

# 复眼透镜在激光二极管阵列光束整形中的应用

贾文武 汪岳峰 黄 峰 殷智勇 赵 诚

(军械工程学院光学与电子工程系, 河北 石家庄 050003)

**摘要** 在回顾复眼透镜对单光束光源的均匀化机制基础上,分析了复眼透镜对激光二极管(LD)阵列光源的光束均匀化机制。即对子光束分割叠加破坏相似性,对所有分割叠加后的子光斑进行叠加获得均匀性。在此基础上,以抽运薄片或者板条激光器需要高功率密度的均匀抽运光为需求,设计了基于复眼透镜的 LD 阵列光束整形系统,并给出了其中复眼透镜和积分透镜这两个关键部件的结构形式和相关参数。最后根据所设计的复眼透镜 LD 光束整形系统搭建了相应的实验光路并测试了整形后光斑不均匀性,测试表明不均匀性为 9.8%,验证了对复眼透镜 LD 阵列光束整形的分析。

**关键词** 光电子学;复眼透镜;光束整形;抽运

**中图分类号** TN245 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0202008

## Application of Fly's Eye Lens in Beam Shaping Laser Diode Array

Jia Wenwu Wang Yuefeng Huang Feng Ying Zhiyong Zhao Cheng

(Department of Optics and Electronic Engineering, Ordnance Engineering College,

Shijiazhuang, Hebei 050003, China)

**Abstract** Reviewing the mechanism of fly's eye lens homogenizing single beam source, the mechanism of fly's eye lens homogenizing laser diode array is studied. Each single beam is split and superposed to break down the comparability between them, then the shaped beams are superposed to gain a uniform beam. Then a fly's eye lens based beam shaping system for laser diode array, aiming to improve pumping intensity, is designed. The parameters of fly's eye lens and integrating lens are given out. An experiment of the designed beam shaping system is done and the non-uniformity of result beam is measured, which confirms the analysis of fly's eye lens homogenizing laser diode array.

**Key words** optoelectronics; fly's eye lens; beam shaping; pumping

**OCIS codes** 220.2945; 140.5560; 140.2020

## 1 引 言

复眼透镜由一系列子透镜组合而成,形成空间上的微透镜阵列。将复眼透镜应用于照明系统中可以获得高的光能利用率和均匀的照明效果,其光束匀化能力在投影显示等领域已经得到广泛的证明<sup>[1~5]</sup>。而在高功率固体激光抽运中,抽运均匀性直接与激光介质的温度分布、应力分布相关联,会影响到激光器能否实现高光束质量的激光输出以及激光器的能量转换效率<sup>[6~9]</sup>。因此将复眼透镜引入到

激光二极管(LD)抽运耦合系统中作为 LD 阵列的光束整形器件,对于提高 LD 抽运的均匀性具有重要意义。但是与投影显示中光束整形不同,LD 阵列的光束整形具有它的特殊性:抽运功率密度是激光抽运源的重要技术指标,因此针对 LD 抽运做光束整形时通常要求压缩光斑尺寸以提高抽运功率密度;LD 阵列光源中单个发光点的光束是相干光而发光点之间不相干,这种局部相干性是如何影响复眼透镜整形结果的均匀性的,这是以抽运为需求的

**收稿日期**: 2010-08-07; **收到修改稿日期**: 2010-09-25

**作者简介**: 贾文武(1984—),男,博士研究生,主要从事光学系统设计和光束整形等方面的研究。

E-mail: jww4891@163.com

**导师简介**: 汪岳峰(1963—),男,博士,教授,主要从事固体激光技术方面的研究。E-mail: WYFmail@sina.com

基于复眼透镜的 LD 阵列光束整形需要重点解决的问题。本文设计了基于复眼透镜的 LD 阵列光束整形系统,给出了相关参数并进行了实验验证。

## 2 复眼透镜 LD 阵列光束均匀化机制

### 2.1 复眼透镜对单光束光源的均匀化机制

复眼透镜光束均匀化主要依靠对光束的分割和叠加来实现,在复眼透镜光束整形中通常是针对单光束光源的<sup>[10,11]</sup>。

如图 1(a)所示,基于复眼透镜的 LD 整形系统通常由双排微透镜阵列和积分透镜组成。两组微透镜阵列前后平行放置且间距为子透镜的焦距,子透镜之间相互对准形成子透镜对。第一组微透镜阵列中的子透镜将入射光束分割为子光束并聚焦到第二组微透镜阵列上,第二组微透镜阵列中的子透镜和积分透镜共同将对应的子光束重合在积分透镜的焦

