光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250430004

高空间色温均匀性的激光前照灯白光光源

谢彤彤[1,2]，单映霞[1,2]，王　洪[1,2,3*]

（1. 华南理工大学 广东省光电工程技术研究开发中心，广州 510640；2. 华南理工大学 物理与光电学院，广州 510640；
3. 中山市华南理工大学现代产业技术研究院，广东 中山 528437）

摘　要： 激光光束的高方向性导致其激发荧光粉产生的蓝光和黄光在空间强度分布上存在明显差异，从而显著降低了光源的空间色温均匀性。针对这一问题，文章提出一种基于微透镜阵列匀化系统和微结构荧光粉层的激光白光光源。该方案通过改变蓝光的空间强度分布，实现蓝光和黄光的均匀混合。测试结果表明，该光源的角色温偏差为630 K，相比传统的激光直接聚焦于荧光粉层表面的激光白光光源和仅采用微透镜阵列匀化系统的激光白光光源分别降低了10 170 K和1 070 K。此外，该光源的光通量为1 458 lm，发光效率达138 lm/W，相对色温为5 226 K，显色指数为71.1，满足汽车前照灯光源的标准要求。

关键词： 激光二极管；白光光源；空间色温均匀性；汽车前照灯

中图分类号： TN248.4　**文章编号：** 1001－5868(2025)04－0616－08

White Light Source with High CCT Uniformity for Laser Headlight

XIE Tongtong[1,2], SHAN Yingxia[1,2], WANG Hong[1,2,3]

(1. Engineering Research Center for Optoelectronics of Guangdong Province, South China University of Technology, Guangzhou 510640, CHN; 2. School of Physics and Optoelectronics, South China University of Technology, Guangzhou 510640, CHN; 3. Zhongshan Institute of Moderm Industrial Technology, South China University of Technology, Zhongshan 528437, CHN)

Abstract: The laser beam has high directionality, which results in a mismatch between the spatial intensity distribution of blue and yellow lights produced by its excitation of phosphor, and leads to poor CCT uniformity. To address this issue, we propose a laser-diode-based white light source incorporating a microlens array-homogenized microstructure phosphor system (MLA-HMPS). It achieves uniform mixing of blue and yellow light by changing the spatial intensity distribution of the blue light. The experimental results show that the CCT deviation of a white light source with the proposed MLA-HMPS is 630 K. Compared with corresponding deviations with a direct laser planar phosphor system and microlens array homogenized planar phosphor system, this value is lower by 10 170 and 1 070 K, respectively. The white light source exhibits a luminous flux of 1 458 lm, an efficiency of 138 lm/W, a CCT of 5 226 K, and a color rendering index of 71.1, thereby meeting the application requirements of automotive headlights.

Key words: laser diode; white light source; CCT uniformity; automotive headlight

收稿日期：2025－04－30.

基金项目：广东省重点领域研发计划重大项目(2020B010171001)；中山市科技发展专项资金重大项目(2023A4002).

*通信作者：王　洪

0　引言

近年来，LED光源凭借其光效高、寿命长等优势被应用于汽车前照灯[1-2]。然而，在高功率密度的驱动条件下，LED电光转化效率会迅速下降，限制了其更高光通量的输出[3]。而激光二极管作为另一种半导体发光器件，在高功率密度驱动条件下仍能维持较高电光转换效率，有利于实现大功率、高亮度照明，在汽车前照灯应用中展现出巨大潜力[4-6]。

目前，激光白光光源大多采用蓝色激光远程激发黄色荧光粉层的方式来产生白光。然而，激光光束具有高方向性，且其中心能量密度极高，导致激光白光光源出射的蓝光和黄光在空间强度分布上存在明显差异，严重降低了光源的空间色温均匀性[7]。在汽车前照灯的实际使用过程中，空间色温分布不均匀不仅会导致人眼视觉不适，甚至对驾驶员的夜间行车安全造成严重影响[8]。为了促进激光白光光源的广泛应用，国内外许多研究人员通过制备荧光陶瓷、荧光玻璃以及发光单晶等新型荧光转换材料来增强荧光粉层对蓝光的吸收，有效改善了光源的空间色温均匀性[9-11]。然而，新型荧光转换材料的制备工艺复杂、成本较高且其材料性能易受环境因素影响。另一种提高光源空间色温均匀性的方式是通过光学元件设计来实现蓝光和黄光的均匀混合。例如，Ma等[12]提出一种二次光学系统，实现蓝光和黄光强度分布的匹配，在小发散角下获得了空间颜色均匀性（ACU）为0.85的均匀白光照明。但小发散角光源并不适用于汽车前照灯的光学系统，这是由于此类光源发出的光线高度集中，极大限制了透镜或反射器设计灵活性，增加了前照灯光学系统设计的复杂程度[13-14]。因此，为提高汽车前照灯的照明质量和行车安全性，需开发具有高色温均匀性且适用于汽车前照灯的激光白光光源。

