

引用格式: LIU Wen-jing, PANG Hui, CAO A-xiu, *et al.* Design and Experiments of Annular Beam Shaping Device with Low Speckle Noise[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(2): 0222001

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

低散斑环形光束整形器件的设计及实验

刘文静^{1,2,3}, 庞辉², 曹阿秀², 史立芳², 付永启¹, 邓启凌²

(1 电子科技大学 物理学院, 成都 611731)

(2 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:提出一种可有效抑制散斑噪声的衍射元件设计方法. 在传统 Gerchberg-Saxton 算法的基础上, 通过选择一种特殊的初始相位, 在不降低衍射效率的同时, 有效提升光斑的均匀性. 以将高斯光束整形为环形平顶光束为例, 开展了数值仿真和光学实验. 结果表明, 利用该方法和传统 Gerchberg-Saxton 算法设计得到的环形平顶光束散斑对比度分别为 11% 和 34%, 验证了该方法可以获得低散斑噪声的环形平顶光束.

关键词:衍射光学元件; 光束整形; Gerchberg-Saxton 算法; 空间光调制器; 散斑抑制

中图分类号: O439

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204902.0222001

Design and Experiments of Annular Beam Shaping Device with Low Speckle Noise

LIU Wen-jing^{1,2,3}, PANG Hui², CAO A-xiu², SHI Li-fang², FU Yong-qi¹, DENG Qi-ling²

(1 College of Physics, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 611731, China)

(2 Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A design method of diffractive element that can effectively suppress speckle noise is proposed. Based on the traditional Gerchberg-Saxton algorithm, the uniformity of the light spot is effectively improved without reducing the diffraction efficiency by selecting a special initial phase. Taking the Gaussian beam shaped into an annular flat-top beam as an example, numerical simulation and optical experiments are carried out. The results show that the speckle contrasts of the annular flat-top beams obtained by using the proposed method and the traditional Gerchberg-Saxton algorithm are 11% and 34%, respectively, which verifies the proposed method can obtain a annular flat-top beam with low speckle noise.

Key words: Diffractive optical element; Beam shaping; Gerchberg-Saxton algorithm; Spatial light modulator; Speckle suppression

OCIS Codes: 220.2740; 220.3630; 220.4000

0 引言

激光技术可应用于激光医疗、激光加工、激光检测、激光武器等领域^[1-3], 不同领域对激光束的需求也不

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 51703227, C0025053, 61605211, 61905251), 中科院科研仪器设备研制项目(No. YJKYYQ20180008), 国家重点研发计划(No. 2017YFC0804900), 四川省科技计划项目(No. 2019YJ0014), 中国科学院青年创新促进会, 中科院西部之光人才支撑计划

第一作者:刘文静(1994-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为微纳光学. Email: 2397942003@qq.com

导师:付永启(1967-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为微纳光学. Email: yqfu@uestc.edu.cn

通讯作者:庞辉(1986-), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为微纳光学. Email: wuli041@126.com

收稿日期:2019-10-18; **录用日期:**2019-12-04

<http://www.photon.ac.cn>

尽相同. 为了提高光刻分辨率, 需要圆环形的均匀照明光斑; 在激光打孔、激光切割、激光检测等^[4-5]应用中要求激光为环形平顶光束. 因此研究如何将激光器出射的高斯光束整形形成所需的特定光束, 具有重要的科学意义. 现有的光束整形技术主要分为两类, 几何光学方法和衍射光学方法. 前者基于几何光学原理, 采用棱镜、柱镜、透镜、非球面镜等折射型器件实现对光束的调控^[6-8]. 后者基于光波的衍射原理设计衍射光学元件实现光束的变换^[9]. 相比于折射型器件, 衍射光学元件(Diffractive Optical Element, DOE)具有体积小、重量轻、易集成、任意波面变换等特点, 理论上可以产生任意强度分布的光斑, 在光束整形领域有着广泛的应用前景. 衍射光学元件的设计方法有模拟退火算法、杨-顾算法、迭代傅里叶算法等^[10-11], 这些算法都是通过不断优化衍射光学元件的相位分布来使输出面的光强分布更加接近理想分布, 而对于输出面的相位分布不加以限制. 最终, 激光的高相干性和系统的点扩散函数引起的干涉效应, 导致整形后的光斑出现不规则分布的亮暗斑点现象, 称之为散斑噪声^[12]. 抑制散斑噪声, 提高光束质量, 成为该技术亟待解决的问题.

国内外研究学者提出了一系列抑制散斑噪声的方法. GOODMAN等发现, 当多幅统计独立并且具有相同平均强度的散斑图像叠加时, 散斑对比度会得到有效下降, 据此, 可以在光路中加入旋转的散射体或者震动的随机相位板等部件来对整形光斑进行时间平均积分^[13,14]. 这种方法在一定程度上抑制了激光散斑, 但是并不能从根本上消除. 之后科研人员意识到若要有效抑制散斑, 除了对光强调控外, 还必须对输出光束的相位进行限制. 北京理工大学刘娟课题组提出了将复振幅光场按照实部和虚部进行分解的方式, 采用两个振幅型衍射光学元件并结合波片实现光场调控^[15]. 然而双片衍射光学元件需要像素之间的严格对准, 安装调试难度较大. 相较于上述抑制散斑的方法, 改进衍射光学元件的设计方法不会增加系统的复杂性. 2014年陶绍华等提出了一种振幅相位双调制算法^[16], 将输出面上目标整形光斑所在的区域定义为信号区, 其它区域定义为噪音区, 在迭代过程中, 限制信号区内的振幅和相位为理想分布, 噪音区的光场不加限制, 最终得到了较高质量的光斑分布, 且在一定程度上降低了散斑噪声, 但是由于引入了噪音区这一自由度, 导致其衍射效率非常低. 清华大学谭峭峰课题组提出了一种衍射光学元件的精细化设计方法^[17], 通过对输入面补零来减少输出面的采样间隔, 以此将输出面上像素点之间的干涉效应考虑在内进行设计, 与传统方法相比, 散斑得到了有效的抑制, 但是该设计方法很难收敛到一个较好的结果, 最终光斑的均匀性较差, 难以满足实际的需求. 因此当前基于衍射光学元件的光束整形技术无法同时兼顾光束质量好和衍射效率高这一需求.

