

·封面文章·

光束积分激光空间整形技术

孟晶晶^{1,2,3}, 余锦^{2,3*}, 栢泽强^{1,2,3}, 王金舵^{1,2,3}, 代守军^{1,2,3}, 王晓东^{1,2,3}

¹中国科学院光电研究院计算光学成像技术重点实验室, 北京 100094;

²中国科学院光电研究院, 北京 100094;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 许多应用中都需要激光光束强度均匀分布,或者按照设计要求对激光光束的强度相位分布进行特定调制,因此,有必要对各种光束整形技术进行研究。目前,已发展了多种激光光束整形技术,其中光束积分法原理简单,适用性广,因此基于此方法的光束整形技术具有很大的工程价值。主要介绍了基于棱镜、反射镜及微透镜阵列等光学元件的光束积分系统的组成情况,列出了典型整形光路,以及近年来在光束整形方面的研究进展。同时,介绍了在整形过程中上述方法的各自特点。

关键词 激光光学; 光束积分法; 棱镜; 数字微镜器件; 微透镜阵列

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.130002

Laser Space Shaping Based on Beam Integration

Meng Jingjing^{1,2,3}, Yu Jin^{2,3*}, Mo Zeqiang^{1,2,3}, Wang Jinduo^{1,2,3},

Dai Shoujun^{1,2,3}, Wang Xiaodong^{1,2,3}

¹Key Laboratory of Computational Optical Imaging Technology, Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

²Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

³University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

Abstract Laser beams with evenly distributed or specifically modulated intensity profiles are required in many practical applications, thereby necessitating theoretical and experimental studies in laser beam shaping techniques. A variety of laser beam shaping methods, wherein the beam integration plays an important role as a result of its simple principle and wide applicability, have been proposed thus far. Therefore, it has great value in engineering. This study introduces the usage of optical components, such as prisms, mirrors, and micro-lens arrays, in beam integration systems. In this paper, the typical optical paths and recent progress are presented along with a discussion of the characteristics of these shaping methods.

Key words laser optics; beam integration method; prism; digital micro-mirror devices; micro-lens array

OCIS codes 140.3290; 220.3620; 230.3990

1 引言

激光器自 1960 年问世以来,输出波长不断拓展,性能持续提升。一般情况下,激光输出光束强度分布为近高斯函数,但是在激光抽运、材料加工、光学信息处理^[1]、光捕获及操纵^[2-3]等诸多领域,都需要对激光的

强度进行重新调制以获得期望的空间分布,如将高斯光束整形为平顶光束、空心光束等,或通过调整光束的相位分布来控制传播路径,实现激光空间整形。

目前,常用的光束整形方法可分为 3 种。第 1 种是采用滤波的方法,这种方法虽然原理、操作都较为简单,但会损失入射光的大部分能量;第 2 种是光场

收稿日期: 2019-01-04; 修回日期: 2019-01-21; 录用日期: 2019-01-31

基金项目: 中国科学院科研仪器设备研制项目(YJKYYQ20170035)、中国科学院重点部署项目(ZDRW-XH-2016-1)、中国科学院联合基金(6141A1070103)

* E-mail: jinyu@aoe.cn.com

映射的方法,通过控制入射光场与目标光场的映射关系实现光束整形,常见的非球面透镜组^[4-5]、双折射透镜组^[6]、衍射光学元件^[7]等都属于该方法,这种方法多应用于单模激光光束的整形;第3种是光束积分法^[8],在这种方法中,入射光束经阵列元件分割后再经透镜等积分元件在目标面叠加,与其他方法相比,这种方法最突出的特点是对波长不敏感,可用于非稳定、多模光场模式整形。对于部分相干光源,采用光束积分法能够得到较为理想的整形效果。1979年,Ream等^[1]首次提出光束积分的概念,对CO₂激光进行分割、调制、叠加后实现了光束整形,并对钢铁表面进行硬化,该方法在理论、制造及实验等方面得到了迅速的发展。近年来,光束积分法的研究一直围绕两个方向进行:1) 优化设计结构,降低元器件要求与简化装调工艺;2) 消除目标面处光束因子叠加产生的干涉条纹。常用的光束积分方法可按照所使用的器件进行分类,如棱镜阵列、反射镜阵列、微透镜阵列(MLA)等,本文将具体介绍上述几种光束积分方法,给出典型光路,并分析各自的特点和适用范围。

2 光束积分法的基本原理

当入射激光模式不确定或随时间变化时,采用针对确定光束整形的场映射方法一般无法获得所需的光强分布,此时采用光束积分法会得到更为理想的效果。因此光束积分法特别适用于准分子激光器、激光二极管阵列、多模或光强分布不规则的激光光源。

光束积分法中“积分”的概念来源于出射光斑图样是许多细光束在目标面的叠加总和。一个光束积分系统一般由两部分组成:1) 一个或多个多口径阵列元件,这部分元件可以将入射光束分割为细光束阵列,元件采用反射式还是折射式可根据实际需求选

择;2) 将细光束重排或聚焦到目标面的积分元件。

计算整形后的目标面光场时,一般假设每个子孔径上输入光束的振幅、相位分布均匀且认为光束阵列之间是完全空间相干的,目标面的光强 $I(x, y)$ 可看作各孔径衍射光的相干和,其表达式为

$$I(x, y) = \left| \sum A_{mn} \exp\{i[k(\alpha_m x + \beta_n y) + \theta_{mn}]\} \right|^2 \times |F(x, y)|^2, \quad (1)$$

式中: A_{mn} 、 θ_{mn} 分别为经坐标为 (m, n) 的孔径出射光束的振幅与相位; α_m 、 β_n 分别为目标场中心与元素透镜中心的方向余弦; $F(x, y)$ 为单个反射或折射式孔径产生的衍射积分; (x, y) 为坐标; k 为波数。(1)式适用于各种光束积分法的理论分析研究。

3 棱镜阵列方法

日本钢铁公司的Yamaguchi等^[9]发明了利用多棱镜阵列实现光束整形的方法,并将其应用到半导体激光器线阵的整形中。棱镜阵列如图1(a)所示,使用时将线阵的发光单元与单个棱镜一一对应,光束被分割旋转重排,以达到改善光束质量的目的。这些棱镜将每束光旋转90°,从第1个棱镜入射的光束在相邻的第2个棱镜出射,因此,设计中需保证棱镜数目比发光单元数多2个。其单个棱镜的结构如图1(b)所示, π_1 、 π_2 、 σ_1 、 σ_3 、 σ_2 、 ρ 分别为棱镜的前后、左右及上下表面,光束以0°入射角入射至平面 π_1 ,依次在 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 上反射后被旋转90°,从平面 π_2 垂直出射。使用的线阵共有12个发光单元,每个发光单元的尺寸为200 μm ,发光单元之间的周期为800 μm ,经棱镜阵列快慢轴准直后光斑尺寸为184 $\mu\text{m} \times 205 \mu\text{m}$ 。棱镜阵列整形方法与Yamaguchi等^[10]提出的渐变折射率透镜(GRIN)阵列整形方法相比,

