

文章编号: 1000-7032(2026)06-1060-10

激光照明的低空机遇：航空障碍灯

卢丽红¹, 张乐乐², 徐 坚^{2,3*}

(1. 焦作大学 土木建筑工程学院, 河南 焦作 454150;
2. 河南理工大学 物理与电子信息学院, 河南 焦作 454000;
3. 河南聚盛光电有限公司, 河南 焦作 454003)

摘要: 随着我国明确低空经济为战略性新兴产业, 相关产业规模开始快速增长, 主要技术开启迭代。航空障碍灯(简称障碍灯)是保障低空飞行安全的关键基础设施。作为建筑与土木工程等特殊安全设施, 其主要安装于高层建筑物, 用以警示飞行器、规避碰撞风险。障碍灯本质是一种需精细配光的高强度投射型光源, 而激光照明技术具有高亮度、小发散角、结构紧凑等特点, 在光强和光束调控方面具备传统光源无法比拟的优势; 此外, 障碍灯属于航空特种照明产业, 对价格的敏感度相对较低, 弱化了激光照明的成本劣势, 为相关产业带来了新的发展机遇。在该背景下, 本文将首先简介障碍灯技术的发展历程, 然后解读当前我国民航标准中的核心参数, 归纳标准中对发光材料和光源器件的要求; 在此基础上, 详细分析激光照明技术在该场景下具备显著优势的物理原理; 最后, 从产业需求的角度, 展望相关技术的发展趋势和面临的挑战, 为相关科研人员提供启发。

关键词: 低空经济; 航空障碍灯; 激光照明

中图分类号: TN249

文献标识码: A

DOI: 10. 37188/CJL. 20260022

CSTR: 32170. 14. CJL. 20260022

Laser-based Lighting for Low-altitude Applications: Aviation Obstruction Lights

LU Lihong¹, ZHANG Lele², XU Jian^{2,3*}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Jiaozuo University, Jiaozuo 454150, China;
2. School of Physics and Electronic Information, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;
3. Henan Juzhan Electro. Ltd, Jiaozuo 454003, China)
* Corresponding Author, E-mail: xujian@hpu. edu. cn

Abstract: With the low-altitude economy established as a strategic emerging industry in China, its scale has expanded rapidly, driving iteration in core technologies. Aviation obstruction lights, as critical safety infrastructure in architecture and civil engineering, are installed atop tall structures to warn aircraft, prevent collisions, and ensure orderly low-altitude operations. These lights function as high-intensity projectors requiring precise optical distribution. Laser illumination technology, characterized by high brightness, low divergence, and compact structure, offers superior beam control and intensity over traditional light sources. Furthermore, the niche nature of the aviation lighting market reduces price sensitivity, which helps mitigate the cost disadvantage of lasers and opens new opportunities for the industry. Against this backdrop, this article first reviews the technological evolution of obstruction lighting, then interprets key parameters in current Chinese civil aviation standards and summarizes their requirements for luminous materials and light sources. Subsequently, it details the physical principles underlying the significant advantages of laser lighting in this application. Finally, from an industry perspective, it outlines future trends and challenges, offering insights for researchers in the field.

Keywords: low-altitude economy; aviation obstruction lights; laser lighting

收稿日期: 2026-01-21; 修订日期: 2026-02-04

基金项目: 河南理工大学双一流学科建设(GCCYJ202405)

Supported by Henan Polytechnic University Double First-Class Discipline Construction Project (GCCYJ202405)

1 引言: 低空经济

低空经济是指以低空空域(通常指地面以上1 000 m以下的空域,部分地区根据实际需求拓展至3 000 m以下)为活动载体,融合航空制造、飞行运营、场景应用、服务保障等多领域的新型经济形态,其核心是通过对低空空域资源的高效

开发与合理利用,催生多元化的产业场景和经济效益(图1)。自2021年低空经济概念被首次写入《国家综合立体交通网规划纲要》,上升为我国的国家战略,相关产业随之进入快速增长的周期。根据专业机构的测算,2024年我国低空经济产业规模超6 700亿元,俨然已成为重要的新质生产力方向^[1-4]。

