

文章编号: 1002-2082 (2020) 03-0469-08

基于 LD 激发荧光粉白光光源的窄光束 照明光学系统设计

郭金涛^{1,2}, 熊德平¹, 温坤华¹, 何 苗¹,
张志清², 夏智锋², 许毅钦²

(1. 广东工业大学 信息工程学院, 广东 广州 510006; 2. 广东省半导体产业技术研究院, 广东 广州 510651)

摘 要: 蓝光半导体激光器激发荧光粉产生白光光源技术发展迅速, 但由于大功率蓝光半导体激光器在快轴、慢轴方向的光场分布差别较大, 使得日前激光照明整体光学性能仍旧较差, 难以实现大规模推广应用。针对该问题, 设计了一款高质量激光照明光学系统, 基于蒙特卡洛光线追踪理论, 对激光光束进行准直调控、均匀光斑整形以及对荧光片进行设计, 使得整体光源模块各元件得到最佳整合, 最终实现了窄光束激光照明。仿真结果表明: 激光光源的光收集率达 98.3%, 激光光斑的不均匀度为 1.7%, 白光均匀度为 98%, 光斑是出射准直角为 1.6° 的方形窄光束白光光斑。

关键词: 激光器; 光学设计; 准直透镜; 窄光束; 均匀度

中图分类号: TN245; TH703

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202041.0301006

Design of narrow beam illumination optical system based on LD excitation phosphor white light source

GUO Jintao^{1,2}, XIONG Deping¹, WEN Kunhua¹, HE Miao¹,
ZHANG Zhiqing², XIA Zhifeng², XU Yiqin²

(1. School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Guangdong Institute of Semiconductor Industrial Technology, Guangzhou 510651, China)

Abstract: The technology of the blue light semiconductor laser excitation phosphor to produce the white light source is developing rapidly. However, due to the large difference of the light field distribution in the fast axis and slow axis direction of the high-power blue light semiconductor laser, the overall optical properties of the laser illumination are still poor, which is difficult to achieve the large-scale application. Aiming at this problem, a high-quality laser illumination optical system was designed based on the Monte Carlo ray tracing theory. The collimation regulation of the laser beam was carried out, the uniform light spot was shaped, and the fluorescent sheet was designed, so that the components of overall light source modules obtained the optimal integration, and the narrow beam laser illumination was finally realized. The simulation results show that the light collection rate of the laser light source reaches to 98.3%, the ununiformity of the laser spot is 1.7%, the uniformity of the white light is 98%, and the light spot is the square narrow beam white light spot with an exit collimation angle of 1.6°.

Key words: laser; optical design; collimating lens; narrow beam; uniformity

收稿日期: 2019-11-14; 修回日期: 2019-12-31

基金项目: 国家自然科学基金 (61875187); 广东省中山市科技计划项目 (2019A4008); 广州市科技计划项目-科学研究专项 (201707010390); 广东省科学院青年科技工作者引导专项 (2019GDASYL-0105061)

作者简介: 郭金涛 (1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事 LED 封装应用及照明光学设计的研究。E-mail: GDUT007@163.com

通信作者: 何苗 (1965-), 男, 博士, 教授, 主要从事 LED 封装与微纳光学器件的研究。E-mail: herofate@126.com

引言

LED具有体积小、抗震动、亮度高、可调光、维修和更换简便,以及寿命长等诸多优点,能满足人类对人造光源的绝大部分期望和要求^[1],因此,LED已成为目前主流的照明方式。由于大功率 GaN 基蓝光 LED 的发展,蓝光 LED 激发荧光粉产生的白光光源作为照明光源得以迅速发展^[2]。但商用白光 LED 存在“效率骤降”现象^[3],即随着电流密度的增加,出光效率会快速衰减。激光二极管(LD)具有亮度高,光电效率转换高且无“效率骤降”现象,照射距离远,散热系统更简单,尺寸更小等特点,尤其在高亮度、高光效、远程照明领域具有显著的优势。LD 结合荧光粉转换器作为一种新兴技术在汽车大灯^[4]、路灯,室内外一般照明,数据投影机,以及无线光通信上显示出巨大的应用潜力。2014 年 12 月 8 日,在瑞典举行的诺贝尔颁奖演讲台上“蓝光之父”——日本科学家中村修二就公开表示“未来 10 年,激光照明将取代 LED 照明”^[5-7]。