本文提出一种基于微透镜阵列匀化系统和微结构荧光粉层的激光白光光源。利用微透镜阵列匀化系统对激光进行匀化，解决激光中心能量密度过高的问题。并通过微结构荧光粉层进一步改变激光的空间强度分布，实现蓝光和黄光的均匀混合，从而提高光源的空间色温均匀性。测试结果表明，该光源的ACU为0.89，角色温偏差仅为630 K，同时，该光源结构紧凑，光束发散角控制在±60°范围以内，其光通量为1 458 lm，发光效率为138 lm/W，色温为5 226 K，显色指数为71.1，满足汽车前照灯光源的标准要求。

1　光源工作原理

基于微透镜阵列匀化系统和微结构荧光粉层的激光白光光源的工作原理如图1所示。该光源采用三个输出光功率为3.5 W的半导体激光二极管作为激发源，以保证有足够的光通量。激光二极管所发出的光束首先经过准直透镜准直后入射到转向棱镜的斜面上，转向棱镜的两个斜面均镀有反射膜，能够减小光束间距。接着，准直激光光束经过由微透镜阵列和聚焦透镜组成的匀化系统后，在荧光粉层下表面形成均匀能量分布。其中，荧光粉层下表面构造有棱锥微结构阵列，用于增大激光光束的发散角。激光光束进入荧光粉层后，部分激光与荧光粉相互作用并转换出黄光，剩余的激光则与黄光混合形成白光出射。最后，荧光粉层的出射光经过自由曲面反射器进行反射，将发散角控制在±60°范围以内。

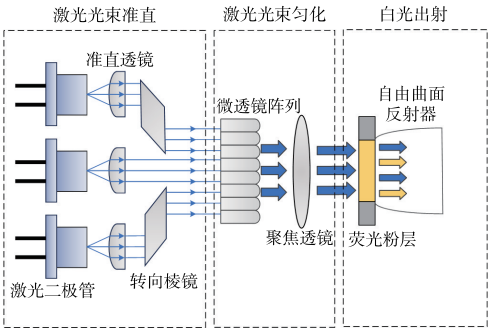


图1　激光白光光源工作原理图

2　主要光学元件设计

2.1　准直透镜设计

如图2所示，激光二极管发射出的光束呈高斯分布，其能量主要集中于中心区域。同时，激光光束存在非对称发散的特点，其快轴方向发散角为49°，慢轴方向发散角为9°。而微透镜阵列对入射光的准直性有很高要求，非准直入射光束在各子透镜表面会存在入射角度偏差，导致子透镜出射光在目标面上的叠加光斑出现位置偏移以及尺寸变化的问题。因此，在激光进入匀化系统之前需要设计准直透镜对激光光束进行准直处理。

图3（a）展示了激光在准直透镜中的光路示意图。入射光线从O点发出，其方向向量用$\boldsymbol{I}=(\sin\theta,\cos\theta)$表示，经过透镜折射后，出射光线均变为准直光线，其方向向量可表示为$\boldsymbol{O}=(0,1)$。将自由

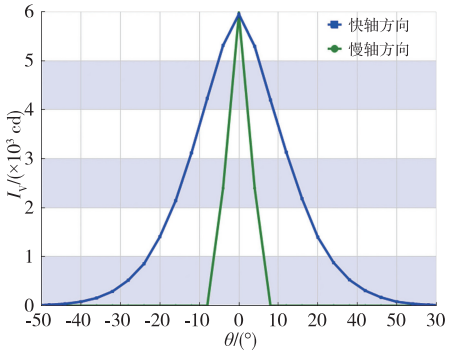
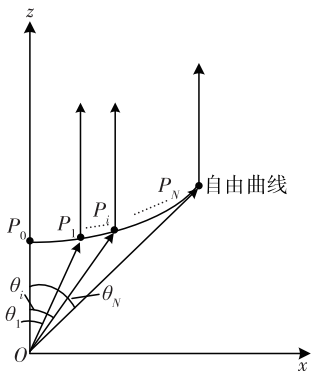