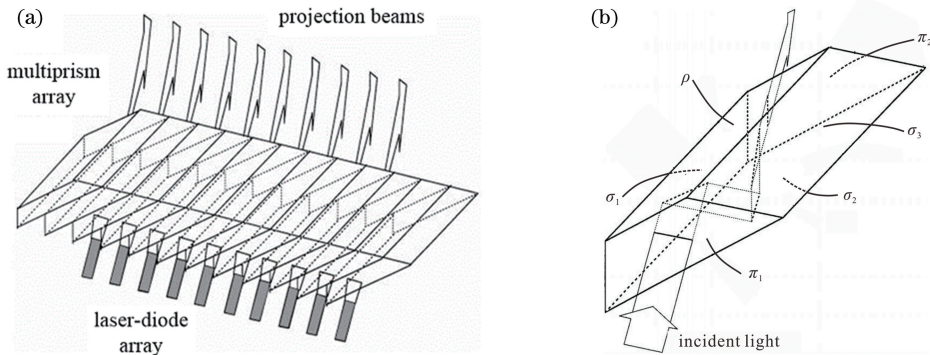


图1 棱镜阵列整形原理。(a)棱镜阵列及半导体激光器线阵经棱镜的光束转换;(b)单个棱镜结构

Fig. 1 Principle of prism array shaping. (a) Prism array and transformation of beams emitted from LD bar;

(b) structure of single prism

由于增加了额外的 4 个光学透射面和 3 个反射面,耦合效率降低,但输出激光功率密度提高了约 18 倍。

对于折射式棱镜,由于材料色散的存在,光线在棱镜内的偏折角度与激光波长密切相关。此外,由于光束质量在传输时会受到棱镜材料缺陷和光谱偏移的影响,因此整形系统的效率和功率密度难以提高。2005 年,Zheng 等^[11]提出利用反射式的双棱镜阵列对半导体激光器叠阵进行整形。此系统由 2 组反射棱镜组成,单棱镜的结构如图 2 所示。根据需整形的叠阵参数(线阵数量,叠阵周期)、光学系统参数(光线入射角 β ,棱镜间距 s ,快轴方向的偏移量与慢轴方向的被分割数 n)、目标光参数积(BPP)和输出功率可以确定阵列中单个棱镜的基本参数值 l_x ,

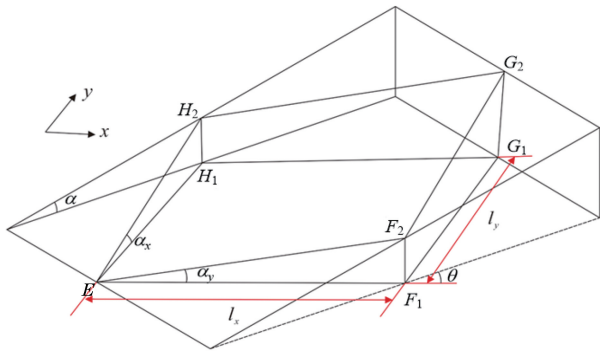


图 2 单棱镜结构
Fig. 2 Structure of single prism

l_y, α_x, α_y 。数值模拟表明,能够将准直后水平、垂直两个平面上激光光束参数积因子为 $B_s = 135 \text{ mm} \cdot \text{mrad}, B_f = 4 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 的半导体叠阵整形为 $B_s = 47.3 \text{ mm} \cdot \text{mrad}, B_f = 5.4 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 的光束。

为尽量降低对棱镜加工与装调的要求,2013 年,Huang 等^[12]利用 2 组交错棱镜阵列和 1 组反射镜阵列进行光束整形。对于由 N 个发光单元组成的半导体激光器叠阵,整形棱镜阵列 1 由长度按等差排列的 $N/2$ 个棱镜组成,它将光束沿慢轴方向分割为 $N/2$ 份,并利用棱镜的倾角对快轴方向进行压缩;棱镜阵列 2 由 $N/2 + 1$ 个 2 种长度交替排列的棱镜组成,其中 2 个相邻棱镜的边界与阵列 1 中的棱镜平分线重合,如图 3 所示,光束经过阵列 2 后完成了二次分割,将慢轴光束分割为 N 份。分割后的光束入射到由 N 个棱镜组成的反射阵列,并且通过在快轴方向线性重排来完成整形过程。实验结果表明,整个方案将被准直后的 $B_s = 240 \text{ mm} \cdot \text{mrad}, B_f = 5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 叠阵光束整形为 $B_s = 30 \text{ mm} \cdot \text{mrad}, B_f = 34 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 的光束。与其他将光束分成相同数量的棱镜阵列相比,这种交错式的排列方式可以增加单个棱镜厚度,在制造与组装上具有一定优势;同时,对快轴方向的压缩进一步提高了整形后的光束质量。

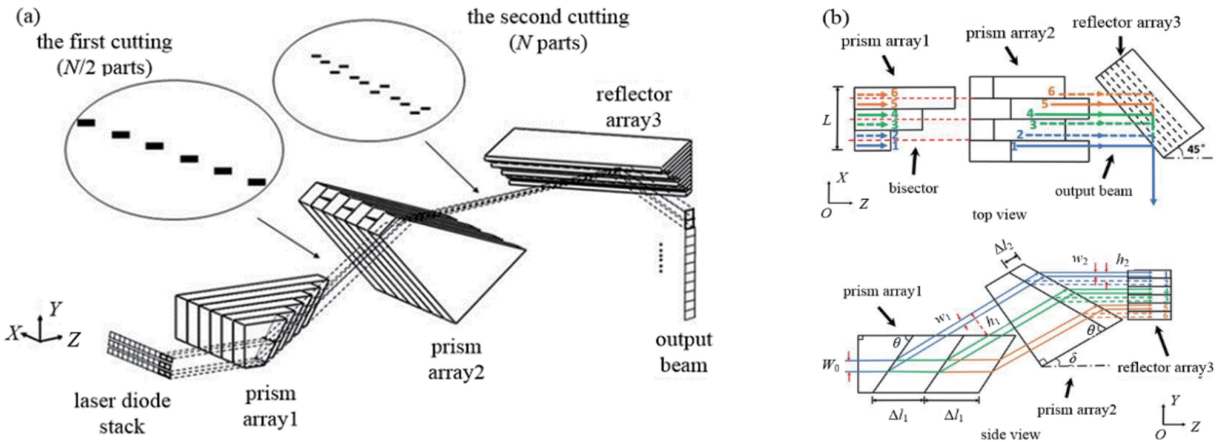


图 3 交错棱镜整形原理。(a)交错棱镜阵列整形装置示意图;(b)整形原理的侧视图及俯视图
Fig. 3 Shaping principle of staggered prisms. (a) Diagram of staggered prism array shaping device;
(b) top view and side view of shaping principle

这种由多个棱镜组阵列组成的整形系统仍会给装调带来很大的困难,它需要很高的光学元件同轴度和装调精度。2016 年,Wu 等^[13]利用光束在棱镜内部的全内反射特征,使用单棱镜组对光束切割重排,以进一步简化系统结构。整个光学系统大致可分为 3 部分,第 1 部分采用偏振复用技术以提高系

统的输出功率;第 2 部分由 8 组高度递增的棱镜组成整形系统,其中每组棱镜由 3 个子棱镜组成,单组棱镜的整形原理如图 4 所示,整形后光束 B_s, B_f 分别由 $65 \text{ mm} \cdot \text{mrad}, 13.5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 改变为 $21 \text{ mm} \cdot \text{mrad}, 14 \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$;第 3 部分在光路中加入了一对柱透镜来提高光纤耦合效率,在维持