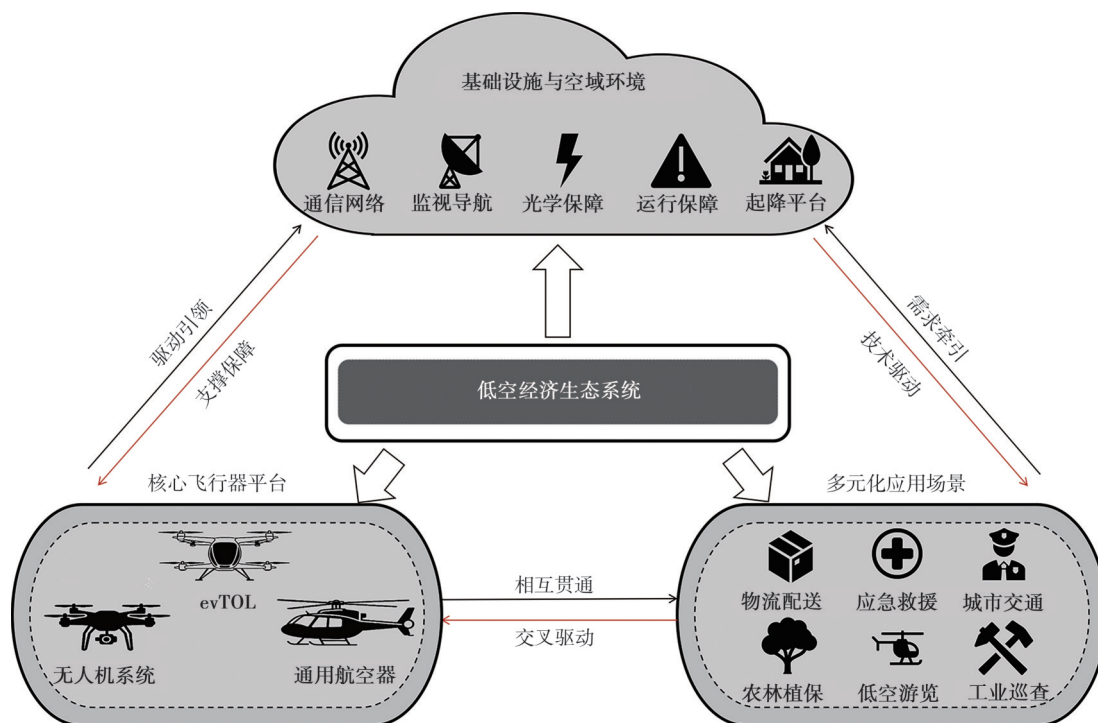


图1 低空经济一体化生态系统示意图

Fig.1 Low-altitude economy integrated ecosystem diagram

2 航空障碍灯的低空使命

开放低空意味着将该空域从单纯的安全管控对象,转变成人员、物资和服务的高效流转“通道”。目前,“通道”存在各种人工障碍物,图2为常见的低空通道中的人工障碍,包括城市高层建筑、工业与能源设施(大型烟囱、冷却塔、高压输电铁塔、石油钻井平台、风力发电机等)、交通与通信枢纽(大型桥梁,广播电视发射塔、微波通信塔、卫星地面站天线塔等)以及一些特殊的人工设施(地标性构筑纪念碑、观景台、大型起重机等)四大类^[5]。这些障碍物广泛分布于低空空域,是航空障碍灯必须覆盖的警示对象。

尽管上述四类障碍物的障碍灯对具体光源指标并无核心差异,但其实际运行环境差异显著。城市高层建筑作为最常见的人造障碍物,障碍灯需兼顾远距离辨识度与城市光环境协调性,避免



图2 低空通道中的人工障碍:(a)城市高层建筑;(b)工业与能源设施;(c)交通与通信枢纽;(d)特殊的人工设施(图片来源:自摄)

Fig.2 Low-altitude artificial obstacles. (a) High-rise buildings in cities. (b) Industrial and energy facilities. (c) Transportation and communication hubs. (d) Special artificial structures

对居民造成光污染。工业与能源设施中的大型烟囱、冷却塔等常处于高温、高湿、高粉尘环境,光源封装需具备更高密封等级(如IP67以上),光学窗口应具有抗灰尘附着能力,以避免烟尘散射造成光强衰减。交通与通信枢纽中的广播电视塔、微波通信塔等多位于开阔高地,雷击风险高,灯具需具备优异的防雷击和电磁兼容性能。风力发电机叶片转动产生强烈振动与风阻,安装于机舱顶部的障碍灯必须具有极高的抗振动、抗冲击能力,且外形需进行流线型设计以降低风阻^[6]。此外,纪念碑、观景台等特殊人工设施往往对灯具的外观设计有更高要求,需在满足警示功能的前提下实现与建筑美学的融合。

航空障碍灯作为航空“通道”安全保障体系中不可或缺的特种警示照明设备,其核心价值在于构建低空飞行环境中的“视觉安全屏障”,有效规避航空器(含固定翼飞机、直升机、无人机等)与高耸障碍物的碰撞风险^[7]。

3 航空障碍灯的去与现在

航空障碍灯的使用始于20世纪初,早期依赖火光、旗帜及白炽灯进行简陋警示。1950年代后,气体放电灯(卤钨灯、氙气频闪灯)凭借高亮度与长距离穿透力成为主流,国际标准体系(如ICAO Annex 14、FAA AC 150/5345-43)随之建立,明确定义了灯具等级、光强及颜色规范等。21世纪,发光二极管(Light-emitting diode, LED)技术引发革命性突破,在效率、寿命、光束质量、小型化等方面均显著优于传统光源,现已成为障碍灯市场的主流^[8-9]。值得注意的是,截至2025年,在峰值光亮度($\text{cd}\cdot\text{mm}^{-2}$)方面,主流大功率LED产品的实测峰值亮度仍略低于高性能的脉冲氙灯。例如,OSRAM KWCU1PM1. TG系列的光亮度约为 $330\text{ cd}\cdot\text{mm}^{-2[10]}$,而一款专业级氙灯(型号7ILX500P)光源亮度可达 $400\text{ cd}\cdot\text{mm}^{-2[11]}$ 。这表明,在追求极致单位面积发光强度的赛道上,气体放电灯仍保持一定优势,但通过多芯片集成和光学设计,LED在系统级光强输出上已全面超越。

我国航空障碍灯执行标准为MH/T 6012-2015《航空障碍灯》,该标准在参考国际标准的基础上,结合国内实际情况制定,对障碍灯的技术、安装、维护等方面作出明确规范^[12]。现行标准依据安装和使用的高度,将障碍灯分为低光强、中光强和高光强三个级别,级别内根据不同场景分为A、B

两个型号。根据MH/T 6012-2015及ICAO附件14的规定,障碍灯的选型与安装高度直接相关:低光强障碍灯($\geq 10\text{ cd}$)通常用于低于45 m的建筑物;中光强障碍灯(A型 $\geq 20\,000\text{ cd}$, B型 $\geq 2\,000\text{ cd}$)通常安装于高于45 m但低于150 m的建筑物;高光强障碍灯(A型 $200\,000\text{ cd}$, B型 $100\,000\text{ cd}$)主要用于高于150 m的超高建筑物、电视塔、烟囱等^[13-17]。其中,低光强和中光强B型为红色,夜间使用;中光强A型、高光强A/B型为白色,具备昼间、夜间、黎明、黄昏等模式(图3)。白光障碍灯的技术难度和市场价值远高于红光,为本文介绍的重点。

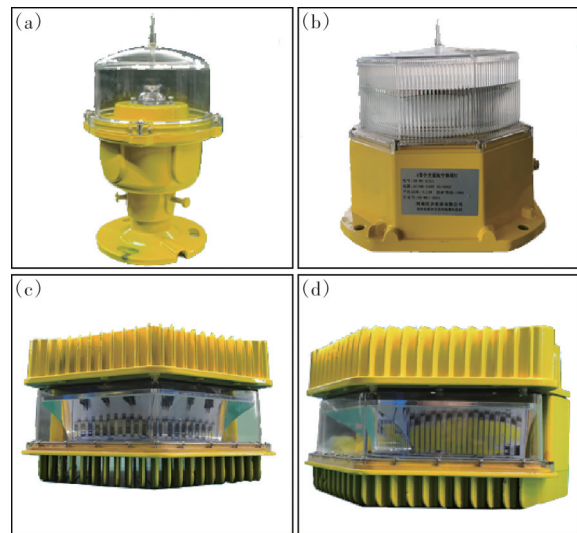


图3 航空障碍灯实物展示:(a)低光强障碍灯;(b)中光强A型障碍灯;(c)高光强A型障碍灯;(d)高光强B型障碍灯(图片来源:信步实业公众号)

