

文章编号: 1005-5630(2024)03-0080-07

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.202304030082

基于合光技术的可变焦激光探照灯设计

王轩宇, 杨一涵, 石悦言, 李阳, 黄俐皓, 隋国荣

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 为增加激光光源的光效, 进一步实现远距离照明, 可使用基于合光技术的方案, 设计一种可变焦激光探照灯。采用多颗蓝光 LD 排成阵列的方法, 利用玻璃反光碗的光回收技术, 对激光探照灯进行光路设计; 同时使用二向色片来控制发散角度, 从而实现激光探照灯的可变焦控制。测量激光模组在 1 A 电流下输出的光通量, 经计算, 荧光陶瓷片出射的总光通量约为 730 lm。此外, 对匀光片的散射特性进行改变, 可实现对聚焦激光光斑的控制。此研究实现了可变焦激光探照灯的光路设计以及对聚焦激光光斑的控制, 并利用二向色片实现了蓝光和黄光混合白光输出。该光学系统的整体光效较高, 有较强的实用意义。

关键词: 激光束合光; 双光路激光模组; 玻璃反光碗; 光通量

中图分类号: O 439 **文献标志码:** A

Design of zoomable laser searchlight based on photoluminescence technology

WANG Xuanyu, YANG Yihan, SHI Yueyan, LI Yang, HUANG Lihao, SUI Guorong

(School of Optical-Electrical and Computing Engineering, University of Shanghai for

Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: To increase the light efficiency of laser light sources and further achieve long-distance illumination, a scheme based on combining light technology can be used to design a variable focus laser searchlight. Using the method of arranging multiple blue light LDs into an array and utilizing the light recovery technology of the glass reflector bowl, the optical path design of the laser searchlight was carried out. Simultaneously using a dichroic chip to control the divergence angle, variable focus control of the laser searchlight was achieved. Measure the luminous flux output by the laser module at a current of 1 A. After calculation, the total luminous flux emitted from the fluorescent ceramic chip was approximately 730 lm. In addition, changing the scattering characteristics of the uniform light sheet could achieve control of the focused laser spot. This study achieved the optical path design of a variable focus laser searchlight and the control of the focused laser spot, and used a dichroic chip to achieve mixed white light output of blue and yellow light. The overall optical efficiency of this optical system is high, and it has strong practical significance.

收稿日期: 2023-04-03

第一作者: 王轩宇 (2002—), 男, 本科生, 研究方向为光电信息科学。E-mail: wang_xuanyu0208@163.com

通信作者: 隋国荣 (1974—), 男, 副教授, 研究方向为光电检测与图像处理、光通讯技术。

E-mail: suigr@usst.edu.cn

Keywords: laser beam combination light; dual-path laser module; glass reflective bowl; luminous flux

引言

从20世纪90年代蓝光发光二极管(light emitting diode, LED)的发明开始,LED逐步成为主流的照明光源,从照明到显示,从室内到室外,从电视到手机,其身影可谓无处不在^[1]。然而考虑到亮度、效率等因素,在很多场合LED仍然无法完全替代传统器件^[2-3]。近年来,与蓝光LED同源的激光二极管(laser diode, LD)发展迅速。LD除了具有与LED一样的安全、环保和寿命长的优点外,还具有辐射发光效率高且不存在效率骤降^[4],色度、色温等特性可调^[5],以及功率密度高,光斑特性好等额外的优势,且在给定色温条件下,LD的显示特性更好^[6]。这些特点使得蓝光LD被当作下一代照明光源,引起了广泛的关注^[7-8]。

激光光源的主要优势在于光源亮度高^[9],可以实现远距离照明,因此特别适合用于探照灯。随着激光应用技术的发展,在材料加工、遥感、激光雷达、光电对抗等领域,高功率高质量的激光束几乎成为了必需。由于单个激光器物理因素和结构因素的限制,高功率与高质量成为了一对矛盾体,而合光技术为解决这一矛盾提供了一条有效途径。目前,光束合成技术已成为国际研究热点之一,国内外研究人员已经提出多种光束合成技术,包括多光束并束输出、光谱合成、主振荡放大、激光腔内合成等方案。目前,单颗蓝光LD的额定电功率不超过15W,为了增加光源的功率,通常将多颗LD排成阵列来使用^[10]。不同LD输出的激光需要先经过准直后再进行光束合成^[11]。由于相邻2颗LD之间需要保持适当的间距,这导致不同激光光束之间具有较大的间隙,因此压缩激光束之间的间隙使之变为一束更细的光(合光)具有重要意义。

