

基于双复眼透镜的三基色激光合成均匀白光束

帅词凤^{1,2} 尹韶云^{1*} 刘显明² 孙秀辉¹ 陈伟民² 杜春雷¹

¹中国科学院重庆绿色智能技术研究院集成光电技术研究中心, 重庆 400714

²重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044

摘要 为获得高亮度均匀白光束,基于复眼透镜光束匀化原理,设计了一套以三基色半导体激光器为光源的双复眼透镜光束匀化合成光学系统。该系统包含两套复眼透镜模组,第一套模组将分立三基色激光束聚焦合成均匀白光斑,第二套模组将白光斑转换为空间均匀白光束。对系统进行仿真,并对空间不同位置处的光分布进行照度和色度均匀性分析,结果表明所得光束为均匀白光束,理论上验证了该光学系统的可行性。搭建了实验光路,分别在距离系统1、2、5 m处对合成白光束进行测量,结果表明合成光束照度均匀性均大于90%,色坐标标准差均小于0.0027。该光学系统合成的白光束具有亮度高、色坐标和强度分布均匀等优势,有望在医用光疗、显示、车用照明等领域得到广泛应用。

关键词 激光光学; 激光照明; 光束匀化; 复眼透镜; 三基色激光

中图分类号 TN94

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0314002

Homogenized White Light Beam Generated by Red, Green and Blue Lasers Based on Double Fly-Eye Lens

Shuai Cifeng^{1,2} Yin Shaoyun¹ Liu Xianming² Sun Xiuhui¹ Chen Weimin² Du Chunlei¹

¹*Integrated Optoelectronic Technology Center, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China*

²*Key Laboratory of Opto-Electronic Technology and Systems of the Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China*

Abstract In order to obtain a uniform white light beam of high luminance, a kind of homogenized beam combination system is designed based on fly-eye lenses, and the light sources consist of red, green and blue semiconductor lasers. There are two fly-eye lenses modules in the optical path, the first one is used to generate a uniform white light spot, while the second one is used to transform the white light spot into a spatially uniform white beam. The optical tracing software is used to simulate the optical path, and the luminance and color uniformity of light distribution at different locations in space are analyzed. The simulation results show that a uniform white light beam is obtained, and the feasibility of the optical system is verified theoretically. The experimental facility is set up, and the color spectrometer is used to measure the combined white beam at the distances of 1, 2, and 5 m. The test results show that the illumination uniformity is greater than 90%, and the color coordinate standard deviation is less than 0.0027. The uniform white light beam combined by this optical path can be widely applied to medical phototherapy, display and automotive lighting, with the advantages of high luminance and uniformity in color coordinates and spatial intensity.

Key words laser optics; laser illumination; beam homogenization; fly-eye lens; red, green and blue lasers

OCIS codes 140.3330; 010.3310; 120.3620

收稿日期: 2015-09-05; 收到修改稿日期: 2015-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(61475199, 61275061)、重庆市科技攻关项目(cstc2015zdcy-ztxx70006)

作者简介: 帅词凤(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事照明光学设计方面的研究。E-mail: cifengshuai@cqu.edu.cn

导师简介: 刘显明(1984—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: xianming65@163.com

*通信联系人。E-mail: ysy@cigit.ac.cn

1 引 言

高亮度定向均匀照明广泛应用于医用光疗、三维测量、商业照明等领域^[1]。普通照明光一般是发散的,需经过复杂的配光结构才能实现定向均匀照明光束,而激光因其具有高亮度、方向性好的优点可以较好地实现定向照明。但激光是一种单波长光源,需要通过红绿蓝三基色光源合成均匀白光才可用于照明。限制三基色激光合成高亮度均匀白光的主要因素包括:1) 单色激光二极管单个功率通常较小,需要合束获得较大功率,合束问题难以解决;2) 三基色激光各自的光场分布及光度参数相差较大,导致合成白光色坐标不均匀;3) 激光光强分布为高斯分布,三基色激光合成白光仍为高斯分布,而非平顶分布均匀白光。