Fig.3 Aviation obstruction lights. (a) Low-intensity type. (b) Medium-intensity Type A. (c) High-intensity Type A. (d) High-intensity Type B

关于白光障碍灯的发展,从国际市场来看,高光强白光障碍灯领域长期由Honeywell、Dialight、Flash Technology等公司主导^[18-19],产品以脉冲氙灯和多芯片集成LED技术为主,经过持续的光学优化与可靠性验证,已形成较为完善的产品体系。近年来,随着激光白光技术成熟,KYOCERA、Nichia等上游器件厂商推出车规级激光白光光源,为白光障碍灯的技术升级提供了新的可能^[20]。相比之下,国内研究尚处起步阶段,目前主要包括笔者团队在内的少数机构开展基于荧光转换型白光激光二极管(Phosphor-converted white laser diode, pc-wLD)的障碍灯原型设计,整体仍以技术跟踪和初步应用探索为主。白光障碍灯的主要光度

和色度指标如表 1 所示。值得注意的是, 1 m² 墙面反射正午太阳光的光强可超过 10 000 cd, 为了形成有效的视觉安全屏障, 光强参数要求相对较低的中光强 A 型障碍灯昼间(仰角 0°)也需达 20 000 cd。

表 1 MH/T 6012-2015 标准中白光障碍灯昼间模式仰角 0° 的光度和色度参数

Tab. 1 MH/T 6012-2015 photometric and chromaticity parameters of standard white obstruction light in daytime mode at an elevation angle of 0°

类型	色温/K	色坐标	昼间光强/cd
中光强 A 型			20 000
高光强 A 型	4 000~6 500	x:0.28~0.38	200 000±25%
高光强 B 型		y:0.29~0.39	100 000±25%

障碍灯是典型的投射型光源, 其光线需在特定角度范围内集中投射, 以确保空中飞行员清晰

识别所指示障碍的位置。因此, 表 2 的光束扩散角是其光度/色度参数之外另一个重要的光学指标。水平光束扩散角综合为 360°, 为确保多方向飞行的航空器均可识别障碍物; 垂直光束扩散角的强制最小值为 3°, 为覆盖航空器关键垂直飞行高度, 消除识别盲区; 垂直光束扩散角建议最大值为 7°, 为避免光强过度分散, 保障远距离识别效果, 同时降低光污染。值得注意的是, 垂直扩散角虽无强制最大值, 但角度过大会造成器件光利用率低, 增加光度指标的实现难度, 同时增加能耗。因此, 在产业实践中, 设计和实施合适的最大垂直扩散角同样有重要价值。中光强白光障碍灯昼间模式的光束扩散角的直观图如图 4 所示, 该图依据 MH/T 6012-2015 标准中的参数要求绘制。

表 2 MH/T 6012-2015 标准中白光障碍灯昼间模式的光束扩散角

Tab. 2 MH/T 6012-2015 beam divergence angle of the obstacle light in daylight mode specified in the standard

障碍灯类型	水平光束扩散角	垂直光束扩散角	
		最小	最大
中光强 A 型	360°	3°	无建议
高光强 A 型	90°或 120°(单灯); 360°(多灯组合)	3°	建议 7°
高光强 B 型	90°或 120°(单灯); 360°(多灯组合)	3°	建议 7°

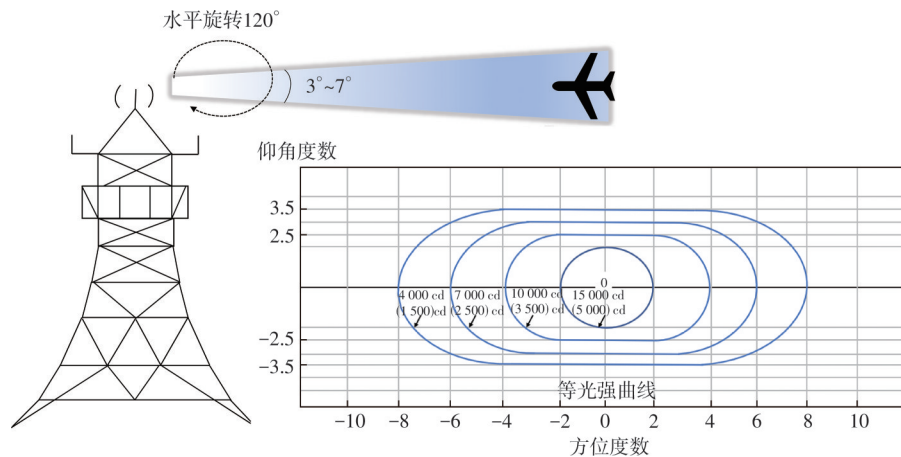


图 4 MH/T 6012-2015 标准中白光障碍灯昼间模式的光束扩散角示意图

Fig.4 MH/T 6012-2015 schematic diagram of the beam divergence angle of the daytime mode of standard white obstruction light

障碍灯的配光设计是警示功能的核心环节。当前的光学方案主要包括反射杯与透镜的组合、全内反射(Total internal reflection, TIR)透镜以及多光源阵列排布三种形式^[21-22]。无论采用何种光学方案, 精细配光的前提是光源具备较高的光出射度(lm·mm⁻²)。高光出射度配合高效的光学系统, 是实现障碍灯精准光束控制的理想技术路径。由于航空障碍灯对光亮度要求较高, 透镜类元件可能引入光效损失和色散问题, 因此现阶段主流

方案仍以抛物面或椭球面反射器为主, 通过反射式结构实现高效的光束收集与压缩。虽有少量专利报道了基于菲涅尔透镜的配光设计^[23], 但在实际应用中, 透镜方案的光效表现和色散控制仍有待进一步验证。

航空障碍灯对光束分布的核心要求可总结为: 水平方向覆盖足够警示范围; 垂直方向严格控制发散角; 同时确保范围内光强均匀。结合对光强的要求, 障碍灯的光源需要同时满足高光通量