1 原理

对激光束进行合光的方案有很多,最简单的方案是利用反射镜阵列来实现^[8],其原理参见

图1。每个小反射镜对应一个激光束,它将该激光束的传播方向进行转折,通过调整小反射镜的位置就可以改变激光束之间的间距。图1显示了如何将激光束之间的间距从原来的 D_1 缩小到 D_2 。然而,这种方案对反射镜的装配角度非常灵敏,如果不同反射镜的装配角度有偏差,就会导致不同激光束之间不再平行,影响最终聚焦光斑的大小。

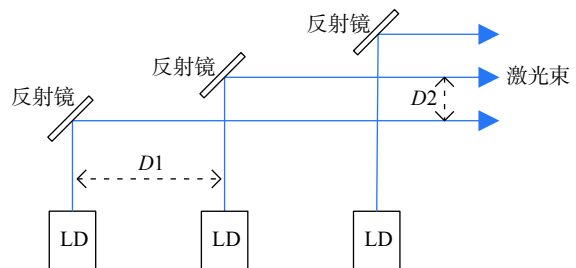


图1 利用反射镜实现激光束合光

Fig. 1 Laser beam combination realized by reflector

为了解决反射镜装配的难题,可以采用45°斜方棱镜来实现激光束合光。斜方棱镜是一种横截面为平行四边形的光学棱镜,它有4个光学面,包括2个全内反射面和2个透射面,其上下平面用于棱镜夹持装配,并非光学面。通过精确控制棱镜4个光学面的角度来实现对光束传播方向的转折。横截面为平行四边形的斜方棱镜能够对激光束实现平行平移而不改变光束的传播方向(见图2)。即使棱镜装配时发生倾斜,它依然能保证出射激光束相对入射激光束的传播方向不变。斜方棱镜对激光束的平移就可以缩小不同激光束之间的间距,实现对激光光束的合光。

本设计使用了3颗平行排列的蓝光LD(日亚化学NUBM 0A),其最大功率可以达到45W。图3是所设计的探照灯的光学系统图,它可以分为光源和镜头两部分。光源部分是1个双光路激光模组,它是整个系统中最复杂的部分。镜头部分由1个凹透镜和2个凸透镜组成,凹透镜的焦点和2个凸透镜(看成1个组合透镜)的焦点重合。它实际上组成了1个共焦扩束准直系统。从光源模组输出的近似准直的光束,经过镜头扩束后,其发散角会变得更小,而中心光强会变得更