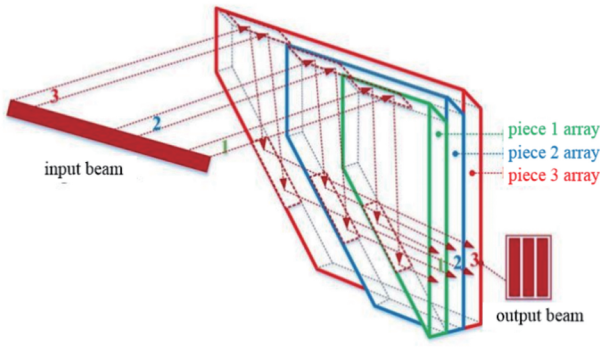


图 4 单棱镜组光束整形原理

Fig. 4 Principle of beam shaping with single prism group
光束发散角前提下保证光斑在快慢轴方向上具有相

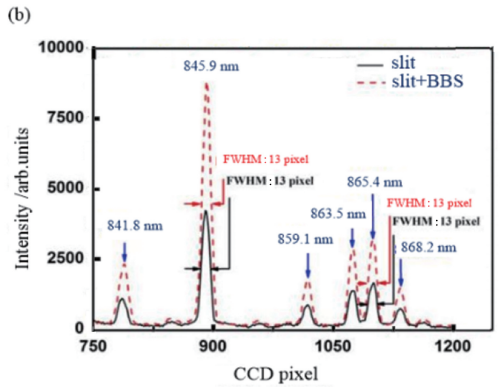
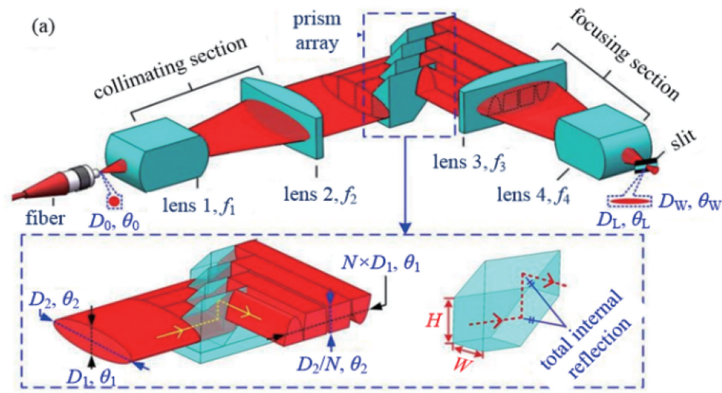


图 5 光谱仪中使用的光束整形系统。(a)光束整形原理图;(b)使用和未使用整形系统时的光谱强度

Fig. 5 Beam shaping system used in spectrometer. (a) Schematic of beam shaping; (b) spectral intensities with and without shaping system

除了用于半导体激光器的光束整形外,棱镜阵列在其他光源的整形中也有着广泛的应用。2013年, Kagoshima 等^[15]报道了利用棱镜阵列对 SPring-8 同步辐射源中 BL24XU 线站 X 光束进行预聚焦的实验。结果表明,当在光束水平和垂直方向都加入棱镜组时,入射光束尺寸由 $655 \mu\text{m} \times 679 \mu\text{m}$ 减小到 $365 \mu\text{m} \times 133 \mu\text{m}$,光通量增加了约 3 倍。2017 年, Zheng 等^[16]将半无源定位跟踪紧密排列的棱镜阵列集成在太阳能激光器中,使日平均光能利用率由 51% 提高到 67.7%。

此外,棱镜中的轴棱锥自身具有分割光束的作用。2016 年, Tsuji 等^[17]使用负透镜和正轴棱锥开发了一种用于激光雷达的 3D 照明系统,如图 6 所示。轴棱锥将高斯光束分割为均匀的两部分,并且在垂直于光轴的平面上沿相反方向传播,实现非相干叠加,形成了用于照明的平顶光束。通过改变负透镜焦距及轴棱锥锥角,所设计的光束整形系统可在 1~1000 m 的传输距离范围内实现目标面光照度标准偏差为 0.004 的均匀照明,并以

同的尺寸。实验中,此整形系统最终将 2 个 640 W 的半导体激光器叠阵耦合到直径为 $600 \mu\text{m}$ 、数值孔径为 0.22 的光纤中,总输出功率达 1056 W。

2015 年, Shi 等^[14]利用在光谱仪光纤光源和狭缝间增加适当的光束整形系统(BSS),提高了光通量。该 BSS 系统由 2 个变形透镜和棱镜阵列组成,利用半导体激光器的逆整形思路实现光通量的提升,原理如图 5(a)所示。椭圆光束经棱镜阵列分割重排后由圆柱形透镜组聚焦,实现了与入射光斑具有相同发散角的椭圆光斑,这样在通过光谱仪狭缝时,可有效降低能量损失,增加光谱强度,见图 5(b),图中 FWHM 为光斑的半峰全宽。

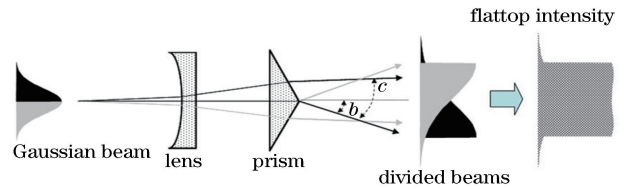


图 6 利用轴棱锥及透镜实现光束整形
Fig. 6 Beam shaping with prism and lens

单模光纤激光器为光源进行了实验验证。Zhou 等^[18]利用含二面角误差的角锥棱镜阵列完成对反射光束的均匀发散,实现了激光光束对远距离探测器的覆盖。当角锥棱镜存在二面角误差时,按原方向返回的光束被分解为 6 束强度均匀分布且中心近似位于同一圆环上的子光束,形成环形的发散光斑,同时光斑的角向均匀性也会随着传输距离的增加而增加。为解决反射光束均匀发散的问题,提出使用具有相同结构参数、不同方位角分布的角锥棱镜组阵,实现远场光斑强弱互补,获得均匀发散的环形反射光斑。

基于棱镜阵列的方法是原理最为简单且结构固

定的光束积分方法,一般情况下仅使用几何光学工具就可以完成整形光学结构的设计,并且使用单组棱镜就可以达到多组反射镜的效果,有利于减小整形装置的尺寸和复杂程度,因此被广泛应用于条码扫描器、抽运固体激光器的激光二极管整形中。但这种方法对棱镜的加工精度和对准精度要求很高,导致装配困难;此外,这种方法只能针对特定的输入光束进行整形,导致该方法适用范围窄、灵活性差。

4 反射阵列方法

早在 19 世纪 80 年代,研究者们就开始将反射式光束积分系统应用于光束匀化处理^[19-22]。1985 年,Dagenais 等^[22]提出将一系列小反射平面镜放置在一段椭圆弧上,入射光经抛物镜反射,这可看作由椭圆的焦点 F 入射,经反射平面镜阵列反射后,在过共轭焦点 F 的焦平面上实现均匀照明,如图 7 所示。分别以非稳腔产生的高度空间相干的单横模激光光束,稳定腔产生的低空间相干的多横模激光光束作为光源进行实验,发现多模光束的匀化效果更好,证明了反射式积分系统在相干度较差的光束匀化方面具有优势。

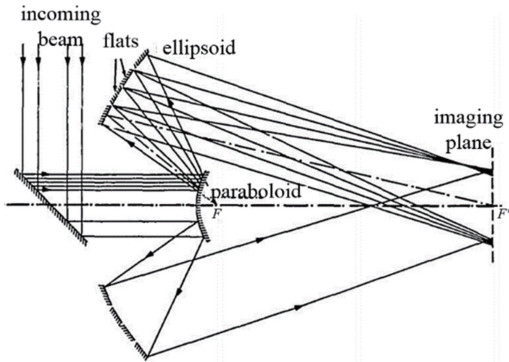


图 7 反射阵列光束整形原理

Fig. 7 Beam shaping principle of mirror array

1997 年,德国夫琅禾费研究所 Ehlers 等^[23]提出了阶梯反射镜光束整形法,通过将入射光束按照反射镜镜面尺寸进行分割、旋转、重排等处理,实现 2 个方向上光束质量的有效平衡。该方法包括 2 组完全相同的阶梯反射镜。第 1 组阶梯镜中每个镜面与慢轴均成 45° ,相邻镜面在光束传播方向上相距常数 d 。第 2 组阶梯镜与第 1 组类似,且 2 组阶梯镜一一相对。当准直光束入射到第 1 组阶梯反射镜时,光束沿慢轴方向被分割为 n 份,经第 2 组反射镜后,被反射到快轴方向,从而将线状光束斑整形为矩形光斑。基于阶梯反射镜方法的光束整形装置一般结构稳定,对半导体激光“Smile”效应不敏感,易于