和高光出射度($\text{lm}\cdot\text{mm}^{-2}$)。若想提高光源的光出射度,最朴素的想法是增加电流,提高光输出。但大功率LED技术存在“效率骤降”(Efficiency droop)问题,即随着驱动电流(电流密度)的增加,其“电-光”转换效率下降,因此限制了其光出射度^[24-27]。LED技术经过多年的发展,最优的产品光出射度可达 $1\,000\text{ lm}\cdot\text{mm}^{-2}$ (如OSRAM KW CULPM1.TG系列)。在车灯、路灯等传统应用场景,该参数十分优异。但障碍灯更高的光束质量要求,意味着基于现有大功率LED技术开发的障碍灯光学系统尺寸和重量都会相对较大。例如,笔者团队参与开发的高光强A型(XB-GAL)障碍灯,其重量超过 10 kg 。

这一弊端在安装环节首先会面临成本高昂的问题,特别是对于高度超过 150 m 的电视塔、烟囱等高耸结构。此外,大体积灯具在强风条件下会产生显著风阻,对安装支架的稳固性及建筑物本体结构构成安全隐患。对于城市地标性高层建筑,过于庞大笨重的障碍灯还会破坏建筑的整体美学设计,难以满足景观协调性要求。而且,为满足高光强要求,LED方案不得不采用多芯片高密度集成,导致热流密度高度集中,进而迫使散热器

尺寸不断加大,最终形成“高光强-大体积”的正反馈循环。

为突破LED在亮度密度上的物理极限,近年来,基于激光二极管(Laser diode, LD)的pc-wLD技术受到广泛关注。pc-wLD的基本原理是利用蓝光LD激发荧光材料,通过荧光转换获得白光输出。由于激光极高的激发功率密度,pc-wLD能够在远小于LED的发光面积上实现极高的光通量输出,从而在光源层面突破传统LED的亮度密度极限。

4 激光照明的机遇与挑战

激光二极管在很大的驱动电流范围内没有“效率骤降”问题^[27],意味着LD在合适工况下可持续增加电流取得极较高的光输出。结合其较小的光斑(直径可微米级),基于LD激发荧光材料的白光激光照明(White laser diode, wLD)技术可实现极高的光出射度($>3\,000\text{ lm}\cdot\text{mm}^{-2}$)。比较有代表性的wLD光源是KYOCERA SLD Laser的LaserLight SMD和Nichia的Giga White NUW7A5。表3为二者在色温(Correlated color temperature, CCT) $6\,000\text{ K}$ 的核心光度参数与典型LED的对比^[28-29]。

表3 LaserLight SMD、Giga White NUW7A5、KW CULPM1.TG参数对比

Tab. 3 Comparison of parameters: LaserLight SMD, Giga White NUW7A5, KW CULPM1.TG

型号	驱动功率/W	光通量/lm	发光面积/ mm^2	光出射度/ $(\text{lm}\cdot\text{mm}^{-2})$	光亮度/ $(\text{cd}\cdot\text{mm}^{-2})$
LaserLight SMD	20.50	1 000	0.247	4 049	~1 300
Giga White NUW7A5	18.86	1 350	0.250	5 440	1 310
KW CULPM1.TG	22.50	2 120	1.990	1 066	~330

注:数据来源于产品技术规格书^[10,28-29],均为典型值。

KYOCERA SLD Laser的LaserLight SMD可实现超过 $4\,000\text{ lm}\cdot\text{mm}^{-2}$ 的光出射度($1\,000\text{ lm}$, 0.247 mm^2),仅通过直径 35 mm 的光学系统即可获得小于 2° 的光束发散角,具备光束控制能力^[28]。另一款比较有代表性的wLD光源是Nichia的Giga White NUW7A5,其效率和亮度参数均略优于LaserLight SMD。后者的最大优势是其贴片式的封装形态(即表面组装元件, Surface mount component, SMD),尺寸 $7\text{ mm}\times 7\text{ mm}\times 2.3\text{ mm}$,该特性允许其在一些场景下使用或者借鉴现有LED的光学系统,进而大幅缩短研发周期,降低开发成本。而Giga White NUW7A5的尺寸为 $46.5\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 9.4\text{ mm}$,相关的后端光学设计和开发成本较高^[29]。Giga White系列光源的优势体现在可靠性,内置安全传感器,衍生型号已完成车规认证。LaserLight已发

布的wLD多为工业级,目前未见完成车规认证的产品。

尽管在光亮度和光出射度参数方面优势明显,wLD在应用于障碍灯时也存在许多挑战。首当其冲的是wLD的“电-光”流明效能并不高,约在 $70\text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$;而大功率wLED的参数可超过 $90\text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ 。该特性意味着,在同等驱动功率条件下,现阶段wLD的发热量会更大,所需的散热系统规格和体积也相应要提高。需要说明的是,激光二极管的封装形式多为远程激发或反射式结构,与LED常见的贴片式、透射式封装存在本质差异。这种封装方式将发光点与热源部分分离,本身即具有一定的散热优势,但目前尚难以对其散热效果进行定量描述。因此,在现阶段讨论激光照明的小型化时,影响灯体更关键的因素在于其光学系统的

极小的发光面积。其次,虽然 LaserLight SMD 的灯珠体积在小型化方面已经取得显著进展,但 $7\text{ mm}\times 7\text{ mm}\times 2.3\text{ mm}$ 的尺寸仍显著大于 KW CULPM1.TG 的 $4.3\text{ mm}\times 4.3\text{ mm}\times 0.9\text{ mm}$ 。而在实际的工程应用中,中光强 A 型航空障碍灯需要约数万流明的光通量。

以笔者参与研发的 XB-ZA 型中光强 A 型 LED 障碍灯为例^[30],其单灯总光通量需求约为 $60\ 000\text{ lm}$ (单面灯组 $10\ 000\text{ lm}$),需采用超过 30 颗大功率 LED 灯珠方可实现。该案例清晰表明,当前大功率 LED 方案在追求超高亮度的同时,结果导致障碍灯结构复杂、体积庞大的问题。另外,由于障碍灯的安装位置往往较为特殊,多数需要人工攀爬运输或者大型设备吊装,如图 5 所示,该安装场景

