

激光与光电子学进展

激光光束整形技术研究进展

元岩^{1,2}, 朱英杰^{1,2*}, 张晶^{2**}, 王延伟^{1,2***}, 周密², 孙晨曦^{1,2}, 颜博霞^{1,2}, 韩巍³, 王宇^{1,2}¹中国科学院大学集成电路学院, 北京 100049;²中国科学院微电子研究所光电技术研发中心, 北京 100094;³北京积水潭医院, 北京 100035

摘要 激光器谐振腔输出的光束呈高斯分布, 需要通过光束整形来提高均匀性, 以满足应用的需求。从光学系统的特性出发, 总结归纳了当前主要的三种激光光束整形技术, 包括光阑法、场映射器法和多孔径光束聚焦法, 分别介绍了三种激光光束整形技术的基本原理、应用范围和主要实现方法, 阐述了不同激光光束整形方法的典型应用和研究进展, 最后, 综合讨论了激光光束整形技术目前所面临的问题及未来的发展方向。本综述对激光光束整形技术的研究具有一定的参考意义。

关键词 光束整形; 光阑; 场映射器; 多孔径光束聚焦

中图分类号 TN24

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231112

Research Progress of Laser Beam Shaping Technology

Qi Yan^{1,2}, Zhu Yingjie^{1,2*}, Zhang Jing^{2**}, Wang Yanwei^{1,2***}, Zhou Mi², Sun Chenxi^{1,2},
Yan Boxia^{1,2}, Han Wei³, Wang Yu^{1,2}¹School of Integrated Circuits, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;²R & D Center of Optoelectronic Technology, Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;³Beijing Jishuitan Hospital, Beijing 100035, China

Abstract The output beam of the laser resonator is Gaussian, which makes it often unable to be used directly. It is necessary to improve the uniformity through beam shaping to meet the application requirements. Starting from the characteristics of optical system, this paper summarizes three main laser beam shaping technologies, including aperture method, field mapper method, and multi-aperture beam focusing method, respectively introduces the basic principle, application range, and main realization methods of three laser beam shaping technologies, and expounds the typical application and research progress of different laser beam shaping methods. Finally, the current problems and future development of laser beam shaping technology are comprehensively discussed. This review has certain reference significance for the research of laser beam shaping technology.

Key words beam shaping; aperture; field mapper; multi-aperture beam focusing

1 引言

激光光束整形技术是指对入射光束的辐照度和相位分布进行重分配的过程, 其中辐照度分布决定了光束的轮廓, 如高斯形、环形、圆形或矩形, 相位决定了输出光束的传播特性^[1]。通常激光器发出的光束其空间分布呈高斯形, 而在很多激光系统中, 为了提高激光的能量利用率, 通常需要把高斯分布或其他非均匀分布

的光束整形成均匀分布, 以满足特定的结构或应用要求。激光光束整形技术在激光领域中发挥着极其重要的作用, 例如光束整形是提高高能激光放大器光束质量最有效的方法^[2], 经过整形后的激光钻孔吞吐量可以提高 25%^[3], 整形能满足半导体光刻中不超过 1% 的均匀辐照度分布^[4], 除此之外, 激光光束整形还广泛应用于激光印刷^[5]、光数据存储^[6]、同位素分离^[7]、光镊捕获^[8]、光纤注入^[9]、皮肤治疗^[10]、惯性约束聚变(ICF)^[11]

收稿日期: 2023-04-18; 修回日期: 2023-04-21; 录用日期: 2023-05-09; 网络首发日期: 2023-07-12

基金项目: 国家自然科学基金 (12074405)

通信作者: *zhuyingjie21@mails.ucas.ac.cn; **zhangj@casoe.com; ***wangyanwei1@ime.ac.cn

等领域,无论是材料加工、医疗美容,还是军事领域和科学研究,应用的需求是激光整形技术稳定性、质量和效率进步的重要动力。

随着对光束质量的要求不断提高,以及光束整形理论和整形元件研究的不断深入,实现激光光束整形的技术得到了长足的发展。Dickey^[12]根据光学系统的特性,将光束整形技术分为三类:光阑法、场映射器法和多孔径光束聚焦法。

光阑法作为传统光学整形技术,通过使用小孔来选择光束中适当的平坦部分,具有使用简单、操作方便等优点,但是会造成大量的能量损失,同时,若输入光束的平坦度不高,则可能会无法找到适合的孔径大小和位置,因而逐步发展出带有一定补偿作用的软边光阑技术。场映射器法是通过规定好的方式将已知的输入光束转换成期望的输出光束,通过合理的设计,场映射器法可以有效地实现传播无损,因此该方法特别适用于光束质量良好的单模激光束。多孔径光束聚焦法是通过微镜阵列将输入光束分成多条衍射光束,再经过主透镜会聚叠加输出,该方法对于空间相干性较低的多模光束非常适用^[13]。

本文将具体介绍上述三种整形技术,包括整形原理、代表方法,通过回顾研究进展,重点分析了各类方法的技术特点及存在的问题,并对未来的发展做了初步的预测和展望。这对激光光束整形技术的研究具有一定的参考意义。

2 光阑法

传统的光阑为硬边光阑,通过截趾光束近平顶部分可以获得超高斯光束,但会产生严重的衍射调制,这样不仅降低了传输效率,非线性尺度的聚焦还可能损坏光学元件。而以锯齿光阑为代表的软边光阑技术,其边缘透射率存在渐变区,这使得在一定的菲涅耳数下,减小了衍射调制,提高了填充因子,保证了平坦度。如图 1 所示,经过光阑截趾整形后的入射光会再通过一个空间滤波器(图中由望远镜系统和其焦点处的小光阑组成),这是为了消除软边光阑整形后部分光束周期性强度的变化。

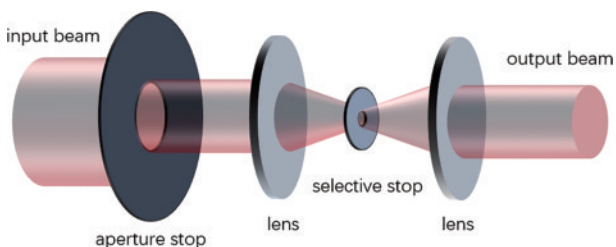


图 1 光阑法原理图

Fig. 1 Schematic diagram of aperture method

2.1 锯齿光阑

锯齿光阑是边缘呈锯齿状的截趾光阑,可通过调

节锯齿光阑参数 β 来抑制光学元件所在区域的衍射调制,它的损伤阈值高,较适用于高功率激光系统^[14]。锯齿光阑的整形效果与其本身的衍射微结构有关,锯齿光阑的不同形状与辐射角度会对光束整形产生不同的影响。对于不同形状的锯齿光阑(图 2),从最大填充因子(87%)和峰值能量密度(相对于平均值的较低值)的角度来看,超高斯轮廓型锯齿光阑的空间光束强度分布表现最好,如图 2(d)所示,相比更适用于激光热核合成装置^[15]。对于半径随角度变化的圆孔波纹锯齿光阑,随着角度间隔的减小,其周期性和规律性越小,对减弱光强调制的作用越强。当锯齿光阑的角度间隔为 0.01° 时能在较大空间范围内抑制衍射调制,最远距离可达 0.15 m ^[16]。2021年,俄罗斯的Sizova等^[17-18]在抛物方程解的基础上,通过分析焦平面中的场结构,求解得到轴对称光束通过圆形锯齿光阑和空间滤波器的传播函数,并提出了在锯齿光阑中安装一个窄的不透明校正环(CR)可以大幅抑制衍射效应,使输出光束平坦化,经证明,在菲涅耳数为 $2\sim 5$ 内CR均可有效作用。

锯齿光阑因其孔状结构不影响光路调整,还有着抗损伤阈值高、使用简单等优点,因此被有效地应用于高功率激光放大系统,但锯齿光阑的缺点是研究成本高、周期长,严重地受限于加工工艺。

2.2 液晶空间光调制器

液晶空间光调制器(LC-SLM)是一种特殊的、可实时调节的软边光阑,其原理是根据LC-SLM的光学调制特性,实时产生与入射光束相关的软边切趾光阑,再结合空间滤波和适当的相位分布算法来得到所需要的均匀输出光束^[19]。

