

文章编号: 1005-5630(2022)03-0062-06

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2022.03.009

# 荧光粉浓度和温度对激光混合荧光投影光源发光特性的影响

张弛良<sup>1</sup>, 张大伟<sup>1,2,3</sup>, 韩朝霞<sup>1,2,3</sup>

- (1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;
2. 上海理工大学 光学仪器与系统工程研究中心, 上海 200093;
3. 上海理工大学 上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093)

**摘要:** 光源是投影显示系统的核心组成部件。激光投影光源具有亮度高、寿命长和色域广等特点, 但存在成本较高和散斑现象的问题。将激光结合激发荧光作为投影机光源, 可以有效降低成本并解决散斑问题。通过将钇铝石榴石 (YAG) 荧光粉和激光单元结合制成混合光源, 研究了不同荧光粉质量分数及工作温度对混合光源发光特性的影响。实验结果表明, 光源的亮度和色度坐标值均随着荧光粉质量分数的增大而提高, 而荧光粉的转化效率随着工作温度的升高而降低。研究结果验证了激光-荧光混合作为投影机用光源的可行性, 不仅降低了整机的制造成本, 解决了激光光源存在的散斑问题, 而且降低了对光源光学元件加工的精度要求, 提升了量产的制成能力。

**关键词:** 投影显示; 激光光源; 荧光; 发光特性  
**中图分类号:** O 482.31 **文献标志码:** A

## Influence of phosphor concentration and operating temperature on hybrid light source characteristics

ZHANG Chiliang<sup>1</sup>, ZHANG Dawei<sup>1,2,3</sup>, HAN Zhaoxia<sup>1,2,3</sup>

- (1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Engineering Research Center of Optical Instruments and Systems (MOE), University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
3. Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Light source is the core component of projector display system. Laser light source has the characteristics of high brightness and long life, but it has the problems of high cost and speckle phenomenon. Combining laser with excited fluorescence as projector light source can effectively solve the problems. In this paper, the YAG phosphor and laser unit are combined into a hybrid light

收稿日期: 2021-12-03

作者简介: 张弛良 (1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为光电材料与器件。E-mail: elroszhang@126.com

通信作者: 张大伟 (1977—), 男, 教授, 研究方向为光学薄膜、微流控、特种光栅以及纳米技术。  
E-mail: usstoe@vip.163.com

source. The influence of phosphor concentration and operation temperature on the luminous characteristics of the hybrid light source was investigated. The experimental results show that the brightness and chromaticity of the hybrid light source increase with the increase of the phosphor concentration, and the conversion efficiency of phosphor decreases with the increase of working temperature. The research results verify the feasibility of the laser-fluorescence hybrid light source for the projector, which not only reduces the manufacturing cost of the whole machine and solves the speckle problem of the laser light source, but also reduces the precision requirements of the optical components and improves the success rate of mass production.

**Keywords:** projection display; laser light source; fluorescence; luminous characteristics

## 引言

光源是投影显示系统的核心组成部件, 光源技术的发展直接决定了投影机的发展和更新<sup>[1]</sup>。评价投影光源主要分析几个方面: 光亮度、发光光谱曲线、照明均匀性、发光效率、发光色度、颜色均匀性、快速点亮特性、发光点大小和光源寿命等<sup>[2-3]</sup>。传统的卤素灯发光效率低且寿命短<sup>[4]</sup>, 超高压汞灯的色域不如激光光源广<sup>[5]</sup>, LED灯虽然体积小寿命长但目前发光效率还是不够高<sup>[6]</sup>, 相比之下, 激光光源亮度高、寿命长, 同时受益于其单色性好的特点, 通过红、绿、蓝三色激光的配比可以获得最真实、最丰富、最鲜艳的色彩<sup>[7]</sup>。然而激光光源也有自身的不足: 首先, 由于激光的高相干性, 使得显示图像中会出现较为严重的散斑现象<sup>[8-9]</sup>; 其次, 激光能量较高导致安全性存在隐患; 最后, 红、绿激光器价格高昂尚不能被市场接受, 并不适合产业化。因此, 在投影显示领域中激光光源的优越性还没有得到最大化的体现<sup>[10-11]</sup>。