面上。由于第一排微透镜阵列将光源的整个宽光束分为多个细光束,每个细光束范围内的微小不均匀性将在重合的过程被平滑从而获得均匀照明。这就是微透镜阵列光束均匀化的分割叠加机制。

当入射光不是平行光时,如图 1(b)所示,不同入射角的光线通过第一组微透镜阵列后将被聚焦于第二组微透镜阵列的相应子透镜的不同高度处。此时第二组微透镜通过第一组子透镜的中心光线偏折为平行光轴出射,保证其他入射角的光线仍然能够在积分透镜的焦面上重合,从而使非准直光束仍然能够在焦面上重合。但是如果光线的入射角过大,使光线聚焦点超出对应子透镜的孔径范围进入相邻的子透镜孔径,其光束将偏离重合区域而形成旁瓣,降低了光源的能量利用率。对于具有一定发散角的光源来讲,子透镜的数值孔径需要足够大才能接收到来自光源的所有光线。

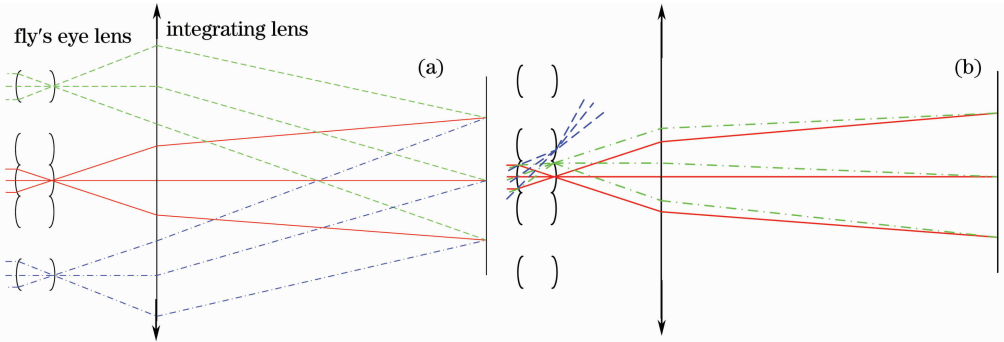


图 1 复眼透镜光束整形系统示意图

Fig. 1 Sketch of fly's eye beam shaping system

### 2.2 复眼透镜对 LD 阵列光束的分割

对复眼透镜单光束光源均匀化机制的分析表明,复眼透镜光束均匀化的一个重要的前提是将光束进行分割和叠加。虽然 LD 阵列的光束也是由一个个子光束组成的,但是如果以此进行光束分割,直接将各子光束叠加仍然不能得到均匀强度分布。因为 LD 的每个子光束之间的光分布是相似的(快轴方向为高斯分布,慢轴方向为超高斯分布),叠加后光分布与单光束的光分布仍然是相似的,并不能实现均匀化的目的。因此在采用复眼透镜的 LD 阵列光束均匀化的过程中,需要使用复眼透镜对 LD 阵列中的子光束进行分割,破坏这种相似性。一个解决办法就是让复眼透镜离开 LD 阵列足够的距离  $l$  使单个 LD 的光束能够覆盖多个复眼透镜的子孔径,从而每个发光点的光束被数个子透镜孔径所分割并在积分透镜后焦面叠加。图 2 是复眼透镜对 LD 阵列光束分割的示意图。由于 LD 阵列中单个