本文提出了一种可以有效抑制散斑噪声的衍射光学元件设计方法, 在传统 Gerchberg-Saxton(GS)算法的基础上, 利用特殊相位作为初始相位, 使得输出面相位分布更加规则有序, 降低输出面像素点之间的干涉, 从而达到减小散斑的效果. 在之前的工作中, 已经实现了对圆形平顶光斑和方形平顶光斑的整形^[10], 并且取得了较好的仿真结果和液晶空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)实验结果. 在此基础上本文将对环形光束进行整形.

1 设计

GS算法是一种基于迭代傅里叶变换的局域搜索算法^[11]. 初始相位的选择很大程度上决定了最终的设计结果. 当前广泛采用随机相位作为初始相位分布, 尽管输出面上的振幅分布可以接近理想分布, 但是其相位分布却是随机不规则的, 最终导致了整形光斑中存在大量的散斑噪声. 本文设计思想是: 选择合适的初始相位分布, 使得入射光经过该相位调制后, 在输出面上产生的光斑与目标光斑大小和形状接近^[18], 再采用GS算法进行局部寻优. 以将入射高斯光束整形成环形平顶光束为例, 详细介绍提出的设计方法. 为了产生环形光斑, 采用的初始相位形式为 $a(x^2 + y^2) + b\sqrt{(x^2 + y^2)}$. 式中, 第一项二次相位分布主要是聚焦功能, 用于产生特定尺寸的光斑, 而第二项相位分布用于产生空心圆形光斑. 如图1, 高斯光束经过该相位的调制后, 可以在输出面产生近似环形的光斑. 在确定了初始相位分布的形式后, 最重要的就是如何确定其中的参数 a 和 b .

假设所需的环形平顶光束的内径和外径分别为 90 和 105 个像素, 输入面衍射元件的采样点数为 512×512 , 入射高斯光束可以表示为

$$u_{in} = \exp[-(x^2 + y^2)/\omega^2] \quad (1)$$

式中, $\omega = 120$ 像素为高斯光束束腰半径, x, y 为像素坐标.

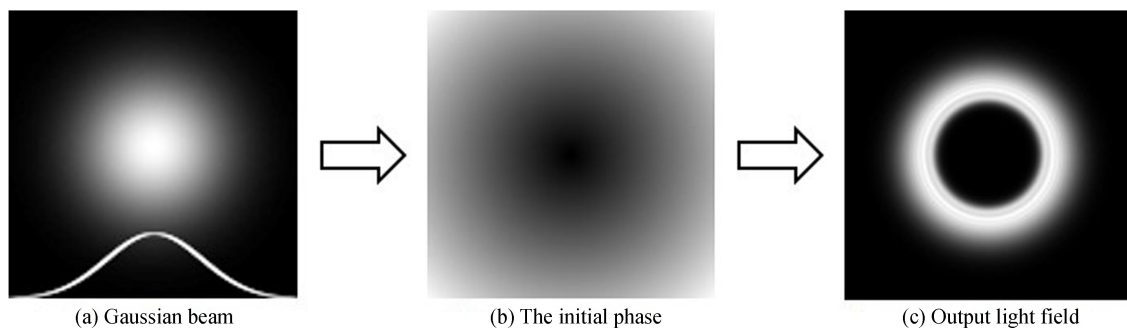


图1 初始相位的确定
Fig.1 The determination of initial phase

首先讨论参数 a 、 b 对输出面光斑的影响. 保持 $b=1$ 不变, a 分别取 0.000 1、0.000 8、0.02、0.004 时, 输出面上产生的环形光斑的光强分布分别如图 2(a)~(d)所示, 其中红色虚线部分代表目标环形平顶光. 可以看出随着参数 a 的增加, 环形光斑的内径与外径之差逐渐变大, 而内径的位置基本保持不变. 随后, 保持 $a=0.001 4$ 不变, 逐渐增减参数 b , 当 b 分别为 0.3、0.6、1.3、1.6 时, 输出面上产生的环形光束光强分布分别如图 2(e)~(h)所示. 显然, 随着 b 的增加, 环形光斑的内径逐渐增加, 而内外径之差保持不变. 由图 2 可以看出, 参数 a 主要影响环形光束的内外径差, 参数 b 主要影响环形光束的内径位置.