根据出光方式的不同,LC-SLM可分为反射型和透射型,如图 3(a)、(c)所示。北京航空航天大学安国等^[20]搭建了反射式光脉冲整形系统,通过改变LC-SLM的调制电压来实现光束整形,当信号源为 10 GHz 、像素调制间隔为 0.08 nm 时,能够产生高斯、三角、平坦与倒三角的光谱形状[图 3(b)],此系统为实现复杂任意脉冲波形奠定了基础。反射式的LC-SLM还可以被用来调制激光束散角,2022年,长春理工大学王姝懿等^[21]利用相位灰度图控制LC-SLM的外加电压,以模拟变焦透镜来控制激光束散角,该方法束散角变化误差在 5% 以内,这为激光参数动态调整提供了重要技术支持。

透射式LC-SLM的入射光和出射光位于元件两侧,因此不需要加入分光棱镜,在一定程度上减少了系统的复杂性。中国工程物理研究院李雨等^[22]分析了透射式LC-SLM像素型结构对 $4f$ 脉冲整形系统的影响[图 3(c)],该系统由两个相同的光栅、两个相同的透镜以及一个LC-SLM组成,元件间等距分布,通过建立完善的数学模型,模拟了不同条件下的失真情况,结果表明,离散型相位调制和像素间隙会导致整形脉冲

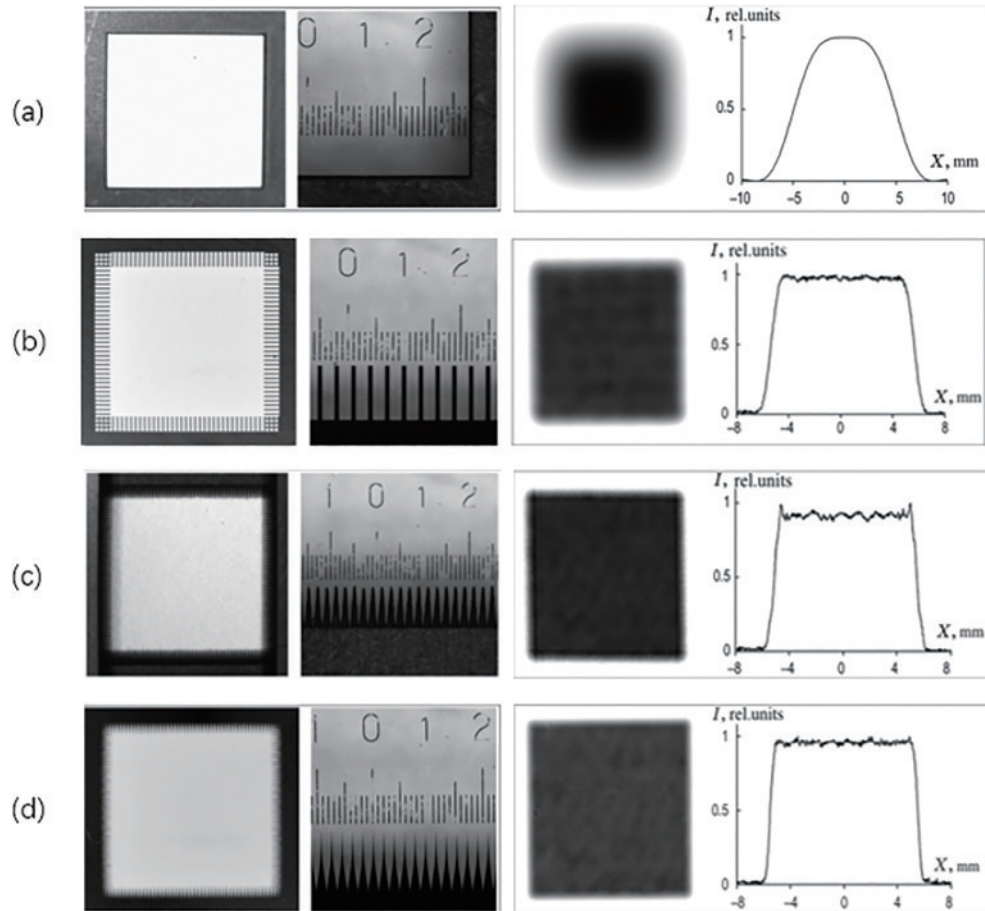


图 2 不同种类的孔径光阑照片与近场强度分布^[15]。(a)带有锐变的止动块；(b)锯齿形状为矩形；(c)锯齿形状为三角形；(d)锯齿形状为超高斯轮廓型

Fig. 2 Photographs of aperture stops and near-fields with beam-intensity profiles^[15]. (a) Stop with a sharp edge; (b) shapes of the serrations are rectangular; (c) shapes of the serrations are triangular; (d) shapes of the serrations are super-Gaussian profiled

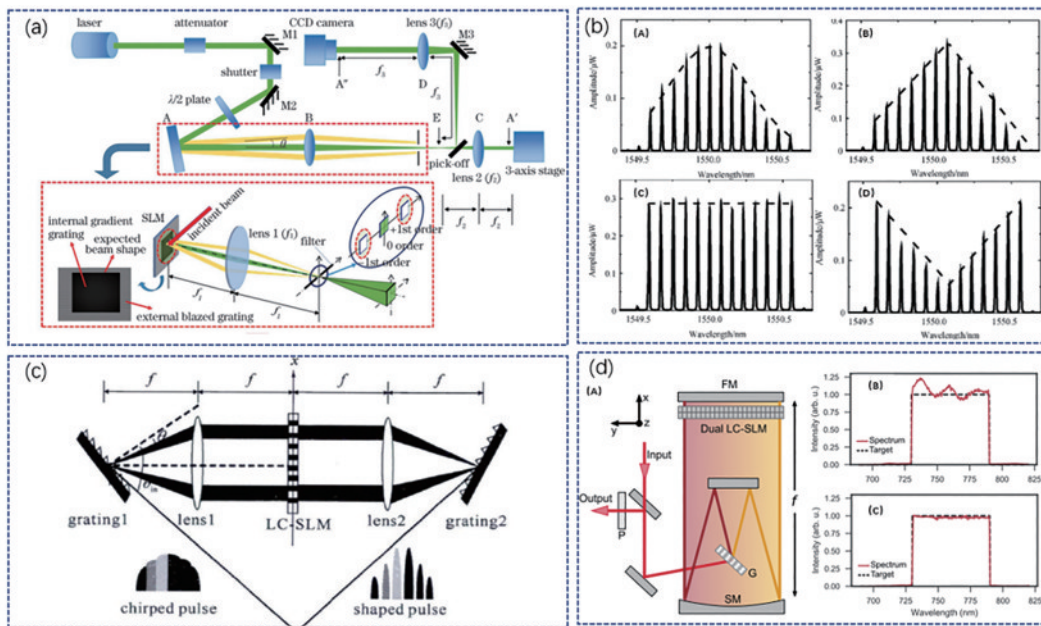


图 3 基于 LC-SLM 的激光光束整形。(a)反射式 LC-SLM 整形系统^[25]；(b)高斯、三角、平坦与倒三角的光谱形状^[20]；(c)透射式 LC-SLM 整形系统^[22]；(d)双层 LC-SLM 的整形系统与结果^[24]

Fig. 3 Laser beam shaping based on LC-SLM. (a) Reflective LC-SLM shaping system^[25]; (b) spectral shapes of Gaussian, triangular, flat, and inverted triangles^[20]; (c) transmission LC-SLM shaping system^[22]; (d) shaping system and results of double layer LC-SLM^[24]

中出现副本脉冲,可通过选取像元尺寸较小的 LC-SLM 和增加适当的透镜、光栅来避免交叠效应产生。

另外,使用多层 LC-SLM 可以实现更好的整形效果。双层 LC-SLM 可以补偿光纤 CPA 系统中的材料色散与非线性相位调制的累计相位,从而产生脉宽 170 fs 的高保真脉冲^[23]。但是,多层结构由于界面反射会存在一定的干扰,2019 年,瑞典的 Wittenbecher 等^[24]提出了一种基于双层 LC-SLM 并以非迭代方式进行校准和抑制光谱强度的脉冲整形方法,图 3(d) 中显示了所使用的系统以及在整形前后 60 nm 平顶光谱的强度分布,可以看出,该方法显著提高了幅度整形的保真度,在一定程度上补偿了多层结构的影响。

LC-SLM 具有可实时主动调控的优点,但其有限的像素尺寸和间隙会影响整形效果,可通过添加灰度级电压产生电路和线性偏振片来提高能量利用率与调制效率^[26],同时该方法激光损伤阈值较低,仅适用于高功率激光系统前级。