复眼透镜作为激光光束匀化常用的光学器件之一,可将不均匀宽光束转化为均匀光斑^[2-4]。通常分立光源经过一套复眼透镜模组可在某一特定平面获得均匀光斑,但离开该平面却呈现光斑分立状态。针对这一问题,本文根据复眼透镜的光束匀化原理,提出一种以三基色激光为光源的双复眼透镜光束匀化合成光学系统,获得空间照度、色坐标均匀性较好的白光束。

2 双复眼透镜光束匀化合成光学系统

2.1 复眼透镜光束匀化原理

复眼透镜,也称微透镜阵列,是由一系列完全相同的小透镜组合形成。如图1所示,一个完整的复眼透镜(FE)由前后两排完全相同的微透镜阵列(A1、A2)构成,间隔距离为小透镜的焦距 f ^[5]。基本的光束匀化系统由复眼透镜和聚焦透镜组成。其匀光原理为:第一列微透镜阵列(A1)将入射光束分割成一系列细光束,同时每个微透镜将发散角在其接收角范围内的子光束聚焦至第二列微透镜阵列(A2)相应位置的微透镜孔径上,A2与积分透镜(L)一起在目标面上产生A1中相应的子透镜口径的实像,L将这些子透镜口径的实像在其焦平面上进行会聚叠加,从而得到与微透镜口径形状完全相同的匀化光斑。根据复眼透镜光束匀化原理和系统结构参数,在积分透镜焦面处可得匀化光斑尺寸 s 为^[6]

$$s = \frac{F}{f} p \approx 2F \cdot NA, \quad (1)$$

式中 p 、 f 、 NA 分别为微透镜阵列中各个子透镜的孔径、焦距和数值孔径, F 为积分透镜的焦距。由(1)式可以看出,焦面处的光斑相当于由微透镜孔径 p 放大 F/f 倍得到,其形状与微透镜孔径一致。微透镜阵列有数值孔径限制,大发散角光束进入复眼透镜匀化系统前必须经过准直。

当矩形复眼透镜入射光为分立的三基色激光光束时,根据上述复眼透镜匀光机制可在焦面 P 处获得一个矩形均匀白光光斑,如图1所示。但随着光束离开焦面继续传播,再次出现三基色光束分离现象,原本均匀的白光光斑将变成不均匀三基色光束,在焦面 P 后方任意位置处设置探测面 P' , P' 光强分布为三基色分立光斑。因此,单一的复眼透镜匀化模组只能在某一特定平面得到均匀白色光斑,而不能在整个照明空间实现均匀白光束,导致其在实际照明应用中存在一定的局限性。

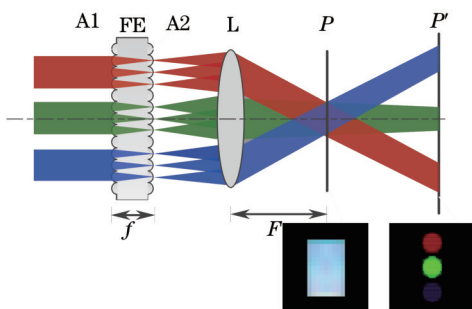


图1 复眼透镜匀光光路图

Fig.1 Optical path diagram of beam homogenization by a fly-eye lens

2.2 双复眼透镜光束匀化合成光学系统

由于单套复眼透镜组存在以上问题,为在整个空间实现均匀白光束,提出了双复眼透镜光束匀化合成光学系统,图2为三基色分立激光束经过由两套复眼透镜积分模组构成的光学系统示意图,即在上述复眼透镜