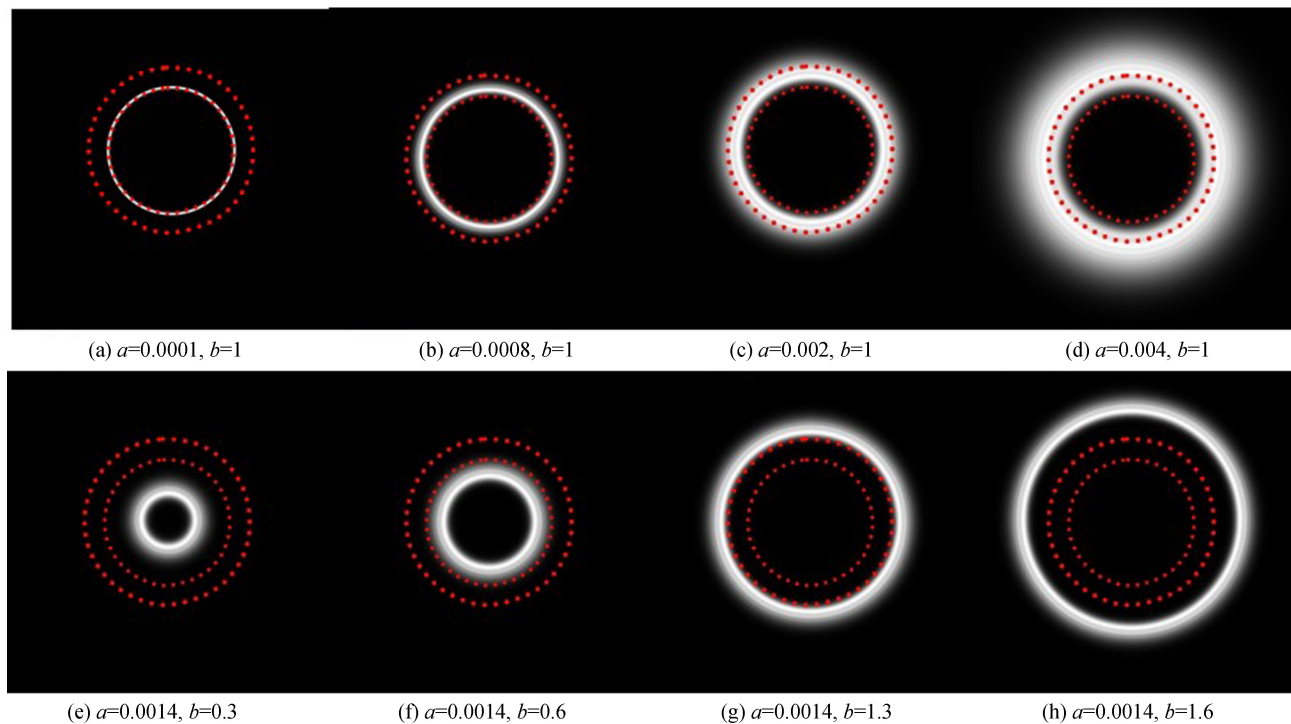


图2 参数 a 和 b 的变化对输出面光斑的影响
Fig.2 The influence of parameter a and b on the output beam

尽管可以通过参数 a 和 b 来控制输出面光斑的大小和位置, 但是仍然不能保证与理想环形平顶光完全一致. 对此, 提出如图 3 所示的设计算法. 基本思想是: 首先找到与目标环形平顶光束位置基本一致的环形光束, 确定其所对应的 b 的值. 其次, 通过找到两个内外径之差比目标环形平顶光斑小和大的环形光斑所对应的 a 的值作为初始相位的下限 a_1 和上限 a_2 . 然后进入寻找最优参数 a 的循环, 以每个参数 a 对应的相位作为初始相位进行 GS 迭代, 计算在该相位条件下的输出平面环形光束的衍射效率和均匀性误差, 如果 $a < a_2$ 则令 $a + \Delta a$, 这里 Δa 取 0.000 1, 找到衍射效率和均匀性最优时所对应的初始相位, 该相位即为最优相位. 然后利用最优相位作为初始相位进行 GS 迭代算法. 为了定量地评价最终整形光斑的质量, 采用衍射效率 η 和均匀性误差 σ 两个指标, 定义为

$$\eta = \sum I_s / \sum I \tag{2}$$

$$\sigma(k) = [\max(I_s) - \min(I_s)] / [\max(I_s) + \min(I_s)] \tag{3}$$

式中, s 代表平顶光束所在区域, I_s 为平顶光束区域的光强, I 为输出面的光强.

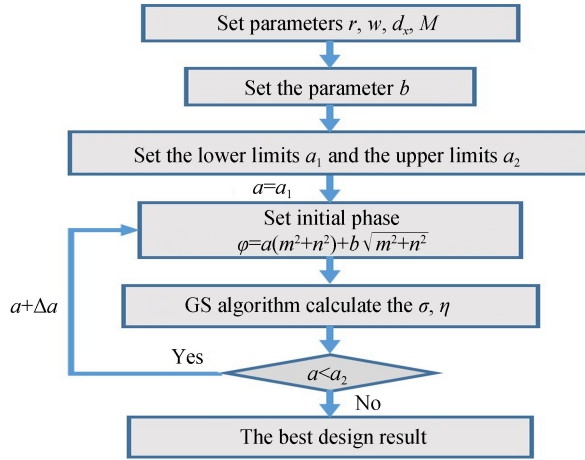


图3 算法流程

Fig.3 The flowchart of the algorithm

2 仿真实验

为了验证提出的设计方法,开展了相关的设计和数值仿真. 假定激光波长 λ 为 632.8 nm, 高斯光光腰半径为 960 μm 的目标环形平顶光束的内径和外径分别为 4 860 μm 和 5 670 μm , 傅里叶变换透镜的焦距 f 为 350 mm. 衍射光学元件的像元尺寸 $d_x \times d_x$ 设置为 8 $\mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$, 像素数 $M \times M$ 为 512 \times 512, 周期为 4.096 mm \times 4.096 mm. 根据采样定理可以得到输出面的采样间隔为 $\frac{\lambda f}{M d_x} = 54$, 则环形平顶光斑内径和外径分别为 90 和 105 像素.