目前基于激光白光照明的相关研究在材料方面研究的较多,在光学系统设计方面研究较少。赵爽^[8]等设计了一款汽车照明光学系统,得到了满足法规的激光白光光源。由于单个激光二极管的功率较低,要想获得大功率的激光白光光源,需要多个激光二极管进行组合,目前主流的组合方式是光纤耦合技术,可实现多单管激光器合束^[9-11]。为了达到高效率,低成本地实现多激光二极管组合,并能够有效实现激光白光照明,设计了一款新型的激光照明光学系统,实现蓝光激光有效地激发荧光片。仿真实验结果表明,设计的系统激光光源光收集率 98.3%,激光光斑不均匀度 1.7%;白光光斑均匀度 98%,出射准直角为 1.6°。设计的系统可应用于探照灯、扫海灯、战术手电、车灯、投影显示等领域。

1 激光照明系统的组成及工作原理

激光照明光学系统采用的是阵列多激光二极管反射式同轴系统^[12],在光学软件 Tracepro 中建立如图 1 所示的光学系统结构。系统由专门设计的基板,激光二极管、准直透镜、聚光镜、混光腔、混光棒、荧光体,光阑等组成。采用 4 颗波长为 450 nm,光功率 3.5 W 的欧司朗激光二极管为光源。通过准直透镜将激光打到反光杯上,反光杯反射将激光束汇聚到焦点,在焦点位置光束通过匀光系统

进行激光二次光学整形,出射的激光光斑均匀度更高。设定与光斑面积大小等同的荧光体,调节荧光体中掺杂荧光粉的浓度及其厚度,得到辐照度均匀的方形白光。

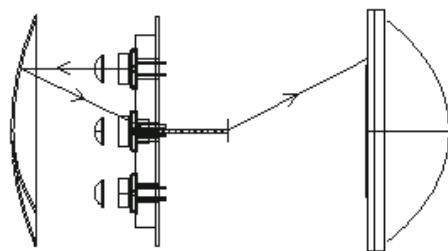


图 1 LD 光学系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of LD optical system

2 激光照明光学系统设计

2.1 半导体激光光源简化模型建立

在欧司朗官网下载所选型号的激光二极管的光源文件及 CAD 模型,在光学仿真软件 Tracepro 中建立激光光束模型。简单描述激光光束的模型为椭圆高斯光束,表达式如下:

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{2x^2}{w_{x0}^2} - \frac{2y^2}{w_{y0}^2}\right) \quad (1)$$

式中: w_{x0} 和 w_{y0} 分别为垂直截面和平行截面上的束腰半径^[13]。将该档案光源导入 Tracepro 光学分析软件,仿真结果如图 2 和图 3 所示。由图 2 和图 3 可知,激光二极管射出的光束一般为椭圆高斯光束,其发光强度呈高斯分布,中心发光强度极强,周边发光强度较弱,即能量分布不均匀,这一缺陷导致激光不能直接使用。所以需要进一步对其光束做整形处理。

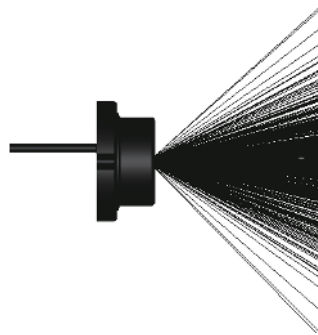


图 2 激光二极管光束模型

Fig. 2 Laser diode beam model

2.2 准直透镜设计

如图 4 所示,设计的准直透镜结构是采用双自

由曲线绕中心轴旋转而成的^[14]。设计过程如下: 首先, 基于非成像光学中的边缘光线理论对初始曲线的离散点进行迭代求解, 然后通过曲线法矢修正反馈算法, 对离散点进行反馈优化, 从而实现了一款双自由曲面的准直透镜设计。

