

激光与光电子学进展

基于微透镜阵列的大面积 LED 阵列光源匀化方法

聂娟^{1,2}, 杜佳林^{1,2}, 李凡星¹, 王思沫^{1,2}, 杨帆¹, 谌庆荣¹, 亓波^{1*}, 严伟¹¹中国科学院光电技术研究所环境光学研究院, 四川 成都 610209;²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 LED阵列光源凭借其高亮度、长寿命及节能环保等独特优点广泛应用于医学、微纳加工、光学成像等领域,但其匀化系统存在光线准直难、可实现的照明光斑面积小等问题,难以在需要均匀照明的光学领域中得到广泛应用。针对这一问题,提出了一种基于微透镜阵列的大面积LED阵列光源匀化方法。首先通过矩阵光学及近轴光学理论进行理论分析,然后利用lighttools软件进行系统设计及仿真实验,最终在像面上实现了大面积的均匀光斑。相较于以往最多可实现50 mm×50 mm的匀化光斑,该匀化系统可做到104 mm×104 mm、均匀度为87.375%的大面积规则的均匀光斑,该方法对医学、红外夜视、投影显示、航空照明领域等需要大面积均匀照明的系统有着重要意义。

关键词 光电子学; 光源匀化方法; 矩阵光学; 微透镜阵列; 大面积LED

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222109

Light Source Homogenization Method for Large-Area LED Array Based on Microlens Array

Nie Juan^{1,2}, Du Jialin^{1,2}, Li Fanxing¹, Wang Simo^{1,2}, Yang Fan¹, Chen Qingrong¹, Qi Bo^{1*}, Yan Wei¹¹Institute of Environmental Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, Sichuan, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract LED array light sources are widely used in medicine, micro-nano processing, optical imaging, and other fields due to their high brightness, long life, energy savings, and environmental protection. However, their homogenization system has issues such as difficult light collimation and small achievable illumination spot area, making them difficult to be widely used in the optical field that requires uniform illumination. To address this issue, this paper proposes a microlens array based large-area LED array light source homogenization method. First, the theoretical analysis is performed by matrix optics and near-axis optics theory, and then the system design and simulation experiments are conducted by using light tools software. Finally, a large-area of the uniform spot is achieved on the image surface. Compared with the previous homogenization system, which can achieve up to 50 mm×50 mm, the homogenization system can achieve a uniform spot of 104 mm×104 mm, and uniformity of 87.375% of the large-area rule. This method is of great significance systems that require large-area uniform illumination in the fields of medicine, infrared night vision, projection display, and aerial lighting.

Key words optoelectronics; light source homogenization method; matrix optics; microlens array; large-area LED

1 引言

LED照明凭借其先天优势——环保、节能、寿命长,已逐步应用在各类照明系统中且已逐渐取代传统

光源成为第四代绿色光源,目前LED阵列光源已成功应用在了各类光学系统中^[1]。而目前的研究多聚焦于激光,针对LED阵列光源的研究较少,如何解决LED阵列的光源匀化中光线准直难、可实现的照明光斑面

收稿日期: 2022-06-19; 修回日期: 2022-07-20; 录用日期: 2022-08-12; 网络首发日期: 2022-08-22

基金项目: 四川省重点研发项目(2022YFG0223, 2022YFG0249)、四川省科技创新苗子工程资助项目(2021JDRC0089, 2022102)、中国科学院科研仪器设备研制项目(YJKYYQ20210041)

通信作者: *qibo@ioe.ac.cn

积小的问题,对需要光源匀化的照明系统具有极大的作用。例如:对于紫外LED数字光刻机来说,照明均匀性是整个光刻系统性能优劣的重要影响因素,优质的照明均匀性可以大幅提高整个光刻系统的分辨率^[2];对于太阳模拟器来说,将LED作为其模拟太阳光的可控光源,具有十分广阔的前景。虽然太阳模拟器的结构种类多样,但是如何提高太阳模拟器的能量利用率,提升照明均匀性,增大照明面积^[3-6],始终是太阳模拟器的光学系统设计中的关键点。因此,我们需要对LED阵列进行二次光学设计。