实际上, 各种光源技术都存在其各自的发展瓶颈和适用领域, 因此结合不同技术的混合光源逐渐成为未来光源的一大发展方向<sup>[12-17]</sup>。1996年采用荧光粉的白光LED诞生。2005年日本日亚化学工业株式会社公布了世界上第一款基于激光轰击荧光粉的激光光源。2013年德国宝马公司在上海车展上推出一款激光车灯也使用到了用于转换激光的荧光粉。将激光结合激发荧光作为投影机光源, 既可以大大降低成本, 又解决了因激光干涉引起的散斑问题。考虑到实际投产

和应用的可行性, 红、绿激光器的成本和安全性问题仍然不适合产业化, 本文选用黄色荧光粉和蓝色激光单元结合制成混合光源, 研究了荧光粉不同质量分数对混合光源发光特性的影响, 分析不同质量分数和质量下光源亮度和色度坐标值的变化, 并研究了工作温度对混合光源特性的影响。研究结果验证了激光-荧光混合作为投影机用光源的可行性, 有望促进激光投影技术的进一步发展和产业化。

## 1 混合光源的设计

本文设计了用于投影显示的激发荧光结合激光混合光源, 其结构和原理示意图如图1所示。激光模组发出的蓝色激光经过两次凹面镜反射后汇聚在蓝宝石基片上, 通过在蓝宝石基片上镀制分光膜, 蓝色激光对蓝色光谱直接透射, 对黄色光谱反射, 再在上面印刷一层钇铝石榴石(YAG)黄色荧光粉, 使得蓝色激光穿过荧光色轮时激发YAG荧光粉产生黄色的荧光。黄色荧光被分光膜反射向后续照明系统方向传输, 与直接透过荧光色轮的蓝色激光混合配比得到白光。获得的白光经两块凸透镜汇聚成平行光投射。

混合光源的设计选用的荧光发光材料为YAG黄色荧光粉(日亚化学工业株式会社), 如图2(a)所示, 其激发波长为450 nm, 发光色度坐标 $y$ 值为 $0.551 \pm 0.002$ , 荧光粉的平均颗粒大小为 $(22 \pm 3) \mu\text{m}$ 。