3 场映射器法

光束整形的第二种方法是场映射器法,通过几何映射原理,场映射器以规定的方式将输入平面的光束均指向输出平面上的对应区域,从而达到整形的效果,其概念如图 4 所示。光线弯曲表示可以与光学元件相关联的波前,通过合理的设计,场映射器法可以有效实现传播无损,因此该方法特别适用于光束质量良好的单模激光束。

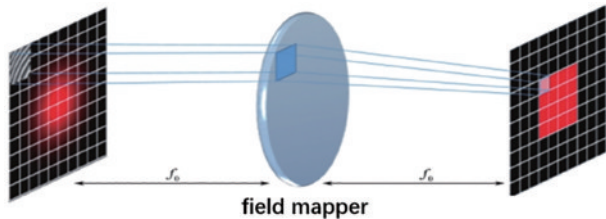


图 4 场映射器概念图^[27]

Fig. 4 Field mapper concept map^[27]

3.1 二元光学元件

二元光学元件起源于菲涅耳波带片、全息图及全息图,但是由于效率太低、制作复杂、工作物质不稳定等问题而无法进行高精度的工作^[28]。二元光学元件是基于衍射理论和惠更斯-菲涅耳衍射积分公式,根据输出光束的要求确定复振幅反射率和透过率调制函数,再通过计算机设计、微电子精密加工和光刻技术所制造的高效率衍射光学元件^[29]。由于衍射效率高、易于集成、能灵活控制波前等特点,其在光束整形领域有广泛的应用场景。

二元光学元件的理论分为两类:标量衍射理论和矢量衍射理论。当元件特征尺寸远大于输入光波长时,采用标量衍射理论足以满足精度要求。标量衍射

理论可以分为局部搜索和全局搜索两类。局部搜索算法主要是迭代傅里叶变换(G-S)算法^[30]、杨-顾(Y-G)算法^[31],其具有收敛速度快、精度高等优点,但是容易陷入局部最优解、结果可靠性不高;全局搜索算法主要是模拟退火(S-A)算法^[32]和遗传算法(GA)^[33],这类算法不依赖初始值、计算结果可靠,但是相对的计算时间较长。目前的研究倾向于对经典算法进行优化和使用其他高效算法^[34],如哈达玛基编码算法^[35]、随机并行梯度下降算法^[36]、神经网络法^[37]、文化基因算法^[38]等。

优化经典算法可以有效地提高衍射效率,提升整形光斑均匀性^[39]。昆明理工大学李昕颖等^[27]使用改进的 G-S 算法对衍射光学元件的初始相位进行修正,实验数据表明,改进后的算法相比原 G-S 算法,其均方根误差降低了 27.29%、能量集中度提升了 3.76%、顶部不均匀性降低了 17.09%,如图 5(a)、(b)所示,改进后的算法显著提高了输出光束质量,得到了均匀性较好的平顶光束。2023 年,江南大学邵加强等^[40]引入机器学习算法来设计衍射光学元件,通过神经网络构建映射关系,该方法可以自动预测衍射光学元件的相位系数,且准确率在 99.9% 以上,模拟输出的光强分布如图 5(c)所示,可以看到平顶光斑能一直保持良好的形状分布。

随着制作工艺的发展,光学元件的特征尺寸逐渐缩小,当衍射特征尺寸与入射光波长相当或处于亚波长时,就必须严格考虑不同电磁场分量的耦合作用,采用矢量衍射理论。按照数学思想分类,矢量衍射理论可以分为积分法和微分法两类。积分法比较适用于连续表面结构的衍射元件,有着结果精确、收敛速度快的优点,但需要非常大且复杂的数值计算,对于计算机要求较高。微分法适用于周期性离散表面结构的衍射元件,同时仍不可避免地需要大量的数值计算^[41-42]。采用矢量衍射理论都需要经过大量复杂且困难的计算机运算,目前的理论还不是很成熟,因此,当前衍射光学元件的设计还是依靠标量衍射理论。

除了需要理论设计确定元件的透反射率分布函数外,二元光学元件还受到加工技术的限制。普通光学元件可以通过一般的研磨抛光来加工,但二元光学元件精度很高需要依托微电子加工工艺,目前的加工方法主要分为多台阶和连续相位二元光学元件加工工艺^[43],前者包括台阶刻蚀法^[44]、薄膜沉积法^[45],后者包括激光束直写法^[46]和金刚石车削法^[47]等,另外还有准分子激光加工法^[48]和灰阶掩模法^[49]等其他制作方法。

二元光学元件用于激光光束整形有着衍射效率高、光斑可确定的优点,同时由于其体积小、质量轻,可以实现阵列、集成等功能,有着很广泛的应用前景。但是二元光学元件激光损伤阈值较低,难以在强激光系统中应用,同时只适用于特定光场条件,并受到理论设计、加工工艺的影响,该技术还有着很大的发展空间。

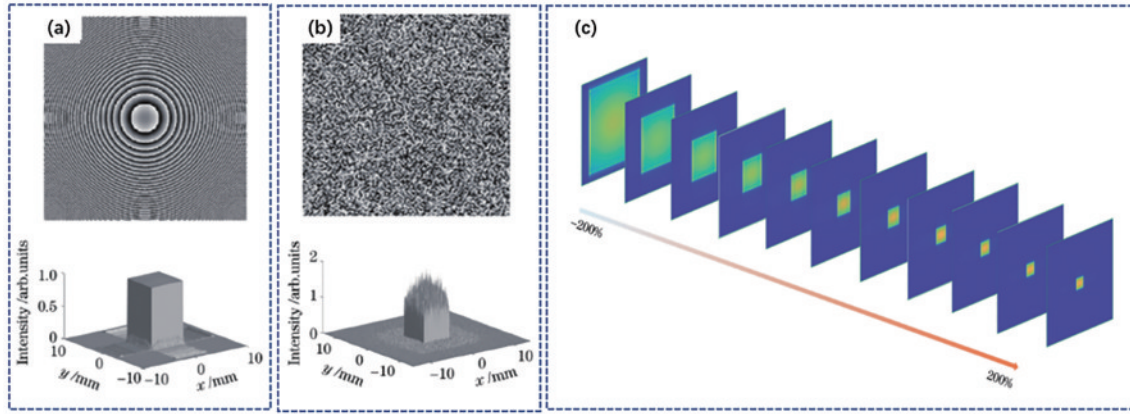


图 5 相位输出平面强度分布。(a)改进 G-S 算法；(b)传统 G-S 算法^[27]；(c)机器学习算法^[40]

Fig. 5 Phase output plane intensity distribution. (a) Improved G-S algorithm; (b) traditional G-S algorithm^[27]; (c) machine learning algorithms^[40]

3.2 非球面透镜组

非球面透镜组整形系统是一种结构相对简单、能量损失小的方法^[50]，根据组成透镜的不同可以分为两类^[51]：两片平凸非球面镜组成的开普勒型和一片平凹一片平凸非球面透镜组成的伽利略型。如图 6(a)所示，前者中间有聚焦，当输入功率较大时会产生等离子体，因此只适用于小功率激光器的整形，后者则可适用于大功率情况^[52]。

在伽利略型非球面镜的使用中，需考虑平顶函数与半峰全宽对整形效果的影响：当半峰全宽过小时，两个透镜中心区域接近平面，输出光束不理想；当半峰全宽增加至 6 时，中心区域光强分布变得均匀，尽管边缘

尖峰仍受面型精度影响，但误差也在可控范围内^[53]。中国计量学院冯科等^[54]考虑加工因素，选择合适的半峰全宽、束腰半径、两镜的折射率与距离等参数，仿真得到了输出光束的平顶特性[图 6(b)]，当传输距离大于 100 mm 后，平顶边缘衍射效应开始严重，从而影响光束质量，在实际应用中可以通过扩束镜来补偿。

开普勒型非球面透镜组由于适用局限性，相比伽利略型就少有研究。北京工业大学陈凯等^[55]对开普勒型非球面透镜组进行了数值模拟分析，得到了两片凸非球面镜的参数（非球面表达式高次项系数），设计了误差较小的开普勒型非球面镜系统，图 6(c)为光学软件对两片球面镜子午截面的拟合曲线。