现如今常用于光束匀化的光学元件有非球面透镜组^[7]、衍射光学元件(DOE)^[8]、多边形匀化棒-积分棒^[9-10]、微透镜阵列等。非球面透镜组具有能量转换效率高、结构紧凑等优点,但不具有光束适应性,对单模高斯光束整形效果较好。对于高阶模高斯光束来说,其强度分布复杂,有时甚至还随时间发生变化,因此并不适用。同时其需要测量光源光场的分布函数,不具有普适性,不适合LED光源的匀化^[11]。DOE虽然具有体积小、色散性能高等优点,但同时也存在着不足,例如:在设计结构上较为复杂,要设计有限非周期结构的亚波长DOE难度较高^[12];光的衍射效率与刻蚀台阶数成正比,但台阶数越多,刻蚀精度要求越高,难度越大;相比于非球面透镜组和衍射光学元件,多边形匀化棒对光束适应性好,但要使匀化棒输出的激光光束均匀性增加,就必须增加光束在棒内的反射次数,想要增加反射次数,势必要加长匀化棒的长度,这将增大整个匀化系统的体积,因而不具备普适性^[13]。相较于以上匀化方法,微透镜阵列的匀光方法不仅兼具它们的优点,而且成本较低,实际制作难度较低,并且具有更加紧凑的结构^[14-15]。阵列对光源进行分束后极大地减小了光源不均匀性,而后子光束叠加积分的平滑作用,进一步提高了照明均匀性。除此之外,微透镜阵列轻薄,能够克服可利用空间小的难点。然而目前大多数研究都集中于微透镜阵列在激光光源^[16-18]或单个LED照明中的匀化作用^[19],照明面虽然能量均匀度好,但其能量密度和匀化面积受限,并不能满足工业化快速生产测量需求。而将微透镜阵列与LED阵列相结合^[20],以同时保证照明均匀性、照明面积和能量利用率等优势,还是一个难点,也正是我们想要解决的问题,这对于大规模的照明系统有着重要意义。

因此,本文利用微透镜阵列对波长为365 nm的LED阵列光源进行光束匀化。首先对于匀化系统的准直单元,采用透镜组对LED阵列发出的光束进行准直,然后在匀化单元采用双排微透镜阵列对已经准直的光束进行匀化,最后利用lighttools软件进行建模仿真实验,最终在像面上得到了大面积的均匀光斑,相较于以往最多可实现50 mm×50 mm的匀化光斑,该匀化系统可做到104 mm×104 mm、均匀度为87.375%的大面积规则的均匀光斑。该方法兼顾了光斑均匀性

及光斑面积两个指标,达到了高均匀、大面积光斑的要求。此外,该匀化系统还具有结构紧凑、体积小等优点,在微纳加工、光学成像^[21]、红外夜视、投影显示、航空照明等各个需要均匀照明的领域中具有广泛的应用前景。

2 LED阵列光源匀化设计

2.1 微透镜阵列两种匀化方式

根据微透镜阵列的个数可以将微透镜阵列匀化方式分为非成像型微透镜阵列(只有一个微透镜阵列)与成像型微透镜阵列(有两个微透镜阵列)。非成像型微透镜阵列系统示意图如图1所示,该系统是由一个微透镜阵列与一个聚焦透镜共同组成的。入射光入射到微透镜阵列后,微透镜阵列的子透镜将其分割为无数细小的子光束,最后由聚焦透镜将这些子光束聚焦在焦平面上。被分割的子光束的光斑半径会变小,均匀性增加,从而经过聚焦透镜后的光斑均匀性也会增加。此技术对于最初入射的光束并无特殊要求,且具有光束转换效率高的优点,因此得到了普遍使用。

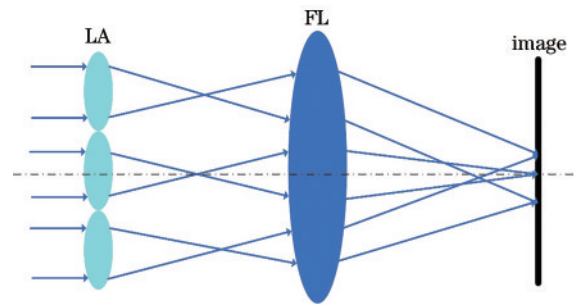


图1 非成像型微透镜阵列系统

Fig. 1 Non-imaging microlens array system

成像型微透镜阵列系统如图2所示,它在非成像型的基础上增加了第二片微透镜阵列,引入第二片微透镜阵列LA2并不是为了匀光,而是对光束进行校正,众所周知,LED具有一定的发散角,因此经过第一个微透镜阵列分割后光线将偏移对应的第二个微透镜阵列子透镜的中心点,但是偏移量不超过其对应的每

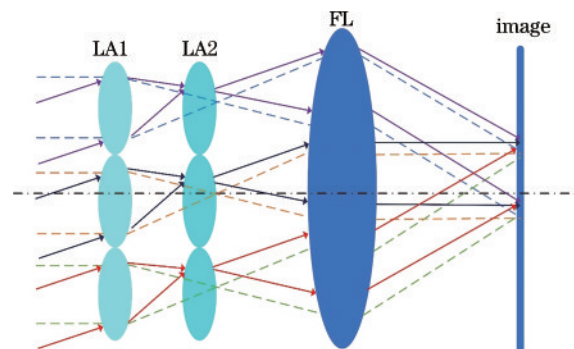


图2 成像型微透镜阵列系统

Fig. 2 Imaging microlens array system

个子透镜尺寸。根据几何光学中光的传播原理可知,由物方焦平面上一点发出的光线,经过透镜将平行射出,斜入射的准直光线在经过两个微透镜阵列后,其出射光线的方向与平行于光轴的平行光经过第二个微透镜的出射方向相同,并且将由积分透镜 FL 聚焦到相同的区域,不会出现旁瓣。基于以上匀化的基础原理,与微透镜阵列有关的理论分析模型也正处于不断地建立和完善中,由此来提升微透镜阵列性能,从而增强其在照明系统中的作用。