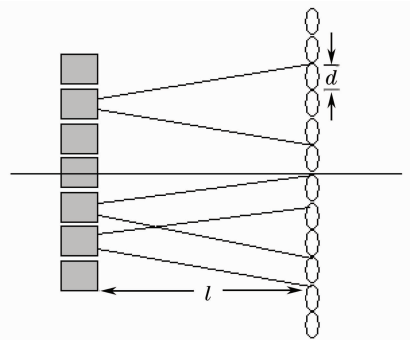


图 2 复眼透镜光束分割

Fig. 2 Beam splitting method of fly's eye lens

发光点的光束是相干的,对单个发光点的分割叠加还不能得到均匀化的目的。但是 LD 阵列是由许多非相干的发光点组成的,每个发光点分割叠加后的非均匀光斑在积分透镜的后焦面重合,其内部不均匀性将会通过叠加得到减小甚至消除。

因此,复眼透镜对 LD 阵列光束均匀化的机制

为:对 LD 阵列中每个发光点的子光束分别进行分割叠加,破坏 LD 阵列中各个子光束之间光分布的相似性;将 LD 阵列中所有子光束分割叠加后的光斑再进行非相干叠加实现均匀化的目的。

### 3 复眼透镜 LD 阵列光束整形系统设计

以一 5 bar 条的 LD 阵列进行基于复眼透镜的抽运光束整形系统的设计为例,指出其中关键参数的确定原则。LD 阵列部分参数为:波长 808 nm;发散角  $40^\circ$  (快轴),  $8^\circ$  (慢轴); bar 条数 5; 间隔 1.8 mm。

要求整形后获得尺寸压缩为  $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ , 强度分布均匀的抽运光斑。由图 1 及 2.1 节分析可知复眼透镜整形系统由复眼透镜和积分透镜组成,对其光学系统设计主要是对其各部件的结构形式和相关参数进行设计。主要包括复眼透镜的构成及其数值孔径参数,积分透镜的选择及其焦距参数。

#### 3.1 复眼透镜及其数值孔径

如图 3 所示,在该方案中复眼透镜由两组正交的一维柱透镜阵列成,其中 1,3 为一组对  $x$  方向(竖直)进行整形;2,4 为一组对  $y$  方向(水平)进行整形,两组之间交叉排列,正交放置。这样可以通过分别改变两组一维柱透镜的数值孔径来实现矩形抽运光斑。复眼透镜的口径为  $14\text{ mm} \times 14\text{ mm}$ , 保证 LD 阵列中每个发光点的光束都能够被复眼透镜的多个孔径分割。

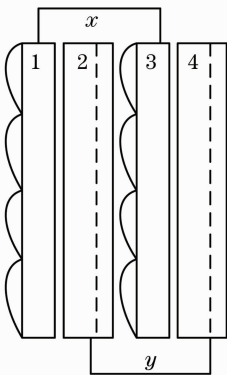


图 3 复眼透镜的构成方式

Fig. 3 Configuration of fly's eye lens

子透镜的数值孔径是影响能量利用率的重要因素,由图 1(b)可知,如果入射光发散角太大,经过第一个子透镜孔径的光线其聚焦位置将超出相应第二个子透镜的孔径范围,从而偏离设计的目标面影响抽运系统的能量利用率。而过分增大子透镜的数值孔径将会增大系统的像差,影响整形结果的均匀性。

LD 阵列快轴发散角为  $40^\circ$ , 而慢轴发散角为  $8^\circ$ 。快轴发散角较大但是便于进行光束的准直,而慢轴方向由于发光单元之间的间隔较小难以进一步准直,但是其发散角在合理范围内。综合以上因素,对 LD 快轴方向进行光纤柱透镜准直轻易准直至约  $1^\circ$  左右,而慢轴方向保持不变。因此设定子透镜的数值孔径为 0.087, 保证  $\pm 5^\circ$  的光线均能被复眼透镜接收,提高 LD 抽运系统的耦合效率。