为印刷荧光涂层, 首先将荧光粉和配套的粘合剂(日亚化学工业株式会社)混合并搅拌均匀。在实际印刷过程中, 若荧光粉浓度过高, 会

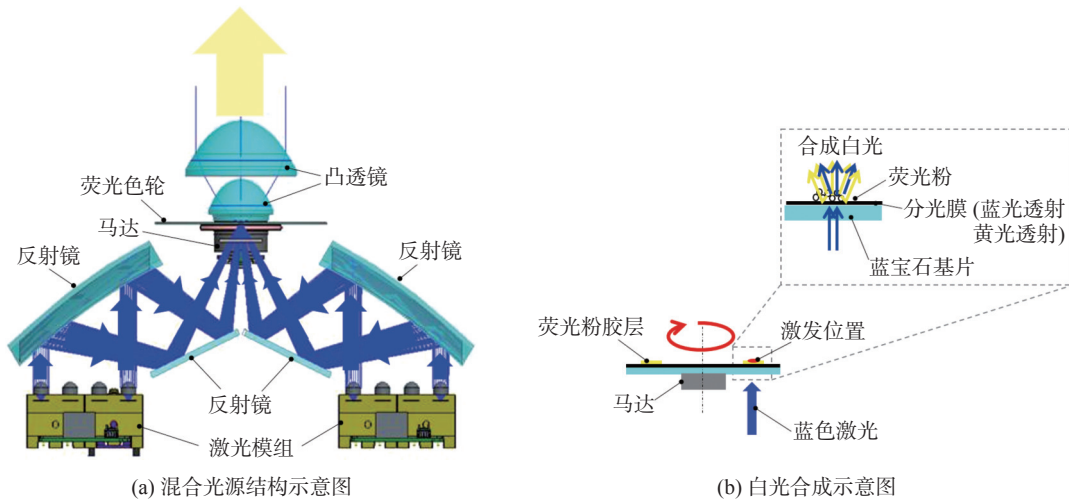


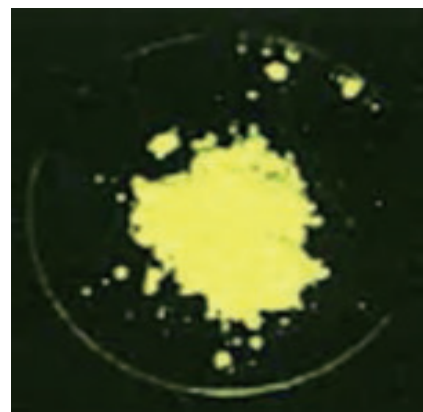
图 1 混合光源结构和原理示意图

Fig. 1 Structure and principle of hybrid light source

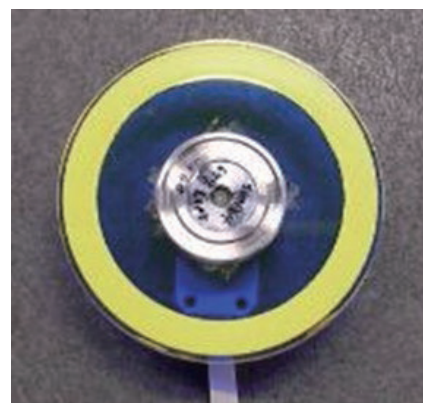
导致胶体溶液过于粘稠，丝网印刷机难以印刷；若荧光粉浓度过低，导致胶体溶液过于稀薄，丝网印刷机需要更大的印刷压力来压制成型，影响印刷网板的使用寿命。综合考虑实际生产的可行性，通过控制添加荧光粉的质量，制备了质量分数分别为 71%、72%、73%、75% 和 78% 的荧光粉胶体。不同质量分数的荧光粉胶体，通过丝网印刷机分别印制在蓝宝石基片上，然后烘烤固化制成荧光色轮，如图 2(b) 所示。测定蓝宝石基片印制荧光粉胶体前后的质量差异，从而得到荧光粉胶层成型后的质量。

将制备好的荧光色轮安置在投射台上，点亮激光单元进行投射。激光单元为蓝色激光模组（日亚化学工业株式会社），输出的标准功率为 31.5 W，峰值波长为 455 nm。荧光色轮和激光单元共同工作，激发荧光结合激光构成混合光源。

对于投影机用的光源，光源的亮度和色度坐标是最为关键的技术指标。在投影机行业内，通常使用输出光通量来表征投影机的亮度，以便于客户理解。将照度计所读取到的照度值乘以标准 60 inch (1 inch=2.54 cm) 的投影面积尺寸，即可得到投影机的输出光通量，单位是 lm。当光源的实际生产过程较为稳定时，光源的色度坐标  $y$  值和色度坐标  $x$  值具有良好的线性相关性，而色度坐标  $y$  值的变化较  $x$  值更为明显，因此光源色度坐标的变化通过监控色度坐标  $y$  值来评价。光源测试系统示意图及搭建的实物图如图 3