由于 LED 阵列发出的光束经准直系统准直后仍存在一定的发散角,需要对准直后的光束进行校正,避免照明光斑出现旁瓣,因此在后续研究中,我们选择成像型微透镜阵列来进行 LED 阵列匀化设计。

2.2 基于矩阵光学的匀化理论研究

对于 LED 光源的匀化设计主要包括两个部分,对于 LED 的准直和对于照明光斑的匀化。图 3 为 LED 匀化系统结构图,LED 阵列光源发出具有一定发散角

的光束,使用 F1、F2 和 F3 组成的透镜组对其进行准直,可以达到理想的光线准直效果,光线经过准直后其均匀性仍旧很差。然后在匀化单元经过微透镜阵列 1 时分割成子光束,再经微透镜阵列 2 进行光束校正后由积分透镜 F4 会聚在像面上,被分割后的细光束极大地降低了 LED 阵列光束的不均匀性,在像面上重新叠加,将大大提高整个匀化系统的均匀性。由于我们建立的是均匀照明的非成像系统,因此在本文中并不考虑像差对于整个系统的影响。当运用矩阵光学来进行光线描述时,并不需要对整个光学系统进行繁琐的逐次成像求解,而是将一系列元件的变换矩阵进行矩阵相乘就可以得到系统的总变换矩阵。该方法不仅解决了光学元件过多时复杂的计算问题,还能够对光束在整个匀化系统的方向及高度变化进行准确描述,下面便利用矩阵光学对各系统参数与像面光斑的均匀性及大小的关系进行分析,以建立匀化系统参数与匀化性能之间的关系。

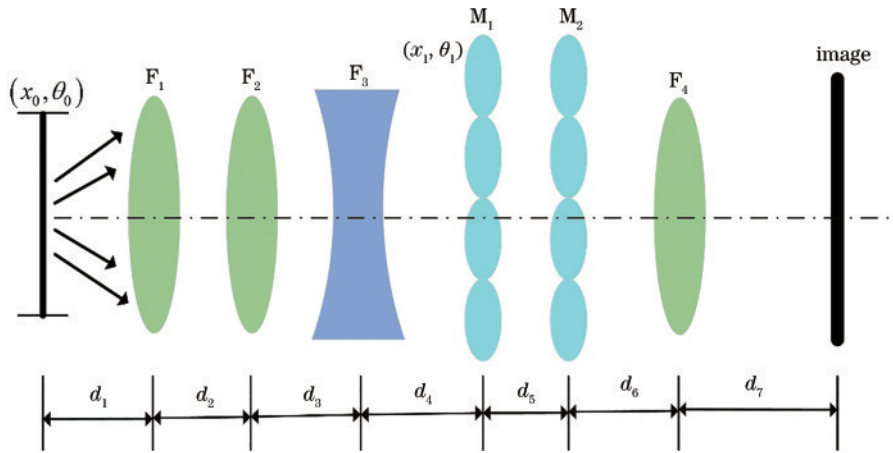


图 3 LED 阵列匀化系统结构
Fig. 3 LED array homogenization system structure

本文主要采用矩阵光学^[22]和近轴光学理论来计算推导匀化模型。基于近轴光学理论,利用矩阵光学来对 LED 发出的光线经过光学系统后的方向 and 高度变化进行描述^[23]。光线在光学系统中的传播主要依靠两种介质,分别是空气和薄透镜,空气可视为均匀介质,因此光线在厚度为 L 的空气中传播的光线变换矩阵为

$$M_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

焦距为 f 的薄透镜的光线变换矩阵为

$$M_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

此外,物像共轭关系可以利用几何光学的成像公式来计算,在理想光学系统中,物体与焦距为 f 的距离为 l ,像距为 l' ,三个参数可以利用光学高斯公式来计算。

$$\frac{1}{l'} + \frac{1}{l} = \frac{1}{f}. \quad (3)$$

不同光组之间的传递关系可以用下式表示,前一光组的像距为 l'_{i-1} ,后一光组的物距为 l_i ,其中 i 为当前光组, $i-1$ 表示前一个光组,两个光组之间的距离为 d_{i-1} 。

$$l_i = l'_{i-1} - d_{i-1}. \quad (4)$$

在此匀化系统中,各个光学器件的参数已在图中标注,其中两个微透镜阵列的焦距分别为 f_1 和 f_2 ,微透镜阵列的口径为 p , n 代表第几个子透镜,LED 阵列发出的光束的初始坐标表示为 (x_0, θ_0) ,光束经过准直后的坐标表示为 (x_1, θ_1) ,最终达到像面的光束坐标表示为 (x_2, θ_2) ,利用式(1)及(2)计算推导可得到准直后的光线坐标表达式为