根据图 3 的设计流程, 首先确定参数 $b = 1$, 此时环形光斑与目标平顶光位置基本一致. 参数 a 的上下限分别取为 0.000 1 和 0.002. 针对每一个初始相位都采用 GS 算法进行 500 次的迭代搜寻. 结果表明: 当参数 a 为 0.001 4 时, 平顶光斑的性能即衍射效率和均匀性最优, 此时的初始相位为 $0.001 4(x^2 + y^2) + \sqrt{x^2 + y^2}$. 分别采用最优的初始相位和传统的随机相位作为初始相位, 再利用 GS 算法进行迭代设计. 图 4 为衍射效率和均匀性误差的收敛曲线对比. 可以看出, 优化的初始相位对应的衍射效率和均匀性都显著优于传统的随机初始相位. 最终得到环形平顶光斑的均匀性误差为 7.4%, 衍射效率为 99.7%. 相比之下, 随机

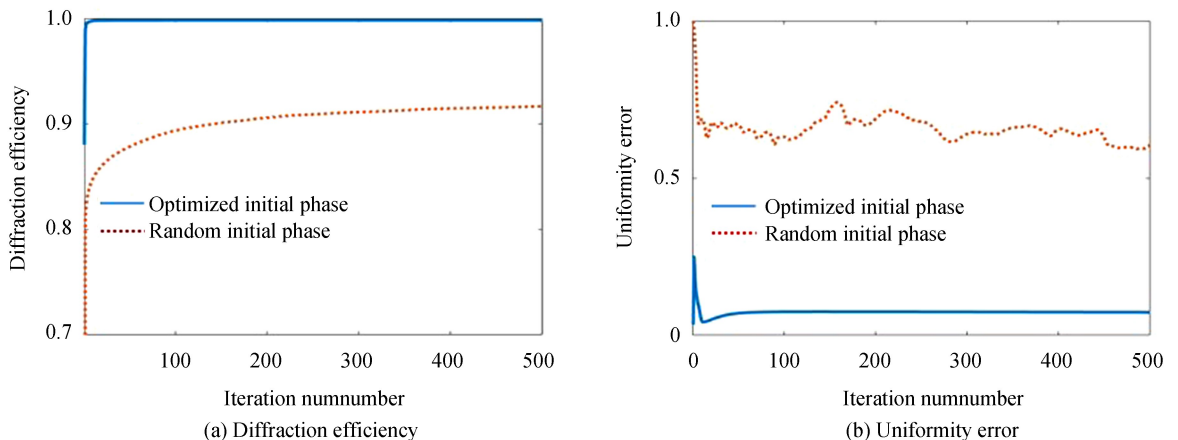


图4 衍射效率和均匀性误差

Fig.4 Diffraction efficiency and uniformity error

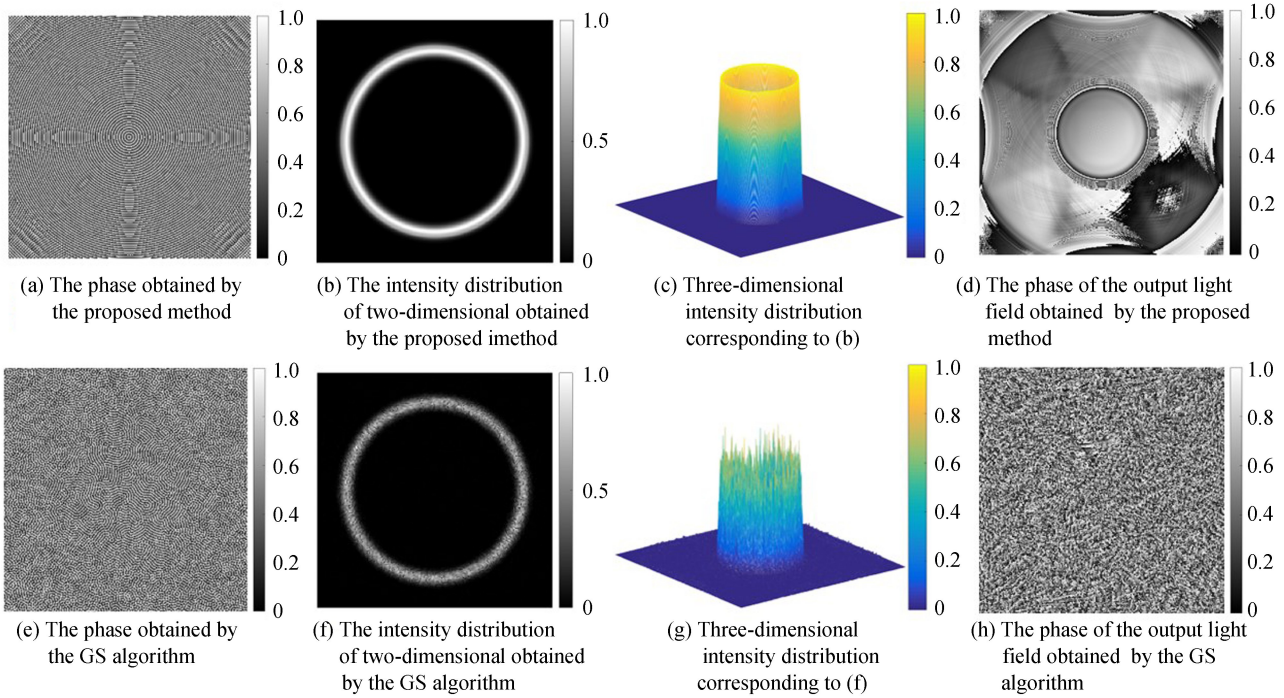


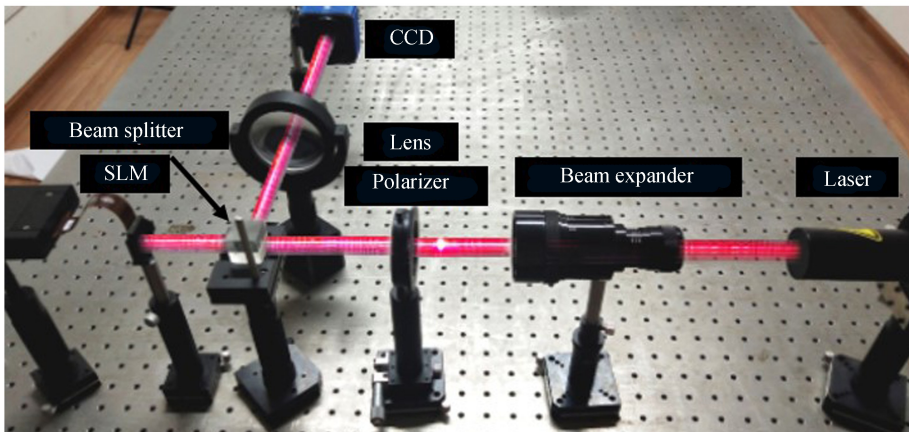
图 5 环形平顶光束的仿真结果

Fig.5 The simulation results of the annular flat-top beam

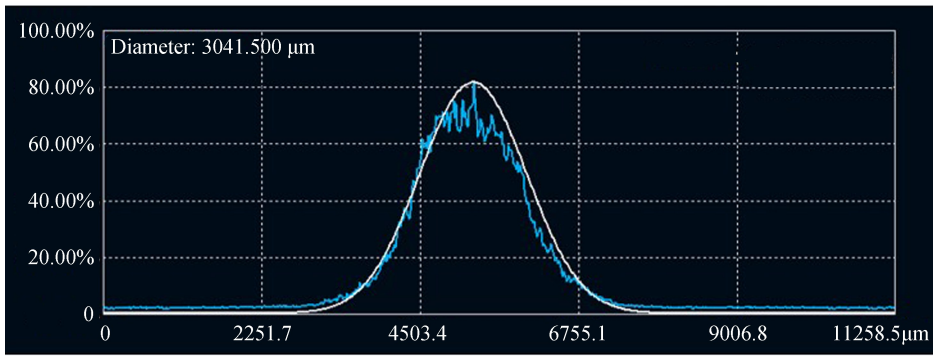
相位对应的均匀性误差高达 62.4%，衍射效率仅为 91.7%。图 5(a)为利用本文设计方法得到的衍射元件的相位分布,图 5(b)和(c)为对应的输出面上的光强分布,图 5(d)为输出面环形平顶光束的相位分布,可以看出,平顶光斑所在区域内的输出相位分布是有序的,因此可以有效抑制采样点之间干涉造成的散斑噪声。图 5(e)~(h)为利用 GS 算法得到的仿真结果。显然,光斑的均匀性非常差,此外随机的不规则的输出面相位分布,还会造成采样点之间干涉相消,进一步降低光斑的均匀性。

3 实验与讨论