(a) 荧光粉



(b) 荧光色轮样品

图 2 样品制备

Fig. 2 Sample preparation

所示，点亮激光模组，并在激光模组散热片两侧附加风扇进行冷却，使用照度计（柯尼卡美能达，CL-200A）测定混合光源的输出光通量和色

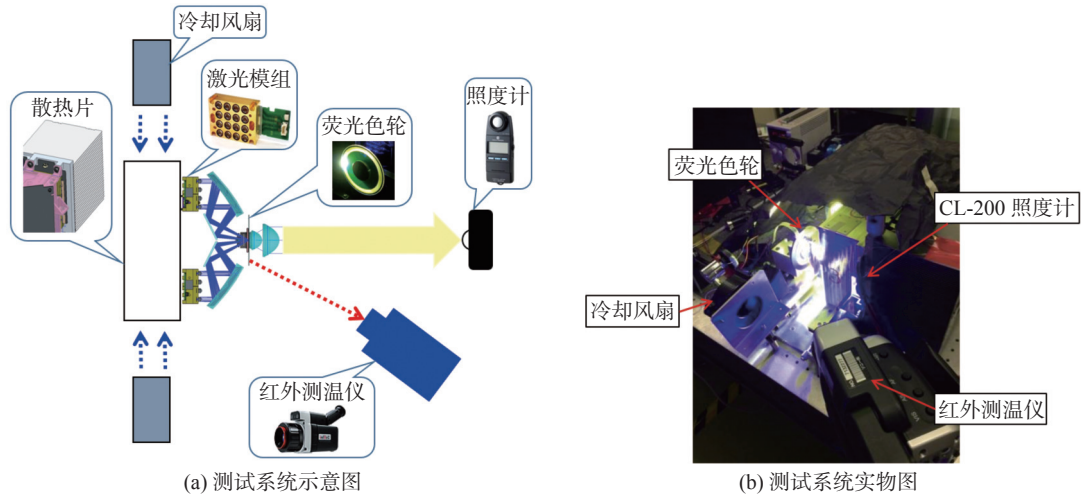


图3 光源测试系统

Fig. 3 The test system of light source performance

度坐标值, 待激光单元出射功率稳定后记录数据。

## 2 荧光粉质量分数对光源特性的影响

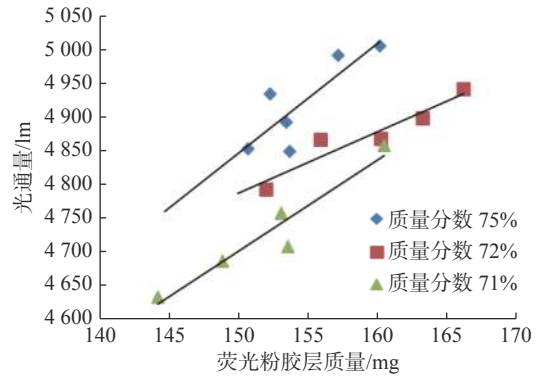
考虑到丝网印刷机的压力配置情况, 选取质量分数分别为 71%、72% 和 75% 的混合光源样品进行测试, 测得光源的亮度和色度坐标  $y$  值随质量分数变化的曲线如图 4 所示。

从图 4(a) 中可以看出, 光源亮度随荧光粉胶层质量的增加而提高, 且质量分数越高, 光源亮度的整体实力越高, 这是由于色轮上荧光粉胶层所含的荧光粉末越多, 蓝色激光激发产生的黄色荧光越强, 从而提高光源的整体亮度。由图 4(b) 可以看出, 光源的色度坐标  $y$  值和荧光粉胶层的质量也成正比关系<sup>[18]</sup>, 而且荧光粉的质量分数越高, 光源的色度坐标  $y$  值也越大。这是由于黄光的色度值本身高于蓝光, 随着荧光粉胶层含有的荧光粉末的总量的增加, 更多的蓝光被荧光粉吸收激发产生黄光, 使得最终得到的白色光源中黄光所占的比例相应增加。