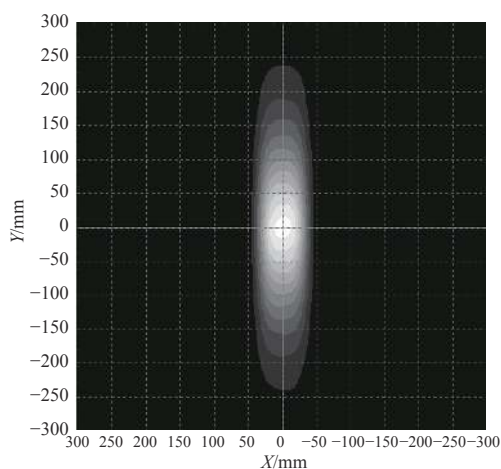


图3 激光二极管辐照度分布图

Fig. 3 Distribution diagram of laser diode irradiance

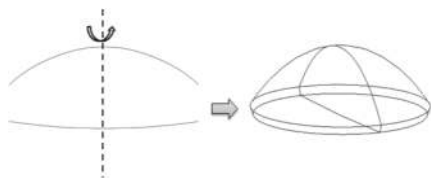


图4 准直透镜形成示意图

Fig. 4 Schematic diagram of collimating lens formation

2.2.1 准直透镜算法设计

如图5所示, 建立直角坐标系。LD光源端点位于 O_1 、 O_2 点, LD边缘光线 $\overrightarrow{O_1B_n}$ 、 $\overrightarrow{O_2B_{n+1}}$ 分别经入射面S2折射后形成出射光 $\overrightarrow{B_nA_n}$ 、 $\overrightarrow{B_{n+1}A_n}$, 法向量分别为 $\overrightarrow{NB_n}$ 、 $\overrightarrow{NB_{n+1}}$, 然后分别以出射光 $\overrightarrow{B_nA_n}$ 、 $\overrightarrow{B_{n+1}A_n}$ 作为出射面S1入射光, 再次折射后形成出射光 $\overrightarrow{A_nT_{1n}}$ 、 $\overrightarrow{A_nT_{2n}}$, 两束出射光呈中心轴对称, 法向量为 $\overrightarrow{NA_n}$ 。

根据菲涅耳定律可得:

$$\begin{aligned} n_0 \frac{\overrightarrow{O_1B_n}}{|\overrightarrow{O_1B_n}|} \times \overrightarrow{NB_n} &= n \frac{\overrightarrow{B_nA_n}}{|\overrightarrow{B_nA_n}|} \times \overrightarrow{NA_n} \\ n \frac{\overrightarrow{B_nA_n}}{|\overrightarrow{B_nA_n}|} \times \overrightarrow{NA_n} &= n_0 \frac{\overrightarrow{A_nT_{1n}}}{|\overrightarrow{A_nT_{1n}}|} \times \overrightarrow{NA_n} \end{aligned}$$

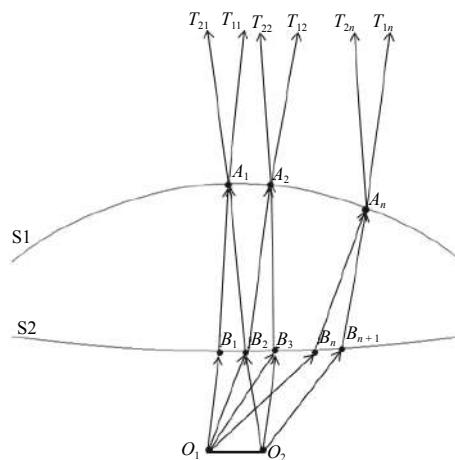


图5 光束示意图

Fig. 5 Schematic diagram of light beam

$$\begin{aligned} n_0 \frac{\overrightarrow{O_2B_{n+1}}}{|\overrightarrow{O_2B_{n+1}}|} \times \overrightarrow{NB_{n+1}} &= n \frac{\overrightarrow{B_{n+1}A_n}}{|\overrightarrow{B_{n+1}A_n}|} \times \overrightarrow{NA_n} \\ n \frac{\overrightarrow{B_{n+1}A_n}}{|\overrightarrow{B_{n+1}A_n}|} \times \overrightarrow{NA_n} &= n_0 \frac{\overrightarrow{A_nT_{2n}}}{|\overrightarrow{A_nT_{2n}}|} \times \overrightarrow{NA_n} \end{aligned}$$

带入初始值, A_1 、 B_1 、 B_2 坐标, A_1 、 B_1 、 B_2 单位法矢量, 通过偏微分的数值迭代求解可获得曲线离散点链, 然后将离散点数据导入建模软件形成3D结构, 如图6所示。