图2 自然空间中激光光束的空间强度分布

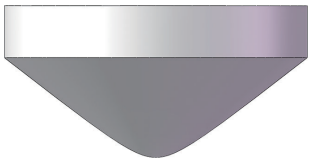
曲线上各点坐标表示为$P_i=(x_i,z_i)$，并设定初始点$P_0=(0,z_0)$的位置，根据折射定律矢量形式可以求得初始曲线上各离散点的法向量：

$$N=\frac{n_o O-n_{in} I}{\left| n_o O-n_{in} I \right|} \tag{1}$$

式中，n_{in}和n_o分别为入射光线和出射光线所在空间介质的折射率。各离散点坐标可通过法向量迭代法计算得到[15]，将离散点组成的自由曲线绕光轴旋转一周，可获得如图3(b)的准直透镜结构。



(a) 激光光路传播示意图



(b) 三维结构图

图3 准直透镜设计原理及三维结构图

利用光学仿真软件Lighttools对透镜的准直效果进行仿真分析，结果如图4所示。激光经过准直透镜后，其快慢轴发散角均为3°，大部分光能集中在1.5°以内，满足微透镜阵列的设计需求。

2.2 微透镜阵列设计

微透镜阵列是该激光白光光源中的关键光学元件，其设计旨在解决激光中心能量密度过高的问题。从图4可知，激光经过准直后，其能量仍高度集中于光束中心区域，而在微透镜阵列匀化系统中，每个子透镜单元仅针对入射光束局部小范围内的光能进行采样。由于子透镜尺寸远小于入射光束的光斑大小，该局部区域内的光能分布可近似视为均匀。各子透镜将入射光束分割为多个能量分布近似均匀的子光束，这些子光束经过聚焦透镜折射后会在目标面上叠加，最终实现激光光束的匀化，如图5所示。

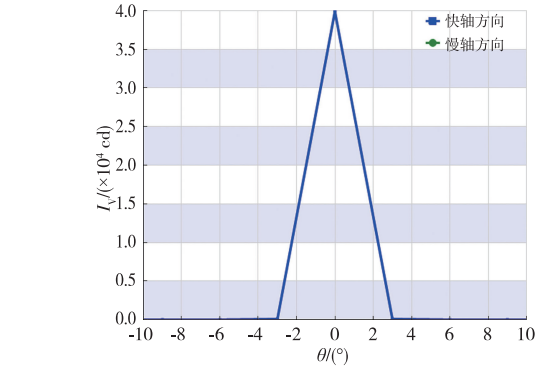


图4 准直激光的空间强度分布

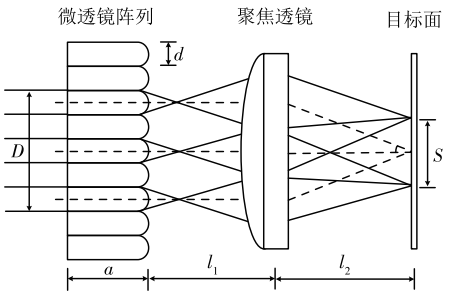


图5 微透镜阵列匀化原理示意图

微透镜阵列的设计方法如下。首先，将子透镜入射面和目标面分别划分为$M\times M$个面积相等的网格。然后，根据能量映射关系建立入射面和目标面上网格坐标的对应关系，如图6所示，入射面上点(d_i,d_j)与目标面上点(t_i,t_j)相对应，其关系满足：

$$E_0 d_i d=E_S t_i S \tag{2}$$

$$E_0 d_j d=E_S t_j S \tag{3}$$

式中，E_0和E_S分别为入射面和目标面的平均照度，d为子透镜的口径大小，S为目标面的宽度。

将入射光线的方向向量表示为(0,0,1)，出射光线的方向向量表示为$(t_i-d_i,\ t_j-d_j,\ h)$，设定子透镜出射面的中心位置为初始点，根据公式(1)和法向量迭代法可求得出射面上各离散点的位置。将离散点进行拟合并生成子透镜，通过将子透镜进行

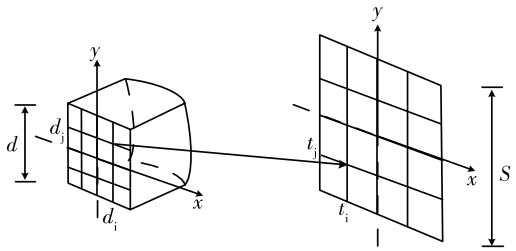
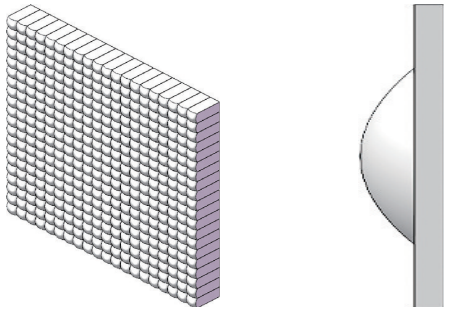