调整集成。2007 年,nLight 公司在阶梯反射镜的基础上提出了垂直堆栈法,将半导体单管按高低顺序焊接到热沉上,对各单管进行快慢轴的准直,合束后进行聚焦。这种方法进一步简化了结构,但反射镜阵列在装配时容易发生变形而影响整形结果。

随着半导体集成电路微加工技术和超精密机械加工技术的进步,微机电集成系统(MEMS)得到了很大的发展,数字微镜器件(DMD)也因此得到了广泛的应用。DMD 最早是由 Hornbeck 于 1987 年发明的,它是一种基于半导体的快速反射数字光开关阵列器件,使用二进制脉宽调制技术精确控制光束的波前,并与图像处理、存储器、光源和光学器件组合以形成能够投影大尺寸、明亮、无缝、高对比度的数字投影技术(DLP)系统^[24]。

DMD 通过互补金属氧化物半导体(CMOS)存储器上的类 CMOS 工艺单片制造。每个光开关上有一面正方形铝镜,反射镜和下面的存储单元之间通过静电吸引可实现反射镜 2 个方向的旋转,其中一个方向可将入射光反射到目标面,另一个方向可将入射光反射到吸收面,如图 8 所示。当存储器处于 1(开)状态时,反射镜可旋转到 10° ,当存储器处于 0(关)状态时,反射镜可旋转到 -10° ,所以可通过计算机实时控制镜片执行机械运动来实现光束整形,并且结合光学薄膜工艺,可以拓展 DMD 器件的光谱适用范围^[25]。研究人员已将 DMD 引入光束整形技术中^[26-28],图 9 为 2015 年 Ding 等^[28]利用 DMD 将高斯激光束整形为超高斯“平顶光束”的实验装置示意图。计算机生成 DMD 加载图案,氦氖激光准直扩束后通过 DMD 调制,经聚焦、滤波后由 CCD 测试、记录。

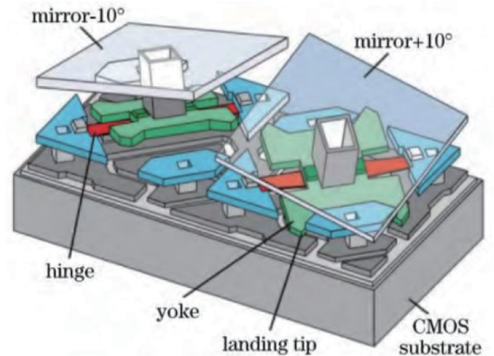


图 8 两个 DMD 像素示意图

Fig. 8 Diagram of two DMD pixels

同时,DMD 也被应用在局域空心光束整形中。1987 年,Durnin^[29]首次提出局域空心光束的概念,光束在自由空间传输时,与传播方向垂直的平面上

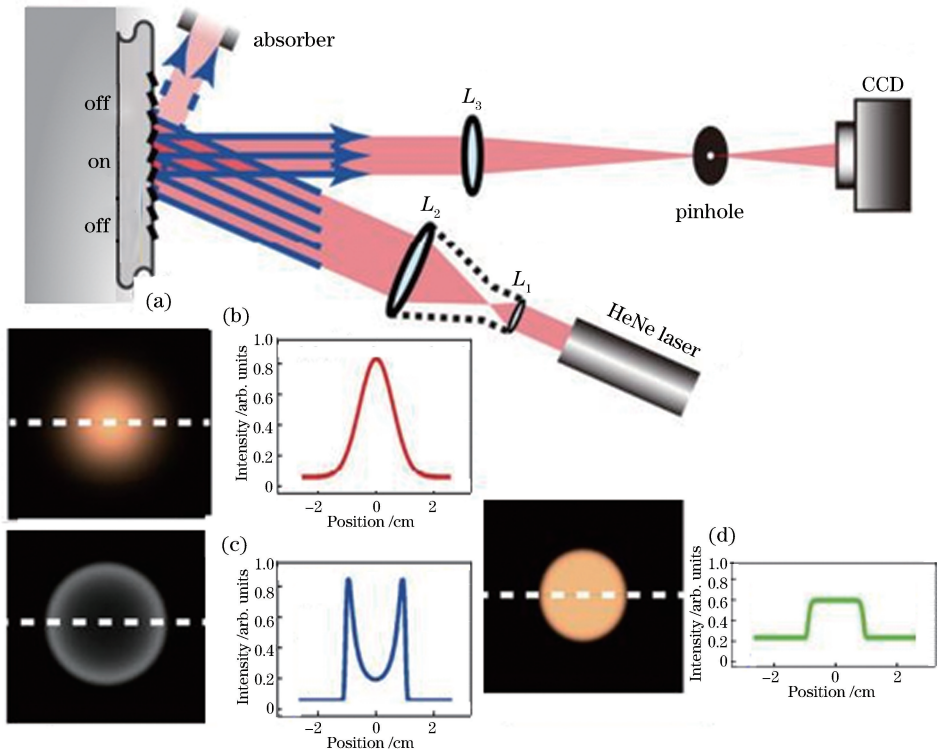


图9 实验装置示意图。(a) He-Ne激光器经DMD整形光路图;(b)输入光束的二维及一维强度分布;(c) DMD的反射模式分布;(d)理想超高斯光束的强度分布

Fig. 9 Diagram of experimental setup. (a) Optical path diagram of He-Ne laser shaped through DMD; (b) 2D and 1D intensity distributions for input beam; (c) distribution of DMD reflection mode; (d) intensity distribution of ideal super-Gaussian beam

光场分布不随距离而发生变化,所以又称为无衍射光束。与传统的高斯光束相比,空心光束具有更大的工作范围,更小的球差^[30],所以被广泛应用于光学微操作、原子光学^[31]等领域。目前已有科研人员使用DMD产生并控制了贝塞尔^[32]、胶囊状^[31]等适用于光镊系统的光束,实验结果表明,空心光束形成的光阱对微粒的操控能力优于普通高斯光镊,但DMD也存在着能量利用率不高的问题。

类似于DMD结构,研究人员也开发了基于微反射镜阵列(MMA)^[33]的光束整形方法。荷兰阿斯麦(ASML)公司将基于MMA的可编程照明装置(FlexRay)^[34-36]应用于NXT系列光刻机的曝光系统中,达到变换照明模式并产生特定照明光瞳分布的目的。FlexRay照明装置中,数千个偏转微镜可在 $-10^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 二维角度范围内连续偏转,从而调节重构光源的光强分布。通过改变偏转微反射镜的角度方向改变光瞳中反射光斑的位置,从而在目标面上重构预设的照明光瞳。图10中以4个反射镜为例说明MMA的工作原理,左、右图分别表示反射镜未旋转时和部分反射镜发生旋转后的光斑。与传