光束匀化系统中再加一套复眼透镜匀化模组(module B),第二套复眼透镜置于第一套复眼透镜模组(module A)焦面处。

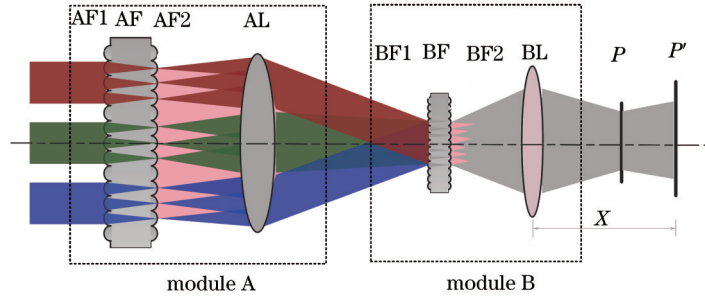


图2 双复眼透镜光束匀化合成光路结构

Fig.2 Optical diagram of beam homogenization by double fly-eye lenses

由上述分析可知,三基色分立光束经过 module A 后在积分透镜(AL)焦面处会聚形成均匀白光光斑,如图 1 所示。此时第二个复眼透镜(BF)入射光为白光光斑,即三基色激光束以不同角度均匀入射至相同微透镜区域,每个微透镜单元均有红绿蓝光入射,其光路如图 3 所示。当入射光角度 θ 小于最大接收角 θ_1 时,由于两微透镜之间距离等于微透镜焦距 f ,分割后的细光束均以接收角平行出射。如图 3 中第 n 级微透镜光路分析所示,三基色激光束经同一微透镜分割细化后以相同出射角 θ_1 平行出射。

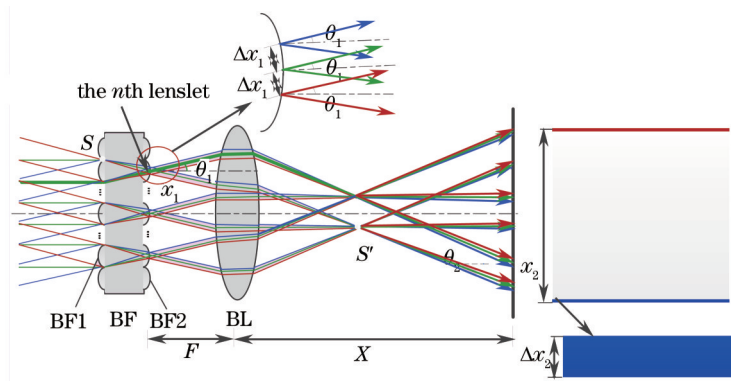


图3 第二套复眼透镜积分模组光路示意图

Fig.3 Optical diagram of the second fly-eye lens module

由复眼透镜光束匀化原理可知,在积分透镜焦面上可以得到均匀白光斑,下面主要针对远离焦面处的光斑情况进行研究。以绿光为例进行分析(图 2),设经复眼透镜分割后出射光束在第 n 级微透镜后表面位置为 x_1 ,角度为 θ_1 ,根据近轴矩阵光学 ABCD 定律^[7],在距离积分透镜 $X(X > F)$ 的面上有

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & F \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

计算得到

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - \frac{x_1}{F}x + F\theta_1 \\ -\frac{x_1}{F} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

以 BF 左侧入射面 BF1 上的 S 点为例,三基色光经(AF)和 AL 后到达 S 点的入射角度不同,从对应后排微透镜出射面 BF2 不同位置处以相同角度 θ_1 入射至积分透镜(BL),最后从 BL 以不同角度出射,会聚于焦面上 S' 点,焦面处光斑是每个微透镜的重叠像。经过焦面后,每束光的三基色光线间存在一定的角度向后传播,故在远处时会有一定的位置间距。以蓝光和绿光为例,设两种光线从微透镜表面出射时的间距为 Δx_1 ,则与 BL 距离 X 处的位置相差 $\Delta x_2 = \Delta x_1 - \frac{\Delta x_1}{F}x$,角度相差 $\Delta \theta_2 = -\frac{\Delta x_1}{F}$ 。在实际光路中, Δx_2 同时也是 X 处蓝光光斑与绿光光斑重叠时的位置间距, x_2 为 X 处光斑尺寸,则有

$$\frac{\Delta x_2}{x_2} = \frac{\Delta x_1 - \frac{\Delta x_1}{F} x}{x_1 - \frac{x_1}{F} x + F\theta_1}, \quad (4)$$