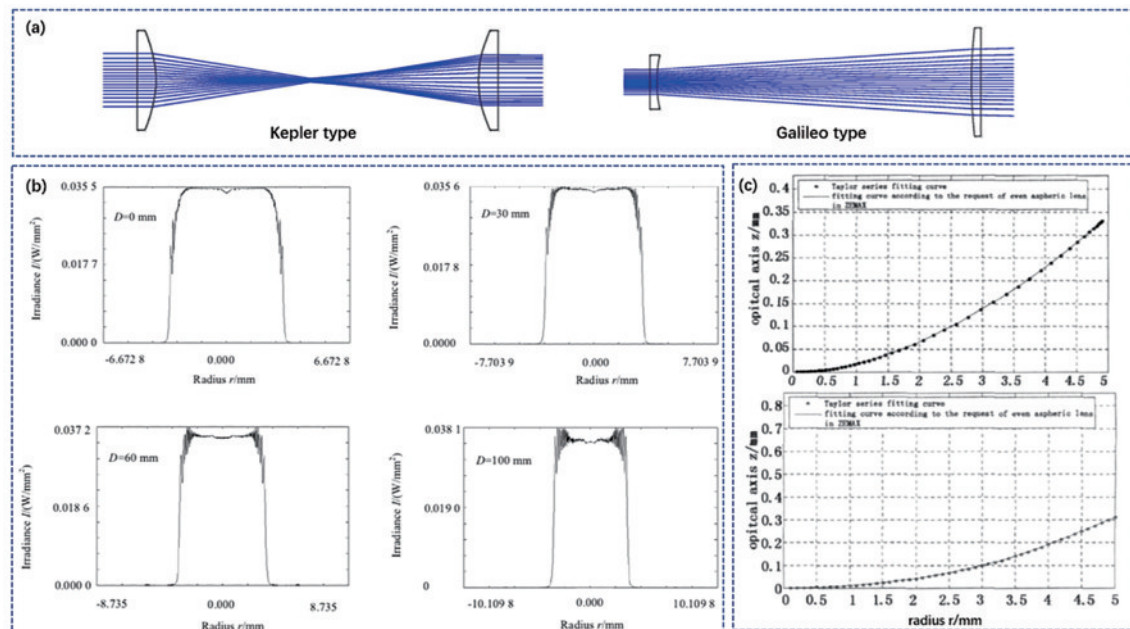


图 6 非球面透镜组分类。(a)两种非球面透镜组^[52]；(b)不同传播距离下输出光的平顶分布情况(D 为传播距离)^[54]；(c)开普勒型非球面镜子午截面曲线^[55]

Fig. 6 Classification of aspheric lens groups. (a) Two types of aspherical lens groups^[52]; (b) flat top distribution of output light at different propagation distances (D is propagation distance)^[54]; (c) meridian section curve of Kepler type aspherical mirror^[55]

非球面透镜组在光束整形中能量损失小、结构简单,尤其适用于单模光束,但在设计中仍然存在一些问题,比如非球面镜加工成本高,受工艺水平制约,同时非球面镜透镜组只能适用于特定的输入光束,且输出光束远场传播质量不高,需与其他光学元件结合使用^[56]。

3.3 双折射元件组

二元光学元件与非球面透镜组只能适用于特定的输入光束,为了解决整形器件适用性差的问题,美国的劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)提出了一种双折射透镜组整形系统^[57],该系统由检偏器和两对双折射透镜组成,通过调节透镜与主轴的夹角,可以使输入的偏振光在不同位置有不同的偏振态,再经过检偏器输出从而达到光束整形的目的。

随着研究的发展,双折射透镜逐渐由双折射晶体所代替,这使得系统更加简单紧凑^[58]。通过控制双折射晶体的温度来实现相位调整,旋转晶体的纵轴来改变输出脉冲形状^[59],还可以结合 Porro 棱镜等其他光学元件来达到预期的整形效果^[60],如图 7(a)、(b)所示。2020 年,法国的 Halassi 等^[61]提出了一种可以输出任意脉冲波形的双折射激光整形系统[图 7(c)],该系统可以放置 N 个非等长的双折射晶体,通过选择每个晶体的相位延迟和偏转角度来实现所需形状的输出脉冲,文中使用 8 个双折射晶体获得了较好的平顶、锯齿和三角形轮廓的脉冲,为了得到更好的输出轮廓可使用更多的双折射晶体,该方法在光束整形领域有较大的参考意义。

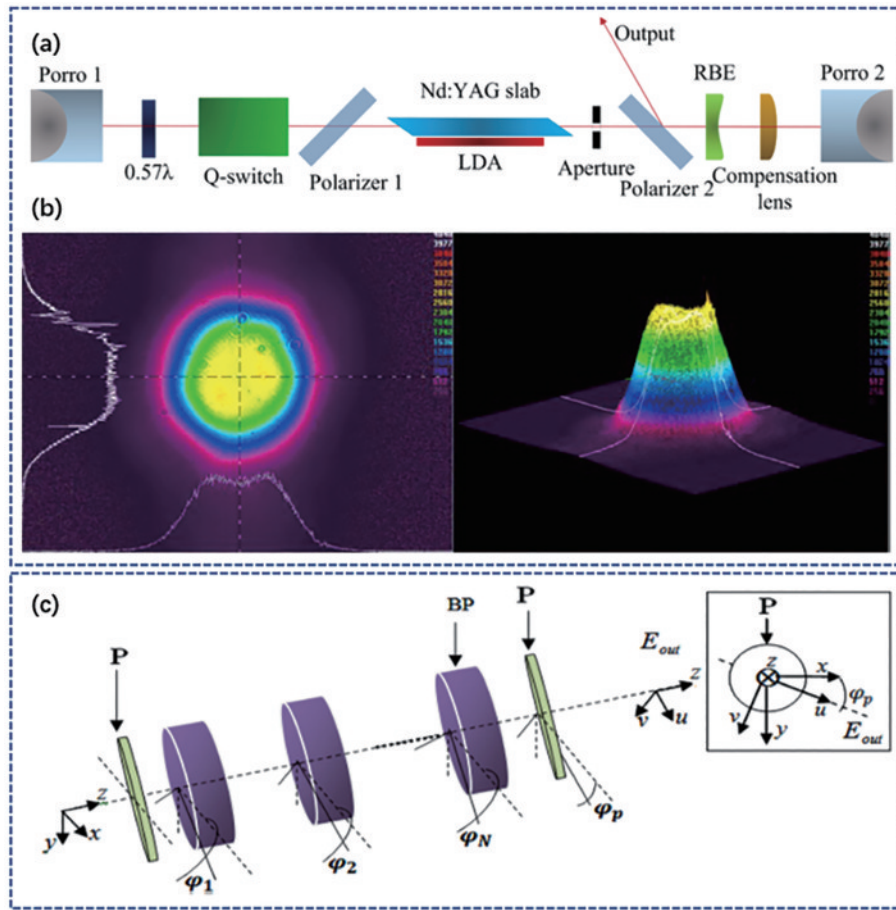


图 7 双折射元件组整形。(a)径向双折射元件(RBE)激光系统^[60]; (b)最大能量下输出近场光斑的 2D 和 3D 视图^[60]; (c) N 个晶体的双折射激光脉冲整形器^[61]

Fig. 7 Birefringent element group shaping. (a) Radial birefringent element (RBE) laser system^[60]; (b) 2D and 3D views of the output near-field spot at maximum energy^[60]; (c) birefringent laser pulse shaper with N crystals^[61]

使用双折射元件组最大的特点就是灵活方便,可以根据输入光束参数改变透射率函数,有较强的工程应用价值,为 ICF 等大功率激光器整形提供了可选方案,但是其应用限制还是在于元件的工艺加工方面。

4 多孔径光束聚焦法

第三种光束整形方法是多孔径光束聚焦法,该系统由微镜阵列和聚焦元件组成(图 8)。输入光束首先被微镜阵列分成若干子光束,再通过聚焦透镜对子光

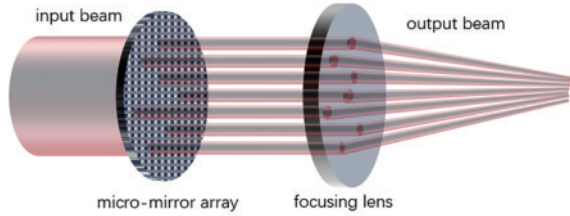


图 8 多孔径光束聚焦系统结构图

Fig. 8 Structure diagram of multi aperture beam focusing system

束叠加输出, 以实现光束的整形操作。这种方法适用于空间相干度较低的多模激光器, 常用于光刻^[62]、激光加工^[63]和准分子激光器^[64]的整形中。

4.1 微镜阵列聚焦系统

微镜阵列材料易获取, 结构紧凑、易于调整, 能量损耗较低, 在光束整形领域有很好的应用。微镜阵列有很多种类, 常见的有正交光楔阵列^[65]、复眼透镜阵列^[66]、微反射镜阵列^[67]、可变焦微透镜阵列^[68]等。