统通过衍射光学元件(DOE)来重构光源的掩模优化技术(SMO)相比,基于MMA的整形照明装置可以按照设计要求生成任意光强分布,有效地扩大了光刻工艺窗口,提高了照明光源的灵活性,并且缩短了设计周期,降低了设计成本^[37]。当光刻工艺进入65 nm以下节点时,为达到所需的重构光源精度,需要不少于10000个微反射镜单元,这会给MEMS的集成和驱动电路的制作带来困难,因此近几年研究人员都在致力于设计一种减少微透镜数量而不影响重构光源精度的照明变换系统。2015年,邢莎莎等^[37]在MMA重构前将光束整形为具有特定非均匀光强分布的光束,实现了减少所需微反射镜数量的目的。实验中,采用柱面复眼透镜对光束进行预整形,一对垂直于Y方向的柱面复眼透镜产生Y方向上均匀的光强分布,一个X方向柱面复眼透镜产生X方向平顶高斯光强分布,由此将微反射镜的数量减小至4000,满足了重构SMO优化后的像素级光源系统设计要求。除此以外,通过优化MMA控制算法也能进一步提升光束整形效果。2014年,杜猛等^[38]提出了基于随机化思想的MMA单元镜

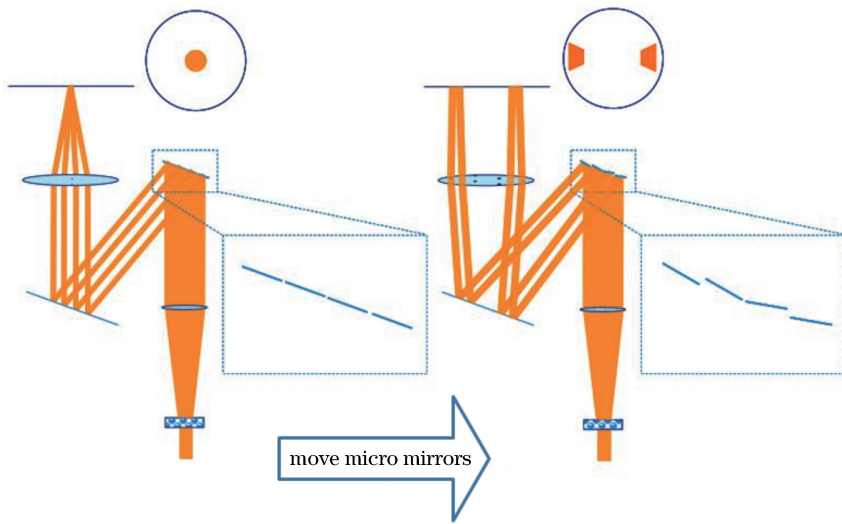


图 10 基于 4 个反射镜的 FlexRay 光束整形

Fig. 10 Flex Ray beam shaping based on four mirrors

X、Y 方向偏转角度控制算法, 仿真分析了单模、多模高斯光束整形的效果, 得到了信号窗内光强的不均匀度、均方差均满足要求的整形光束。这项工作证明微镜数目增加时, 光束整形质量明显提高, 并且合适的算法也对噪声具备一定的抑制作用。

DMD 和 MMA 装置都能够实现对光束空间及相位的高速调制^[39-40], 相比较而言, DMD 对光束调制的帧速率允许在 1 kHz 数量级, 光学效率在 5% 左右; MMA 具有高达 1 MHz 数量级的帧速率, 且在最新的报道中光学效率已达 19.1%。

目前, 利用 DMD、MMA 反射式积分元件构成的光束整形系统是发展的主趋势。这 2 类元件都可通过实时控制微镜单元的偏转角度来产生期望的光强分布, 并可通过增加微反射镜数量提高重构光源精度, 具有较快的响应速度与较高的可靠性。

5 MLA 方法

Yamaguchi 等^[10]于 1992 年利用渐变折射率透镜 (GRIN) 阵列将 LD bar 光束分割准直聚焦并用于抽运 Nd:YAG 激光器。此方法由于未进行子光束重排处理, 光束均匀性未得到显著提升, 但由于减少了慢轴方向的拉格朗日不变量, 所以整形后光束质量得到提升。这可认为是透镜阵列光束整形的最早实例。2011 年, 贾文武等^[41]将 MLA 用于 LD 叠阵整形, 由于 MLA 破坏了 LD 叠阵中各子光束之间光场分布的相似性, 且保证分割后的光束以非相干形式叠加, 最终实现了匀化的目的。以光斑中强度最大值和最小值的差值与均值的比来衡量整形光

斑的不均匀性, 并得到不均匀度为 9% 的光斑强度分布, 整形结果明显优于 GRIN 阵列获得的结果。2014 年, Qiao 等^[42]利用椭圆 MLA、GRIN 及聚焦透镜组成的光学系统对 LD 叠阵光束进行了准直与聚焦, 并将其耦合入光纤, 如图 11 所示, MLA 与 GRIN 的相互配合使光束耦合到光纤的效率提高了 3.44%。此外, MLA 因其具有较高的损伤阈值 (一般可达到 20 J/cm^2) 被应用到惯性约束核聚变 (ICF) 装置中, 以实现均匀度极高的靶面辐照。Lin 等^[43]以高功率多模光纤激光器阵列作为 ICF 光源, 使用单个 MLA 对其匀化得到光强均方差小于 4% 的匀化光斑。

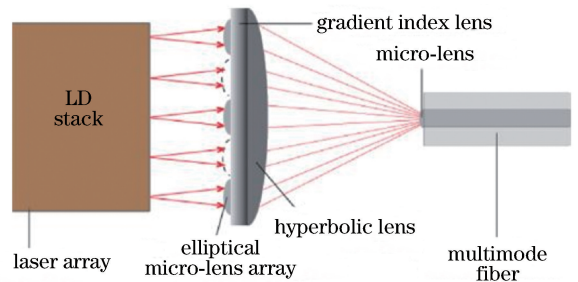


图 11 整形及聚焦系统

Fig. 11 Shaping and focusing system

2000 年, Dickey 等^[44]将 MLA 系统划分为如图 12(a)与 12(b)所示的非成像和成像结构。非成像积分器由单组 MLA 和积分透镜组成, 目标面上的光场分布为光束经 N 个单透镜衍射后的干涉叠加; 成像积分器由 2 组 MLA 和积分透镜组成, 在 2 组微透镜中, 前组任意一个微透镜与后组中对应位置处的微透镜组成一个通道, 并且每一通道中 2 个微透镜的参数完全相同, 且通道长度恰好等于微透镜

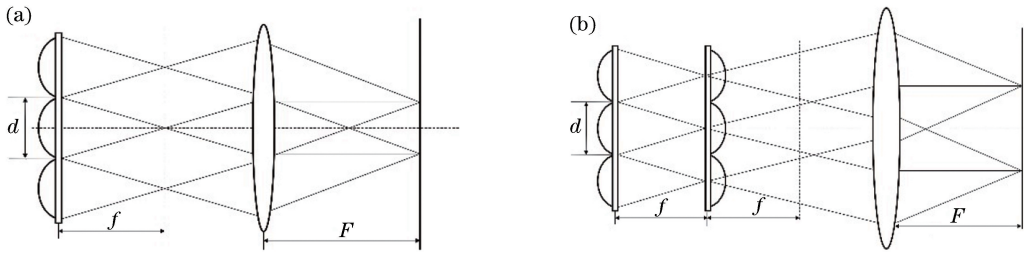


图 12 MLA 系统结构示意图。(a)非成像 MLA 一维结构图;(b)成像 MLA 一维结构图

Fig. 12 Structural diagram of MLA system. (a) One-dimensional structure of non-imaging MLA; (b) one-dimensional structure of imaging MLA

的焦距。对非成像型积分器而言,入射光束角度的改变会引起目标面处光斑的移动,此时成像型积分器的第 2 组 MLA 会对光束有一定的校正作用,从而改善了积分器的匀化性能。