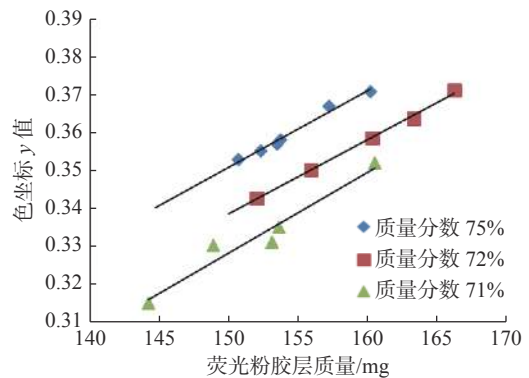
根据以上实验结果, 进一步测定了以相同胶层质量 160 mg 印刷的质量分数分别为 71%、72%、73%、75% 和 78% 的 5 种样品, 得到了混合光源的亮度和色度坐标  $y$  值与荧光粉质量分数间的关系曲线, 如图 5 所示。

从图 5 中可以看出, 激光-荧光混合光源的亮度和色度坐标  $y$  值都随着荧光粉质量分数的增

大而提高。荧光粉的质量分数每提高 1%, 光源的整体亮度会增加 0.5%。荧光粉质量分数对色度坐标  $y$  值的影响更大, 质量分数每提高 1%,



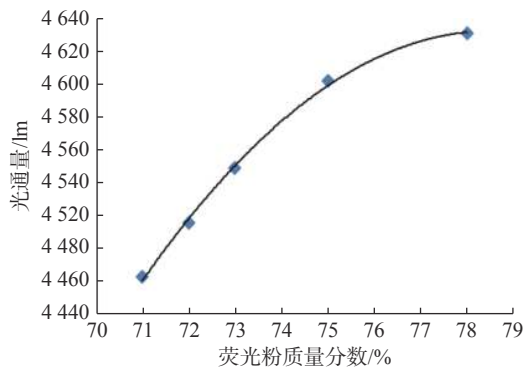
(a) 不同质量分数样品亮度与荧光粉胶层质量的关系



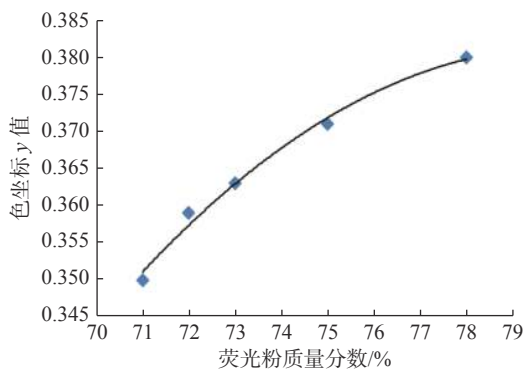
(b) 不同质量分数样品色度与荧光粉胶层质量的关系

图4 不同质量分数样品亮度和色度与荧光粉胶层质量的关系

Fig. 4 Relationship between the luminous flux, chrominance and phosphor layer mass



(a) 亮度与荧光粉质量分数的关系曲线

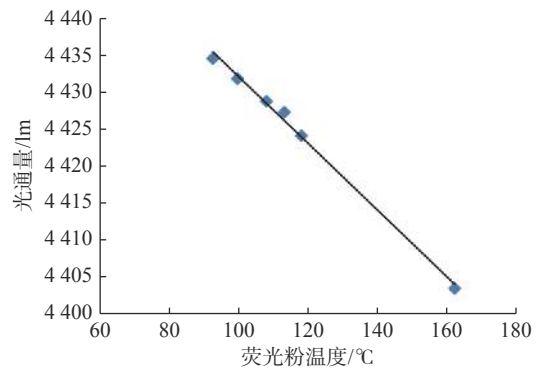


(b) 色度与荧光粉质量分数的关系曲线

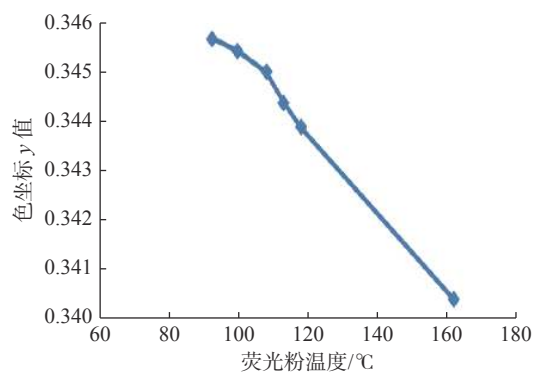
图 5 亮度和色度与荧光粉质量分数的关系

Fig. 5 Relationship between the light source characteristics and phosphor concentration