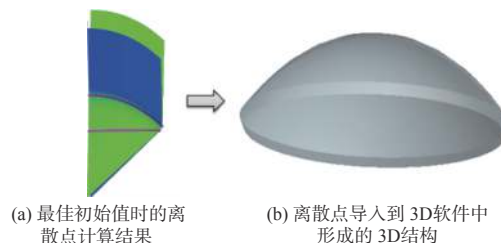


图6 3D结构形成示意图

Fig. 6 Schematic diagram of 3D structure formation

2.2.2 结果分析

在光学分析软件 Tracepro 中建立模型, 如图7所示。准直透镜的材料设置为折射率 1.493 86 的聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA), 透射率为 1 (不考虑透镜光损失)。由图7可知, 经准直透镜的激光光束得到了很好的准直。图8与图3对比, 可知激光光束的辐照度分布得到了有效压缩, 由图3的大椭圆形变为图8的小椭圆形的激光光束。由图8得到收集到的光通量是 3.443 0 W, 系统中使用的激光二极管发射光通量为 3.5 W, 由公式:

$$\frac{\text{总光通量}}{\text{发射光通量}} \times 100\% = \text{收集率} \quad (2)$$

带入数据得到激光光束的收集率达到 98.3%, 可见准直透镜的准直聚光效果很好。

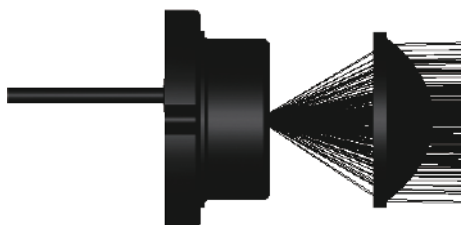


图7 激光二极管光束准直模型

Fig. 7 Laser diode beam collimation model

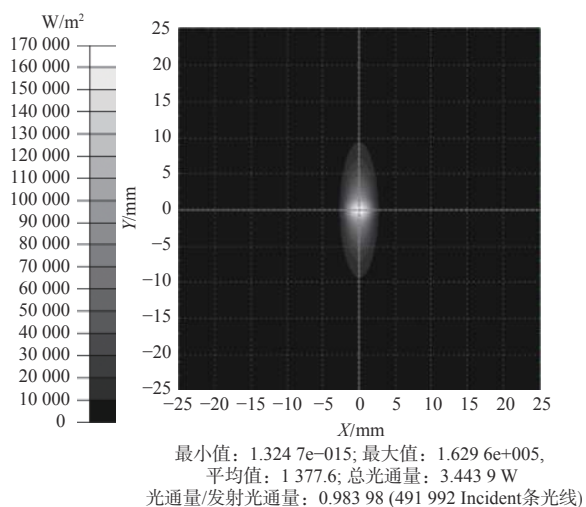


图8 接收面辐照度分布图

Fig. 8 Distribution diagram of receiving surface irradiance

2.3 匀光系统设计

2.3.1 反光杯设计

反光杯采用抛物面镜, 由抛物线绕对称轴旋转而成, 利用反光杯将准直光汇聚到混光棒的端口内, 平行于对称轴的任何一条光线经抛物面镜反射后都会汇聚于焦点处。结合设计的准直透镜及在 3D 建模软件中建立的基板尺寸, 在 Tracepro 中建立一个抛物面反光杯, 实现激光光束的汇聚。本文设计的抛物面反光杯的参数为: 焦距 31 mm, 直径 5 mm, 厚度 0.5 mm, 如图 9 所示, 实现了激光光束汇聚于焦点处。

2.3.2 混光棒设计

混光棒能将光线均匀化, 其成本低、效率高、结构简单^[15-16]。因为经反光杯汇聚的激光光束功率密度过高且不均匀, 为了得到扩束并分布均匀的激光光斑, 设计了一款材质为石英玻璃的长方体混光棒, 如图 10 所示。光线在混光棒内发生数次反射, 打乱了原有激光光束的传播路径, 实现光

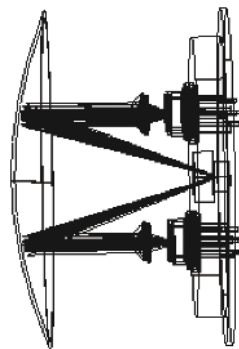


图9 抛物面反光镜模型设计

Fig. 9 Paraboloid reflector model design



图10 混光棒混光示意图

Fig. 10 Schematic diagram of light mixing in light mixing rod

线的进一步均匀分布。混光棒入光端面的中心位置需放置在激光光束汇聚的焦点处。仿真优化得到的最优尺寸为截面边长为 1 mm 的方形, 长度为 16.5 mm。10⁵条光线进入光学系统进行仿真, 发现单纯的使用混光棒还不能较好地生成均匀光斑, 故而对混光棒の入光面加以优化, 设置为磨砂面之后, 均匀度得到明显提升。当截面形状一定时, 混光棒的长度也不是越长越好, 需取一个恰当的长度值, 混光棒的出光面辐照图分布曲线如图 11 和图 12 所示。