研究者们基于微透镜匀化的基本原理,不断建立和完善 MLA 光束整形分析模型。2002 年, Büttner 等^[45]从傅里叶光学的角度出发,建立了非相干光源经微透镜的传输模型,引入无量纲参数 ρ 表征非相干光源 LED 空间分布对微透镜匀化效果的影响。结果表明,当微透镜数值孔径 NA 为定值时,增大 ρ 与光源光谱宽度,可抑制目标面处的干涉效应,提高光斑均匀度,并且成像型 MLA 能够实现比非成像型更好的匀化效果。这个模型结果与实验结果基本一致,实验中也发现微透镜像差小于 0.06 个波长时可实现良好的整形效果。2012 年, Lim 等^[46]采用有限时域差分法(FDTD)建模分析了光束通过微光学系统的传输过程,并且实验验证了距焦平面不同距离处的光强分布情况,验证了模型的正确性。此外,分析表明受衍射极限的影响,随着微透镜数值孔径的增大,整形后光斑尺寸减小,光强最大值也相应降低。由于此模型准确度比较高,在激光精密工程及成像方面得到了广泛的应用。2013 年,殷志勇等^[47]分析了非准直光束入射下 MLA 匀化性能的变化,不同角度并具有一定发散角的光束入射时,当入射角超过微透镜孔径角匹配范围时,在目标面上会出现严重的副瓣,影响光斑均匀性,由此确定了发散光束入射时微透镜数值孔径的选取范围。

此外,研究者们也根据几何光学规律对光线在 MLA 中传播的规律及性质进行了系统的像差分析和优化设计。2005 年, Schreiber 等^[48]从矩阵光学的角度分析了 MLA 数值孔径值及傅里叶透镜对光斑匀化尺寸和系统像差的影响,指出大数值孔径 MLA 可有效缩短整形系统长度,但同时也增大了出射光斑的发散角,使系统在远距离照明时应用受

限。2015 年, Wang 等^[49]建立了 MLA 系统在光线追迹理论中的计算模型,并且基于统计学思想将光束光强分布和追迹光线密度相关联,通过追迹不同强度分布的入射光束传输过程,分析了入射倾斜角度、观测面离焦距离及微透镜中单个透镜孔径对匀化特性的影响。

为降低利用 MLA 整形时目标表面干涉条纹的对比度,2007 年, Wippermann 等^[50]提出了一种破坏常规 MLA 周期结构的非周期型啾啾 MLA。作者在文中分别展示了周期型非成像、成像型 MLA 及啾啾 MLA 的单透镜衍射和多缝干涉图像,如图 13 所示。仿真结果表明,经特殊设计的楔形非周期 MLA 由于出射子光束的相位差产生特定的干涉图样,从而提高了目标面处光斑的均匀性。2014 年, Deng 等^[51]以双面 MLA^[52]设计思想为基础,设计了两侧具有一定旋转角度的双面 MLA,使用波长为 632.8 nm 的单模氦氖激光器作为光源,证明了当阵列两侧旋转角度为 60° 时,干涉条纹可见度达到最小值。图 14 显示了激光经双面 MLA 后的输出图案及相对横截面光强分布,整形后的光束接近平顶,且光斑 FWHM 为 6.8 cm。随着镜片加工工艺的进步,研究者们将自由曲面及其微阵列应用于光束整形技术。2016 年, Chen 等^[53]以准直激光为入射光源,通过能量网格划分法,建立了入射光源和目标平面的能量映射关系。在此基础上,针对单个能量网格,根据预设目标辐照值,设计了微型自由曲面透镜,将微透镜紧密排列,构成了 MLA 整形系统。该方法的系统空间均匀度和能量利用率非常高,但结构复杂,制作成本高。

微透镜的发展,在很大程度上依赖于光学微加工技术的进步,所以微透镜的另一重要研究方向集中于微光学制作工艺的开发。在实际应用中,为满足更多需求和更高精度要求,需不断完善已有工艺,

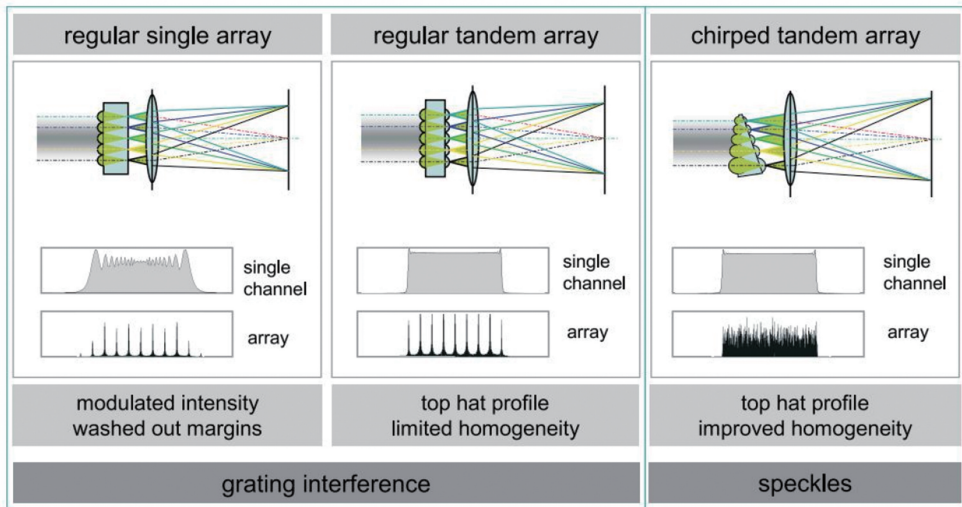


图 13 三种 MLA 结构及其整形效果比较

Fig. 13 Comparison of configurations and shaping effects of three types of MLA

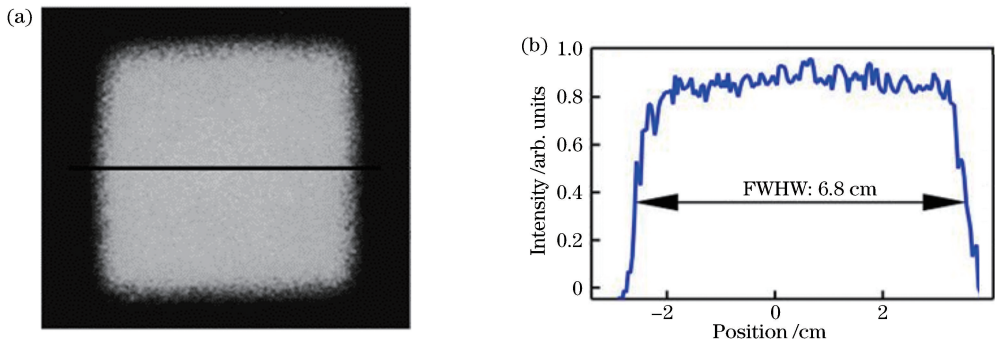


图 14 整形后光斑及横截面光强分布。(a)输出光束的二维强度分布;(b)输出光束的一维强度分布

Fig. 14 Shaped light spot and cross-sectional light intensity. (a) 2D intensity distribution of output laser beam;
(b) 1D intensity distribution of output laser beam

提出新工艺,寻找更适合的材料。目前,微透镜的加工工艺大致可分为两类。一类为掩模光刻技术,如灰度掩模法^[54]等。为提高 MLA 的灵活性并提高光能利用率,2007年, Yang 等^[55]采用精确控制光束能量密度分布的灰度光刻工艺在 PET 薄膜上制作了具有接近 100% 填充因子的高质量非对称六角形微镜(HML)。2017年, Zuo 等^[56]通过类 CMOS 工艺制作了镜头尺寸几微米到几百微米的凸透镜阵列。制作过程可分为两部分:1) 制作周期分布的 Si 模板,如图 15 (a)~(d)所示;2) 氢化非晶硅(a-Si:H)的沉积,如图 15 (e)~(f)所示。此方法制作的 MLA 经扫描电镜(SEM)和聚焦离子束(FIB)测试后具有较高的表面质量,并可实现 100% 的填充率。另一类为无掩模光刻技术,如电子束刻蚀^[57]、聚焦离子束技术^[58]等。2013年, Saito 等^[59]基于聚二甲基硅氧烷(PDMS)薄膜在负压作用下变形的性质,提出利用质子束刻写(PSM)技术加工微