凸显了当前高光强 LED 障碍灯(如 XB-GAL 型,重量 $>10\text{ kg}$)在安装维护上的挑战。因此,采用更高光出射度的光源,开发轻量化和小型化的航空障碍灯产品具有显著的市场需求。

为改变这一现状,前文所述的两种新型 wLD 光源提供了新的思路。以 LaserLight SMD 光源为例,其发光面积仅 0.247 mm^2 ,通过直径 35 mm 的透镜即可获得小于 2° 的发散角。这一特性使得光学设计极为简化,仅需简单的柱面扩束镜即可实现垂直方向 $3^\circ\sim 7^\circ$ 的扩展,水平方向则可通过棱镜或柱面镜实现 120° 扩散,最终通过 3 个模组拼接实现 360° 全覆盖,有望将灯具的整体体积减小。图 6 对比了当单面灯组 $10\ 000\text{ lm}$ 时的三种光源所需光源数量及发光面积的等比例对比尺寸显示。LED 方案(KW CULPM1.TG)需约 5 颗,总发光面积约 9.95 mm^2 ; LaserLight SMD 激光方案需 10 颗,总发光面积 2.47 mm^2 ; GigaWhite NUW7A5 激光方案需 8 颗,总发光面积 2.00 mm^2 。激光方案的总发光面积仅为 LED 方案的 $1/4\sim 1/5$,发光面积的缩小为后续光学系统的微型化奠定了基础,有望将灯具整体体积缩减至原有 $1/3$ 以下。这一优势源于激光光源极高的亮度密度。尽管 LaserLight SMD 和 GigaWhite NUW7A5 的封装尺寸远大于 KW CULPM1.TG,但其发光面积(分别为 0.247 mm^2 和 0.250 mm^2)远小于后者(1.990 mm^2),从而实现了数量级的亮度密度提升。



图 5 高光强 A 型障碍灯安装图(图片来源:自摄)

Fig.5 High-intensity Type A obstruction light installation diagram

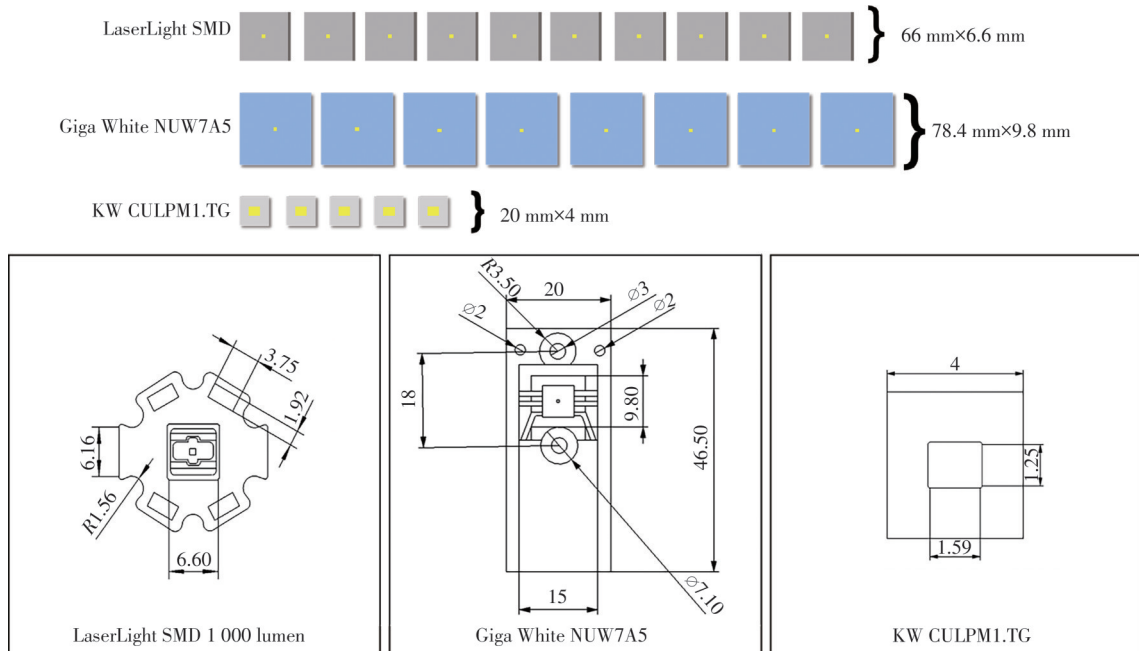


图 6 LaserLight SMD、Giga White NUW7A5、KW CULPM1.TG 所需数量与尺寸图

Fig.6 LaserLight SMD, Giga White NUW7A5, KW CULPM1.TG number required and dimension diagram

激光光源的超高亮度 ($>3\ 000\ \text{cd}\cdot\text{mm}^{-2}$) 在某种意义上更有利于配光设计。根据 SLD Laser 的技术资料^[28], LaserLight SMD 产品已通过 IEC 60825 和 UL 8750 等国际安全认证, 被归类为“Class 1 Laser Product”, 即在照明应用中无需额外警告标识。高亮度特性使得光学系统能够更精确地控制光束分布, 可以避免光线向上进入驾驶舱。经过配光后, 飞行员感知到的光强与 LED 方案是一致的, 均需满足民航标准的统一规定。然而, 激光光源的超高亮度在低空飞行场景下, 特别是对于直升机、eVTOL 等慢速飞行器, 仍可能对近距离飞行员造成眩光甚至暂时性闪盲^[31]。国际民航组织 (ICAO) 在附件 14 中明确强调, 障碍灯设计应在“被看见”与“不刺眼”之间取得平衡。目前, 关于激光照明在航空领域应用的眩光研究尚未充分展开, 相关行业标准也亟待更新。

上述分析从光源性能层面揭示了激光照明的优势, 而其优势在器件结构层面将得到更直接的体现。以图 3 展示的各类航空障碍灯为例, 其内部通常由光源模组、一次光学元件 (反射杯或 TIR 透镜)、二次光学元件 (配光透镜)、驱动电源、散热器及外壳组成。笔者研发的 XB-ZA 型障碍灯采用的是阵列式车规级 LED, 若采用激光照明并且达到同等光学指标, 灯具整体体积可显著减小。然而, 这一技术对驱动电流的稳定性要求更高, 会增加驱动电源的复杂度并导致制造成本上升, 但激光光源的结构优势依然显著。