微镜阵列的整形效果受到很多因素制约。其中, 阵列个数的影响最大, 通常双列微镜系统的光束整形

能力优于单列微镜系统, 这是因为第二列微镜会充当场镜阵列, 入射光束经过光学系统后, 其辐照光斑的边缘能量差异降低, 进而提高均匀性^[69], 对两种微镜阵列的输出光束进行光线追迹[图 9(a)], 可以看到双列微镜的光场分布更趋近于平顶型^[70]。

微镜的小尺度不均匀性会直接影响干涉条纹的间隔, 可以通过优化设计楔角偏差和离焦量值来改善光束小尺度的不均匀性^[71]。微镜阵列的孔径和间距也对整形光斑有影响, 2020 年, 周叶等^[72]设计了一种使用柱面微透镜阵列的整形系统, 基于矩阵理论、傅里叶光学理论进行数值仿真, 证明了微镜孔径越大, 成像光场分布越趋于平顶分布, 同时光斑长度与阵列间距呈线性正相关, 并通过搭建实验系统得到了长度在 2~34 mm 范围内可调的光斑, 结论与仿真结果吻合。

数字微镜器件(DMD)^[73]通过控制反射角度来实现对光束的调制, 是一种主动、可编码的空间调制器。DMD 耐高温、寿命长, 有较快的响应速度。但用于高功率激光装置的前级系统时, 还需要严格评估其反射面相位畸变的影响, 同时, 该器件基于成熟的大规模集成电路制造技术, 对光刻、工艺水平要求较高^[74]。

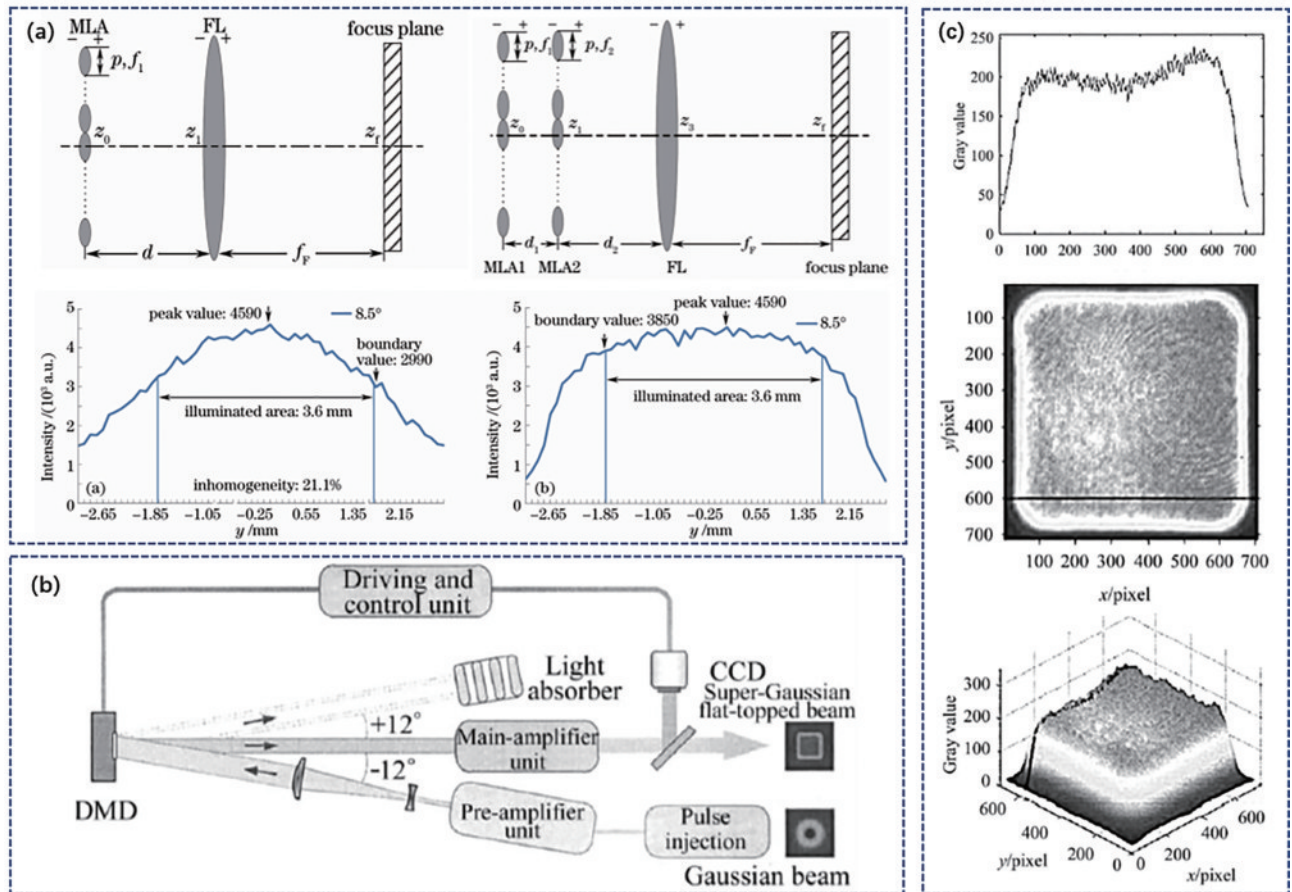


图 9 微镜阵列整形系统。(a)单、双微镜阵列系统图与整形光场分布^[70]; (b) DMD 光束整形系统^[75]; (c) DMD 整形光斑一维、二维和三维分布^[75]

Fig. 9 Micromirror array shaping system. (a) System diagram and shaped light field distribution of single and double micromirror arrays^[70]; (b) DMD beam shaping system^[75]; (c) one-dimensional, two-dimensional, and three-dimensional distribution of DMD shaping spot^[75]

DMD 对光束的填充因子和光场调制度有着很好的改善效果。中国科学院光电研究院邱基斯等^[75]基于 DMD 对超高斯平顶分布光束的整形进行了研究,整形系统如图 9(b)所示,通过二次整形,输出激光的近场调制度改善了 28.1%,分散度仅为 1.77%,整形光斑在三个维度上均表现出较强的稳定性[图 9(c)]。中国科学院苏州生物医学工程技术研究所娄艳阳等^[76]采用 DMD 和误差扩散法对单平顶和多平顶的光束进行整形仿真,光束填充因子由整形前的 36.1% 分别提高到 62.3% 和 56.7%,光场调制度由 73.3% 分别降到 25.6% 和 30.3%,使用该方法可以获得高质量的整形光束,在快速激光扫描领域有一定的应用价值。

微镜阵列聚焦光束整形系统有着加工工艺简单、抗损伤阈值高、易于调整等优点,但目前还存在两个问题:1)微镜阵列系统能量利用率低,阵列间存在的间隙会导致光束填充因子较低、能量损耗大;2)大量的子光束会对输出光斑产生干涉影响,使得均匀性

降低。

4.2 随机相位板

随机相位板(RPP)是由许多阵列形式的相位单元组成,通过在石英基底表面直接刻蚀或镀膜形成浮雕结构,相位单元可以是任意相同多边形,相位是 0 或 π ,但要保证两者数量相同以避免产生锐脉冲,当输入光束经过 RPP 后,随机产生相位延迟为 0 或 π 的子光束,再通过透镜会聚叠加达到光束整形的效果,其中焦斑的大小和形状由相位单元的大小和形状决定^[77]。

对 RPP 设计时需考虑不同空间频率的权重,光谱形状和焦斑的空间频率有关,不同的形状有着不同的匀滑效果^[78]。2019 年,德国的 Bagnoud 等^[79]对高能亚皮秒激光器中的 RPP 应用进行了研究,并在 1600 倍衍射极限的区域上得到焦点的均匀强度分布(图 10),由于非线性脉冲畸变和光束自聚焦效应,RPP 设计在前端会带来预期的远场强度分布,目前该设计已在 PHELIX 激光设备中应用。