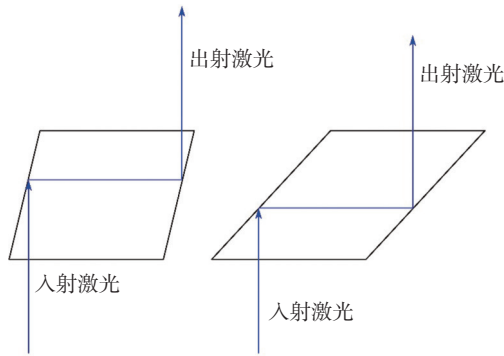


图 2 斜方棱镜实现光束平移的原理

Fig. 2 Principle of beam translation realized by rhombic prism

强。调焦时，保持 2 个凸透镜不动，只需调节中间凹透镜的前后位置，就可以改变输出光的角度，实现变焦的功能。

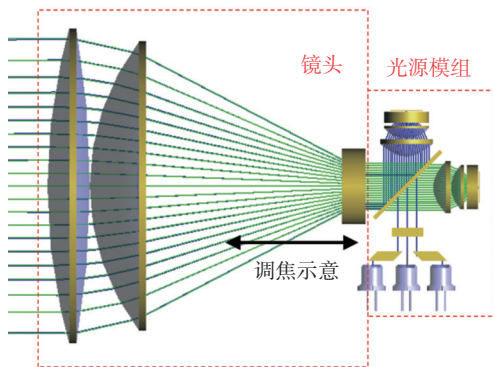


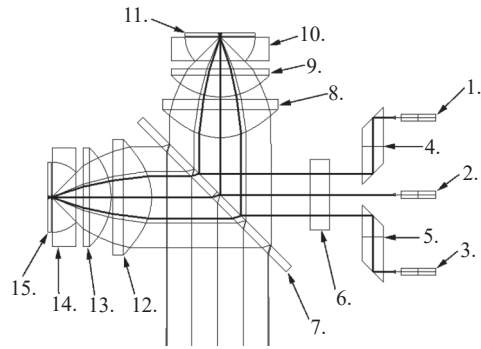
图 3 激光探照灯的光学系统图

Fig. 3 Optical system diagram of laser searchlight

图 4 是图 3 中光源模组部分的光学系统图，其中 ϕ 表示透镜的通光孔径；1~3 为 3 颗蓝光 LD，彼此平行设置，它们各带 1 个准直透镜，输出准直激光。为了实现 3 束激光的合光，需要采用 4、5 两个斜方棱镜。合光之后的激光束先透过一个匀光片 6，然后入射到二向色片 7 上。二向色片 7 是最关键的光学器件，它既要实现对蓝光的分光，又要实现对黄光的透射输出，其光谱透过率曲线参见图 5。

2 实验结果和分析

从图 5 可知，当波长为 455 nm 的蓝光入射到二向色片 7 上时，大约有 80% 的蓝光会被反射，20% 的蓝光被透射，即对蓝光进行分光。反射的蓝光会经过透镜 8 和 9 的聚焦后入射到荧



1, 2, 3 蓝光 LD; 4, 5 斜方棱镜; 6 匀光片; 7 二向色片; 8, 12 $\phi 16$ 平凸透镜; 9, 13 $\phi 14$ 平凸透镜; 10, 14 反光碗; 11 荧光陶瓷片; 15 漫反射板

图 4 双光路激光模组的光学系统图

Fig. 4 Optical system diagram of a dual path laser module

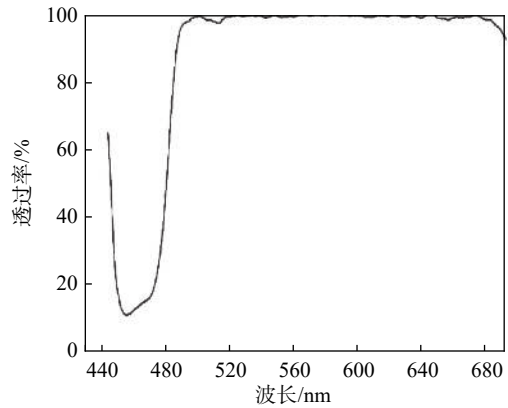


图 5 二向色片在 45°角的光谱透过率曲线

Fig. 5 Spectral transmittance curve of dichroic film at 45°

光陶瓷片 11 上，此为反射光路；而透射的蓝光经过透镜 12 和 13 聚焦后入射到漫反射板 15 上，此为透射光路。2 个光路相对于二向色片 7 呈对称布置，其中透镜 8 和 12 相同，为非球面透镜；透镜 9 和 13 相同，为球面透镜。2 组透镜分别位于 2 个光路中，一方面实现对入射蓝光的聚焦，另一方面实现对出射光的收集和准直。由于系统中包含透射光路和反射光路，因此该光源模组被称为双光路激光模组。

在图 4 所示的光学系统中，匀光片 6 的散射特性决定了聚焦激光光斑的形状。当透镜 8 和 9 将激光聚焦到荧光陶瓷片 11 上时，本质是对其空间光场进行了傅里叶变换，激光束的空间光强分布最终变为激光光斑的表面光场分布。准直激光透过匀光片后会形成有一定发散角的光束。如果光束发散角大，那么聚焦光斑面积就大；如