在 pc-wLD 技术路径中, YAG:Ce³⁺ 荧光材料因其优异的综合性能成为当前研究的焦点^[32-33]。YAG 属于立方晶系石榴石结构, 对称性高, 拥有高熔点 ($\sim 1\ 970\ ^\circ\text{C}$) 和高热导率 ($\sim 13\ \text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), 能够承受激光激发产生的高热流密度而不发生严重的热猝灭^[34-35]。在光谱特性方面, Ce³⁺ 在蓝光激发下的内量子效率可接近 90%, 确保了高效的光转换。通过 Ce³⁺ 掺杂浓度的调控及与其他离子 (如 Gd³⁺, Pr³⁺) 的共掺杂, 可以微调黄光发射峰位, 实现从冷白到暖白的色温调控, 满足标准中对色坐标 ($x:0.28\sim 0.38, y:0.29\sim 0.39$) 的要求。图 7 汇总了 YAG:Ce³⁺ 材料在单晶、陶瓷及荧光玻璃薄膜 (Phosphor-in-glass film, PiG-F) 三种形态下的关键性能参数与代表性成果, 其材料形态多样性为不同激光激发模式和热管理方案提供了丰富选择^[36-40]。

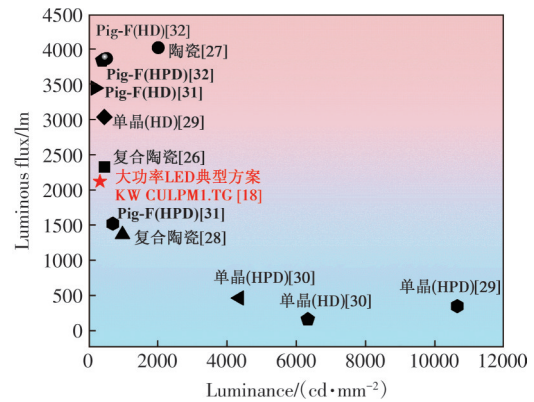


图 7 YAG:Ce³⁺ 荧光材料方案汇总

Fig.7 Summary of YAG:Ce³⁺ phosphor material solutions
注:HPD 为 High power density (高功率密度), 指在极小发光面积上实现极高功率密度的器件类型;HD 为 High density (高密度)。

分析图 7 可知, 不同 YAG:Ce³⁺ 材料呈现出清晰的性能分区。图中同时标示了表 3 中大功率 LED 的典型方案 (OSRAM KW CULPM1.TG 系列光亮度约 $330\ \text{cd}\cdot\text{mm}^{-2}$, 光通量 $2\ 120\ \text{lm}$), 以此为基准可见单晶材料 (尤其是 HPD 型) 展现出极高的光亮度, 可达约 $10^4\ \text{cd}\cdot\text{mm}^{-2}$ 量级, 印证了其在小尺寸高密度发光方面的优势; 但对应的光通量普遍偏低, 限制了其在需要大光通量输出场景 (如航空障碍灯) 中的应用。PiG-F 则兼具转换效率与成型加工性, 成本优势明显, 是大规模应用的潜在方向。陶瓷与复合陶瓷材料则主要分布在图表左上方, 其光通量表现卓越, 最高突破 $4\ 000\ \text{lm}$, 同时维持了 $10^3\ \text{cd}\cdot\text{mm}^{-2}$ 量级的实用光亮度, 更适合高功率激光激发下稳定工作。这两类材料的性能点均显著远离 LED 坐标, 形成了明显的性能优势区, 在总光输出与亮度密度之间取得了更佳平衡。对于航空障碍灯这类需要高总光通量的场景, 陶瓷材料是目前 pc-wLD 技术路线中最具潜力的方案, 更适合航空障碍灯要求高总光通量的需求。

本章通过案例与数据对比阐明, 以 LD 激发 YAG:Ce³⁺ 荧光材料为代表的激光照明技术, 凭借其在亮度密度上的根本性突破, 有望实现障碍灯光源模组的结构紧凑与小型化, 这为降低灯具对安装主体 (如高层建筑、通讯塔架及风力发电机) 的结构负载与风阻影响提供了关键优势, 使其在整体结构与外观设计上更具有友好性。虽然在材料集成、可靠性和成本方面仍需持续投入研究, 但其技术方向已基本清晰。因此, 该技术是突破现有技术瓶颈、引领下一代航空障碍灯向超高性能、小型化与高可靠性发展的必然趋势。

5 结 论

激光照明技术已被证明在车灯、投影等领域具备重要应用价值,但将其普及受到了成本与供应链的制约。而低空经济的战略兴起为激光照明技术开辟了新的应用场景——航空障碍灯。作为低空光学保障的重要基础设施,障碍灯的光源需要具备极高的光出射度以获得高光束质量和高光强,为激光照明技术提供了宝贵的产业化窗口。当前激光照明器件多源于车规级设计,其封装与系统方案难以直接满足航空障碍灯在长期极端环境下的可靠性、复杂光学配光及轻量化安装需求。此外,激光照明在航空障碍灯应用中带来的眩光影响仍需重点研究,相

关安全性评估方法和行业标准有待进一步完善。

因此,面向航空障碍灯的专用封装与一体化技术方案是打通从“技术潜力”到“市场应用”的关键瓶颈。未来,该领域的重心应从普适性亮度提升,转向形成“材料-光学-系统”一体化技术体系,适配风电、高空建筑、低空交通等多场景。这不仅将为航空障碍灯向高性能、高可靠性、小型化方向迭代提供核心支撑,更是筑牢下一代低空飞行安全的战略基石。

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.20260022>

参 考 文 献:

- [1] 廖小罕,徐晨晨,叶虎平. 低空经济发展与低空路网基础设施建设的效益和挑战 [J]. 中国科学院院刊, 2024, 39(11): 1966-1981.
 LIAO X H, XU C C, YE H P. Benefits and challenges of constructing low-altitude air route network infrastructure for developing low-altitude economy [J]. *Bull. Chin. Acad. Sci.*, 2024, 39(11): 1966-1981. (in Chinese)
- [2] 中国政府网. 中共中央国务院印发《国家综合立体交通网规划纲要》[EB/OL]. (2021-02-24) [2026-02-26]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5593440.htm.
 CHINESE GOVERNMENT'S OFFICIAL WEB PORTAL. The CPC Central Committee and the State Council issued the Outline of the National Comprehensive Multidimensional Transportation Network Plan [EB/OL]. (2021-02-24) [2026-02-26]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5593440.htm. (in Chinese)
- [3] 工业和信息化部,科学技术部,财政部,中国民用航空局. 通用航空装备创新应用实施方案(2024—2030年)[EB/OL]. (2024-03-27) [2026-02-28]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202403/content_6942115.htm.
 MINISTRY OF INDUSTRY AND INFORMATION TECHNOLOGY, MINISTRY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, MINISTRY OF FINANCE, CIVIL AVIATION ADMINISTRATION OF CHINA. Implementation Plan for Innovative Application of General Aviation Equipment (2024—2030) [EB/OL]. (2024-03-27) [2026-02-28]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202403/content_6942115.htm. (in Chinese)
- [4] 张愉菲,杨文彬,傅军,等. 数据驱动的低空监视网络安全威胁分析[J]. 网络空间安全科学学报, 2025, 3(1): 73-85.
 ZHANG Y F, YANG W B, FU J, et al. Analysis of data-driven cybersecurity threats in low-altitude surveillance networks [J]. *J. Cybersecurity*, 2025, 3(1): 73-85. (in Chinese)
- [5] 中国民用航空局. MH 5001-2021 民用机场飞行区技术标准 [S]. 北京: 中国民航出版社, 2021.
 CIVIL AVIATION ADMINISTRATION OF CHINA. MH 5001-2021 Aerodrome technical standards [S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2021. (in Chinese)
- [6] 国际电工委员会. IEC TS 61400-29:2023 风能发电系统 第29部分:风力发电机组标记和照明 [S]. 日内瓦: 国际电工委员会, 2023.
 INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC TS 61400-29:2023 Wind energy generation systems—Part 29: Marking and lighting of wind turbines [S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2023. (in English)
- [7] 舒炎昕,高鸣阳,严风硕,等. 通用航空低空飞行障碍物预警技术浅析与展望 [C]. 第十届中国航空学会青年科技论坛论文集, 南昌, 2022: 592-596.
 SHU Y X, GAO M Y, YAN F S, et al. Analysis and prospect of early warning technology for low altitude flying obstacles in general aviation [C]. *Proceedings of the 10th Youth Science and Technology Forum of CSAA, Nanchang*, 2022: 592-596. (in Chinese)

- [8] 陈洁. 航空障碍灯远程监控系统的研究与实现 [D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
CHEN J. *Research and Implementation of Remote Monitoring System for Aviation Obstacle Light* [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011. (in Chinese)
- [9] PÉREZ-OCÓN F, POZO A M, RABAZA O. New obstruction lighting system for aviation safety [J]. *Eng. Struct.*, 2017, 132: 531-539.
- [10] 艾迈斯欧司. 白光 LED(白色发光二极管) [EB/OL]. (2024-02-28) [2026-02-28]. <https://ams-osram.cn/products/leds/white-leds>.
OSRAMams. White LEDs [EB/OL]. (2024-02-28) [2026-02-28]. <https://ams-osram.com/products/leds/white-LEDs>. (in English)
- [11] 北京赛凡光电仪器有限公司. 7ILX150P/7ILX500P 光催化氙灯光源 [EB/OL]. [2026-02-26]. <https://www.instrument.com.cn/netshow/SH102776/C163553.htm>.
BEIJING SAIFAN OPTOELECTRONIC INSTRUMENT CO., LTD. 7ILX150P/7ILX500P photocatalytic xenon lamp light source [EB/OL]. [2026-02-26]. <https://www.instrument.com.cn/netshow/SH102776/C163553.htm>. (in Chinese)
- [12] 中国民用航空局. MH/T 6012-2015 航空障碍灯 [S]. 北京: 中国民航出版社, 2015.
CIVIL AVIATION ADMINISTRATION OF CHINA. MH/T 6012-2015 Aeronautical obstacle light [S]. Beijing: Civil Aviation Press of China, 2015. (in Chinese)
- [13] 中国民用航空局. MH/T 5079-2024 助航灯光系统规划设计指南 [S]. 北京: 中国民航出版社, 2024.
CIVIL AVIATION ADMINISTRATION OF CHINA. MH/T 5079-2024 Planning and design guidelines for aids lighting systems [S]. Beijing: Civil Aviation Press of China, 2024. (in Chinese)
- [14] 中国民用航空局. MH/T 5083-2024 民用机场助航灯光系统维护规程 [S]. 北京: 中国民航出版社, 2024.
CIVIL AVIATION ADMINISTRATION OF CHINA. MH/T 5083-2024 Specifications for the maintenance of aerodrome navigation lighting aids system [S]. Beijing: Civil Aviation Press of China, 2024. (in Chinese)
- [15] 国际民用航空组织. 机场设计手册 第 4 部分: 目视助航设施 (Doc 9157 第 4 部分) [M]. 第 5 版. 蒙特利尔: 国际民用航空组织, 2021.
INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. *Aerodrome Design Manual, Part 4: Visual Aids (Doc 9157, Part 4)* [M]. 5th ed. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2021. (in English)
- [16] 国际民用航空组织. 关于附件 14 第 I 卷第 18 号修订案的采纳: 国家信函 AN 4/1. 2. 31-25/23 [S/OL]. (2025-04-24) [2026-02-23]. 蒙特利尔: 国际民用航空组织.
INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. Adoption of Amendment 18 to Annex 14, Volume I: State letter AN 4/1. 2. 31-25/23 [S/OL]. (2025-04-24) [2026-02-23]. Montreal: International Civil Aviation Organization. (in English)
- [17] 国际民用航空组织. 国际民用航空公约附件 14 第 I 卷: 机场设计和运行 [S]. 第 9 版. 蒙特利尔: 国际民航组织, 2022.
INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation, Volume I: Aerodrome Design and Operations [S]. 9th ed. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2022. (in English)
- [18] HONEYWELL INTERNATIONAL INC. White LED anti-collision light utilizing light-emitting diode (LED) technology: European Patent Office, EP1773667A1 [P]. 2007-04-18.
- [19] DIALIGHT. Dialight launches new SafeSite® integrated LED obstruction lighting system [EB/OL]. (2014-03-04) [2026-02-28]. <https://www.dialight.com/about/news-item/dialight-launches-new-safesite-integrated-led-obstruction-lighting-system/>.
- [20] MASUI S, YAMAMOTO T, NAGAHAMA S I. A white light source excited by laser diodes [J]. *Electron. Commun. Jpn.*, 2015, 98(5): 23-27.
- [21] 肖启红, 李田方. 一种全凹型抛物面反光器组合式光学装置: 中国, CN211738966U [P]. 2020-10-23.
XIAO Q H, LI T F. Full-concave parabolic reflector combined optical device: China, CN211738966U [P]. 2020-10-23. (in Chinese)
- [22] 苏丹. LED 在飞机航行灯中的应用及光学设计案例分析 [J]. *应用光学*, 2014, 35(6): 966-970.
SU D. Application and optical design case analysis of LED used in air craft navigation lamp [J]. *J. Appl. Opt.*, 2014, 35(6): 966-970. (in Chinese)
- [23] 宋恒柱, 吕志明, 李民, 等. 光学透镜及使用该光学透镜的航空障碍灯: 中国, CN103148447A [P]. 2013-06-12.
SONG H Z, LYU Z M, LI M, *et al.* Optical lens and aviation obstruction beacon adopting same: China, CN103148447A [P]. 2013-06-12. (in Chinese)