当探测面远离焦面($X \gg F$)时,对(4)式进行简化可得

$$\frac{\Delta x_2}{x_2} \approx \frac{\Delta x_1}{x_1}, \quad (5)$$

当所用微透镜尺寸为微米量级时,则 Δx_1 也是微米量级, x_1 是入射光斑尺寸,为厘米量级,二者相差较大, $\Delta x_2/x_2 \leq 0.001$ 。由于实际光路中,每个微透镜均在 S' 处发出不同角度的三基色光线,所有光线在由两边缘微透镜出射的光线构成的范围 x_2 内重叠,非重叠区域仅为 Δx_2 ,而 Δx_2 相对整个光斑区域宽度 x_2 可忽略不计,所以可得到近似均匀的白光光斑。通过以上分析可得,三基色激光束经双复眼透镜光束匀化合成系统后可在空间任意位置得到近似均匀的白光光斑,即实现了均匀白光光束。

2.3 仿真分析

针对实际三基色激光光源设计双复眼透镜光束匀化合成光路,利用光学软件对整体光学系统进行仿真。在系统结构中,对三基色激光束先进行准直使其发散角符合FE1数值孔径要求,以免在AL焦面处产生旁瓣^[8],准直后光源参数如表1所示。复眼透镜设计时应使AF数值孔径小于BF数值孔径,同时AL应尽可能选择长焦设计以减小小焦面上白光光斑发散角,使得入射光束发散角满足BF数值孔径。仿真结构中各透镜参数如表2所示,透镜材料均为BK7。当入射光为三基色分立激光光束时,经双复眼透镜光学系统匀化合成后在不同位置处设置探测面。图4为不同位置探测面的光斑照度分布,图4(a1)~(c1)为每个位置处的照度分布图,图4(a2)~(c2)为对应的真彩色图。由于系统中使用的透镜并非理想透镜,存在一定的像差和球差,会导致光斑边缘出现不锐利现象。当距离为1 m时,其照度均匀度和合光效果较好。当探测屏位于5 m处

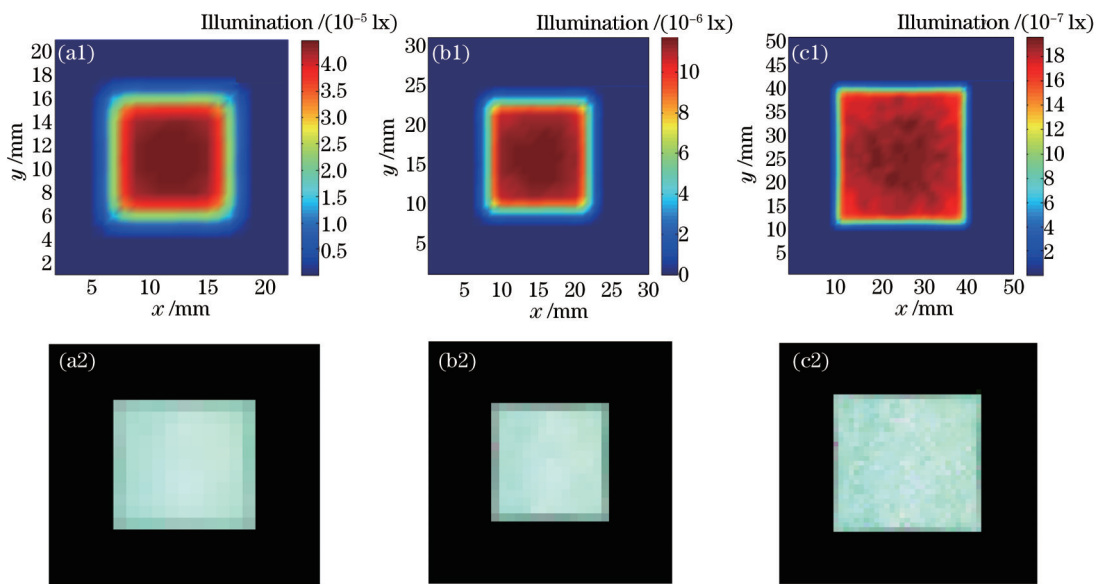


图4 不同位置处探测屏光斑照度分布。(a) $d=1$ m; (b) $d=2$ m; (c) $d=5$ m

Fig.4 Spot illumination distributions at different positions. (a) $d=1$ m; (b) $d=2$ m; (c) $d=5$ m