果光束的光强分布均匀, 那么聚焦光斑的表面光场分布也会均匀。因此, 只要改变匀光片 6 的散射特性就可以实现对聚焦激光光斑的控制。

本设计方案选择了全角为 4° 的玻璃匀光片 (按照 $1/e^2$ 的强度), 这种匀光片通过对平板玻璃进行化学刻蚀来制得。图 6(a) 是制备的玻璃

匀光片的表面形貌图, 图 6(b) 是准直蓝激光透过匀光片之后的扩散光斑图像, 图 6(c) 是图 6(b) 中光斑剖面的强度分布曲线。从曲线可知, 准直激光经过匀光片后的光强分布可近似为高斯分布。

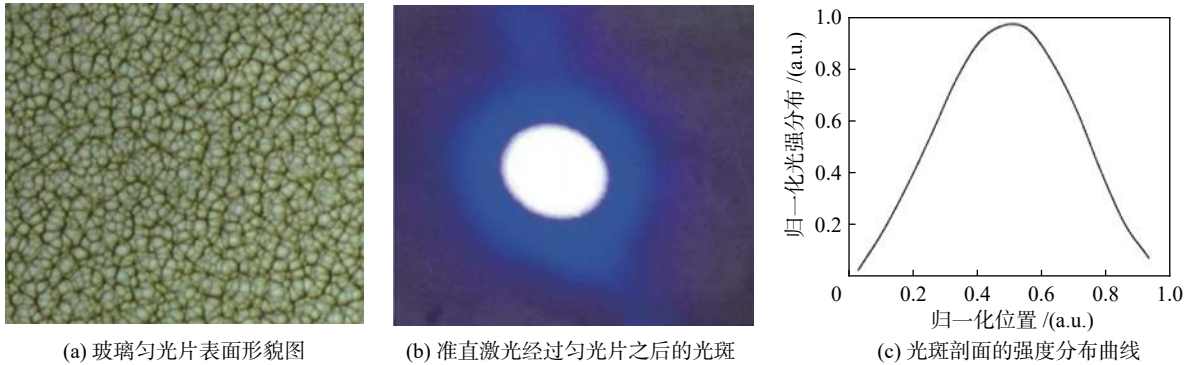


图 6 匀光片和扩散光斑

Fig. 6 Uniform light film and diffuse light spot

在图 4 的光学系统中, 10 和 14 为玻璃反光碗, 其内表面为球面, 并镀有高反射膜。荧光陶瓷片 11 和漫反射板 15 分别位于反光碗的球心处。从荧光陶瓷片发射的光, 有一部分会照射到反光碗的内壁, 然后被反光碗反射回球心。反射回球心的光将再次被荧光陶瓷片散射后输出, 这可以提高荧光陶瓷片中心的亮度。该技术可称之为光回收技术, 其本质是基于腔增强理论。本设计方案中采用了 45° 的玻璃反光碗 (见图 7)。以反光碗的中心光轴为轴线, 与光轴夹角在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 的光可以通过反光碗上端的开口出射, 而夹角在 $45^\circ \sim 90^\circ$ 的光将被反光碗内壁反射回收。由于光回收技术可以对大角度范围内的光进行回收利用, 所以透镜 8 和 9 只需要对 $0^\circ \sim 45^\circ$ 角度范围内的光进行收集。这大大降低了透镜的设计

难度, 只需要使用普通折射率的 K9 玻璃透镜即可实现。此外, 由于收光角度变小, 透镜镀膜更简单, 而整个系统的色散也会更小。

从荧光陶瓷片发射的黄光经过透镜组 8 和 9 收集后会变为准直黄光, 然后入射到二向色片 7 上。从图 5 中的镀膜曲线可知, 二向色片对波长在 $490 \sim 690 \text{ nm}$ 的光具有很高的透过率, 因此, 从荧光陶瓷片发射的黄光几乎都可以透过二向色片而输出。同时, 被漫反射板 15 反射的蓝光, 经过透镜组 12 和 13 收集后变为准直蓝光, 然后入射到二向色片 7 上被分光, 其中 80% 的蓝光被二向色片反射后输出, 而其余 20% 的蓝光会因为透射而损失掉。漫反射板 15 对蓝光的反射率接近 100%。因此, 整个光学系统输出的蓝光占总入射蓝光的比例大约为 $20\% \times 80\% = 16\%$, 而系统损失的蓝光占比为 $20\% \times 20\% = 4\%$ 。输出的蓝光与黄光混合最终便可合成白光。因此, 借助一个二向色片即可同时实现蓝光和黄光的输出, 且系统的整体光效也比较高。