为了进一步验证提出的设计方法,开展了光束整形实验。实验中采用纯相位型的 SLM 来显示设计得到的衍射元件的相位分布,可以有效避免传统衍射元件加工制备所需的繁杂的工艺。SLM 是一种动态的相位调制器件,目前已经广泛用于光束整形^[2,11,17]、全息显示^[19-21]、图像重构^[22]等领域。实验光路如图 6(a)所示,波长 632 nm 的氦氖激光经扩束镜后投射到 SLM(型号为 HOLOEYE PLUTO VIS,分辨率为 1 920 pixel×1 080 pixel,像素大小为 8×8)上。利用计算机将设计好的环形平顶光束对应的相位分布输入到 SLM 中,调制后的光场再经傅里叶变换透镜投射到焦平面上的 CCD(型号为 HR16000CTLGEC,像素数为 4 896 pixel×



(a) Experimental setup



(b) Intensity distribution of the gaussian beam on the SLM

图6 实验光路及高斯光强度分布

Fig.6 Experimental setup and the intensity distribution of Gaussian beam

3 248 pixel, 像素尺寸为 7.4×7.4 上, CCD 用来采集焦平面上的光强分布. 为了使 SLM 处于纯相位调制模式, 在光路中加入了偏振片使得入射到 SLM 上的激光偏振方向为水平方向. 图 6(b) 为利用光斑分析仪检测到入射到 SLM 上的高斯光束及其拟合曲线, 由该曲线拟合公式可知, 入射高斯光的光腰半径为 $1518 \mu\text{m}$. 假定两组所需的环形平顶光束的内外径分别为 $4096 \mu\text{m}$ 和 $4480 \mu\text{m}$, 以及 $4352 \mu\text{m}$ 和 $4480 \mu\text{m}$. 通过仿真得到该两个不同尺寸的环形平顶光束对应的最优初始相位分别为 $0.002(x^2 + y^2) + \sqrt{(x^2 + y^2)}$ 和 $0.0016(x^2 + y^2) + \sqrt{(x^2 + y^2)}$.