图 6　子透镜入射面与目标面的映射关系

阵列就可以得到图 7(a)所示的微透镜阵列。最后，聚焦透镜的曲率半径 R 可以由光线的几何传播关系计算得到：

$$R=(n-1)\frac{D-d}{2\tan u} \tag{4}$$

式中，n 表示透镜的折射率，D 为入射光束的通光孔径，u 为目标面的孔径角。计算得到聚焦透镜的曲率半径 R 为 5.865 mm，其结构如图 7(b)所示。



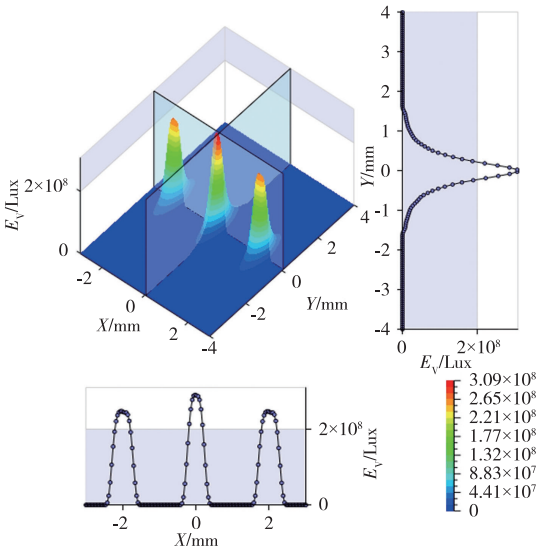
(a) 微透镜阵列　　(b) 聚焦透镜

图 7　三维结构图

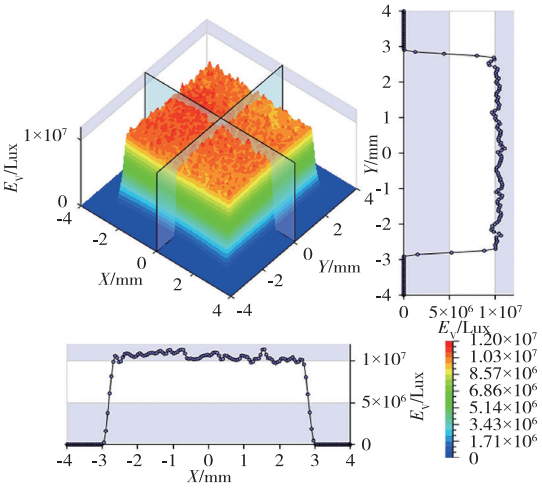
将上述透镜导入 Lighttools 中，并对荧光粉层表面的照度分布进行仿真分析。图 8(a)展示了传统采用准直激光直接聚焦于荧光粉层表面的照度分布图，三束激光在荧光粉层表面的照度峰值均集中于光斑中心区域，说明光斑中心存在极高的能量密度，不利于荧光粉的均匀激发。相较之下，激光经过微透镜阵列匀化后，如图 8(b)所示，在荧光粉层表面呈现近似平顶的照度分布，激光能量得以均匀分布于荧光粉层入射面区域。将照度均匀度表示为 U，可得：

$$U=\left[1-\frac{\max|E_i-E_a|}{E_a}\right]\times 100\% \tag{5}$$

式中，E_a 为目标面的平均照度，E_i 为第 i 个采样区域的最大或最小照度值。通过该公式，计算得到激光经过匀化系统后在荧光粉层表面的照度均匀度为 88.5%，说明所设计的微透镜阵列匀化系统具有良好的匀化效果。



(a) 准直激光直接入射



(b) 激光经过微透镜阵列匀化

图 8　荧光粉层表面照度分布图

2.3　微结构荧光粉层设计

在经过微透镜阵列匀化处理后，激光中心能量密度过高的问题得以有效解决。然而，激光仍具有较小发散角，与黄光的空间强度分布还存在较大差异。为了提高光源颜色质量，在荧光粉层入射面构造了棱锥微结构阵列，如图 9 所示。根据上述仿真结果，可以确定入射激光的发散角 θ_0 为 15°，设定最大出射光角度 θ_{max} 为 60°，则棱锥微结构的角度 α 可根据光线的几何传播关系计算得到：

$$\begin{cases} n\sin\theta_1=\sin(\alpha-\theta_0) \\ n\sin\theta_2=\sin\theta_{max} \end{cases} \tag{6}$$

