B W, et al. High power laser-driven ceramic phosphor plate for outstanding efficient white light conversion in application of automotive lighting [J]. *Sci. Rep.*, 2016, 6(1):31206-1-7.
- [8] ABU-AGEEL N, ASLAM D. Laser-driven visible solid-state light source for etendue-limited applications [J]. *J. Disp. Technol.*, 2014, 10(8):700-703.
- [9] 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):1800173-1-29.
- [10] RONDA C R, JÜSTEL T, NIKOL H. Rare earth phosphors: fundamentals and applications [J]. *J. Alloys Compd.*, 1998, 275-277:669-676.
- [11] RAUKAS M, KELSO J, ZHENG Y, et al. Ceramic phosphors for light conversion in LEDs [J]. *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, 2013, 2(2):R3168-R3176.
- [12] 余宪恩. 实用发光材料与光致发光机理 [M]. 北京:中国轻工业出版社, 1997.

- YU X E. *Applied Luminescent Materials and Mechanism of Photoluminescence* [M]. Beijing: China Light Industry Press, 1997. (in Chinese)
- [13] LENEFF A, KELSO J, TCHOUL M, *et al.* Laser-activated remote phosphor conversion with ceramic phosphors [C]. *Proceedings of SPIE 9190, Thirteenth International Conference on Solid State Lighting, San Diego*, 2014: 91900C.
- [14] JOSHI B, KSHETRI Y K, GYAWALI G, *et al.* Transparent Mg- α/β -Sialon: Eu²⁺ ceramics as a yellow phosphor for pc-WLED [J]. *J. Alloys Compd.*, 2015, 631: 38-45.
- [15] JI E K, SONG Y H, BAK M K, *et al.* The design of a ceramic phosphor plate with functional materials for application in high power LEDs [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2015, 3(48): 12390-12393.
- [16] LI S X, ZHU Q Q, TANG D M, *et al.* Al₂O₃-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.
- [17] YAO Q, HU P, SUN P, *et al.* YAG: Ce³⁺ transparent ceramic phosphors brighten the next-generation laser-driven lighting [J]. *Adv. Mater.*, 2020, 32(19): 1907888-1-7.
- [18] YOSHIMURA K, ANNEN K, FUKUNAGA H, *et al.* Optical properties of solid-state laser lighting devices using SiAlON phosphor-glass composite films as wavelength converters [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2016, 55(4): 042102-1-5.
- [19] 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.
- [20] ZHENG P, LI S X, WANG L, *et al.* Unique color converter architecture enabling phosphor-in-glass (PiG) films suitable for high-power and high-luminance laser-driven white lighting [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, 10(17): 14930-14940.
- [21] YOU S H, LI S X, ZHENG P, *et al.* A thermally robust La₃Si₆N₁₁: Ce-in-glass film for high-brightness blue-laser-driven solid state lighting [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2019, 13(2): 1800216-1-10.
- [22] YOU S H, LI S X, WANG L, *et al.* Ternary solid solution phosphors Ca_{1-x-y}Li_xAl_{1-x-y}Si_{1+x+y}N_{3-y}O_y: Ce³⁺ with enhanced thermal stability for high-power laser lighting [J]. *Chem. Eng. J.*, 2021, 404: 126575.
- [23] XIA Y H, LI S X, ZHANG Y X, *et al.* Discovery of a Ce³⁺-activated red nitride phosphor for high-brightness solid-state lighting [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2020, 8(41): 14402-14408.
- [24] ZHENG P, LI S X, WEI R, *et al.* Unique design strategy for laser-driven color converters enabling superhigh-luminance and high-directionality white light [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2019, 13(10): 1900147-1-10.



黑玲丽(1995 -),女,湖北十堰人,硕士研究生,2018年于湖北大学获得学士学位,主要从事激光荧光材料光均匀性的研究。

E-mail: 1145031910@qq.com



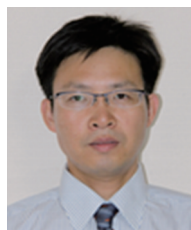
程璇(1963 -),女,福建长汀人,博士,教授,1993年于美国明尼苏达大学获得博士学位,主要从事低温燃料电池(质子交换膜和直接甲醇燃料电池)关键部件膜电极组件(催化剂和质子交换膜)、电池性能和寿命、新型锂离子电池电极材料、二氧化硅气凝胶多孔结构和表面修饰以及功能复合材料、薄膜材料和工程结构的原位腐蚀监测等方面的研究。

E-mail: xcheng@xmu.edu.cn



李淑星(1990 -),女,河南平顶山人,博士,讲师,2017年于中国科学院上海硅酸盐研究所获得博士学位,主要从事新型发光材料的研制与器件开发、大功率激光激发下荧光材料的机理研究、设计制备与产业化应用。

E-mail: lishuxing@xmu.edu.cn



解荣军(1969 -),男,江苏镇江人,博士,教授,1998年于中国科学院上海硅酸盐研究所获得博士学位,主要从事稀土发光材料、量子点和发光器件的研究。

E-mail: rxjie@xmu.edu.cn