最终选定间隔为  $500\ \mu\text{m}$ , 顶点曲率半径为 1.5 mm, 厚度为 1 mm 的一维柱透镜阵列产品(SUSS 公司, 型号为 16-1367-109-111 的产品)进行实验研究。但是由于这样的子透镜焦距约为 3.3 mm, 若将两组微透镜阵列放置在相互的子透镜焦平面上则前后两部分之间将会存在一个微小的间隙。由于实验条件的限制,在实验过程中,前后两组微透镜阵列之间紧密排列,而不是严格的后组微透镜阵列放置在前组子透镜的后焦面上。这种放置方法将会增大通过复眼透镜后子光束的发散角,需要在其后积分透镜的焦距设计中进行补偿。

#### 3.2 积分透镜及其焦距

抽运目标面上光斑的大小由子光束通过复眼透镜后的发散角和积分透镜的焦距决定。如图 4 所示,考虑一束平行光通过复眼透镜的子透镜对后变为角度为  $2\alpha$  的发散光束(由于实验第二组微透镜阵列不能放置在第一组焦面上,而是略在焦面之前,设计时需要考虑实际的角度)。积分透镜靠近复眼透镜放置基本上不影响发散角大小,因此在积分透镜的后焦面上光斑尺寸为

$$f \cdot \tan \alpha = H,$$

式中  $f$  为积分透镜的焦距,  $2H$  为整形后光斑的尺寸。

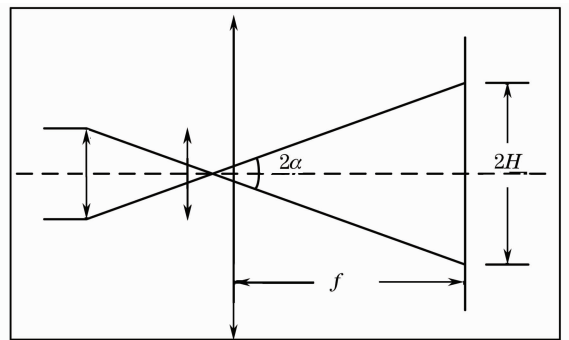


图 4 积分透镜焦距、光斑尺寸与子光束发散角的关系

Fig. 4 Relation of focal length of integrating lens, beam size and divergence of beamlet

要实现  $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$  的光斑面积要求积分透镜的焦距为 17 mm, 考虑到积分透镜的口径约需

20 mm以实现与复眼透镜口径的匹配,此时若采用普通透镜则像差将会非常大,影响复眼透镜的整形性能<sup>[12]</sup>。故选用非球面透镜作为积分透镜,以减小像差对整形结果的影响。

#### 4 复眼透镜 LD 阵列光束整形实验

经过对复眼透镜 LD 阵列光束整形的分析和设计,对一 5 bar 条的 LD 阵列光束进行相应的实验研究。LD 阵列光束经过快轴预准直后其光场分布如图 5 所示,由一条条亮线组成。实验时 LD 的输入电流很小,部分发光点没有发光,正好模拟了阵列中部分发光点失效对整形效果的影响。通过复眼透镜将 LD 阵列这种由若干亮线组成的光斑整形为 4 mm × 4 mm 的均匀光斑。复眼透镜按照 2.1 节中的方法构

成如图 6 所示。为了方便调试和安装,通过一个成像透镜将光路上不同截面处的光斑放大成像在较远的成像屏上。由摄像头将成像屏上 808 nm 的整形光斑像转化为可见图像,成像在显示器上。



图 5 整形前 LD 阵列的光斑分布  
Fig. 5 Light spot of LD before shaping

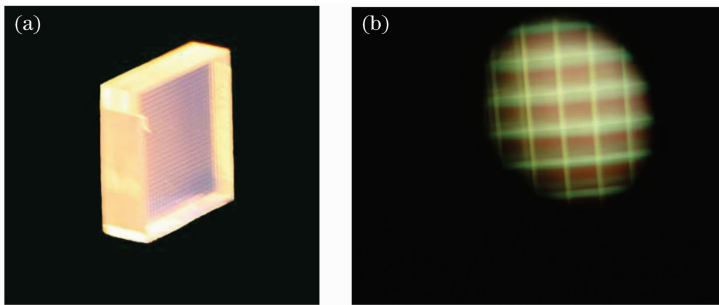


图 6 组装好的二维复眼透镜。(a)二维复眼透镜外观,(b)显微镜下的二维结构

Fig. 6 Fly's eye lens. (a) appearance of fly's eye lens, (b) two dimensional construction under microscope