在 Lighttools 中建立荧光粉层薄板，并利用软件自带的三维纹理在其下表面构造棱锥微结构。其中，棱锥微结构的角度 α 由公式(6)计算得到为

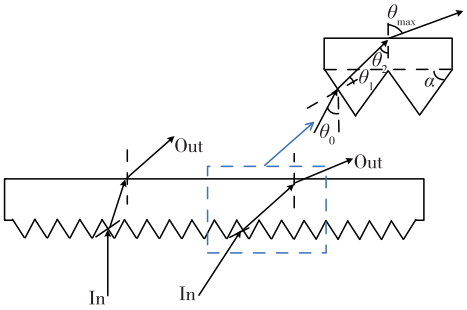
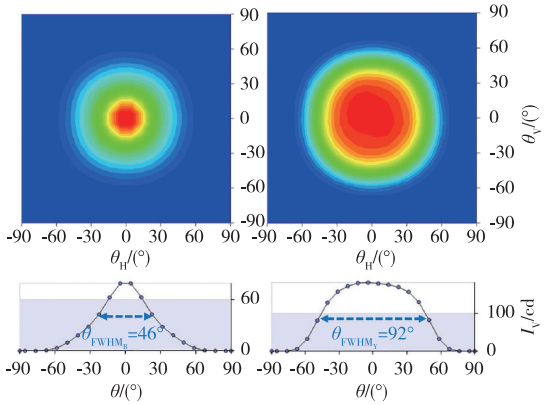
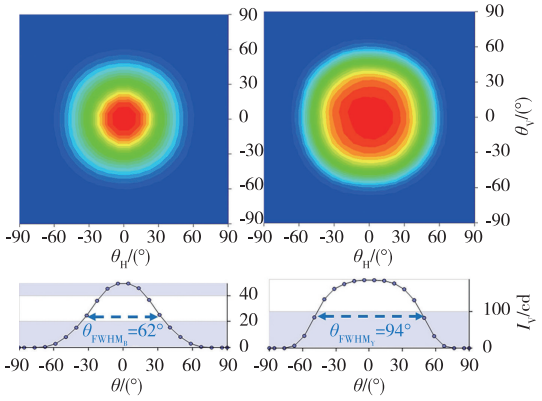


图 9 荧光粉层中激光光路传播示意图

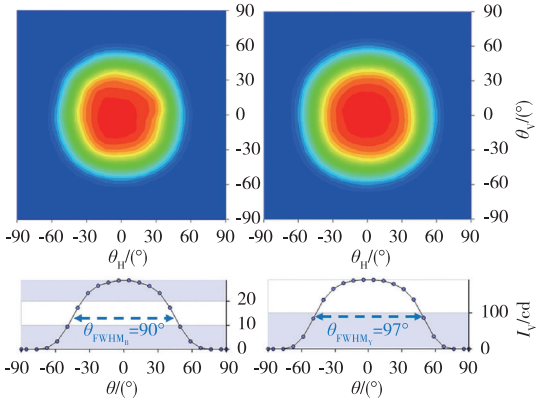
61.5°。为了验证微透镜阵列和微结构荧光粉层对激光白光光源出射蓝光和黄光空间强度分布的影响，在仿真软件中，分别对以下三种光学系统中蓝光和黄光的空间强度分布进行仿真分析：① 激光直接聚焦于光滑荧光粉层表面的光学系统，将其命名为 DL-PPS；② 激光经过微透镜阵列匀化后，入射到光滑荧光粉层表面的光学系统，命名为 MLA-HPPS；③ 激光经过微透镜阵列匀化后，入射到微结构荧光粉层的光学系统，命名为 MLA-HMPS。从图 10 可以看出，在 DL-PPS 中，黄光的半峰全宽（FWHM）发散角为 92°，而蓝光仅为 46°，说明采用激光聚焦于荧光粉层的方式会导致蓝光和黄光显著分离。在 MLA-HPPS 中，蓝光的空间强度分布有一定改善，但其 FWHM 发散角为 62°，与黄光仍存在一定差异，这是由于微透镜阵列虽能够解决蓝光中心能量过高的问题，但匀化后的蓝光仍具有较小发散角，在空间中与黄光的强度分布仍存在差异。而在 MLA-HMPS 中，蓝光的 FWHM 发散角为 90°，实现了与黄光空间强度分布高度匹配。该结果表明，微结构荧光粉层能够有效改变激光在光学系统中的传播路径，进一步增大出射蓝光的空间强度分布，实现蓝光和黄光的均匀混合。