透镜的方法,为制作 MLA 提供了新的思路。2016年, Huang 等^[60]使用 DMD 无掩模单次扫描光刻技术结合表面热回流工艺制造了非球面微透镜,该方法可以充分保证微元件外形轮廓,且制作成本低,效率高。

MLA 以其质量小、体积小、便于集成等优点已应用到诸多光束整形领域。随着微光学技术的发展, MLA 加工工艺已日趋成熟。目前 MLA 光束整形技术研究正朝着目标干涉图样不均匀性不断降低,加工工艺与流程不断简化的方向发展。

6 结束语

目前,随着基础理论研究、计算机模拟及设计手段的进一步完善,光束积分法向着整形系统微型化及集成化方向发展,具有非常好的研究与应用前景。然而,在很多复杂系统中,单独使用光束积分法并不能实现良好的激光整形,需要配合其他方法

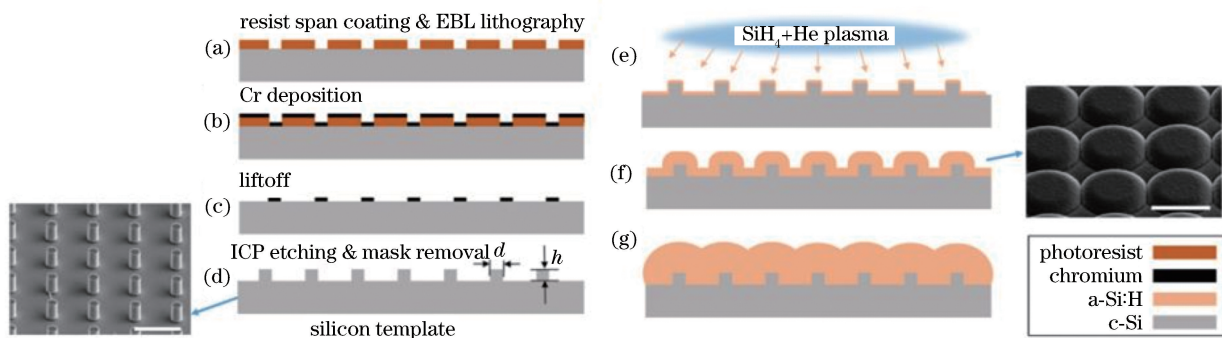


图 15 微透镜制作过程示意图。(a)~(d) Si 模板制造过程;(e)~(g) a-Si:H 沉积

Fig. 15 Schematic of micro-lens fabrication procedure. (a)-(d) Silicon template fabrication; (e)-(g) a-Si:H deposition

一起使用,以构成完整的整形系统。在常见的几种方法中,使用棱镜阵列对光束整形的原理较为简单,但棱镜的制造加工与装调必须满足严格的公差和精度要求,并且使用过程中由于其形状大小并不固定,难以进行大规模的自动化生产、推广;DMD 及 MMA 使用方便、高效,可实现任意光束的整形,但较高的制作成本也成为了制约市场推广的重要因素;MLA 整形系统在理论分析、整形质量及加工制造等方面都已趋向于完善,在激光焊接、切割、打孔等材料加工、惯性约束核聚变、照明系统及医疗手术等方面都得到了广泛应用。

参 考 文 献

- [1] Dickey F, Lizotte T. Laser beam shaping applications [M]. Boca Raton: CRC Press, 2017: 16-18.
- [2] Li Y M, Gong L, Li D, *et al.* Progress in optical tweezers technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 0101001.
李银妹, 龚雷, 李迪, 等. 光镊技术的研究现状[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0101001.
- [3] Guo Z H, Liu Z T, Chen Q M, *et al.* Application and progress of laser shaping devices in optical tweezers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 090004.
郭志和, 刘泽田, 陈启敏, 等. 激光整形器件在光镊中的应用及进展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 090004.
- [4] Olikier V, Doskolovich L L, Bykov D A. Beam shaping with a plano-freeform lens pair [J]. Optics Express, 2018, 26(15): 19406-19419.
- [5] Yang Z K, Ma X H, Fang J Y, *et al.* Tunable bottle beam of semiconductor laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1105001.
杨智焜, 马晓辉, 房俊宇, 等. 半导体激光可调谐局域空心光束[J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1105001.
- [6] Yang X T, Fan W. Spatial laser beam shaping using birefringent lenses [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(11): 1698-1704.
杨向通, 范薇. 利用双折射透镜组实现激光束空间整形[J]. 光学学报, 2006, 26(11): 1698-1704.
- [7] Veldkamp W B. Laser beam profile shaping with binary diffraction gratings [J]. Optics Communications, 1981, 38(5/6): 381-386.
- [8] Hajj B, Oudjedi L, Fiche J B, *et al.* Highly efficient multicolor multifocus microscopy by optimal design of diffraction binary gratings [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 5284.
- [9] Yamaguchi S, Kobayashi T, Saito Y, *et al.* Collimation of emissions from a high-power multistriple laser-diode bar with multiprism array coupling and focusing to a small spot [J]. Optics Letters, 1995, 20(8): 898-900.
- [10] Yamaguchi S, Imai H. Efficient Nd:YAG laser end-pumped by a 1 cm aperture laser-diode bar with a GRIN lens array coupling [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1992, 28(4): 1101-1105.
- [11] Zheng G X, Du C L, Zhou C, *et al.* Laser diode stack beam shaping by reflective two-wedge-angle prism arrays [J]. Optical Engineering, 2005, 44(4): 044203.
- [12] Huang Z H, Xiong L L, Liu H, *et al.* Double-cutting beam shaping technique for high-power diode laser area light source [J]. Optical Engineering, 2013, 52(10): 106108.
- [13] Wu Y L, Dong Z Y, Chen Y Q, *et al.* Beam shaping for kilowatt fiber-coupled diode lasers by using one-step beam cutting-rotating of prisms [J]. Applied Optics, 2016, 55(34): 9769-9773.
- [14] Shi Z D, Fang L, Fan B, *et al.* Beam shaping system based on a prism array for improving the throughput of a dispersive spectrometer [J]. Applied Optics, 2015, 54(10): 2715-2719.