不均匀度公式为

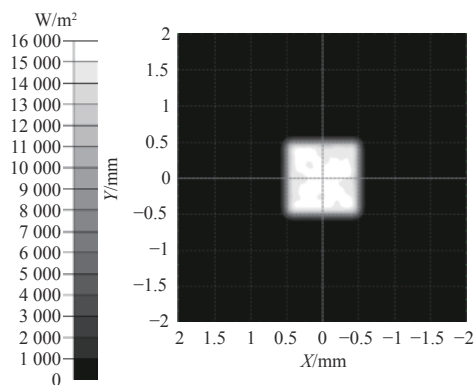


图11 混光棒出光面辐照度分布图

Fig. 11 Irradiance distribution diagram of light-emitting surface of light mixing rod

$$\sigma = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $I_{\max}$ 、 $I_{\min}$ 分别为被照射面的最大照度和最小照度值^[17]。上式带入数据可得均匀度为 1.7%。

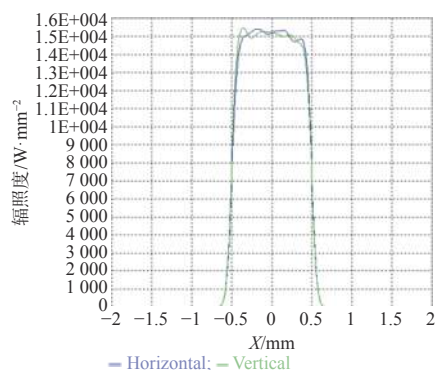


图 12 混光棒出光面辐照度分布曲线

Fig. 12 Irradiance distribution curve of light-emitting surface of light mixing rod

2.4 荧光片的设计

为了实现系统输出白光, 对荧光片的特性加以

探讨。利用蓝光激光激发荧光片产生白光的原理^[18], 并且经荧光片的吸收、散射、折射, 产生的白光对人眼无伤害。上述得到激光光束均匀光斑为正方形, 需实现光斑面积与荧光片的匹配。首先在 Tracepro 中建立了规格为 1 mm×1 mm×0.8 mm 的荧光片模型, 使用商用荧光粉 YAG:Ce³⁺ 的激发光谱和发射光谱建立荧光粉特性, 通过属性编辑器改变荧光片的厚度、荧光粉浓度等特性, 实现激光激发荧光产生均匀的白光光斑的荧光片。通过固定荧光片的厚度为 0.8 mm, 调整荧光片 YAG:Ce³⁺ 摩尔浓度分别为 15 mol/liter、13 mol/liter、12 mol/liter、10.96 mol/liter, 荧光片被激发产生的光斑效果图如图 13(a)~13(d) 所示。对比光斑效果得出摩尔浓度为 10.96 mol/liter 的荧光片较佳。同理, 固定荧光片的 YAG:Ce³⁺ 浓度为 10.96 mol/liter, 改变荧光片的厚度分别为 0.6 mm、0.7 mm、0.8 mm、0.9 mm, 荧光片被激发产生的光斑效果图如图 14(a)~14(d) 所示。对比光斑效果得出厚度为 0.8 mm 的荧光片较佳。