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & d_4 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F_3} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F_1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ \theta_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Ax_0 + B\theta_0 \\ Cx_0 + D\theta_0 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

其中

$$A = 1 - \frac{d_4}{F_3} - \frac{d_3 + d_4}{F_2} + \frac{d_3 d_4}{F_2 F_3} - \frac{d_2 d_3 d_4}{F_1} + \frac{d_2 d_3 + d_2 d_4}{F_1 F_2} + \frac{d_2 d_4 + d_3 d_4}{F_1 F_3} - \frac{d_2 d_3 d_4}{F_1 F_2 F_3}, \quad (6)$$

$$B = d_1 + d_2 + d_3 + d_4 - \frac{d_1 d_2 d_3 d_4}{F_1} - \frac{d_1 d_4 + d_2 d_4 + d_3 d_4}{F_3} - \frac{d_1 d_3 + d_1 d_4 + d_2 d_3 + d_2 d_4}{F_2} + \frac{d_1 d_3 d_4 + d_2 d_3 d_4}{F_2 F_3} + \frac{d_1 d_2 d_3 + d_1 d_2 d_4}{F_1 F_2} + \frac{d_1 d_2 d_4 + d_1 d_3 d_4}{F_1 F_3} - \frac{d_2 d_3 d_4}{F_1 F_2 F_3}, \quad (7)$$

$$C = 1 - \frac{1 + d_2}{F_1} - \frac{1}{F_2} - \frac{1}{F_3} + \frac{d_2}{F_1 F_2} + \frac{d_2 + d_3}{F_1 F_3} + \frac{d_3}{F_2 F_3} - \frac{d_2 d_3}{F_1 F_2 F_3}, \quad (8)$$

$$D = 1 + d_2 - \frac{d_1 + d_1 d_2}{F_1} - \frac{d_1 + d_2}{F_2} - \frac{d_1 + d_2 + d_3}{F_3} + \frac{d_1 d_2}{F_1 F_2} + \frac{d_1 d_2 + d_1 d_3}{F_1 F_3} + \frac{d_1 d_3 + d_2 d_3}{F_2 F_3} - \frac{d_1 d_2 d_3}{F_1 F_2 F_3}. \quad (9)$$

经准直后的光束经过微透镜后到达像面时的光线

坐标为

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & d_7 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F_4} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_6 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \left[\begin{pmatrix} np \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_5 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} np + x_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix} \right] = \begin{bmatrix} \left(1 - \frac{d_7}{F_4}\right) A_1 & \left(d_6 + d_7 - \frac{d_6 d_7}{F_4}\right) B_1 \\ -\frac{1}{F_4} A_1 & \left(1 - \frac{d_6}{F_4}\right) B_1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

其中

$$A_1 = np + d_5 \theta_1 + \left(1 - \frac{d_5}{f_1}\right) (x_1 + np), \quad (11)$$

$$B_1 = \left(-\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} + \frac{d_5}{f_1 f_2}\right) (x_1 + np) + \left(1 - \frac{d_5}{f_2}\right) \theta_1. \quad (12)$$

为了使该匀化系统可以成功用在光刻系统、太阳模拟器等各类光学系统中,其结构必须紧凑,以免影响光学系统其他部分的功能或加大其体积,因此令 $d_4 = d_6 = 0$,即令透镜 F_3 紧靠微透镜阵列 M_1 ,透镜 F_4 紧靠微透镜阵列 M_2 ,得到如图 4 所示的简化型匀化系统。