在图 4 的光学系统中, 如果荧光陶瓷片 11 上有未被吸收的蓝光反射出来, 那么反射蓝光中的绝大部分 (约 80%) 光都会损失掉。因此本设计方案希望荧光陶瓷片对蓝光的吸收系数越高越好。同时, 为了配合反光碗的光回收技术,

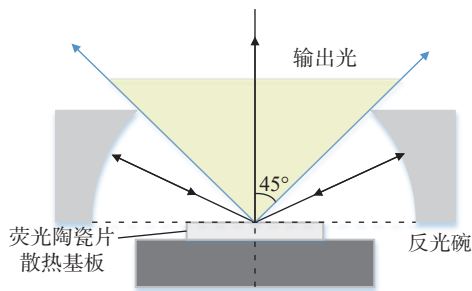


图 7 反光碗实现光回收的原理

Fig. 7 Reflective bowl to achieve light recovery principle

又希望荧光陶瓷片具有良好的散射特性。只有散射强，才能使反光碗的光回收效率高；同时荧光陶瓷片的散射还能使陶瓷片上的光斑扩散范围小，亮度更高。本设计案例采用了德国肖特公司的黄色荧光陶瓷片。由于使用的激光功率比较高，为了提高荧光陶瓷片的散热性能，荧光陶瓷片被焊接在一个铜基板上，见图 8(a)，图中荧光陶瓷片的尺寸为 4 mm × 4 mm × 0.2 mm，而铜基板的尺寸为 10 mm × 10 mm × 2 mm。

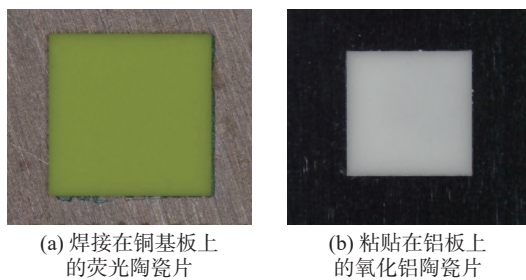


图 8 2 种陶瓷片

Fig. 8 Two types of ceramic chips

漫反射板采用多孔氧化铝陶瓷片。为使最终合成的白光在颜色分布上均匀，蓝光光路和黄光光路的光强分布应当尽可能一致，因此，漫反射板的散射特性和荧光陶瓷片的散射特性也要保持一致。本设计采用了 0.2 mm 厚度的多孔氧化铝陶瓷片，它具有和荧光陶瓷片相似的散射特性，且厚度也相同。制作漫反射板时，直接将氧化铝陶瓷片用硅胶粘贴到镜面铝板上，见图 8(b)，通过测试可知其对光的漫反射率接近 100%。

图 9(a)是所设计的双光路激光模块的内部结构图，图 9(b)是模块的实物照片，其中 3 颗蓝光 LD 采用串联的方式进行驱动。首先测量了该激光模组在 1 A 电流时输出的光通量，测量结果见表 1，光谱曲线见图 10。从测量结果可知，该激光模组可输出光源色温为 8 057 K 的白光，其颜色坐标(0.291, 0.316)接近黑体辐射曲线，但显色指数不高，只有 66，这是目前以 YAG : Ce 荧光陶瓷来输出白光的通病。由于辐

射光谱中缺少红光成分，一般只能得到高色温的白光，且显色指数不高。如果增加 Ce 的浓度，虽然可以降低白光的色温，却会导致光效降低，同时热淬灭性能变差。当前使用的 YAG : Ce 荧光陶瓷是综合了颜色和热淬灭性后的选择。当电流为 1 A 时，激光模组消耗的电功率约为 11 W，而输出的光通量为 545.6 lm，据此可计算出其光效约为 50 lm/W^[12]。