表1 三基色光源准直后的光参数

Table 1 Parameters of tricolor lasers after alignment

Color	Wavelength/nm	Divergence /($^\circ$)	
		$\theta_{//}$	θ_{\perp}
R	635	3	1.0
G	520	3	1.5
B	445	2	0.5

表2 透镜参数(单位:毫米)

Table 2 Lens parameters (unit:mm)

	X	Y	Thickness	Radius of curvature	Focal length	Row× column	Aperture D
	Half-weight	Half-weight	H	R	F		
AF	1.2	1.2	24	8	16	48×48	-
BF	0.81	0.54	14.7	4.9	9.8	24.3×22.68	-
AL	-	-	10	0,-40	77	-	48
BL	-	-	7	+65,-65	63	-	60

时,仍然未出现三基色光斑分立现象[见图4(c)],但随着光束传播距离增大、照度降低、分区数增多,每个分区接收的光线数量减少,故各个像点之间接收的光线重合度降低,即三基色光线之间会存在一定的偏离。

为了对所得光束进行均匀性评价,对仿真结果进行数据处理,对各处光斑进行照度及色坐标均匀性分析,定义如下参数^[9-11]。某分区照度均匀度为

$$\Delta E' = \frac{\bar{E} - E_i}{\bar{E}}, \quad (6)$$

光斑照度均匀性为

$$E = \frac{S_c}{S}, \quad (7)$$

色坐标转换公式为

$$u' = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}, \quad v' = \frac{9y}{-2x + 12y + 3}, \quad (8)$$

两种颜色的色相差为

$$\Delta V_{uv} = \sqrt{(u'_1 - u'_2)^2 + (v'_1 - v'_2)^2}, \quad (9)$$

式中 E_i 表示接收屏光斑上某一点的光照强度, \bar{E} 表示照明区域各点照度的平均值, S 表示照明区域光斑总面积, S_c 表示光斑内 $-0.05 \leq \Delta E' \leq 0.5$ 区域的面积。根据复眼透镜照明系统均匀性指标 $\Delta E'$ 一般控制在 $\pm 5\%$ 以内的准则^[8-10], 将 $|\Delta E'| \leq 0.05$ 的区域面积定义为均匀光区域, 即光斑的均匀部分。在同一光斑内, $\Delta E'$ 越小表示该处均匀度越高, E 越大表示该矩形光斑内光能分布的均匀性越好。根据各点的三个刺激值计算各分区色坐标, 同时根据(8)式色坐标转换公式, 将 CIE1931 色坐标转换为 CIE1976LUV 均匀色度坐标系, 两种颜色的色相差可以直接用其色坐标的距离 ΔV_{uv} 来表示。目前以激光作为照明光源还没有国际照明委员会(CIE)标准及国家标准, 取荧光灯的允许色差标准^[13], 当色坐标满足 $\Delta V_{uv} \leq 0.03$ 时表示色彩一致, 按色坐标加权公式计算平均色坐标 (\bar{u}, \bar{v}) , 将各测点色坐标与平均色坐标代入(9)式计算可得该测点色相差 ΔV_{uv} , 即该测点的色坐标均匀度 $\Delta U'$, 取其中满足 $\Delta V_{uv} \leq 0.03$ 区域的面积与照明区域面积比值作为色度均匀性指标 U 。选取 1 m、5 m 处仿真结果进行均匀性分析, 对 1 m 处照明光斑进行 19×19 分区, 5 m 处光斑进行 39×39 分区, 计算各分区单元格内的照度和色坐标均匀度, 从而得出整个光斑的照度及色度均匀性。

图 5 为 1 m 和 5 m 处照度归一化三维图, 图 5(a) 为 1 m 处光斑, 从图中可见照明区域内各分区归一化值均在 0.9 左右, 图 5(b) 为 5 m 处光斑, 归一化值在 0.8 左右。1 m 处光斑均匀照明区域为 $133 \text{ mm} \times 133 \text{ mm}$ 方形光斑, 运用(6)式计算各分区均匀度, 其中满足 $|\Delta E'| \leq 0.05$ 的区域面积为 16981 mm^2 , 根据(7)式求得光斑均匀性系数为 0.958, 即均匀部分占总照明区域的 95.8%。同理, 求得 5 m 处光斑均匀照明区域为 $665 \text{ mm} \times 665 \text{ mm}$, $S_c = 4.1 \times 10^5 \text{ mm}^2$, $E = 0.926$ 。