图 7 为利用本文算法设计得到的两组环形平顶光束实验结果. 作为对比, 图 8 是利用传统 GS 算法设计的得到的环形平顶光束实验结果. 由截面曲线看出, CCD 采集到的两组环形光斑像素点数分别约为外径 610、内径 550, 和外径 610、内径 590. 由于 CCD 的像元尺寸为 $7.4 \mu\text{m}$, 经计算, 实验采集到的光斑尺寸与理论尺寸大致相同. 由图 7 和图 8 可以明显看出, 利用本文设计算法得到的环形平顶光斑均匀性显著优于传统

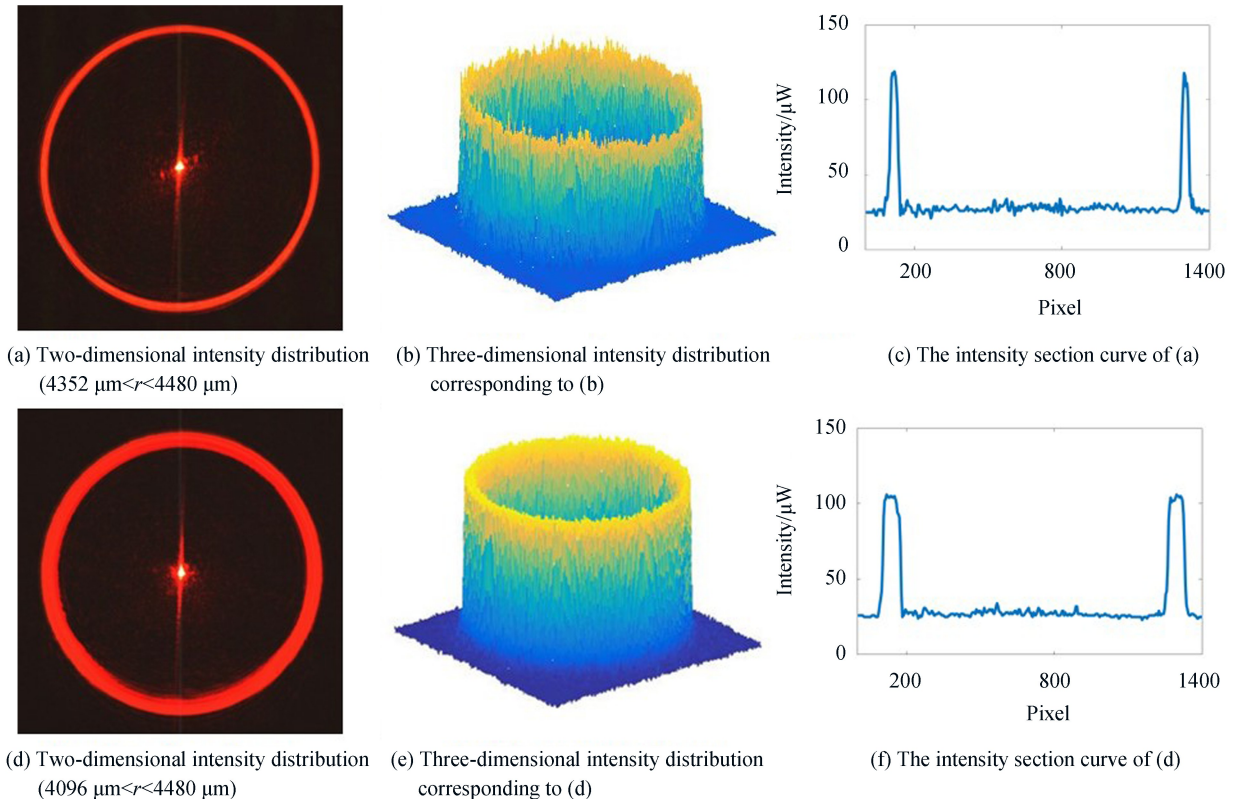


图7 本文算法的实验结果

Fig.7 The experimental results of proposed method

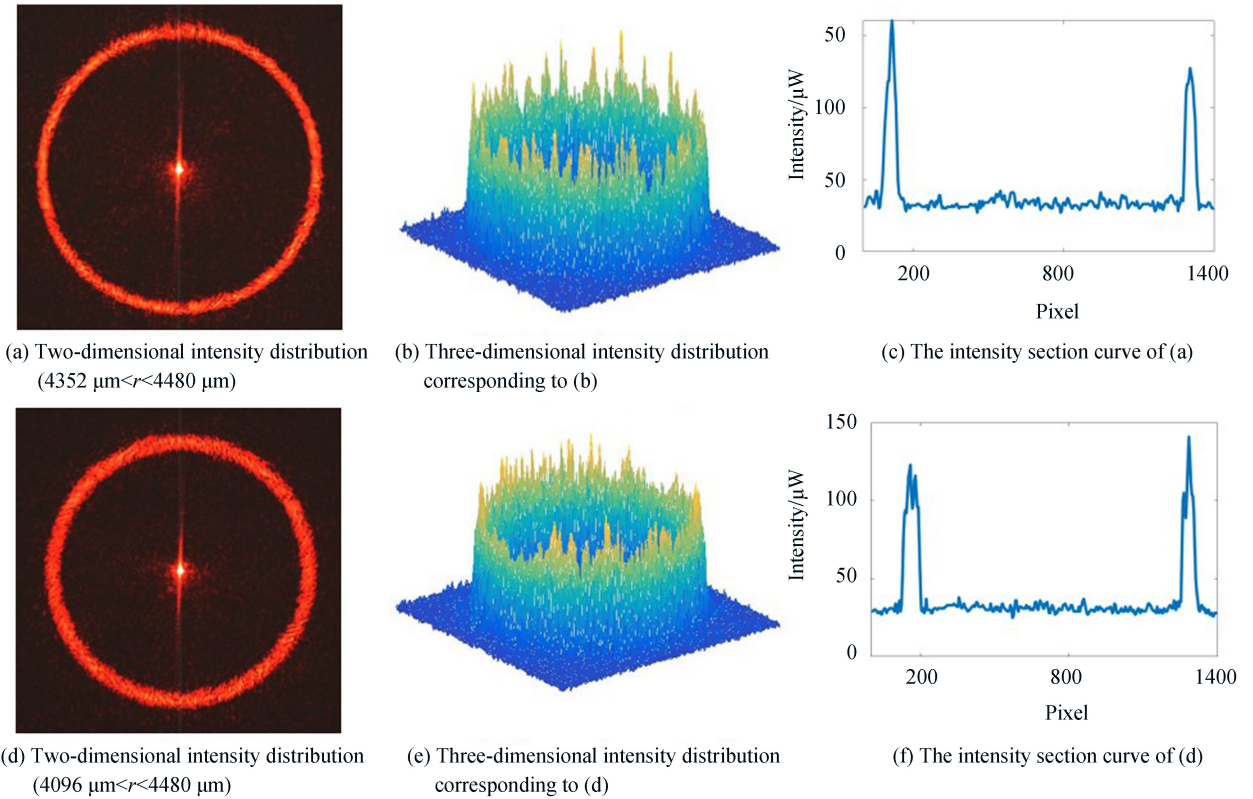


图 8 传统 GS 算法的实验结果

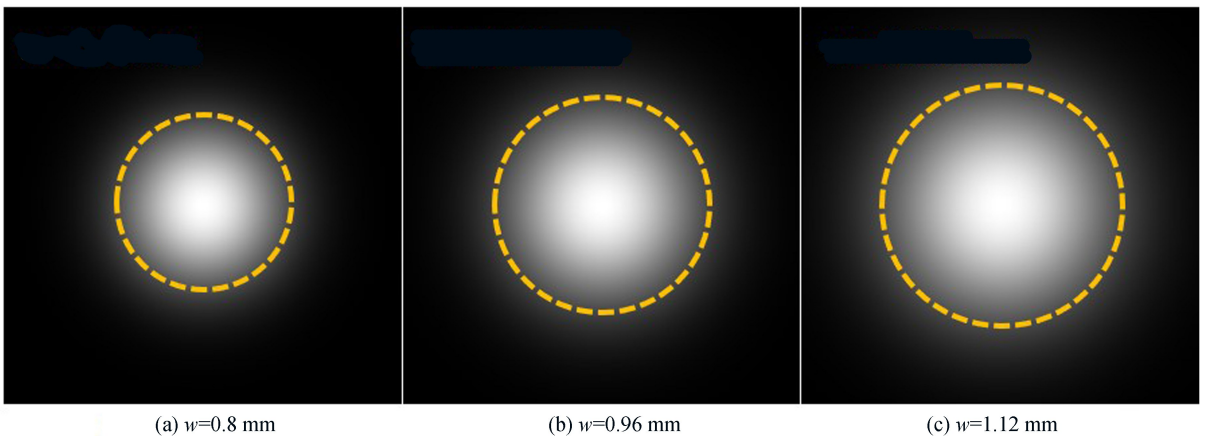
Fig.8 The experimental results of traditional GS algorithm

GS 算法,且激光散斑明显减少. 利用散斑对比度来衡量散斑抑制的程度,用 S_c 表示^[11]

$$S_c = \sigma / \langle I \rangle \quad (4)$$