首先观察复眼透镜对 LD 阵列光束的分割情况。图 7(a)为观察复眼透镜对 LD 阵列光束分割的实验光路。在该光路中先不加积分透镜,在复眼透镜后放置一成像透镜和成像屏。通过调节成像透镜和成像屏的位置,使复眼透镜后表面的光斑成像在成像屏上。通过一摄像头将成像屏上的像转化为可见图像成像在显示器上,如图 7(b)所示。可以看出 LD 阵列光束被复眼透镜的子孔径所分割,分割后的各个子光束的强度分布不一,而子光束内的光强度分布也是不均匀的。

再将积分透镜加入光路中如图 8(a)所示,在积分透镜后焦面上放置一白纸,其上的光斑如图 9 所示。调节成像透镜的位置使该光斑成像在成像屏上,通过摄像头转化为可见图像如图 8(b)所示。可见图 7(b)中这些强度不一,分布也不尽相同的子光束将通过积分透镜在其后焦面上叠加获得均匀的光斑。同时可以看见整形后光斑内不存在干涉条纹,说明单个发光点分割叠加所产生的干涉条纹已被发光点之间的非相干叠加所消除。

复眼透镜 LD 阵列光束整形可以得到均匀的光

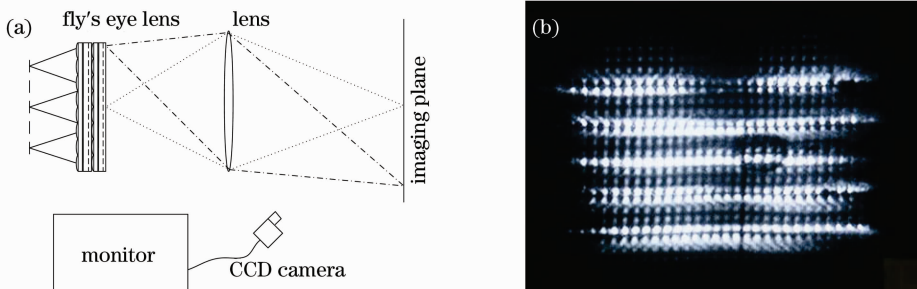


图 7 复眼透镜对光束的分割情况。(a)实验光路,(b)复眼透镜对光束的分割

Fig. 7 Split beam by fly's eye lens. (a) experimental system, (b) split beam

分布,可以作为薄片或者板条激光的抽运光源整形手段。此时抽运光的均匀性是一个重要特性,因此对整形光斑的均匀性进行了测量。其均匀性可以通过光斑中强度最大值与最小值的差值与均值的比来

衡量,即不均匀性,比值越小表明均匀性越好。测量时,通过 CCD 摄像头正对图 9 的光斑进行成像,则图像的灰度分布反映了光斑的强度分布。经过测量光斑像的不均匀性为 9.8%。

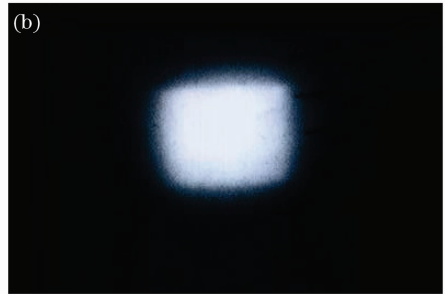
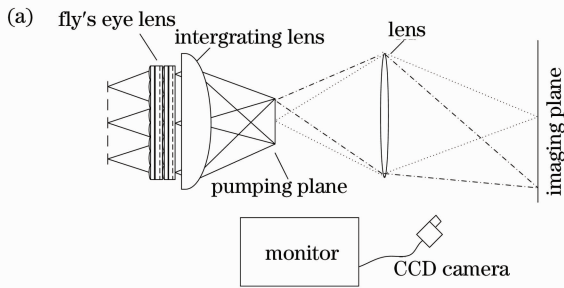