图 6 为 1 m、5 m 处光斑各分区色坐标在 CIE1976LUV 均匀色空间上的分布, 从均匀色空间坐标分布可看出, 大部分色坐标在中心白点(0.2095, 0.4714)附近, 只有少数分区色坐标偏离, 且 1 m 处光斑色坐标分布较 5 m 处光斑色坐标分布更为集中。计算两处均匀照明区域平均色坐标并运用(9)式求得各分区色相差, 再根据满足 $\Delta V_{uv} \leq 0.03$ 区域面积与总照明面积之比得到: 1 m 处 $U_1 = 0.98$; 5 m 处 $U_2 = 0.94$ 。由计算结果可得两处白光光斑色度均匀性均较高, 即同一光斑内分区之间的色差人眼基本无法分辨。

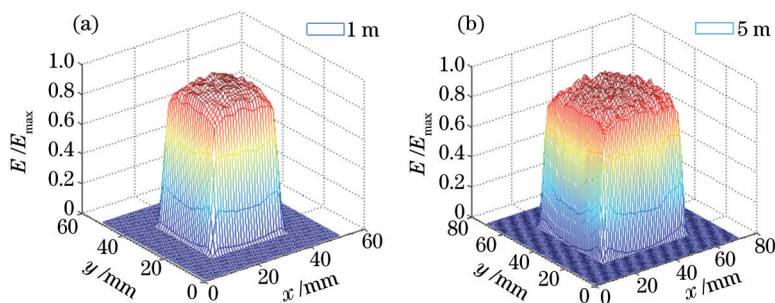


图 5 照度归一化三维图。(a) $d=1$ m; (b) $d=5$ m

Fig.5 3D graphs of normalized illumination. (a) $d=1$ m; (b) $d=5$ m

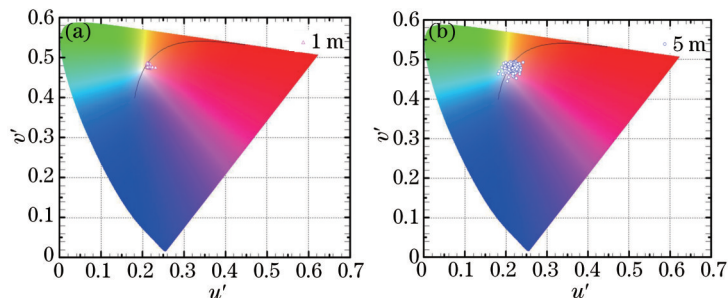


图 6 各分区 1976LUV 均匀色空间坐标。(a) $d=1$ m; (b) $d=5$ m

Fig.6 Color coordinates of each partition in the 1976LUV color space. (a) $d=1$ m; (b) $d=5$ m

3 实验与结果讨论

对复眼透镜光束匀化合成光学系统进行实验验证,搭建了如图 7 所示实验光路。实验所用透镜与仿真中使用参数相同,其中三基色光源经准直后光学参数如表 2 所示。图 8 为实验结果,其中图 8(a)为激光经过一套复眼透镜模组焦面后 1 m 处光斑图,图中显示三基色分离状态。图 8(b)~(d)分别为距双复眼透镜模组后焦面 1、2、5 m 处光斑图,从照明效果可以看出三基色光束合成效果较好,光斑均匀度较高,且光斑形状清晰。