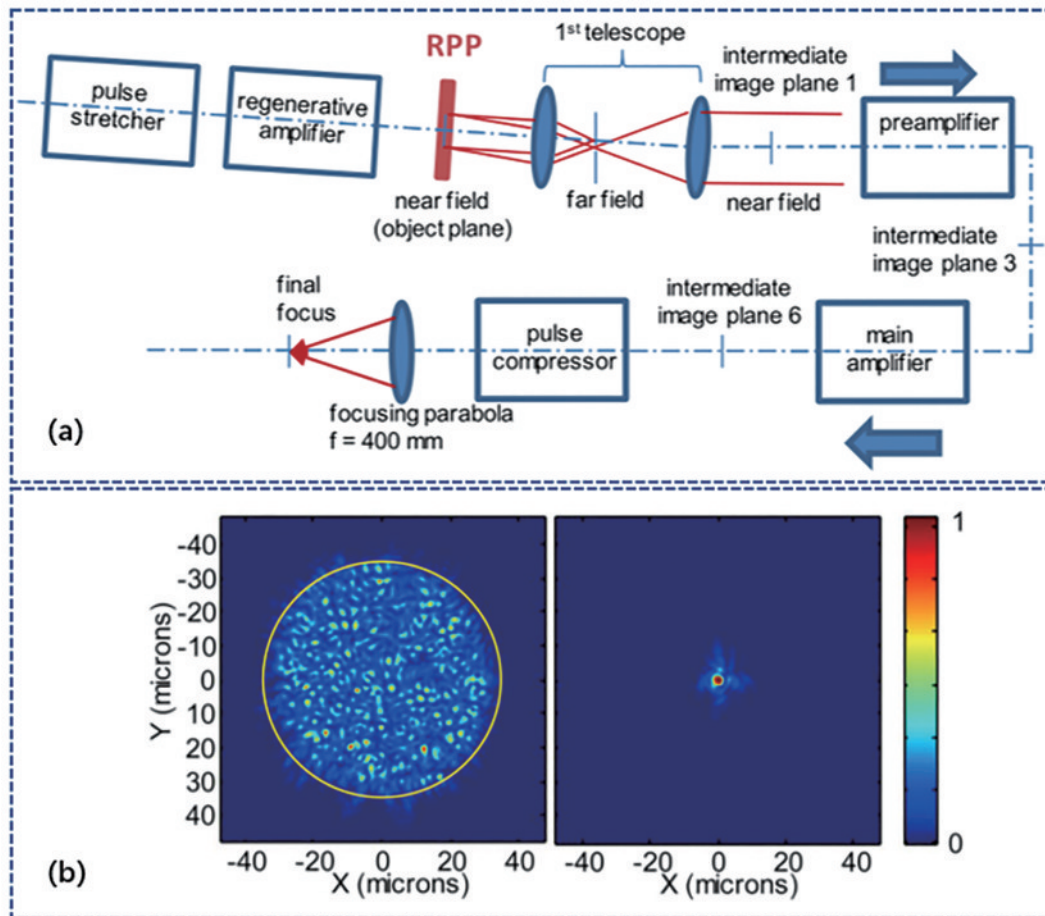


图 10 RPP 光束整形应用^[79]。(a)基于 RPP 的 PHELIX 激光系统;(b)远场光束强度分布(左图使用 RPP,右图未使用 RPP)
Fig. 10 RPP beam shaping application^[79]. (a) PHELIX laser system based on RPP; (b) far-field beam intensity distribution (left image with RPP, right image without RPP)

利用 RPP 进行光束整形有着容易控制焦斑形状和大小、使用简单、制作工艺不复杂等优点,但由于多光束衍射聚焦的作用,输出光束会受到干涉散斑的影响,同时 RPP 的厚度会引入过多的非线性克尔效

应^[79],导致光束透过率低,影响光强大小。

5 结束语

本文介绍了激光光束整形的三种主要技术,并简

要综述了各技术的代表方法和研究进展。随着理论研究的深入和工艺水平的提高,激光光束整形技术在不断的发展,不同类型的光束整形技术各有特点。

光阑法作为传统光束整形技术具有原理简单、操作方便等优点,但其会造成输入光束的能量损失,后来逐渐出现了锯齿光阑和可以实时调节的 LC-SLM 等软边光阑,极大地减少了衍射调制,保证了光束的填充因子。

场映射器法经过严谨的设计可以实现有效无损,特别适用于单模激光器的整形,其中:二元光学元件由于体积小质量轻,符合光学系统微小集成化发展而特别受重视,设计算法的更新和制造工艺的改进是该技术发展的主要方向;非球面透镜组整形系统结构简单、能量损失小,也有很好的整形效果,但只能针对特定的输入光束;双折射元件组克服了适用性差的缺点,可以根据输入光束灵活地调整透射率函数,有较强的工程应用价值,为 ICF 等大功率激光器整形提供了可选方案。

多孔径光束聚焦法更适用于空间相干度较低的多模激光器,尤其是光刻中准分子激光器的整形应用,在前级系统中具有代表的器件有微镜阵列与随机相位板。微镜阵列又分为正交光楔阵列、复眼透镜阵列、微反射镜阵列等多种类别,其中以 DMD 为代表的微反射阵列由于可主动调节有着不错的发展前景,而随机相位板对于光斑匀化效果好,因此在成像领域应用较多,但其光束透过率低,影响光强的大小。目前多孔径光束聚焦法的研究方向主要有两点:对器件结构设计的优化,以及设法消除光束叠加产生的干涉影响。

综合来看,激光光束整形技术的发展主要依托于更优秀的设计算法和更先进的制造工艺,为了满足光学系统集成化、规模化等需求,整形器件的小型化和可主动调节性也是研究的重点方向,同时,由于单一方法存在一定的局限性,多种方法配合势必是未来趋势,相信随着各领域技术的进步,将会出现更有效的激光光束整形技术。

参 考 文 献

- [1] Shealy D L. Historical perspective of laser beam shaping [J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4770: 28-47.
- [2] 杜少军, 陆启生, 舒柏宏. 基于二元光学设计的高能激光窗口的初步探讨[J]. 光学技术, 2007, 33(S1): 227-228, 231.
Du S J, Lu Q S, Shu B H. Preliminary study on high power laser window designed with binary optics[J]. Optical Technique, 2007, 33(S1): 227-228, 231.
- [3] Dunskey C. High-speed microvia formation with UV solid-state lasers[J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 90(10): 1670-1680.
- [4] Partlo W N, Tompkins P J, Dewa P G, et al. Depth of focus and resolution enhancement of i-line and deep-UV lithography using annular illumination[J]. Proceedings of SPIE, 1993, 1927: 137-157.
- [5] Chichkov B. Laser printing: trends and perspectives[J]. Applied Physics A, 2022, 128(11): 1015.
- [6] Wei X, Zhao W W, Zheng T, et al. Laser-modified luminescence for optical data storage[J]. Chinese Physics B, 2022, 31(11): 117901.
- [7] Burns H S, Biegalski S R. Forensic signatures from laser isotope separation[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2022, 331(12): 4947-4952.
- [8] Gao B K, Rong Y F, Chen P, et al. An optical fiber probe based on multi-optical well particle capture[J]. Optoelectronics Letters, 2022, 18(11): 641-646.
- [9] Li R F, Hu Z J, Li H T, et al. All-fiber laser-self-mixing interferometer with adjustable injection intensity for remote sensing of 40 km[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(14): 4863-4870.
- [10] Teymour S, Kania B, Lal K, et al. Energy-based devices in the treatment of acne scars in skin of color[J]. Journal of Cosmetic Dermatology, 2023, 22(4): 1177-1184.
- [11] Tazes I, Passalidis S, Kaselouris E, et al. A computational study on the optical shaping of gas targets via blast wave collisions for magnetic vortex acceleration [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2022, 10(5): e31.
- [12] Dickey F M. Laser beam shaping[J]. Optics and Photonics News, 2003, 14(4): 30-35.
- [13] Dickey F M, Lizotte T E. Laser beam shaping applications[M]. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [14] 葛卫国, 刘永欣, 马善钧, 等. 硬边光阑、超高斯光阑和锯齿光阑的比较研究[J]. 激光杂志, 2005, 26(5): 48-49.
Ge W G, Liu Y X, Ma S J, et al. A comparison of hard-edged, super-Gaussian and serrated apertures[J]. Laser Journal, 2005, 26(5): 48-49.
- [15] Bel'kov S A, Voronich I N, Garanin S G, et al. Study of the apodization of a laser beam by serrated aperture stops for high-power installations of laser thermonuclear synthesis[J]. Journal of Optical Technology, 2015, 82(6): 330-338.
- [16] 王金国, 朱占达, 孙哲, 等. 半径随机的圆孔波纹锯齿光阑的衍射特性[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(8): 1801-1805.
Wang J G, Zhu Z D, Sun Z, et al. Diffraction characteristics of serrated circular aperture with random radius[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(8): 1801-1805.
- [17] Sizova I, Moskalev T, Mikheev L. Laser beam shaping with circular serrated apertures. I. Spatial filtering[J]. Applied Optics, 2019, 58(18): 4905-4909.
- [18] Sizova I, Moskalev T, Stavrovskii D. Correction of shape distortions in laser beams apodized with circular serrated apertures[J]. Applied Optics, 2021, 60(16): 4861-4870.
- [19] 郭恒, 闫剑锋, 李欣, 等. 空间整形飞秒激光图案化加工氧化石墨烯[J]. 中国激光, 2021, 48(2): 0202018.
Guo H, Yan J F, Li X, et al. Patterned graphene oxide by spatially-shaped femtosecond laser[J]. Chinese Journal