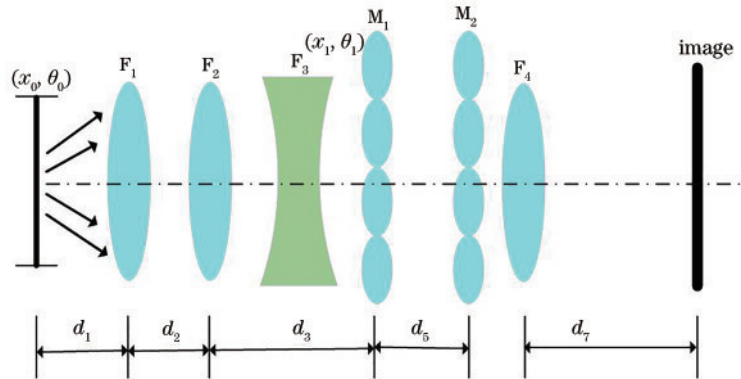


图 4 LED 阵列匀化系统简化结构

Fig. 4 Simplified structure of LED array homogenization system

准直后的光线坐标与 d_2 和 d_4 都无关,因此 (x_1, θ_1) 保持式(5)不变化,则到达微透镜阵列 M_1 及像面的光线坐标变为

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \left(1 - \frac{d_3}{F_2} + \frac{d_2 d_3}{F_1 F_2}\right) x_0 + \left(d_1 + d_2 + d_3 - \frac{d_1 d_3 + d_2 d_3}{F_2} + \frac{d_1 d_2 d_3}{F_1 F_2}\right) \theta_0 \\ C x_0 + D \theta_0 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \left(1 - \frac{d_7}{F_4}\right) A_1 + d_7 B_1 - \frac{1}{F_4} A_1 + B_1 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

其中,

$$A_1 = np + d_5 \theta_1 + \left(1 - \frac{d_5}{f_1}\right) (x_1 + np), \quad (15)$$

$$C = 1 - \frac{1 + d_2}{F_1} - \frac{1}{F_2} - \frac{1}{F_3} + \frac{d_2}{F_1 F_2} + \frac{d_2 + d_3}{F_1 F_3} + \frac{d_3}{F_2 F_3} - \frac{d_2 d_3}{F_1 F_2 F_3}, \quad (16)$$

$$D = 1 + d_2 - \frac{d_1 + d_1 d_2}{F_1} - \frac{d_1 + d_2}{F_2} - \frac{d_1 + d_2 + d_3}{F_3} + \frac{d_1 d_2}{F_1 F_2} + \frac{d_1 d_2 + d_1 d_3}{F_1 F_3} + \frac{d_1 d_3 + d_2 d_3}{F_2 F_3} - \frac{d_1 d_2 d_3}{F_1 F_2 F_3}. \quad (17)$$

在此基础上,要求该光学系统满足柯勒照明系统

的两组共轭关系要求,由模型分析可知,两组共轭关系为微透镜阵列 M_1 与像面、微透镜阵列 M_2 与无穷远,根据第一组共轭关系可知,理论上由 LED 阵列发出的光束经过准直后由微透镜阵列 M_1 聚焦于微透镜阵列 M_2 的每个透镜单元焦点上,但这只是为了满足共轭关系,实际上只需满足几何光学的成像理论即可实现匀光。因此利用式(3)及(4)可得:

$$\begin{cases} l'_4 = d_5 = \frac{f_1 F_3 (F_2 - d_3)}{(F_2 - d_3) F_3 - f_1 (F_2 - F_3 - d_3)} \\ l'_6 = d_7 = \frac{f_2 d_5 F_4}{f_2 d_5 - F_4 (d_5 - f_2)} \end{cases} \quad (18)$$

在满足复眼柯拉匀化系统要求的基础上,对模型进行简化,令 $d_5 = f_1 = f_2 = f, F_4 = d_7, d_1 = F_1, d_3 = F_2 + F_3$, 由此可将入射微透镜阵列 M_1 和像面的光束坐标进行简化可得:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{d_2 d_3 - F_1 F_3}{F_1 F_2} x_0 + \left(d_1 + d_2 + d_3 - \frac{d_1 d_3}{F_2} \right) \theta_0 \\ \left(1 - \frac{d_2}{F_1} + \frac{F_2}{F_1 F_3} \right) x_0 + \frac{d_3}{F_2 F_3} (F_1 + F_2 + d_2) \theta_0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{d_7}{f} (x_1 + np) \\ -\frac{1}{F_4} (np + f\theta_1) - \frac{1}{f} (x_1 + np) \end{bmatrix} \quad (20)$$

对于入射到微透镜阵列 M_1 的光束坐标来说,其最大的高度为 $x'_{1\max} = p/2$,最大的发散角为 $\theta_{1\max} = p/2f$,因此到达像面的光束坐标最大值表达式为

$$\begin{pmatrix} x_{2\max} \\ \theta_{2\max} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{d_7 p}{2f} \\ -\frac{1}{F_4} (np + fp/2f) - \frac{p}{f} (x_1 + np) \end{bmatrix} \quad (21)$$

根据该式,可以确定影响像面光斑大小的主要参数分别为:微透镜阵列口径 p 、焦距 f 、像面距积分透镜的距离 d_7 ,因此要想在像面上得到理想光斑,重点在于对这三个参数的确定。