光源的色度坐标  $y$  值会增加 1.1%。这是因为随着质量分数增大, 有更多的蓝色激光参与激发被转化为黄色的荧光参与合成, 由于黄色的荧光相对于激光单元本身的蓝色激光有更高的光视效能, 使得光源的整体亮度得到了增加。并且黄光本身就比蓝光的色度值高, 使得光源的色度坐标  $y$  值向上偏移。从图 5 中还可以看出, 当荧光粉的质量分数达到 75% 后, 随着质量分数的继续提升, 荧光粉的转化效率有所下降, 亮度和色度坐标  $y$  值的增高逐渐开始趋于平缓。从以上分析结果可知, 通过调整荧光粉的质量配比, 可以得到不同亮度和色度坐标的混合光源, 以适配不



(a) 亮度与荧光粉工作温度的关系曲线



(b) 色度与荧光粉工作温度的关系曲线

图 6 亮度和色度与荧光粉工作温度的关系

Fig. 6 Relationship between the light source characteristics and phosphor operating temperature

同结构的光学照明系统, 光源亮度和色度的可调空间增大同样降低了对光学照明系统的精度要求, 提高了产线实际生产的制成能力指数(Cpk)。

### 3 荧光体工作温度对光源特性的影响

选取荧光粉胶层质量 160 mg、质量分数为 75% 的样品进行测试。调节激光单元两侧附加风扇的功率以改变光源的冷却环境, 使用红外测温仪测定此时的荧光粉胶层的温度, 如表 1 所示。测得混合光源的亮度和色度坐标  $y$  值与荧光粉工作温度间的关系曲线如图 6 所示。

表 1 风扇功率与荧光粉胶层温度变化关系

Tab. 1 The relationship between the fan power and the temperature change of the phosphor layer

风扇功率/W	12	10	8	6	5	4.5
荧光粉胶层温度/°C	92.4	99.5	108	113	118	162

从图 6 可以看到, 光源的亮度随着荧光粉胶层的工作温度的升高而降低, 工作温度每升高

10 °C, 输出亮度降低 0.1%。色度坐标  $y$  值也随着工作温度的升高而减小, 工作温度每升高 10 °C,

色度坐标  $y$  值减小 0.22%。输出的图像画面往蓝色方向偏移, 表明荧光粉的转换效率与工作温度成反比, 工作温度越高, 蓝色激光转化成黄色荧光的转换效率越低, 黄光的强度越弱。更多的蓝色激光直接参与到混合光源中去, 光源中黄光的占比成分相应减少, 相对亮度降低, 色度坐标  $y$  值相应减小。为了使传输到后续光学照明系统的光能足够强, 期望投影机用光源的亮度尽可能高, 然而由于冷却风扇的功率限制和工作时产生的噪音问题, 投影机光源实际工作时荧光粉胶层的温度控制在  $(100 \pm 10)^\circ\text{C}$  较为合适, 所需的风扇功率为  $8 \sim 12\text{W}$ , 对冷却系统的压力较小, 荧光粉胶层也不会有烧穿的危险, 此时光源的色度坐标  $y$  值为 0.3455, 对后续光学照明系统的搭建和调制有较大的自由度。