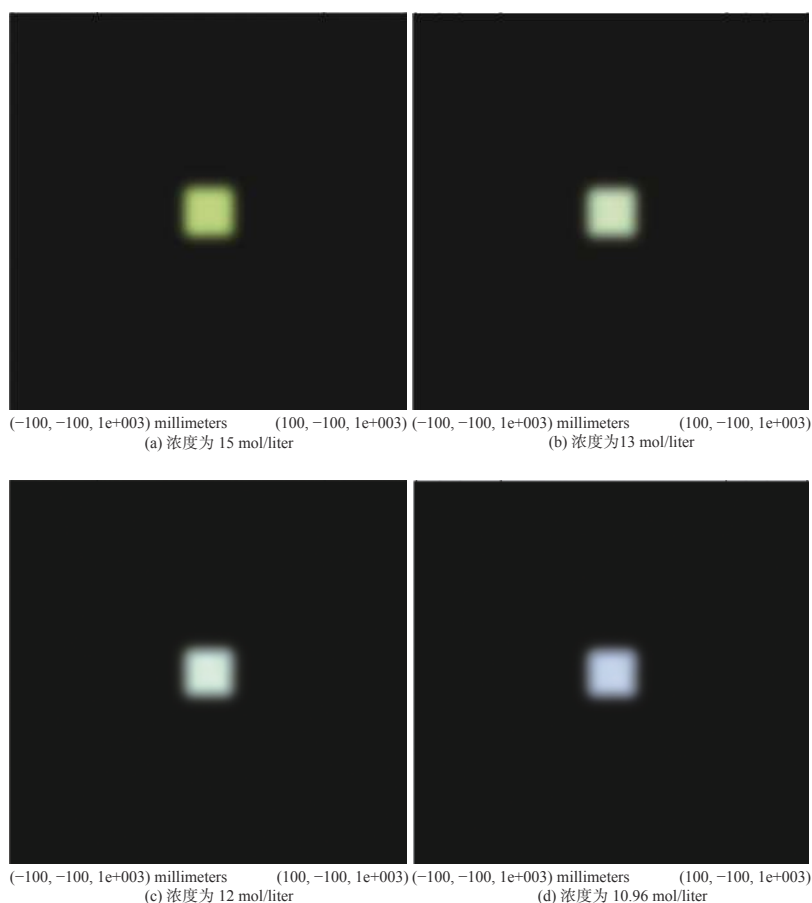


图 13 不同摩尔浓度荧光粉片的发光效果

Fig. 13 Luminous effect of phosphor sheets with different molar concentration

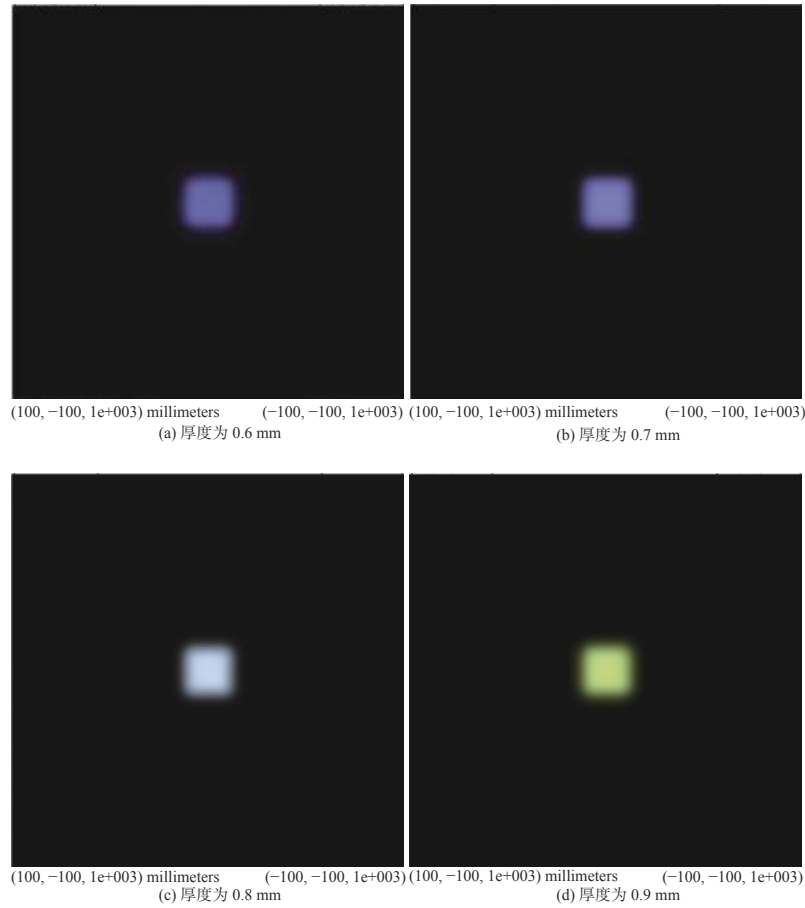


图 14 不同厚度荧光片的发光效果

Fig. 14 Luminous effect of fluorescent sheets with different thicknesses

3 激光照明光学系统仿真及结果分析

根据前面的参数设计,在光学仿真软件 Tracepro 中用 5×10^5 条光线激发荧光体,如图 15 所示。分析发现只是单纯的利用表面光滑的荧光片无法实现高均匀度、窄光束的白光。为了解决这一问题,考虑可以改变光线的传播路径,故而对荧

光片的表面结构做出变化,这里在荧光片的入光面和出光面变成磨砂面,并且在出光面加上光阑,如图 16(a)和 16(b)所示。通过不断调节准直透镜的焦点位置,在边长为 200 mm 的方形接收面上得到的均匀度达 98%,角度为 1.6° 的方形光斑,如图 16(c)所示。