2.3 光斑均匀性定义

目前,对光斑均匀性定义应用最广泛的是美国国家标准 ANSI/NAPMITT7.228—1997^[24],也称为九点采样法,主要是通过光斑照度对均匀性进行定义。具体方法为:将照明面等面积分为 9 个矩形区域,将每个矩形中心点的光照度作为采样点,并对其进行编号,如图 5 所示。

将照明均匀度用 U 表示,可得:

$$U = \left[1 - \frac{\max |E_i - E_a|}{E_a} \right] \times 100\%, \quad (22)$$

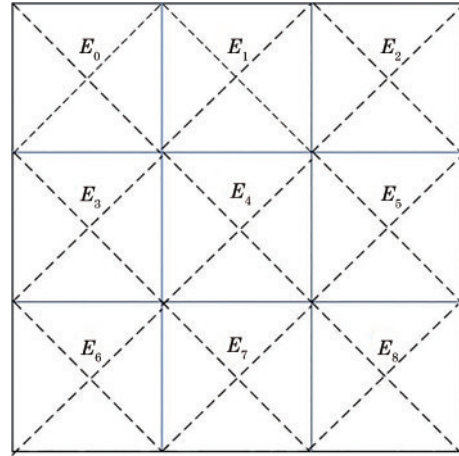


图 5 九点采样法示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the nine-point sampling method

式中: $E_i = 0, 1, \dots, 8; E_a = \frac{\sum_0^8 E_i}{9}$ 。

3 模型参数设计及仿真实验

本文主要针对 4×5 的方形 LED 阵列光源来进行匀化,最终在像面上需实现面积 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 、均匀度在 80% 以上的光斑。每个 LED 的辐射功率及大小分别为 2.5 W 和 $3.5 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$,波长为 365 nm,发散角为 20° 。首先根据 LED 阵列的大小确定微透镜阵列的个数为 30×30 ,而像面上的照明光斑面积为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,由式(20)、(21)可确定系统参数如下:微透镜阵列单元的口径 $p = 4 \text{ mm}$,焦点 $f = 5 \text{ mm}$, $d_1 = F_1 = 80 \text{ mm}, d_3 = F_2 + F_3, d_2 = 47 \text{ mm}, d_3 = 30 \text{ mm}, F_2 = 70 \text{ mm}, d_7 = d_4 = 250 \text{ mm}, d_5 = f_1 = f_2 = f = 5 \text{ mm}$,由 $d_4 = d_6 = 0$ 计算得到 $F_3 = -40 \text{ mm}$ 。

根据以上计算结果,可在 lighttools 中进行建模仿真,最终得到的模型如图 6 所示,在完成建模后,对该模型进行光线追迹,可以发现,当对 LED 阵列发出的光线进行准直时,经过透镜组 F_1, F_2, F_3 发出的光束准直效果并无改变,这是因为 LED 阵列发散角较大,并不完全适用于近轴光线理论,因此本文利用 lighttools 自身的准直优化评价函数来对 F_1 的焦距及 d_1 进行优化,最终可得到修正后的参数为 $F_1 = 69.924 \text{ mm}, d_1 = 102.848 \text{ mm}$,将光线追迹的模拟输入修改为 250000,再进行光线追迹,最后对像面上的光斑均匀性进行分析。

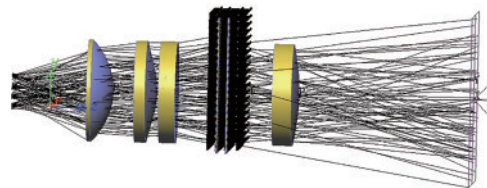


图 6 LED 阵列匀化系统设计结构

Fig. 6 Design structure of LED array homogenization system

在完成建模和参数设定后,改变像面的位置分别对整个匀化系统进行仿真,最终可在像面上得到如图 7 所示的光照度分布。

根据仿真结果可知,像面在积分透镜焦面处得到的光斑并不理想,而是在焦平面前 $d_i=430$ mm 时达到

理想效果,此时的光斑均匀度为 $U=87.375\%$,这是因为经过微透镜阵列进行匀光后的光路发生了微小改变,所以实现理想匀化光斑的位置并不一定在积分透镜焦面上,该匀化系统可实现 104 mm \times 104 mm、均匀度为 87.375% 的照明光斑,基本与理想结果一致。