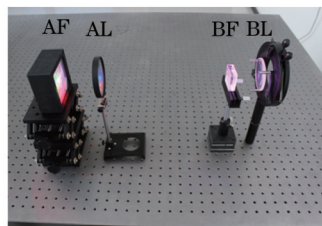


图 7 实验装置图

Fig.7 Photograph of the experimental setup

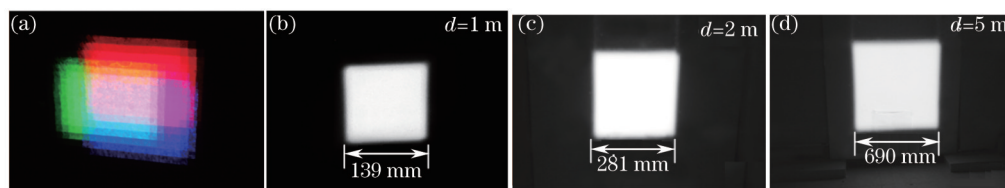


图 8 实验结果图。(a) 光源经一套复眼透镜模组焦面后 1 m 处光斑分布;
(b) (c) (d) 光源经双复眼透镜模组后距焦面分别为 1、2、5 m 处的光斑分布

Fig.8 Experimental results. (a) Spot distribution at the position of $d=1$ m when the beam propagates through one fly-eye lens module;
(b) (c) (d) spot distributions at the positions of $d=1, 2, 5$ m when the beam propagates through two fly-eye lens modules

由于实际测量过程中无法对光斑精细分区,故采用美国国家标准局(ANSI)标准九点法评价照明光斑的均匀性,分别对三个位置处方形光斑进行 9 点色坐标和照度测试^[12],以判断白光矩形光束在传输空间的均匀

性。实验中采用远方SPIC-200进行光度参数测试,各处色坐标测试结果如图9所示。从图9中3个位置处9点色坐标在CIE1976LUV均匀色空间整体图的分布可以看出,所有点色坐标分布比较密集,即色坐标均匀度较好。从各位置处的9点色坐标在CIE1976局部色品图分布可以看出不同距离处的各点色坐标也存在一定的离散性,且 d 越大色坐标分布越离散。根据(9)式求得同一光斑内各测点与平均色坐标色相差 ΔV_{uv} ,如表3所示,可知各处光斑测点均满足 $\Delta V_{uv} \leq 3 \times 10^{-2}$,说明同一光斑色彩一致性较高。

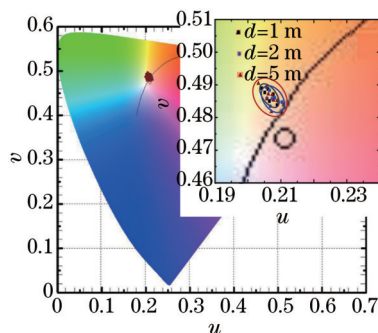


图9 不同位置处色坐标分布

Fig.9 Color coordinate distribution at different positions

表3 各位置处9点色坐标与平均色坐标的偏差 ΔV_{uv}

Table 3 Deviation between 9-point color coordinates and mean color coordinates at different positions

d/m	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.002	0.0008	0.0015	0.0009	0.0005	0.0006	0.0006	0.0007	0.0004
2	0.0003	0.0003	0.001	0.002	0.0009	0.002	0.0016	0.001	0.0009
5	0.0003	0.0006	0.0014	0.0026	0.0016	0.0006	0.0022	0.0001	0.0006

标准差也能体现9点色坐标离散性。表4为3个位置处9点色坐标标准差和照度均匀性。从表中数据可以得出, d 越小,标准差越小,色坐标分布相对集中。当 $d=1\text{ m}$ 时标准差最小,说明其色坐标均匀度最好。实验过程中对方形光斑照度也进行测试,从表4中可以看出光斑在各处的照度均匀性均高于0.9。从仿真和实验结果来看,仿真中1 m处照度均匀性为0.96,色度均匀性为0.98,与实验结果基本吻合。

表4 各位置处9点色坐标标准差及照度均匀性

Table 4 Standard deviation and illumination uniformity of 9-point color coordinates at different positions

d/m	1	2	5
Standard deviation	0.0023	0.0025	0.0027
Illumination uniformity /%	94	93.74	90

4 结 论

提出的双复眼透镜光束匀化合成光学系统能够实现将红绿蓝三基色激光匀化合成成为色坐标均匀性以及照度均匀性均较好的高亮度白光束。采用彩色光谱仪分别在距系统1、2、5m处对合成白光束进行测试,测试结果表明,合成光束照度均匀性均大于90%,且色坐标标准差均小于0.0027。由于光束匀化合成主要通过复眼透镜完成,与其他合束装置受功率和结构影响不同,因此可在光源端任意增加激光器数量即可实现大功率,同时所得白光束光谱可调。该光学系统合成的均匀白光束具有亮度高、色坐标和强度空间分布均匀、显色性好等优势,有望在医用光疗、显示、车用照明等领域得到广泛应用。