（a）DL-PPS



（b）MLA-HPPS



（c）MLA-HMPS

图 10 激光白光光源出射蓝光（左）和黄光（右）的空间强度分布图

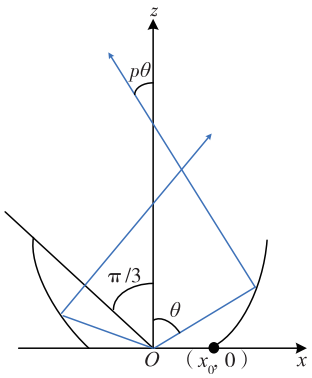
2.4 自由曲面反射器设计

在汽车前照灯光学系统设计中，光源发出的白光通常只有±60°范围内的光线能被有效利用[16]，而荧光粉层出射光一般呈朗伯分布。为了提高光线利用率，设计了自由曲面反射器来减小光源的出光发散角，其设计原理如图 11(a)所示。光线从 O 点以角度 θ 发出，经自由曲面反射器反射后，以角度 $p\theta$ 出射，其中 p 表示出射光和入射光的角度之比。将最大出射光角度设置为 60°，给定初始点坐标 $(x_0,0)$ 后，其法向量可由反射定律矢量形式计算得到：

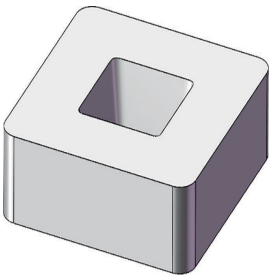
$$N=\frac{O-I}{|O-I|} \tag{7}$$

式中，I 为入射向量，O 为经自由曲面反射后的出射向量。

获得初始点的法向量后，初始曲线上各点坐标可通过法向量迭代法计算得到。将初始曲线分别沿水平和垂直方向进行平移，便可得到自由曲面反射器，如图 11(b)所示。



(a) 激光光路传播示意图



(b) 三维结构图

图 11　自由曲面反射器设计原理及三维结构图

对光学系统中出射白光的空间强度进行仿真分析，其结果如图 12 所示，光学系统的出光发散角控制在±60°范围以内，验证了所设计结构的可行性。

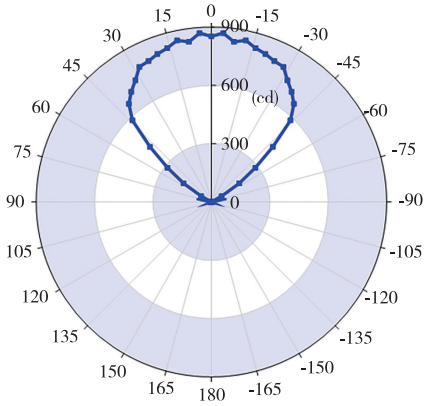


图 12　空间强度分布曲线

3　测试及结果分析

根据所设计的光学结构，组装了激光白光光源的实物模型进行实际光学性能测试，其结构如图 13 所示。其中，透镜材料均为 PMMA，反射器材料为铝合金，表面镀有高反射式膜，荧光粉层由硅胶和 YAG 荧光粉混合而成，激光二极管总输出光功率为 10.5 W。

首先，分别对基于 DL-PPS，MLA-HPPS 以及

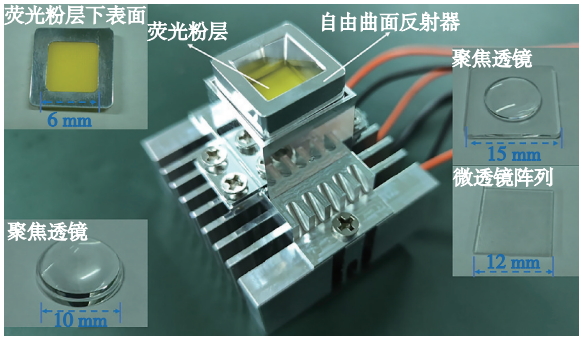
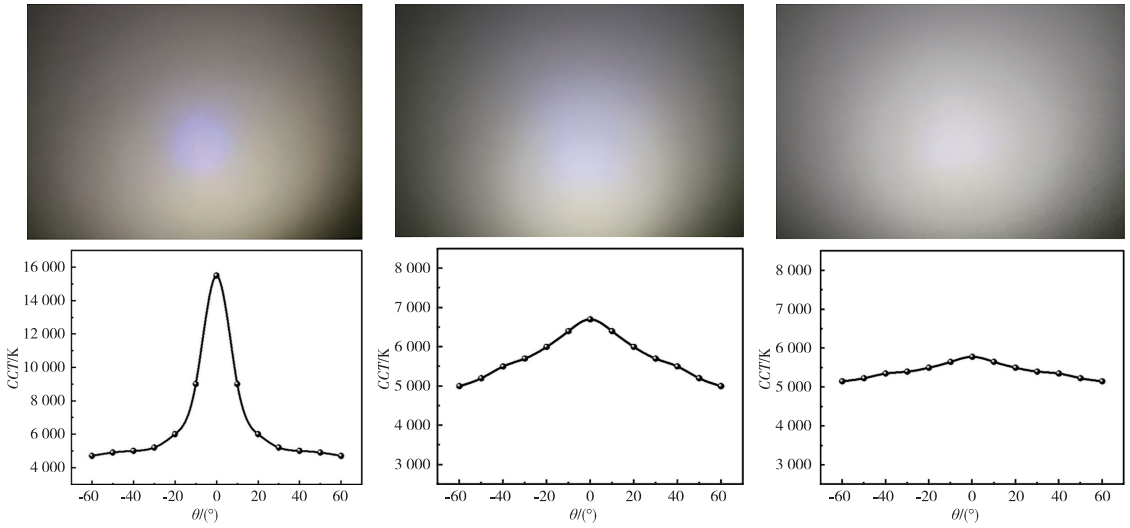