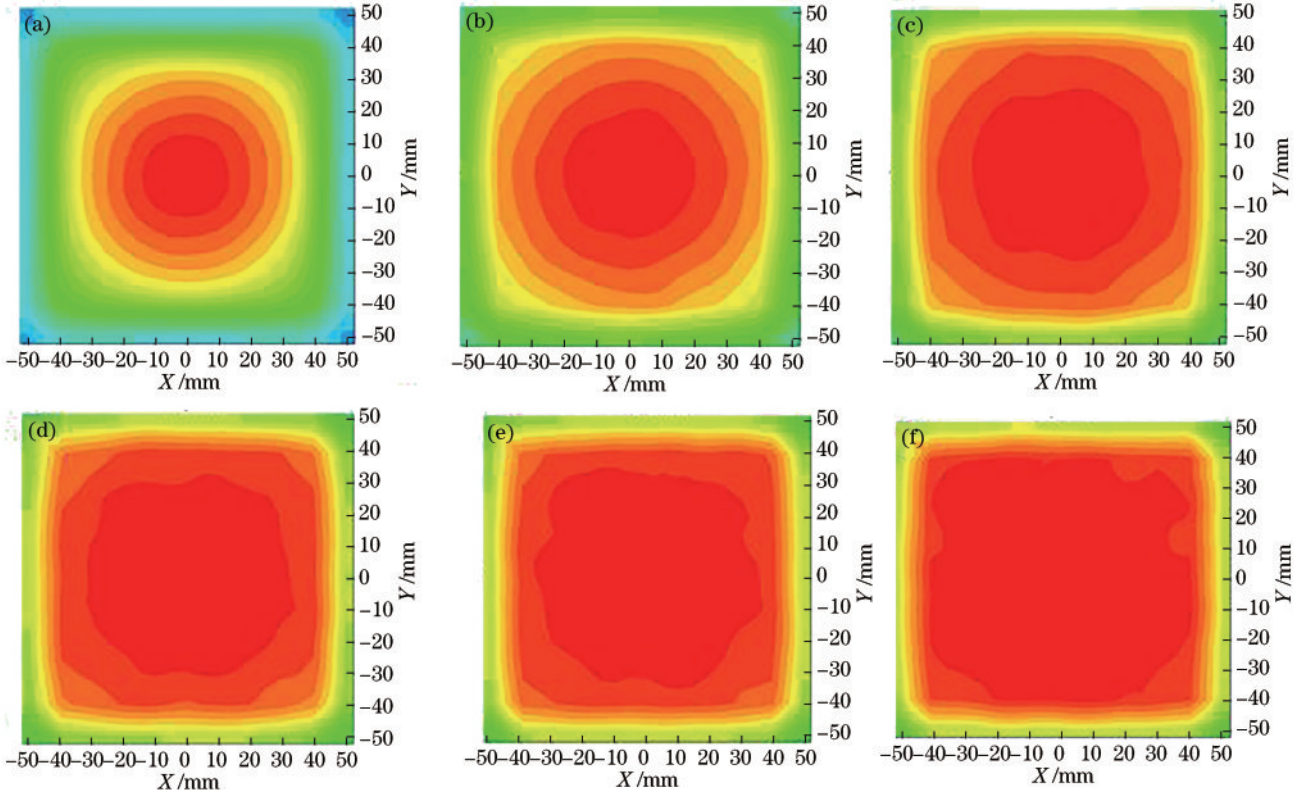


图 7 匀化系统仿真结果。(a) $d=150$ mm; (b) $d=270$ mm; (c) $d=320$ mm; (d) $d=370$ mm; (e) $d=420$ mm; (f) $d=430$ mm

Fig. 7 Simulation results of homogenization system. (a) $d=150$ mm; (b) $d=270$ mm; (c) $d=320$ mm; (d) $d=370$ mm; (e) $d=420$ mm; (f) $d=430$ mm

4 结 论

本文根据矩阵光学与近轴光学理论进行模型设计,在准直单元利用了透镜组来对 LED 阵列发出的光束进行准直,在匀化单元利用的是双排微透镜阵列进行光束匀化,成功在像面上得到了 104 mm \times 104 mm、均匀度为 87.375% 的大面积均匀光斑。从仿真结果可以看出,本文设计的微透镜阵列匀光系统能够以较小的光学结构得到大面积的矩形均匀光斑,这对于需要大面积均匀照明的光学系统具有极大的意义。此外,该方法还具有结构紧凑、体积小等特点,应用于其他光学系统中并不会改变系统结构,也不会影响系统原有性能。相较于过去可匀化的 LED 阵列光源尺寸限制,该匀化系统对于较大尺寸及较大发散角的 LED 阵列光源均可实现理想的匀化效果。该方法能够实现高均匀大面积矩形光斑,可应用于数字光刻、太阳模拟器等各类需要照明的光学系统中。

参 考 文 献

- [1] 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.
Lei C Q, Wang Y F, Yin Z Y, et al. Homogenization system for diode laser stack beams based on microlens array[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(5): 0502009.
- [2] 赵阳. 深紫外光刻复杂照明光学系统设计[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010.
Zhao Y. Design of complex illumination optical system for deep ultraviolet lithography[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics and Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [3] 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.
Wang P P, Yang X B, Zhu J F, et al. Design and analysis on large area uniform illumination with fly-eye lens[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(5): 771-778.
- [4] Kim D, Lee H, Cho N, et al. Effect of GaN microlens array on the efficiency of GaN-based blue-light-emitting