- of Lasers, 2021, 48(2): 0202018.
- [20] 安国, 闫娟娟, 刘娅. 基于液晶空间光调制器的脉冲整形系统校准及应用[J]. 光子学报, 2014, 43(7): 0706012. An G, Yan J J, Liu Y. Calibration and application of optical pulse shaping system based on liquid crystal spatial light modulator[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(7): 0706012.
- [21] 王姝懿, 刘智, 林鹏, 等. 基于液晶空间光调制器的激光束散角控制技术[J]. 液晶与显示, 2022, 37(11): 1430-1438. Wang S Y, Liu Z, Lin P, et al. Laser beam divergence control technology based on liquid crystal spatial light modulator[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2022, 37(11): 1430-1438.
- [22] 李雨, 李泽仁, 刘寿先. LC-SLM 像素型结构对 4f 脉冲整形系统的影响[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(8): 30-35. Li Y, Li Z R, Liu S X. 4f pulse-shaping system influenced by liquid crystal spatial light modulator pixel structure[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(8): 30-35.
- [23] Prawiharjo J, Daga N K, Geng R, et al. High fidelity femtosecond pulses from an ultrafast fiber laser system via adaptive amplitude and phase pre-shaping[J]. Optics Express, 2008, 16(19): 15074-15089.
- [24] Wittenbecher L, Zigmantas D. Correction of Fabry-Pérot interference effects in phase and amplitude pulse shapers based on liquid crystal spatial light modulators[J]. Optics Express, 2019, 27(16): 22970-22982.
- [25] 翟中生, 张艺, 吕清花, 等. 基于组合光栅的光束整形方法研究[J]. 中国激光, 2022, 49(13): 1305001. Zhai Z S, Zhang Y, Lü Q H, et al. Research on beam shaping method based on combined grating[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(13): 1305001.
- [26] 陈君, 黄曾鑫, 匡登峰. 利用多轴非对称结构光束的微粒光学操控[J]. 中国激光, 2021, 48(24): 2413001. Chen J, Huang Z X, Kuang D F. Optical manipulation of micro-particles with multi-axis asymmetric structured beam[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(24): 2413001.
- [27] 李昕颖, 钱晓凡, 孟妮妮. 光束整形衍射光学元件的优化算法[J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1105003. Li X Y, Qian X F, Meng N N. Optimization algorithm of diffractive optical elements for beam shaping[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1105003.
- [28] 霍家琦, 胡源, 程彬鹏. 衍射光学技术发展历程及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(7): 0700002. Huo J Q, Hu Y, Cheng B P. History and application of diffractive optics technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(7): 0700002.
- [29] 龚华平, 吕志伟, 林殿阳. 激光束空间整形的研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(9): 2-5. Gong H P, Lü Z W, Lin D Y. Present status of laser beam spatial shaping[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42(9): 2-5.
- [30] 修龙汪, 李文青, 杨鹏, 等. 基于双曲初始相位的 GS 改进算法[J]. 光子学报, 2022, 51(4): 0405001. Xiu L W, Li W Q, Yang P, et al. Improved GS algorithm based on hyperbolic initial phase[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(4): 0405001.
- [31] Yang G, Wang L, Dong B, et al. On the amplitude-phase retrieval problem in an optical-system involved nonunitary transformation[J]. Optik, 1987, 75: 68-74.
- [32] Wang H, Hu T, Wang Z, et al. Reconstruction of power pylons from LiDAR point clouds based on structural segmentation and parameter estimation[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022, 19: 6500205.
- [33] 刘宇, 黄建华, 赵传江, 等. 透过散射介质聚焦时背景噪声抑制的实验研究[J]. 光子学报, 2023, 52(1): 0129001. Liu Y, Huang J H, Zhao C J, et al. Experimental study on background noise suppression when focusing through scattering medium[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(1): 0129001.
- [34] 刘文静, 庞辉, 曹阿秀, 等. 低散斑环形光束整形器件的设计及实验[J]. 光子学报, 2020, 49(2): 0222001. Liu W J, Pang H, Cao A X, et al. Design and experiments of annular beam shaping device with low speckle noise[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(2): 0222001.
- [35] 张峰, 李博骁, 田蕾, 等. 基于哈达玛基编码算法的水下光传输优化[J]. 液晶与显示, 2022, 37(11): 1453-1458. Zhang F, Li B X, Tian L, et al. Optimization of underwater optical transmission based on hadamard coding algorithm[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2022, 37(11): 1453-1458.
- [36] 陆瑶, 姜宗福, 刘文广, 等. 3×1 光子灯笼实现 $30 \mu\text{m}$ 纤芯光纤激光模式控制[J]. 光学学报, 2021, 41(17): 1736001. Lu Y, Jiang Z F, Liu W G, et al. Laser mode control in fiber with core diameter of $30 \mu\text{m}$ based on 3×1 photonic lantern[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(17): 1736001.
- [37] Buske P, Völl A, Eisebitt M, et al. Advanced beam shaping for laser materials processing based on diffractive neural networks[J]. Optics Express, 2022, 30(13): 22798-22816.
- [38] 何泽文, 庄秋实, 曹惠宁, 等. 基于文化基因算法的透过散射介质聚焦[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(24): 2429001. He Z W, Zhuang Q S, Cao H N, et al. Focusing through scattering medium based on memetic algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(24): 2429001.
- [39] Hsu K H, Lin H Y. Trade-off between diffraction efficiency and uniformity for design of binary diffractive laser beam shaper[J]. Optical Review, 2013, 20(4): 296-302.
- [40] 邵加强, 苏宙平. 基于机器学习设计连续相位分布的衍射光学元件[J]. 光学学报, 2023, 43(3): 0323001. Shao J Q, Su Z P. Design of diffractive optical elements with continuous phase distribution based on machine learning[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(3): 0323001.