图 13　激光白光光源实物模型

MLA-HMPS 的三种激光白光光源的空间色温分布进行测试，由于光源的出光发散角小于 120°，因此测试角度为－60°～60°。从图 14(a)可以看出，在基于 DL-PPS 的光源照明区域内，其中心位置存在明显蓝斑，与空间色温分布曲线中心的高色温值相对应。该现象证明了传统采用激光直接聚焦于荧光粉层的方式会对光源的空间色温均匀性造成严重影响，不利于实际照明应用。相比之下，基于 MLA-HPPS 的光源的白光颜色混合效果有了明显改善，如图 14(b)所示，但在其照明区域内，可以观察到中心区域的颜色偏蓝，边缘区域的颜色偏黄，从对应的空间色温分布曲线中也可以发现，该光源仍存在较大的角色温偏差。而在图 14(c)所示的基于 MLA-HMPS 的光源照明区域内，呈现出均匀的白光，其角色温偏差仅为 630 K，相比另外两种光源分别减少 10 170 K 和 1 070 K。将最小色温与最大色温的比值用来表示光源的 ACU，可得到三种光源的 ACU 分别为 0.3，0.75 和 0.89。该结果表明，所提出的基于 MLA-HMPS 的激光白光光源具有更好的空间色温均匀性，有助于提高光源的照明质量。

接着，对上述三种光源的光色参数进行测试，其结果如表 1 所示，基于 MLA-HPPS 和基于 MLA-HMPS 光源的光色参数均满足汽车前照灯光源的标准要求。其中，基于 MLA-HMPS 的光源具有更高的光通量，说明微结构荧光粉层有助于增加荧光粉颗粒的激发，提高光源的光转换效率。此外，从表中可以发现，基于 DL-PPS 的光源的光通量相对较低，且其色温偏高。通过对图 15 所示的三种光源稳定工作后的荧光粉层表面进行观察，可以发现，该光源的荧光粉层表面出现了碳化现象。说明采用激光直接聚焦于荧光粉层的方式会导致荧光粉层因局部温度过高产生热淬灭现象，对光源的光转换效率造成严重影响。而在基于 MLA-



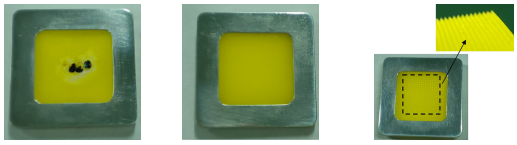
(a) DL-PPS (b) MLA-HPPS (c) MLA-HMPS

图 14 三种激光白光光源的实际照明效果和空间色温分布曲线

HPPS 和基于 MLA-HMPS 的光源中，荧光粉层表面没有出现碳化现象，利用热电偶对这两种光源稳定工作状态下的荧光粉层表面最高温度进行测试，测试结果分别为 98℃和 114℃，均低于荧光粉热淬灭温度。该结果表明，微透镜阵列匀化系统可以有效避免荧光粉层局部温度过高的问题，从而保证荧光粉颗粒的稳定激发，有助于提高激光白光光源的发光稳定性。