- diodes[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2005, 44(1/7): L18-L20.
- [5] Voelkel R, Weible K J. Laser beam homogenizing: limitations and constraints[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7102: 71020J.
- [6] 匡丽娟, 翟金会, 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.
Kuang L J, Zhai J H, Ruan Y, et al. Characteristics of the fly-eye lens in uniform illumination system[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2005, 3(6): 29-31.
- [7] Frieden B R. Lossless conversion of a plane laser wave to a plane wave of uniform irradiance[J]. Applied Optics, 1965, 4(11): 1400-1403.
- [8] Kanzler K, Stockham A. Diffractive laser beam shaping for holography[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7430: 743006.
- [9] Chen M, Berkowitz-Mattuck J B, Glaser P E. The use of a kaleidoscope to obtain uniform flux over a large area in a solar or arc imaging furnace[J]. Applied Optics, 1963, 2(3): 265-271.
- [10] Chen E G, Wu R M, Guo T L. Design a freeform microlens array module for any arbitrary-shape collimated beam shaping and color mixing[J]. Optics Communications, 2014, 321: 78-85.
- [11] 高瑀含, 安志勇, 李娜娜, 等. 高斯光束整形系统的光学设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 1464-1471.
Gao Y H, An Z Y, Li N N, et al. Optical design of Gaussian beam shaping[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(7): 1464-1471.
- [12] 林勇. 用于激光光束整形的衍射光学元件设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
Lin Y. Design of diffractive optical elements for laser beam shaping[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [13] 熊岩. 基于万花筒的半导体激光光束匀化技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
Xiong Y. Research of homogenizing technology for diode laser beam based on kaleidoscope[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [14] Zhang F, Yang Q, Bian H, et al. Fabrication of a chalcogenide glass microlens array for infrared laser beam homogenization[J]. Materials, 2021, 14(20): 5952.
- [15] 李江, 高筱钧, 付作立, 等. 超快激光仿生复眼加工研究进展[J]. 中国激光, 2022, 49(10): 1002704.
Li J, Gao X J, Fu Z L, et al. Research advancement on the fabrication of artificial compound eye using ultrafast laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(10): 1002704.
- [16] 刘中元. 用于 DMD 光刻机的匀光系统的研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2019.
Liu Z Y. Research on a homogenizer for DMD lithography machine[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2019.
- [17] 陈宽, 张浩, 樊红英, 等. 基于微透镜阵列的激光光束能量均化技术研究[C]//第十五届全国光学测试学术交流会论文摘要集. 北京: 中国光学学会, 2014: 93.
Chen K, Zhang H, Fan H Y, et al. Research on laser beam energy homogenization technology based on microlens array[C]//Abstract Collection of the 15th National Optical Testing Academic Exchange Conference. Beijing: The Chinese Optical Society, 2014.
- [18] 陆汉民. 均匀照明系统的设计与应用[J]. 光学仪器, 1990, 12(4): 32-39.
Lu H M. Design and application of uniformly illuminating system[J]. Optical Instruments, 1990, 12(4): 32-39.
- [19] 郭长伟. 基于 LED 均匀照明的仿真研究与应用[D]. 苏州: 苏州大学, 2019.
Guo C W. Simulation research and application based on uniform illumination of the LED[D]. Suzhou: Soochow University, 2019.
- [20] 田大垒, 关荣锋, 王杏, 等. 用于 LED 的微透镜阵列的光学性能研究[J]. 半导体技术, 2008, 33(9): 776-779.
Tian D L, Guan R F, Wang X, et al. Study on optical properties of microlens array for LED[J]. Semiconductor Technology, 2008, 33(9): 776-779.
- [21] 杨飞凡, 李晖, 彭晶, 等. 基于图正则化的高分辨率光场显微成像研究[J]. 光学学报, 2021, 41(9): 0918001.
Yang F F, Li H, Peng J, et al. Research on microscopic imaging of high-resolution light field based on graph regularization[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(9): 0918001.
- [22] 阎吉祥, 魏光辉. 矩阵光学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995.
Yan J X, Wei G H. Matrix optics[M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 1995.
- [23] 姜安琪. 基于微透镜阵列和随机场景的光匀化系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
Jiang A Q. Research on the beam homogenization system based on the microlens arrays and random scenes[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [24] 梁庆九, 周金运. 基于 365 nm LED 的数字光刻照明系统匀光设计[J]. 量子电子学报, 2018, 35(2): 225-229.
Liang Q J, Zhou J Y. Uniform light design of digital lithography illumination system based on 365 nm LED[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2018, 35(2): 225-229.