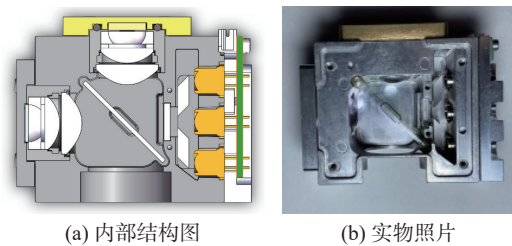


图 9 双光路激光模组

Fig. 9 Dual-path laser module

图 11 显示了该激光模组的光通量和光效随激光二极管电流变化的曲线。当激光电流为 3.4 A 时，其输出光通量达到最大值 1 976 lm；电流超过 3.4 A 后，荧光陶瓷片出现饱和，导致输出光通量断崖式下降。由于荧光陶瓷片和铜基板之间的焊接工艺提供了良好的可靠性，加之荧光陶瓷片本身具有出色的耐高温性能，因此出现发光饱和的荧光陶瓷片并没有损坏，只要降低电流就可以恢复正常。

从图 11 还可发现：当激光电流在 1~3 A 时，该激光模组的光效基本都能维持在 50 lm/W 以上；当电流达到 1.8 A 时，其光效达到最大值，约为 55 lm/W。必须指出的是，所测得的光通量和光效还包含了激光模组的光收集效率。该激光模组中使用了光回收技术，这种技术会导致系统的光收集效率偏低。

为了测量光回收技术带来的光效损失和亮度增益，制作了一个和反光碗尺寸完全一样的黑色遮光罩(见图 12)。

对比测量时，用黑色遮光罩替换玻璃反光

表 1 激光模组在 1 A 电流时的光学参数

Tab. 1 Optical parameters of laser module at 1 A current

电流/A	光通量/lm	光谱密集度/mW	点坐标	光源色温/K	显色指数	光电转换效率/(lm·W ⁻¹)
1	545.6	1643.3	(0.291, 0.316)	8057	66	50

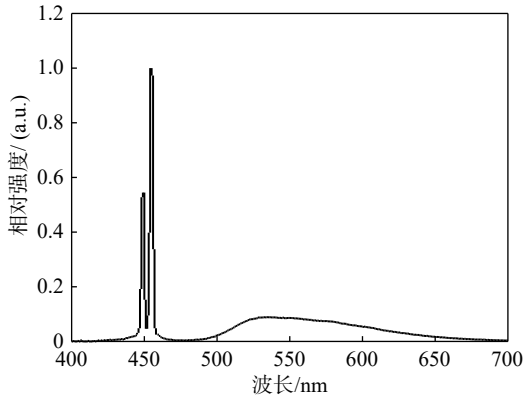


图 10 激光模组在 1 A 电流时的光谱曲线

Fig. 10 Spectral curve of laser module at 1 A current

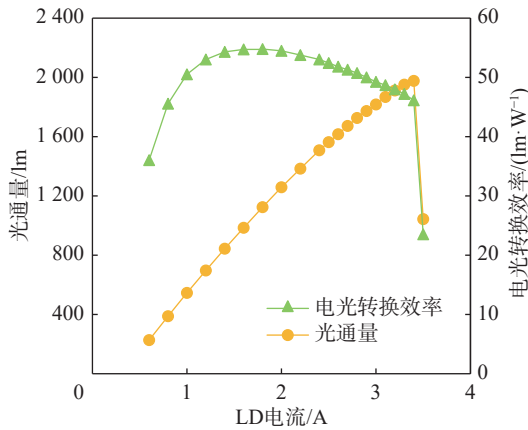


图 11 激光模组的光通量和光效随激光电流变化的曲线

Fig. 11 Curve of the flux and efficiency of a laser module as a function of the laser current

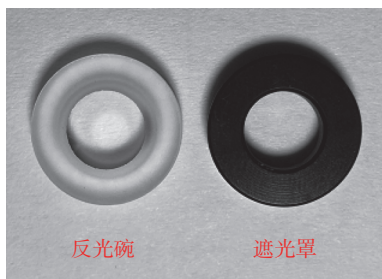


图 12 玻璃反光碗和黑色遮光罩

Fig. 12 Photo of glass reflective bowl and black shade

碗, 然后测量激光模组在 1 A 电流时输出的光通量, 此时测得的结果为 365 lm。从荧光陶瓷片发射的光, 其光强分布可近似为朗伯分布, 由于黑色遮光罩上部的圆形通光孔正好对应了 45° 的光锥角度, 可估算 2 片透镜所收集的光占总光通量的一半, 也就是说当使用黑色遮光罩时, 系统的光收集效率约为 0.5。据此可计算出荧光陶瓷