表 1 三种激光白光光源的光色参数

光色参数	DL-PPS	MLA-HPPS	MLA-HMPS
光通量/lm	645	1 292	1 458
色温/K	7 896	5 567	5 226
色坐标	(0.301 2, 0.275 6)	(0.331 1, 0.332 5)	(0.338 8, 0.342 4)
主波长/nm	496	563	568
红光比/%	11.9	14.1	14.2
显色指数	65.8	71.6	71.1



(a) DL-PPS (b) MLA-HPPS (c) MLA-HMPS

图 15 三种激光白光光源稳定工作后的荧光粉层表面形貌

4 结论

针对激光光束分布集中且中心能量密度过高所导致的色温分布不均匀问题，本文提出一种基于 MLA-HMPS 的激光白光光源。所提出的微透镜阵列匀化系统和微结构荧光粉层可以实现蓝光和黄光空间强度分布的匹配，同时使更多荧光粉颗粒被有效激发，提高光源的空间色温均匀性和光通量。测试结果表明，该基于 MLA-HMPS 的光源光色参数均满足汽车前照灯光源的标准要求。此外，该光源能够有效避免荧光粉层表面局部温度过高而导致的热淬火问题，有助于实现高质量和高可靠性的激光前照灯照明。

参考文献：

[1] Zhu Z, Wei S, Liu R, et al. Freeform surface design for high-efficient LED low-beam headlamp lens [J]. Optics Communications, 2020, 477: 126269.

[2] Wu H, Zhang X, Ge P. Modular design of a high-efficiency LED headlamp system based on freeform reflectors [J]. Optics & Laser Technology, 2015, 72: 79-85.

[3] 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 & Photonics Reviews, 2013, 7(6): 963-993.

[4] Wei Y, Liu D, Xie T, et al. Small-size LD-based automobile headlamp design with long illumination distance and wide illumination range[J]. Applied Optics, 2023, 62(29): 7689-7699.

[5] 赖 军，刘登飞，张 辉，等. 激光远程激发荧光粉的前照灯白光光源[J]. 光学与光电技术，2020，18(6)：74-79.
Lai Jun, Liu Dengfei, Zhang Hui, et al. White light source of automotive headlamp based on laser remote activation phosphor[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2020, 18(6): 74-79.

[6] Kumar V, Sharma P, Mehta D S. Design and development of speckle-free high-power laser-driven phosphor converted compact automotive headlamp module[J]. Journal of Physics: Photonics, 2024, 6(2): 025008.

[7] Sang P, Zhang L, Kang J, et al. Composite structure Al_2O_3/Al_2O_3-YAG: Ce/YAG ceramics with high color spatial uniformity for white laser lighting[J]. Journal of Advanced Ceramics, 2024, 13(2): 189-197.

[8] Mehri A, Golmohammadi R, Aliabadi M, et al. Visual and non-visual responses of drivers to simulated LED headlights varying in correlated colour temperature [J]. Lighting Research & Technology, 2024, 56(5): 502-526.

[9] Shen Z, Zhu Q Q, Tian R, et al. Investigation of excitation modes in Al_2O_3-YAG phosphor ceramics for high-power laser-driven lighting[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2024, 13(4): 046002.

[10] Chang Y P, Chang J K, Chen H A, et al. An advanced laser headlight module employing highly reliable glass phosphor [J]. Optics Express, 2019, 27(3): 1808-1815.

[11] Chang Y P, Shih H K, Liu C N, et al. Laser-assisted LED for adaptive-driving-beam headlights employing ultra-reliable single crystal phosphor for autonomous vehicles[J]. Optics Express, 2021, 29(17): 26466-26473.

[12] Ma Y, Luo X. Small-divergent-angle uniform illumination with enhanced luminance of transmissive phosphor-converted white laser diode by secondary optics design[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 122: 14-22.

[13] Zhang H, Liu D, Wei Y, et al. Asymmetric double freeform surface lens for integrated LED automobile headlamp [J]. Micromachines, 2021, 12(6): 663.

[14] Ying S P, Chen B M, Fu H K, et al. Single headlamp with low- and high-beam light[J]. Photonics, 2021, 8(2): 32.

[15] Luo D, Ge P, Liu D, et al. A combined lens design for an LED low-beam motorcycle headlight[J]. Lighting Research & Technology, 2018, 50(3): 456-466.

[16] Sun C C, Wu C S, Lin Y S, et al. Review of optical design for vehicle forward lighting based on white LEDs[J]. Optical Engineering, 2021, 60(9): 091501.

作者简介：

谢彤彤(1998—)，女，广东省揭阳市人，硕士研究生，主要研究方向为激光白光照明；

王　洪(1964—)，男，江苏省无锡市人，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为光通信网络与器件、光电系统设计与集成。