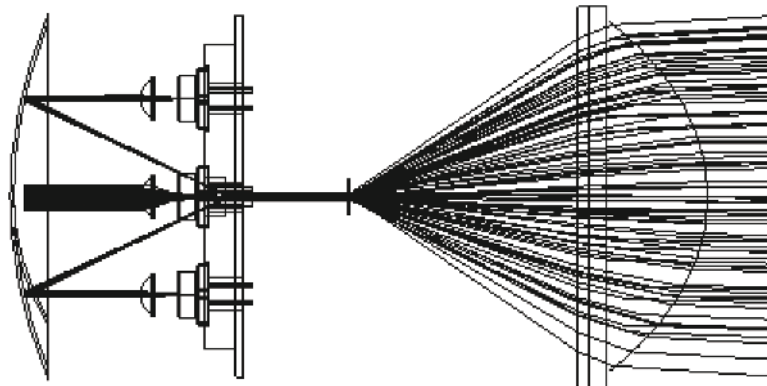


图 15 激光照明光学系统模型

Fig. 15 Laser illumination optical system model

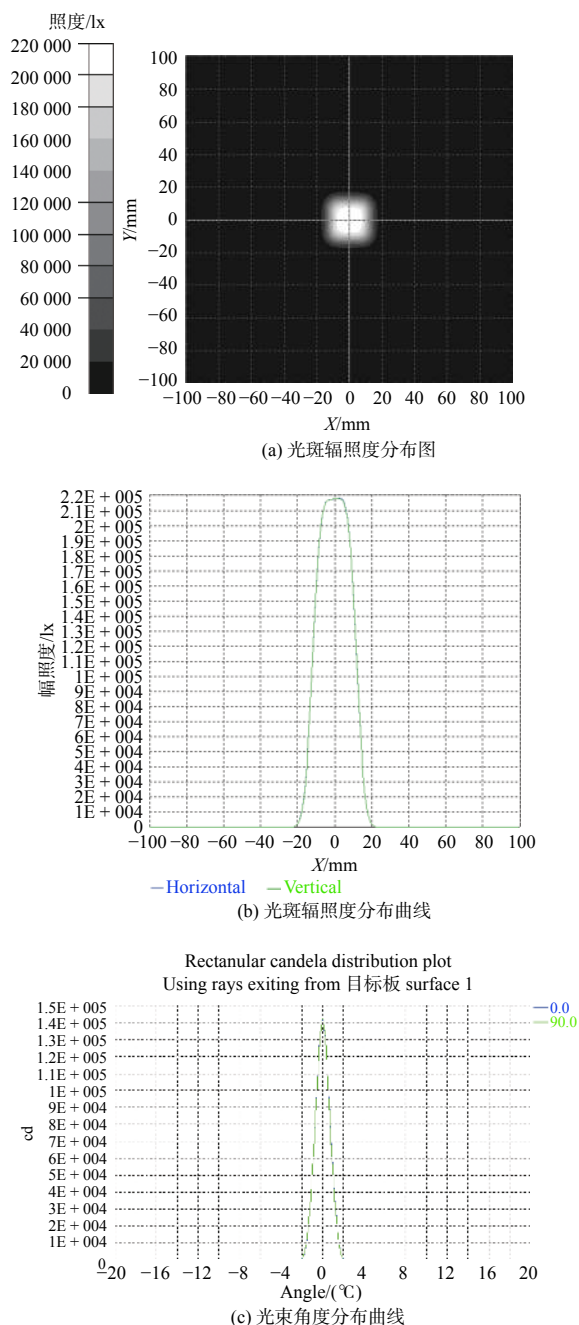


图 16 系统仿真实验效果图

Fig. 16 Effect diagram of system simulation experiment

4 结论

本文设计了一款基于 LD 阵列白光光源, 采用多个激光二极管反射式实现同轴准直系统的激光白光照明模块, 利用光学仿真软件 Tracepro 对光学系统进行蒙特卡罗光线仿真追迹, 实现激光二极管光收集率 98.3%, 激光光斑的不均匀度为 1.7%, 在方形接收面上得到白光的均匀度达到 98%, 准直角为 1.6° 。本设计采用混光棒能够充分将激光光束打乱, 从而获得很好的匀光效

果。反光杯的聚光能力不受激光二极管数量的限制, 增加激光二极管的数量可以实现大功率的激光照明模块, 为激光照明的进一步研究奠定了基础。

参考文献:

- [1] CHEN Dahua. The replacement of new light sources[J]. *China Light & Lighting*, 2016(10): 7-9.
陈大华. 新光源的更新换代[J]. *中国照明电器*, 2016(10): 7-9.
- [2] CHO J, PARK J H, KIM J K, et al. White light-emitting diodes: history, progress, and future[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11(2): 1600147.
- [3] ZHANG X, SI S, YU J, et al. Improving the luminous efficacy and resistance to blue laser irradiation of phosphor-in-glass based solid state laser lighting through employing dual-functional sapphire plate[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(2): 354-361.
- [4] CHEN Liang, WANG Jianchao, PAN Yong, et al. Research progress and key technical analysis of automotive laser illumination[J]. *Applied Laser*, 2018, 38(6): 1044-1048.
陈亮, 王健超, 潘涌等. 车用激光照明研究进展及关键技术分析[J]. *应用激光*, 2018, 38(6): 1044-1048.
- [5] NAKAMURA S J. From high-efficiency blue light diode to laser illumination[J]. *Science and Technology Herald*, 2019, 37(2): 34-35.
中村修二. 从高效蓝光二极管到激光照明[J]. *科技导报*, 2019, 37(2): 34-35.
- [6] ZHOU Lei, XIANG Weidong, YUAN Rongrong, et al. Research status and latest development of laser lighting research[J]. *China Lighting Appliances*, 2017(9): 28-32.
周磊, 向卫东, 袁荣荣, 等. 激光照明研究现状及最新进展[J]. *中国照明电器*, 2017(9): 28-32.
- [7] CHANG Weigang. Application status and development trend of LED lighting technology[J]. *Industry and Technology Forum*, 2017, 16(13): 67-68.
常卫刚. LED照明技术的应用现状与发展趋势[J]. *产业与科技论坛*, 2017, 16(13): 67-68.
- [8] ZHAO Shuang, WU Xiaojie, ZOU Yonggang, et al. Design of semiconductor laser excitation phosphor conversion white light illumination system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(1): 140-145.
赵爽, 吴肖杰, 邹永刚, 等. 半导体激光激发荧光粉转换白光照明系统设计[J]. *应用光学*, 2018, 39(1): 140-145.

- [9] YIN Juanjuan, BAO Jiaqi, ZENG Zhihong, et al. Gaussian beam flattening and shaping technology based on multimode fiber[J]. *Optical Technology*, 2019, 45(2): 234-239.
尹娟娟, 包佳琪, 曾志红, 等. 基于多模光纤的高斯光束平顶化整形技术[J]. *光学技术*, 2019, 45(2): 234-239.
- [10] LIANG Lintao. Research on single-mode laser beam shaping technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
梁林涛. 单模激光光束整形技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [11] YU Guolei. Research on beam shaping of high power semiconductor lasers[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
于果蕾. 大功率半导体激光器光束整形研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- [12] SUN Mingjiao. Design of optical system for $\Phi 100$ caliber collimated solar simulator[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013.
孙铭礁. $\Phi 100$ 口径准直式太阳模拟器光学系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2013.
- [13] GAO Yuhua. Research on Gaussian beam shaping technology[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012.
高琨含. 高斯光束整形技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- [14] ZHAO Huan, LI Changgeng, CHEN Zhitao, et al. Design of LED uniform illumination collimating lens based on double free-form surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 264-269.
赵欢, 李长庚, 陈志涛, 等. 基于双自由曲面的LED均匀照明准直透镜设计[J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 264-269.
- [15] SUN Mingjie, YU Kanglong, MENG Zhaokui. A speckle reduction technique using vibration mixing bars[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(10): 69-74.
孙鸣捷, 于康龙, 孟照魁. 一种采用振动混光棒的散斑抑制技术[J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 69-74.
- [16] ZHANG Xinqiang, ZHANG Qingmao, GUO Liang, et al. Design and simulation of optical system of new LED solar simulator[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(5): 882-886.
张新强, 张庆茂, 郭亮, 等. 新型LED太阳模拟器光学系统设计及仿真[J]. *应用光学*, 2019, 40(5): 882-886.
- [17] NIU Lei, LI Xiangning, SUI Feng. Design of a new laser projection display lighting system[J]. *Optoelectronic Engineering*, 2015, 42(3): 77-82.
牛磊, 李湘宁, 隋峰. 新型激光投影显示照明系统设计[J]. *光电工程*, 2015, 42(3): 77-82.
- [18] ZHANG Zehong. Research on white light illumination optical system of semiconductor laser excitation phosphor[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2018.
张泽宏. 半导体激光激发荧光体的白光照明光学系统研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2018.