- [15] Kagoshima Y, Takano H, Takeda S. Constant-pitch microprism-array optical device for beam condensers in hard X-ray synchrotron radiation beamlines [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(21): 214314.
- [16] Zheng C, Li Q Y, Rosengarten G, *et al.* Compact, semi-passive beam steering prism array for solar concentrators[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(14): 4158-4167.
- [17] Tsuji H, Nakano T, Matsumoto Y, *et al.* Flattop beam illumination for 3D imaging lidar with simple optical devices in the wide distance range[J]. *Optical Review*, 2016, 23(2): 155-160.
- [18] Zhou X F, Qi Z M, Luo X Q, *et al.* A method to diverge reflected beam uniformly using cube-corner retroreflector array with dihedral angle tolerances[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(8): 084201.
周晓凤, 戚祖敏, 罗向前, 等. 利用含二面角误差的角锥棱镜阵列实现反射光束均匀发散的方法[J]. *物理学报*, 2017, 66(8): 084201.
- [19] Doherty V J. Design of mirrors with segmented conical surfaces tangent to a discontinuous aspheric base[J]. *Proceedings of SPIE*, 1983, 399: 263-271.
- [20] David S R, Walker T, Cassarly W J. Faceted reflector design for uniform illumination [J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3842: 437-446.
- [21] Cassarly W J, David S R, Jenkins D G, *et al.* Automated design of a uniform distribution using faceted reflectors[J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(7): 1830-1839.
- [22] Dagenais D M, Woodroffe J A, Itzkan I. Optical beam shaping of a high power laser for uniform target illumination[J]. *Applied Optics*, 1985, 24(5): 671-675.
- [23] Ehlers B, Du K M, Baumann M, *et al.* Beam shaping and fiber coupling of high-power diode laser arrays[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3097: 639-644.
- [24] Hornbeck L J. Digital light processing for high-brightness high-resolution applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3013: 27-40.
- [25] Ren Y X, Lu R D, Gong L. Tailoring light with a digital micromirror device[J]. *Annalen Der Physik*, 2015, 527(7/8): 447-470.
- [26] Liang J Y, Kohn R N, Becker M F, *et al.* 1.5% root-mean-square flat-intensity laser beam formed using a binary-amplitude spatial light modulator[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(10): 1955-1962.
- [27] Liang J Y, Wu S Y, Kohn R N, *et al.* Bandwidth-limited laser image projection using a DMD-based beam shaper[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8254: 82540M.
- [28] Ding X Y, Ren Y X, Lu R D. Shaping super-Gaussian beam through digital micro-mirror device [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, 58(3): 1-6.
- [29] Durnin J. Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1987, 4(4): 651-654.
- [30] Zeng J, Chen Y H, Liu X L, *et al.* Research progress on partially coherent vortex beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0126004.
曾军, 陈亚红, 刘显龙, 等. 部分相干涡旋光束研究进展[J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0126004.
- [31] Gong L, Liu W W, Zhao Q, *et al.* Controllable light capsules employing modified Bessel-Gauss beams[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 29001.
- [32] Ren Y X, Fang Z X, Lu R D. Shaping non-diffracting beams with a digital micromirror device [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9761: 97610O.
- [33] Lakner H K, Duerr P, Dauderstaedt U, *et al.* Design and fabrication of micromirror arrays for UV lithography[J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4561: 255-264.
- [34] Mulder M, Engelen A, Noordman O, *et al.* Performance of FlexRay: a fully programmable illumination system for generation of freeform sources on high NA immersion systems [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7640: 76401P.
- [35] Mulder M, Engelen A, Noordman O, *et al.* Performance of a programmable illuminator for generation of freeform sources on high NA immersion systems [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7520: 75200Y.
- [36] McIntyre G, Corliss D, Groenendijk R, *et al.* Qualification, monitoring, and integration into a production environment of the world's first fully programmable illuminator[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7973: 797306.
- [37] Xing S S, Ran Y H, Jiang H B, *et al.* Illumination mode conversion system design based on micromirror array in lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(11): 1111002.
邢莎莎, 冉英华, 江海波, 等. 基于微反射镜阵列的光刻照明模式变换系统设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(11): 1111002.
- [38] Du M, Xing T W, Yuan J H, *et al.* Application of micromirror array in beam shaping[J]. *Infrared and*

- Laser Engineering, 2014, 43(4): 1210-1214.
- 杜猛, 邢廷文, 袁家虎, 等. 微反射镜阵列在光束整形中的应用[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1210-1214.
- [39] Mitchell K J, Turtaev S, Padgett M J, *et al.* High-speed spatial control of the intensity, phase and polarisation of vector beams using a digital micromirror device[J]. Optics Express, 2016, 24(25): 29269-29282.
- [40] Roth M, Heber J, Janschek K. Modulating complex beams in amplitude and phase using fast tilt-micromirror arrays and phase masks [J]. Optics Letters, 2018, 43(12): 2860-2863.
- [41] Jia W W, Wang Y F, Huang F, *et al.* Application of fly's eye lens in beam shaping laser diode array[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(2): 0202008.
贾文武, 汪岳峰, 黄峰, 等. 复眼透镜在激光二极管阵列光束整形中的应用[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0202008.
- [42] Qiao B, Jiang P, Yang H J, *et al.* The elliptical micro-lens array in the application of the LDA beam shaping[J]. Optik, 2014, 125(24): 7149-7153.
- [43] Lin J, Xu L X, Wang S B, *et al.* Theoretical analysis of lens array for uniform irradiation on target in multimode fiber lasers [J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(10): 101402.
- [44] Dickey F, Lizotte T. Laser beam shaping: theory and techniques [M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2017: 281-282.
- [45] Büttner A, Zeitner U D. Wave optical analysis of light-emitting diode beam shaping using microlens arrays [J]. Optical Engineering, 2002, 41(10): 2393-2400.
- [46] Lim C S, Hong M H, Senthil Kumar A, *et al.* Study of field intensity distribution of laser beam propagating through a micro-lens array[J]. Applied Physics A, 2012, 107(1): 149-153.
- [47] Yin Z Y, Wang Y F, Yin S Y, *et al.* Impact of microlens changes on the homogenization effect of semiconductor laser beam[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(10): 2556-2560.
殷智勇, 汪岳峰, 尹韶云, 等. 微透镜变化对半导体激光器光束匀化效果的影响[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(10): 2556-2560.
- [48] Schreiber P, Kudaev S, Dannberg P, *et al.* Homogeneous LED-illumination using microlens arrays [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5942: 59420K.
- [49] Wang Z X, Zhu G Z, Huang Y, *et al.* Analytical model of microlens array system homogenizer [J]. Optics & Laser Technology, 2015, 75: 214-220.
- [50] Wippermann F, Zeitner U D, Dannberg P, *et al.* Beam homogenizers based on chirped microlens arrays [J]. Optics Express, 2007, 15(10): 6218-6231.
- [51] Deng Z F, Yang Q, Chen F, *et al.* High-performance laser beam homogenizer based on double-sided concave microlens [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(20): 2086-2089.
- [52] Yao P H, Chen C H, Chen C H. Low speckle laser illuminated projection system with a vibrating diffractive beam shaper [J]. Optics Express, 2012, 20(15): 16552-16566.
- [53] Chen E G, Huang J M, Guo T L, *et al.* A laser beam shaper for homogeneous rectangular illumination based on freeform micro lens array [J]. Optoelectronics Letters, 2016, 12(4): 253-256.
- [54] Zhou Z, Lee S H. Fabrication of an improved gray-scale mask for refractive micro- and meso-optics [J]. Optics Letters, 2004, 29(5): 457-458.
- [55] Yang J J, Liao Y S, Chen C F. Fabrication of long hexagonal micro-lens array by applying gray-scale lithography in micro-replication process [J]. Optics Communications, 2007, 270(2): 433-440.
- [56] Zuo H J, Choi D Y, Gai X, *et al.* CMOS compatible fabrication of micro, nano convex silicon lens arrays by conformal chemical vapor deposition [J]. Optics Express, 2017, 25(4): 3069-3076.
- [57] Yu W, Yuan X. Fabrication of refractive microlens in hybrid SiO₂/TiO₂ sol-gel glass by electron beam lithography [J]. Optics Express, 2003, 11(8): 899-903.
- [58] Tseng A A. Recent developments in micromilling using focused ion beam technology [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2004, 14(4): R15-R34.
- [59] Saito K, Hayashi H, Nishikawa H. Fabrication of curved PDMS microstructures on silica glass by proton beam writing aimed for micro-lens arrays on transparent substrates [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2013, 306: 284-287.
- [60] Huang S Z, Li M J, Shen L G, *et al.* Improved slicing strategy for digital micromirror device-based three-dimensional lithography with a single scan [J]. Micro & Nano Letters, 2017, 12(1): 49-52.