- [41] Lalithambigai K, Anbarasan P M, Rajesh K B. Formation of optical needle by high NA lens axicon with dedicated complex spiral phase mask[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2015, 47(7): 2017-2025.
- [42] Umamageswari N, Rajesh K B, Udhayakumar M, et al. Tight focusing properties of spirally polarized LG_(1,1) beam with high NA parabolic mirror[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2018, 50(2): 77.
- [43] 张羽, 杨坤涛, 杨长城. 二元光学元件的制作技术与进展[J]. *光学仪器*, 2005, 27(2): 80-85.
Zhang Y, Yang K T, Yang C C. Fabrication technology and development of binary optical elements[J]. *Optical Instruments*, 2005, 27(2): 80-85.
- [44] Wang L K, Zhao Y, Yang Y, et al. Two-step femtosecond laser etching for bulk micromachining of 4H-SiC membrane applied in pressure sensing[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(9): 12359-12367.
- [45] Hosseingholilou S, Dorrani D. Electrophoretic deposited gold nanoparticle thin film on silver substrate[J]. *IET Optoelectronics*, 2023, 17(2/3): 51-60.
- [46] Häcker A V, Mohr-Weidenfeller L, Stolzenberg C F L, et al. Modifications to a high-precision direct laser writing setup to improve its laser microfabrication[J]. *Proceedings of SPIE*, 2022, 11989: 119890U.
- [47] You K Y, Fang F Z. High effective laser assisted diamond turning of binderless tungsten carbide[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, 302: 117505.
- [48] Sohrabi S, Pazokian H, Ghafary B, et al. Superhydrophobic-antibacterial polycarbonate fabrication using excimer laser treatment[J]. *Optik*, 2022, 262: 169377.
- [49] Wang M, Wang X F, Zhou Z C, et al. High-spatial-resolution composition analysis of micro/nano-structures with a nanoscale compositional variation[J]. *Nano Research*, 2023, 16(1): 1090-1095.
- [50] Ekimenkova A S, Orekhova M K, Voznesenskaya A O, et al. Design of an optical system for a laser beam shaping system based on aspheric polymer lenses[J]. *Journal of Optical Technology*, 2020, 87(11): 698-702.
- [51] 赵阳, 向阳, 李婷婷. 深紫外激光辐照加速材料老化系统的光学设计[J]. *光学学报*, 2021, 41(5): 0522001.
Zhao Y, Xiang Y, Li T T. Optical design of deep ultraviolet laser irradiation system for accelerating material aging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(5): 0522001.
- [52] 陈凯. 高斯光束整形为平顶光束整形系统的研究与设计[D]. 北京: 北京工业大学, 2011.
Chen K. Research and design of Gaussian beam shaping system for flat-topped beam[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011.
- [53] 钟旭森, 唐晓军, 王钢. 整形为平顶洛伦兹光束的非球面透镜组研究[J]. *激光与红外*, 2018, 48(4): 515-518.
Zhong X S, Tang X J, Wang G. Study on aspheric lens group in laser beam shaping system[J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(4): 515-518.
- [54] 冯科, 李劲松. 高斯光束非球面镜整形系统的设计[J]. *光电工程*, 2013, 40(5): 127-132.
Feng K, Li J S. Design of aspherics lenses shaping system on Gaussian beam[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(5): 127-132.
- [55] 陈凯, 陈檬, 李港, 等. 高斯光束整形为平顶光束的双凸非球面镜的数值模拟与分析[J]. *激光与红外*, 2010, 40(10): 1043-1047.
Chen K, Chen M, Li G, et al. Numerical simulation and analysis of convex two-aspheric-mirror system that converts a Gaussian to a flat-top beam[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(10): 1043-1047.
- [56] 李党娟, 王佳超, 陈阳, 等. 大功率长焦深高斯光束整形设计[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(10): 2129-2137.
Li D J, Wang J C, Chen Y, et al. Design of high power long-coke deep-Gaussian beam shaping system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(10): 2129-2137.
- [57] van Wouwerghem B M, Salmon J T, Wilcox R W. Beamlet-pulse-generation and wavefront-control system: UCRL-LR-105821-95-1[P]. 1996-06-01.
- [58] 李成, 汪文星, 李伟伟, 等. 光阴极微波电子枪驱动激光整形与传输系统[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33(9): 094002.
Li C, Wang W X, Li W W, et al. Drive laser shaping and transport system for photocathode RF gun[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33(9): 094002.
- [59] Will I. Generation of flat-top picosecond pulses by means of a two-stage birefringent filter[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2008, 594(2): 119-125.
- [60] Yang H L, Meng J Q, Chen W B. High efficiency and high-energy intra-cavity beam shaping laser[J]. *Laser Physics*, 2015, 25(9): 095005.
- [61] Halassi A, Driouche Y, Hamdi R, et al. Generalized temporal synthesis method for a birefringent laser pulse shaper[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2020, 37(11): C15-C19.
- [62] Huang W H, Liu T G, Wang Z, et al. Flexible refractive and diffractive micro-optical films shaped by fitting aspherical microprofiles with featured aperture and depth and their spatial arrangement for imaging applications[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2022, 40(2): 022804.
- [63] Luo Z, Duan J A, Guo C L. Femtosecond laser one-step direct-writing cylindrical microlens array on fused silica[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(12): 2358-2361.
- [64] Bian J, Chen F R, Ling H, et al. Experimental and modeling study of controllable laser lift-off via low-fluence multiscanning of polyimide-substrate interface[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 188: 122609.
- [65] 吕百达, 蔡邦维, 张彬. 强激光的空间整形和靶面均匀辐照技术[J]. *红外与激光工程*, 1999, 28(1): 25-28.
Lü B D, Cai B W, Zhang B. Spatial shaping and uniform irradiation on the target of high power lasers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1999, 28(1): 25-28.
- [66] Tai Y H, Miyamoto T. Experimental characterization of high tolerance to beam irradiation conditions of light beam power receiving module for optical wireless power

- transmission equipped with a fly-eye lens system[J]. *Energies*, 2022, 15(19): 7388.
- [67] 赵杨, 丁迎春. 基于超像素方法的多点可控波前整形研究[J]. *光子学报*, 2021, 50(9): 0929002.
Zhao Y, Ding Y C. Multi-point controllable wavefront shaping based on superpixel method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(9): 0929002.
- [68] 郭凯, 彭旷, 王文峰, 等. 光学胶膜液体可变焦微透镜阵列[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(7): 20210958.
Guo K, Peng K, Wang W F, et al. Optical film liquid variable focus microlens array[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(7): 20210958.
- [69] 靳羽华, 赵艳, 蒋毅坚. 准分子激光微透镜整形均束装置[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0602003.
Jin Y H, Zhao Y, Jiang Y J. Microlens beam shaping and homogenizing optical system for excimer laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(6): 0602003.
- [70] 殷智勇, 汪岳峰, 贾文武, 等. 基于微透镜阵列的光束积分系统的性能分析[J]. *中国激光*, 2012, 39(7): 0702007.
Yin Z Y, Wang Y F, Jia W W, et al. Performance analysis of beam integrator system based on microlens array[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(7): 0702007.
- [71] 郑建洲, 于清旭, 关寿华. 正交光楔列阵光学系统的小尺度不均匀性[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(1): 38-44.
Zheng J Z, Yu Q X, Guan S H. Small-scale non-uniformity of cross segmented wedge array focus system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(1): 38-44.
- [72] 周叶, 祝启欣, 黄中亚, 等. 基于柱面微透镜阵列的激光匀化系统设计及实验研究[J]. *激光与红外*, 2020, 50(4): 486-492.
Zhou Y, Zhu Q X, Huang Z Y, et al. Design and experimental investigations of laser homogenization system based on cylindrical microlens array[J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(4): 486-492.
- [73] Sanjeev A, Kapellner Y, Shbero N, et al. Non-contact optical wavefront shaping for focusing light and high-resolution imaging inside and behind biological scattering medium[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10932: 1093204.
- [74] 黄大杰, 范薇, 林尊琪. 数字微镜器件用于光束空间整形[J]. *中国激光*, 2011, 38(5): 0502008.
Huang D J, Fan W, Lin Z Q. Spatial laser beam shaping using digital micromirror device[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(5): 0502008.
- [75] 邱基斯, 樊仲维, 唐熊忻. 超高斯平顶分布光束空间整形技术研究[J]. *光电子·激光*, 2014, 25(2): 233-238.
Qiu J S, Fan Z W, Tang X X. Research on spatial shaping technology of super-Gaussian flattopped distributed beam[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2014, 25(2): 233-238.
- [76] 娄艳阳, 郑贤良, 张世超, 等. 基于数字微镜阵列的平顶光束空间整形[J]. *激光技术*, 2016, 40(6): 916-920.
Lou Y Y, Zheng X L, Zhang S C, et al. Flat-top beams spatial shaping with digital micromirror device[J]. *Laser Technology*, 2016, 40(6): 916-920.
- [77] Ruyer C, Fusaro A, Debayle A, et al. Influence of a random phase plate on the growth of the backward stimulated Brillouin scatter[J]. *Physical Review E*, 2023, 107(3): 035208.
- [78] 李平, 马驰, 粟敬钦, 等. 时域与空域结合实现光束平滑的光谱优化分析[J]. *中国激光*, 2008, 35(4): 534-538.
Li P, Ma C, Su J Q, et al. Analysis of laser optimized spectrum for smoothing the focused spot by temporal and special method[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(4): 534-538.
- [79] Bagnoud V, Hornung J, Afshari M, et al. Implementation of a phase plate for the generation of homogeneous focal-spot intensity distributions at the high-energy short-pulse laser facility PHELIX[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2019, 7(4): e62