- [24] WIERER J J JR, TSAO J Y, SIZOV D S. Comparison between blue lasers and light-emitting diodes for future solid-state lighting [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2013, 7(6): 963-993.
- [25] LI S X, WANG L, HIROSAKI N, *et al.* Color conversion materials for high-brightness laser-driven solid-state lighting [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2018, 12(12): 1800173.
- [26] BEHRINGER M, KÖNIG H. Blue high-power laser diodes-beam sources for novel applications [J]. *PhotonicsViews*, 2020, 17(2): 60-63.
- [27] 徐坚, 江志, 徐鹏, 等. 激光照明用荧光材料的散射调控策略——Mini综述 [J]. *发光学报*, 2021, 42(10): 1637-1645.
XU J, JIANG Z, XU P, *et al.* Scattering control strategies in phosphors for laser lighting application——Mini review [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(10): 1637-1645. (in Chinese)
- [28] KYOCERA SLD Laser. LaserLight SMD 1 000 white light component: technical documentation, 740-00009, Rev. B [EB/OL]. [2026-02-28]. https://media.digikay.com/pdf/Data%20Sheets/AVX%20PDFs/LaserLight_SMD_1000.pdf.
- [29] NICHIA CORPORATION. GigaWhite™: NUW7A5 [EB/OL]. [2026-05-22]. https://led-ld.nichia.co.jp/en/product/ld_gigawhite.html.
- [30] 河南信步实业有限公司. A型中光强航空障碍灯(XB-ZA) [EB/OL]. [2026-02-28]. https://www.rambling.cn/product/productshow_1792.html.
HENAN XINBU INDUSTRIAL CO., LTD. Type A medium-intensity aviation obstruction light (XB-ZA) [EB/OL]. [2026-02-28]. https://www.rambling.cn/product/productshow_1792.html. (in Chinese)
- [31] DEMIK R J, HARRIMAN S, PHILLIPS R S, *et al.* Measuring intensity of laser light penetrating flight decks in laser illuminations [J]. *J. Aviation Technol. Eng.*, 2013, 3(1): 2.
- [32] LIN H, HU T, CHENG Y, *et al.* Glass ceramic phosphors: towards long-lifetime high-power white light-emitting-diode applications—a review [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2018, 12(6): 1700344.
- [33] 胡盼, 丁慧, 刘永福, 等. YAG:Ce³⁺在激光照明应用中的研究进展 [J]. *发光学报*, 2020, 41(12): 1504-1528.
HU P, DING H, LIU Y F, *et al.* Research progress of YAG:Ce³⁺ for white laser diode lighting application [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020, 41(12): 1504-1528. (in Chinese)
- [34] SHEN Z T, ZHU Q Q, TIAN R D, *et al.* Investigation of excitation modes in Al₂O₃-YAG phosphor ceramics for high-power laser-driven lighting [J]. *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, 2024, 13(4): 046002.
- [35] CHENG Z Q, WANG Y B, LI W Y, *et al.* Porous Ce:YAG ceramics with controllable microstructure for high-brightness laser lighting [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2023, 106(5): 2903-2910.
- [36] WANG J C, TANG X Y, ZHENG P, *et al.* Thermally self-managing YAG:Ce-Al₂O₃ color converters enabling high-brightness laser-driven solid state lighting in a transmissive configuration [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2019, 7(13): 3901-3908.
- [37] CHEN X R, YUAN S D, LIU B G, *et al.* Unveiling the effect of Ce³⁺ doping concentration in YAG:Ce single crystals towards high luminance laser lighting [J]. *J. Lumin.*, 2024, 275: 120786.
- [38] YUAN S D, BITZIOU I, CHEN X R, *et al.* Novel strategy to optimize luminance for phosphor-converted laser lighting [J]. *J. Lumin.*, 2024, 265: 120233.
- [39] LIU B G, PANG S Q, CHEN X R, *et al.* Pore-existing phosphor-in-glass film realizing ultra-efficient and uniform laser lighting [J]. *J. Lumin.*, 2024, 266: 120337.
- [40] XU J, THORSETH A, XU C, *et al.* Investigation of laser-induced luminescence saturation in a single-crystal YAG:Ce phosphor: towards unique architecture, high saturation threshold, and high-brightness laser-driven white lighting [J]. *J. Lumin.*, 2019, 212: 279-285.



卢丽红(1989-),女,河南焦作人,硕士,讲师,2014年于华北水利水电大学获得硕士学位,主要从事建筑照明、环保型建筑建筑材料以及航空障碍灯的高空适配等方面的研究。
E-mail: 1201608112@jzu.edu.cn



徐坚(1988-),男,河南焦作人,博士,副教授,硕士生导师,2016年于厦门大学获得博士学位,主要从事稀土发光材料的制备与精密加工、大功率特种光源的构建以及低空光学保障技术的相关产业研究。
E-mail: xujian@hpu.edu.cn