## 4 结 论

本文设计制备了用于投影显示的激光-荧光混合光源, 研究了荧光粉浓度及工作温度对混合光源发光特性的影响。结果表明激光-荧光混合光源的亮度和色度坐标  $y$  值都随着荧光粉的浓度增加而提高, 当质量分数达到 75%, 增速开始减缓, 此时荧光粉的转化效率接近饱和。72%~75% 的浓度配比最适合实际印刷量产, 此时的光能利用率足够高, 且色度坐标  $y$  值有较大的调整空间便于后续投影机光学照明系统进一步的调制。亮度和色度可调降低了对光学元件加工的精度要求, 提升了量产的制成能力。工作温度对混合光源的发光特性同样具有影响, 结果表明工作温度越高, 激发转换效率越低, 导致光源色度坐标  $y$  值减小。荧光体的工作温度控制在  $(100 \pm 10)^\circ\text{C}$  最为理想, 此时光源色度接近理想的白色度, 同时规避了冷却系统的功率限制和噪音问题。实验结果验证了将激光-荧光混合光源作为投影机光源的可行性, 不仅大大降低了整机的制造成本, 解决了激光光源存在的散斑问题, 而且为后续双激光光源或多激光光源导入投影领域的产业化积累了一定的实例数据。

### 参考文献:

- [1] 刘旭, 李海峰. 现代投影显示技术 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2009: 1 - 208.
- [2] BRENNESHOLTZ M S. Light collection efficiency for light valve projection systems[C]//Proceedings of SPIE 2650 Projection Displays II. San Jose: SPIE, 1996: 71 - 79.
- [3] HIGASHI T, ARIMOTO T. Long life DC metal-halide lamps for LCD Projectors[J]. SID'95: 135-136.
- [4] 林智清. 高功率发光二极管照明器于数字光源处理式投影机之效能 [D]. 台湾: 国立台湾科技大学电子工程系, 2004.
- [5] KEUPER M H, PAOLINI S, HARBERS G. Ultra-compact LED based image projector for portable applications[C]//SID 03 Digest, 713-715.
- [6] 施旭, 冯小波, 贺臻, 等. 新光源在 DLP 拼接系统中的应用及特性测试 [J]. 现代显示, 2012(5): 36 - 42.
- [7] 许祖彦. 激光显示——新一代显示技术 [J]. 激光与红外, 2006(S1): 737 - 741.
- [8] 何志江. 白光 LED 用 YAG 荧光粉的表面修饰研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2013.
- [9] SASAKI K Y, TALBOT J B. Deposition of powder phosphors for information displays[J]. *Advanced Materials*, 1999, 11(2): 91 - 105.
- [10] FALICOFF W, CHAVES J, PARKYN B. PC-LED luminance enhancement due to phosphor scattering[C]//Proceedings of SPIE 5942 Nonimaging Optics and Efficient Illumination Systems II. San Diego: SPIE, 2005: 221 - 235.
- [11] 施丰华, 王海波. 白光 LED 用远程荧光技术 [J]. 中国照明电器, 2012(4): 6 - 8.
- [12] 周青超, 柏泽龙, 鲁路, 等. 白光 LED 远程荧光粉技术研究进展与展望 [J]. 中国光学, 2015, 8(3): 313 - 328.
- [13] WON Y H, JANG H S, CHO K W, et al. Effect of phosphor geometry on the luminous efficiency of high-power white light-emitting diodes with excellent color rendering property[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(1): 1 - 3.
- [14] 雷海燕. 高校多媒体教室投影机的选购 [J]. 课程教育研究, 2017(29): 18.
- [15] 胡盼, 丁慧, 刘永福, 等. YAG:  $\text{Ce}^{3+}$  在激光照明应用中的研究进展 [J]. 发光学报, 2020, 41(12): 1504 - 1528.
- [16] 江子琦, 刘晓梅, 柳华, 等. 半导体激光白光光源研究进展 [J]. 液晶与显示, 2021, 36(3): 371 - 378.
- [17] 王飞霞, 金岑岑, 李晓华, 等. 激光投影电视的感知亮度与色度关系 [J]. 光学学报, 2020, 40(13): 204 - 210.
- [18] 康健, 张乐, 单迎双, 等. 激光白光光源及其光学系统解析 [J]. 应用光学, 2019, 40(5): 763 - 773.