参 考 文 献

- 1 Kim Y, Pack J H, Min S W, *et al.*. Wide-viewing-angle integral three-dimensional imaging system by curving a screen and a lens array [J]. Applied Optics, 2005, 44(4): 546-552.
- 2 Liu Hong, Wang Weisheng, Zheng Jian. Design of fly-eye lens for laser display[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(8): 089002.

- 刘 红, 王蔚生, 郑 健. 激光显示照明光路中复眼透镜的设计[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(8): 089002.
- 3 Hadrath S. Methods for color mixing[C]. SPIE, 2011, 8170: 81700Q.
- 4 Zhou Ping, Lu Wei, Lin Yuxiang, *et al.*. Fly eye lens array used in liquid crystal projection display with high light efficiency[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(5): 587-591.
- 周 平, 陆 巍, 林宇翔, 等. 复眼透镜提高液晶投影照明系统的能量利用率[J]. 光学学报, 2004, 24(5): 587-591.
- 5 Lei Chengqiang, Wang Yuefeng, Yin Zhiyong, *et al.*. Homogenization system for diode laser stack beams based on microlens array[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0502009.
- 雷呈强, 汪岳峰, 殷智勇, 等. 基于微透镜阵列的半导体激光器堆栈匀化系统[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0502009.
- 6 Lei Chengqiang, Wang Yuefeng, Yin Zhiyong, *et al.*. High homogenization diode laser stack beam shaping system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s1): s104005.
- 雷呈强, 汪岳峰, 殷智勇, 等. 高均匀性半导体激光器堆栈匀化系统[J]. 光学学报, 2015, 35(s1): s104005.
- 7 Schreiber S, Kudaev S, Dannberg P, *et al.*. Homogeneous LED-illumination using microlens arrays[C]. SPIE, 2005, 5942: 59420K.
- 8 Kuang Lijuan, Huo Jinhui, Ruan Yu, *et al.*. Characteristics of fly-eye lens in uniform illumination system[J]. Optics and Optoelectronic Technology, 2005, 3(6): 29-31.
- 匡丽娟, 霍金会, 阮 玉, 等. 复眼透镜阵列应用于均匀照明系统的特性研究[J]. 光学与光电技术, 2005, 3(6): 29-31.
- 9 Wang Peipei, Yang Xibin, Zhu Jianfeng, *et al.*. Design and analysis on large area uniform illumination with fly-eye lens[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(5): 771-778.
- 王沛沛, 杨西斌, 朱剑锋, 等. 基于复眼透镜的大面积均匀照明方案研究[J]. 应用光学, 2014, 35(5): 771-778.
- 10 Zhou Shuwen, Lin Jinbo. Uniformity of the illuminative system with fly's eye lens[J]. Journal of Zhejiang University, 1986, 20(5): 130-136.
- 周淑文, 林金波. 复眼透镜照明系统的均匀性[J]. 浙江大学学报, 1986, 20(5): 130-136.
- 11 Zeng Shanshan, Liu Jian, Lu Ligen, *et al.*. Experimental research on improving uniformity of fiber-optical irradiation device[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0422004.
- 曾珊珊, 刘 建, 卢利根, 等. 改善光纤照射装置均匀性的实验研究[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0422004.
- 12 Lü Fei. Uniformity Calibration of LED Panel Based on Color Mixing Theory[D]. Xi'an: Xidian University, 2013: 16-22.
- 吕 斐. 基于混色理论的LED显示屏均匀性校正方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013: 16-22.
- 13 Li Xilin. The chroma uniformity and fidelity of the LED display[J]. Advanced Display, 2006, (6): 9-15.
- 李熹霖. LED显示屏的色度均匀性和色保真度[J]. 现代显示, 2006, (6): 9-15.

栏目编辑: 宋梅梅