片出射的总光通量约为 730 lm。再对比使用玻璃反光碗时的光通量数据(545.6 lm), 就可得到使用玻璃反光碗时系统的光收集效率, 计算结果约为 75%。在理想情况下, 被玻璃反光碗反射的光和原光斑正好重合, 据此可计算反光碗对荧光陶瓷片中心亮度的增益约为 50%, 所有的测量结果参见表 2。由于被反光碗反射回荧光陶瓷片上的光还会在陶瓷片内扩散, 所以中心亮度的增益会小于 50%, 实测结果大约为 40%。

表 2 反光碗亮度增益测量结果

Tab. 2 Reflection bowl brightness gain measurement results

测量对象	电流/A	光通量/lm	收集效率	亮度增益
遮光罩	1	365	0.5	
总光通量	1	730		
反光碗	1	546	0.75	0.5

图 13 是最终制作的激光探照灯的实物照片以及户外照明效果图。图中探照灯出光口采用直径为 100 mm 的玻璃透镜, 输出光束的最小角度约为 0.5°(半角), 而最大中心光强达到 900 mcd, 通过调焦可使光束角度在 0.5°~10°内连续变化。



(a) 激光探照灯的实物照片 (b) 探照灯的户外照明效果

图 13 激光探照灯展示效果

Fig. 13 Laser searchlight display effect

3 结论

本文介绍了一款基于合光技术的可变焦激光探照灯。使用反射镜阵列对 LD 蓝光进行光束合成, 再将其入射至设计的光学系统当中。该设计的核心是一个双光路激光模组, 它借助一个二向色片来实现蓝光的分光和白光的合成, 其合成的白光亮度高且色度均匀。在激光模组的设计中还用到了光回收技术, 该方案具有通用性, 它非常

容易拓宽到更高的功率级,使用更多的 LD 来实现更高的光通量输出。该光学模组结构简单,易于扩展,可行性和适配性较高,具有广阔的应用前景。

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] HAHN B, GALLER B, ENGL K. Development of high-efficiency and high-power vertical light emitting diodes[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2014, 53(10): 100208.
- [3] WANG L, JIN J, MI C Z Y, et al. A review on experimental measurements for understanding efficiency droop in InGaN-based light-emitting diodes[J]. *Materials*, 2017, 10(11): 1233.
- [4] HUNG P C, TSAO J Y. Maximum white luminous efficacy of radiation versus color rendering index and color temperature: exact results and a useful analytic expression[J]. *Journal of Display Technology*, 2013, 9(6): 405 – 412.
- [5] PETERS M, ROSSIN V, ACKLIN B. High-efficiency high-reliability laser diodes at JDS Uniphase[C]// *Proceedings of the 5711, High-Power Diode Laser Technology and Applications III*. San Jose: SPIE, 2005.
- [6] FEEZELL D, NAKAMURA S. Invention, development, and status of the blue light-emitting diode, the enabler of solid-state lighting[J]. *Comptes Rendus. Physique*, 2018, 19(3): 113 – 133.
- [7] WIERER J J, TSAO J Y, SIZOV D S. The potential of III-nitride laser diodes for solid-state lighting[J]. *Physica Status Solidi C*, 2014, 11(3/4): 674 – 677.
- [8] LACHMAYER R, WOLF A, KLOPPENBURG G. System efficiency of laser-based white light[J]. *Advanced Optical Technologies*, 2014, 3(5/6): 523 – 530.
- [9] NEUMANN A, WIERER J J, DAVIS W, et al. Four-color laser white illuminant demonstrating high color-rendering quality[J]. *Optics Express*, 2011, 19(S4): A982 – A990.
- [10] Manchester H. Light of hope—or Terror[J]. *Readers Digest*, 1963(2): 97 – 100.
- [11] PHILLIPS J M, COLTRIN M E, CRAWFORD M H, et al. Research challenges to ultra-efficient inorganic solid-state lighting[J]. *Laser & Photonics Review*, 2007, 1(4): 307 – 333.
- [12] YANG Y, ZHUANG S L, KAI B. High brightness laser-driven white emitter for Etendue-limited applications[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(30): 8321 – 8325.

(编辑: 李晓莉)