式中, σ 和 $\langle I \rangle$ 分别为信号区内光斑强度的标准差及信号区内光斑强度的平均值. 经计算利用本文设计方法得到的环形平顶光束散斑对比度 11%, 利用传统 GS 算法设计得到的环形平顶光束散斑对比度为 34%.

影响输出光斑的一个重要因素是入射高斯光束尺寸的变化,图 9(a)和(c)是分别将高斯光束光腰半径减小 0.16 mm 及增大 0.16 mm 的光强分布,图(d)和(f)分别是其对应的输出面光斑,可以看出,当入射高斯光束减小 0.16 mm 时,输出环形平顶光束的边缘明显凹陷下去了,当入射高斯光束增大 0.16 mm 时,输出环形平顶光束的边缘光强明显较强.入射高斯光束的尺寸影响输出光斑的质量,因此在实验时应当控制入射高斯光斑的大小.



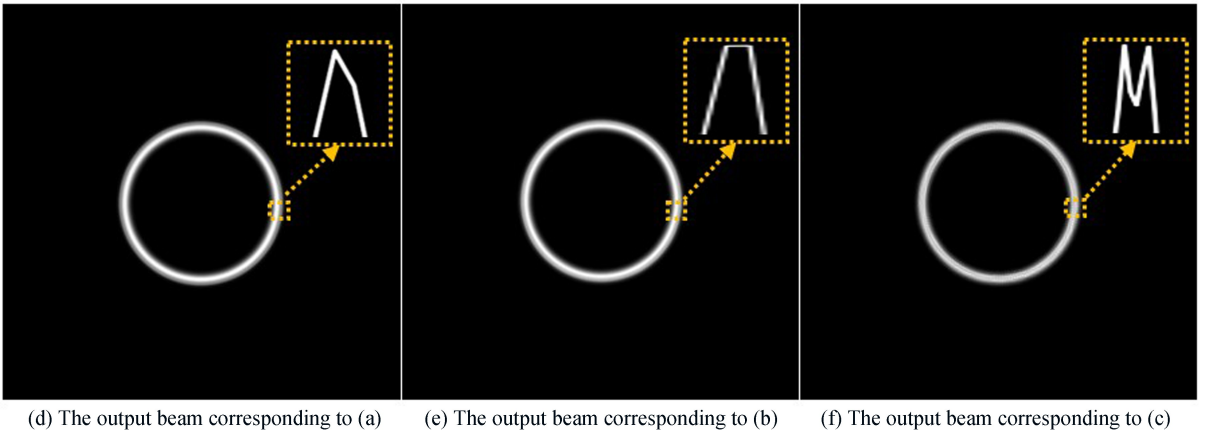


图9 入射高斯光束的束腰半径变化对输出光斑的影响
Fig.9 Effect of Gaussian spot with different waist radius on output beam

4 结论

本文提出了一种抑制散斑噪声的算法,该算法采用特殊的相位作为初始相位,在输出面上不仅可以使光斑分布更加均匀,而且可以使相位分布更加规则有序,以达到消除散斑噪声的效果.利用该算法设计的环形平顶光束在仿真和实验中的性能均优于传统GS算法,且在很大程度上抑制了散斑噪声.利用该方法设计的环形平顶光束在激光切割、激光打孔、激光加工等领域有着广阔的应用前景.