图 8 复眼透镜 LD 阵列光束整形结果。(a)实验光路,(b)后焦面光斑成像

Fig. 8 Results of experiment. (a) experimental system, (b) image of beam on the back focal plane



图 9 整形后 LD 阵列的光斑分布

Fig. 9 Light spot of LD after shaping

## 5 结 论

以激光抽运为需求,对复眼透镜用于 LD 阵列光束整形方法进行了研究。指出了复眼透镜 LD 阵列光束均匀化的机制:对 LD 阵列中每个发光点的子光束分别进行分割叠加,破坏 LD 阵列中各个子光束之间光分布的相似性;再将 LD 阵列中所有子光束分割叠加后的光斑再进行非相干叠加,排除子光束分割叠加时干涉效应的影响,最终实现均匀化的目的。以激光抽运为需求进行了复眼透镜 LD 光束整形系统的设计,指出了其中复眼透镜子透镜数值孔径和积分透镜焦距等参数的确定原则及其对整形性能的影响。最后通过实验验证了文章对复眼透镜 LD 阵列光束整形均匀化机制的分析。

## 参 考 文 献

- Peter Schreiber, Sergey Kudaev, Peter Dannberg *et al.*. Homogeneous LED-illumination using microlens arrays [C]. *SPIE*, 2005, **5942**: 59420K
- Frank C. Wippermann, Uwe-D. Zeitner. Fly's eye condenser based on chirped microlens arrays [C]. *SPIE*, 2007, **6663**: 666309

- Sun Wenjun, Zhang Meiheng, Yin Yanzong *et al.*. Design of LED optical engine for micro-projection display of DMD [J]. *Optical Technique*, 2009, **35**(5): 646~648  
孙文军, 张梅恒, 尹燕宗等. DMD 微投影显示的 LED 光学引擎设计[J]. *光学技术*, 2009, **35**(5): 646~648
- Maik Zimmermann, Norbert Lindleinb, Reinhard Voelkel *et al.*. Microlens laser beam homogenizer—from theory to application[C]. *SPIE*, 2007, **6663**: 666302
- Wang Wei, Zhou Changhe. New technology for fabrication of polymer microlens arrays[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2869~2872  
王 伟, 周常河. 一种新型聚合物微透镜阵列的制造技术[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2869~2872
- Cai Zhen, Jiang Jianfeng, Hu Hao *et al.*. Kilowatt high power heat capacity laser with 3 times diffraction limit[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2266~2271  
蔡 震, 蒋建锋, 胡 浩等. 千瓦级 3 倍衍射极限的高功率热容激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2266~2271
- Duan Wentao, Jiang Dongbin, Jiang Xuejun *et al.*. High power laser diode arrays end-pumped efficient coupling system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 51~55  
段文涛, 蒋东宾, 蒋学君等. 高效大功率激光二极管阵列端面抽运耦合系统[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 51~55
- Qi Yan, Gong Wupeng, Li Huan *et al.*. Effects of aberrations of coupling systems on the end-pumped solid-state lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 47~50  
齐 岩, 宫武鹏, 李 欢等. 耦合系统的成像质量对端面抽运固体激光器的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 47~50
- Lin Lin, Guo Zhen, Wang Shiyu *et al.*. Nonuniformity of thermal effect in a LD side-pumped laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1766~1771  
林 林, 过 振, 王石语等. 激光二极管侧面抽运激光器热效应的不均匀性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1766~1771
- M. Dickey Fred, C. Holswade Scott. *Laser Beam Shaping Theory and Techniques*[M]. New York: Marcel Dekker, 2000
- Bart Van Giel, Youri Meuret, Hugo Thienpont. Using a fly's eye integrator in efficient illumination engines with multiple light-emitting diode light sources [J]. *Opt. Eng.*, 2007, **46**(4): 043001
- Jia Wenwu, Huang Feng, Wang Yuefeng *et al.*. An optimization method for fly's eye integrator[J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, **42**(8): 1308~1311