参考文献

- [1] ZHAO Tian-zhuo, YU Jin, LI Chao-yang, *et al.* Beam shaping and compensation for high-gain Nd: glass amplification [J]. *Journal of Modern Optics*, 2012, **60**(2): 109-115.
- [2] WANG Dong, ZHANG Jian, WANG Hao, *et al.* Variable shape or variable diameter flattop beam tailored by using an adaptive weight FFT-based iterative algorithm and a phase-only liquid crystal spatial light modulator [J]. *Optics Communications*, 2012, **285**: 5044-5050.
- [3] CHEN Chien-yue, DENG Qing-long, WU Pei-jung, *et al.* Speckle reduction by combination of digital filter and optical suppression in a modified Gerchberg-Saxton algorithm computer-generated hologram [J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(27): 163-168.
- [4] HU Xin-yao, ZHAO Qian, YU Pan-pan, *et al.* Dynamic shaping of orbital-angular-momentum beams for information encoding[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(2): 1796-1808.
- [5] SIO L D, ROBERTS D E, LIAO Zhi, *et al.* Beam shaping diffractive wave plates[J]. *Applied Optics*, 2018, **57**(1): 118-121.
- [6] CAO A-xiu, SHI Li-fang, YU Jin-qing, *et al.* Laser beam homogenization method based on random microlens array[J]. *Applied Laser*, 2015, **35**(1): 124-128.
曹阿秀, 史立芳, 余金清, 等. 基于随机微透镜阵列的激光光束匀化方法[J]. *应用激光*, 2015, **35**(1): 124-128.
- [7] ZHENG Guang, FANG Tao, BI Yong, *et al.* Laser digital cinema projector[J]. *Display Technology*, 2008, **4**(3): 314-318.
- [8] ZHANG S. A simple bi-convex refractive laser beam shaper[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2007, **9**(10): 945-950.
- [9] WANG Guang-yi, PANG Hui, WANG Jia-zhou, *et al.* Design of the laser beam splitter with large diffraction angle base on Rayleigh-Sommerfeld intergral[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(12): 1223002.
王广逸, 庞辉, 王佳舟, 等. 基于瑞利-索墨菲积分的大角度激光分束器设计[J]. *光子学报*, 2017, **46**(12): 1223002.
- [10] PANG Hui, LIU Wen-jing, CAO A-xiu, *et al.* Speckle-reduced holographic beam shaping with modified Gerchberg-Saxton algorithm[J]. *Optics Communications*, 2019, **433**: 44-51.
- [11] GERCHBERG R W, SAXTON W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. *Optik*, 1972, **35**(2): 1-6.
- [12] MA He, LIU Juan, YANG Min-qiang, *et al.* Influence of limited random-phase of objects on the image quality of 3D holographic display[J]. *Optics Communications*, 2017, **385**: 153-159.
- [13] LIANG Chuan-yang, ZHANG Wei, WU Zhi-hui, *et al.* Beam shaping and speckle reduction in laser projection display systems using a vibrating diffractive optical elements[J]. *Current Optics and Photonics*, 2017, **1**(1): 23-28.
- [14] WANG Ling-li, TSCHUDI T, HALLDORSSON T, *et al.* Speckle reduction in laser projection systems by diffractive

- optical elements[J]. *Applied Optics*, 1998, **31**(10): 1770-1775.
- [15] ZHAO Hao-zhi, LIU Juan, XIAO Ru, *et al.* Modulation of optical intensity on curved surfaces and its application to fabricate DOEs with arbitrary profile by interference[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(4): 5140-5148.
- [16] TAO Shao-hua, YU Wei-xing. Beam shaping of complex amplitude with separate constraints on the output beam[J]. *Optics Express*, 2014, **23**(2): 1796-1808.
- [17] YANG Mei-xia, KONG Zhe, TAN Qiao-feng, *et al.* Precise design of diffraction optical elements based on annular beam shaping[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, **39**(3): 0305002.
杨美霞, 孔哲, 谭峭峰, 等. 基于环形光束整形的衍射光学元件的精确设计[J]. *光学学报*, 2019, **39**(3): 0305002
- [18] PASIENSKI M, DEMARCO B. A high-accuracy algorithm for designing arbitrary holographic atom traps[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(3): 2176-2190.
- [19] GAO Qian-kun, LIU Juan, HAN Jian, *et al.* Monocular 3D see-through head-mounted display via complex amplitude modulation[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(15): 17372-17383.
- [20] LIU Jung-ping, HSIEH W Y, POON T C, *et al.* Complex Fresnel hologram display using a single SLM[J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(34): 128-135.
- [21] QU Wei-dong, GU Hua-rong, TAN Qiao-feng, *et al.* Holographic projection with higher image quality[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(17): 19179-19184.
- [22] QI Yi-jun, CHANG Chen-liang, XIA Jun, *et al.* Speckleless holographic display by complex modulation based on double-phase method[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(26): 30368-30378.

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (Nos. 51703227, C0025053, 61605211, 61905251), Instrument Development of Chinese Academy of Sciences (No. YJKYYQ20180008), National Research and Development Program of China (No. 2017YFC0804900), Sichuan Science and Technology Program (No. 2019YJ0014), Youth Innovation Promotion Association of CAS, CAS “Light of West China” Program