

基于SLM的几何稳相法光束整形影响因素分析

翟中生 段浪 郑雅雯

Analysis of factors affecting beam shaping quality of geometric steady-phase method based on SLM

ZHAI Zhongsheng, DUAN Lang, ZHENG Yawen

引用本文:

翟中生, 段浪, 郑雅雯. 基于SLM的几何稳相法光束整形影响因素分析[J]. 应用光学, 2023, 44(4): 711–719. DOI: 10.5768/JAO202344.0401002

ZHAI Zhongsheng, DUAN Lang, ZHENG Yawen. Analysis of factors affecting beam shaping quality of geometric steady-phase method based on SLM[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(4): 711–719. DOI: 10.5768/JAO202344.0401002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0401002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于二维MEMS器件的微型投影技术

Micro-projection technology based on 2D MEMS device

应用光学. 2020, 41(1): 156–162 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0105001>

激光并行加工DM码实验研究

Experimental study on laser parallel processing of DM code

应用光学. 2021, 42(6): 1115–1121 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0605002>

大尺寸太赫兹平顶波束的产生研究

Generation of large-size terahertz flat-topped beam

应用光学. 2021, 42(4): 622–629 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401008>

基于圆锥透镜生成双级无衍射光束的理论分析

Theoretical analysis of generating two-stage non-diffracting beam based on axicon method

应用光学. 2018, 39(5): 722–728 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0505004>

镜面瑕疵对激光光束质量的影响

Effect of mirror defect on laser beam quality

应用光学. 2017, 38(4): 665–669 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0407002>

热透镜控制激光光束质量技术研究

Controlling technique of beam quality by thermal lensing

应用光学. 2017, 38(1): 120–125 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0107001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 04-0711-09

基于 SLM 的几何稳相法光束整形影响因素分析

翟中生^{1,2}, 段 浪¹, 郑雅雯¹

(1. 湖北工业大学 机械工程学院 现代制造质量工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068;
2. 智能输送技术与装备湖北省重点实验室, 湖北 黄石 435000)

摘 要: 基于几何稳相法求解调制相位, 使用傅里叶透镜进行傅里叶变换, 在后焦面处聚焦, 得到对应的平顶光束, 从而将圆形高斯光束整形为方形平顶光束, 其中光路参数对整形质量将产生较大影响。实验中发现, 方形平顶光束受零级光影响均匀性较差, 因此详细分析了零级光产生的原因, 提出了有效的解决方法, 并对实验结果中出现的零级光通过叠加闪耀光栅直接移除。实验结果表明: 移除零级光后方形平顶光束的能量利用率为 72.3%, 光束均匀性高达 97.2%, 优于传统整形方法。最后进一步分析了全息图与入射光束偏移量、离焦以及入射光束束腰半径对几何稳相法整形质量的影响, 为几何法光束整形的应用提供了便利。

关键词: 光束整形; 稳相法; 空间光调制器; 平顶光束

中图分类号: TN247; O436

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0401002

Analysis of factors affecting beam shaping quality of geometric steady-phase method based on SLM

ZHAI Zhongsheng^{1,2}, DUAN Lang¹, ZHENG Yawen¹

(1. Hubei Key Laboratory of Modern Manufacturing Quality Engineering, School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. Hubei Key Laboratory of Intelligent Transportation Technology and Device, Huangshi 435000, China)

Abstract: The modulation phase was solved based on the geometric steady-phase method, the Fourier transform was carried out through Fourier lens, and the corresponding flat-top beam was focused at the rear focal plane, so that the circular Gaussian beam was shaped into a square flat-top beam, in which the optical path parameters had a great influence on shaping quality. In the experiment, it was found that the square flat-top beam was affected by the zero-order light and had poor uniformity. Therefore, the causes of the zero-order light were analyzed in detail and effective solutions were proposed. The zero-order light in the experimental results was directly removed by stacking the shining grating. The experimental results show that the energy utilization rate of square flat-top beam is 72.3%, and the beam uniformity is up to 97.2%, which is better than the traditional shaping method. Furthermore, the quality of beam shaping by geometric steady-phase method are further analyzed for three factors: the offset of hologram, out-of-focus and waist radius of incident beam, which provides convenience for the application of beam shaping by geometric steady-phase method.

Key words: beam shaping; geometric steady-phase method; spatial light modulator; flat-top beam

引言

由于激光器产生的光束强度通常呈现高斯分布, 因此在许多领域并不能直接使用。能量均匀

分布的平顶光束在激光投影印刷、激光表面处理、激光诱导损伤、激光打孔等领域广泛应用, 因此, 将激光器产生的高斯光束整形形成平顶光束是当前

收稿日期: 2022-09-09; 修回日期: 2022-09-27

基金项目: 国家自然科学基金 (32071457); 湖北省创新群体 (2022CFA006); 省重点实验室开放基金 (2022XZ110)

作者简介: 翟中生 (1978—), 男, 博导, 主要从事精密测量、光学成像等方面的研究。E-mail: zs.zhai@hbut.edu.cn

激光应用领域的研究热点^[1-4]。

空间光调制器作为衍射元件具有实时、可编程的优点,可以灵活地控制算法参数,因此许多研究人员将其应用于光束整形研究中^[5-9],大多采用基于标量理论的迭代算法。CHANG C L 等人^[10]提出了一种双约束 GS(Gale-Shapley)算法,采样点的振幅和相位同时被约束,散斑得到了抑制,光束均匀性得到改善,但是能量利用率下降非常厉害。PANG H 等人^[11]提出一种全局搜索最优初始相位进行 GS 迭代的算法,获得了均匀性以及能量利用率都很高的圆形、方形平顶光束,但该方法存在搜索过程漫长,运算量较大等缺点,并且整形结果的好坏依赖于初始相位的准确性。MATTHEW P 等人^[12]提出 MRAF(mixed-region amplitude freedom)算法,该算法将目标光束分为信号区和噪声区,信号区的光束均匀性很高,噪声区用光阑挡住,因此能量利用率较低。KUANG Z 等人^[8]使用孔径光阑法,将几何掩模加载到空间光调制器,获得了三角形、圆形、方形等平顶光束,由于小孔存在衍射效应,因此结果周围存在许多杂散光,并且能量利用率较低。

非球面镜法整形技术主要应用于静态光束整形中,DICKEY F M 等人^[13-15]将稳相法应用于非球面镜光束整形系统设计,何杰玲等人^[16]将稳相法应用于变形镜光束整形系统的设计。非球面镜光束整形系统及变形镜光束整形系统都属于静态光束整形,存在透镜加工难度大,对系统适应性差等缺点,但是稳相法获得的平顶光束具有能量利用率高、光束均匀性高等优点。

本文使用稳相法生成相位全息图,加载到空间光调制器,将入射高斯光束整形成方形平顶光束,可以同时保证能量利用率和光束均匀性,并通过数值仿真以及光学实验进行对比验证。对比实验结果表明,GS 算法的光束均匀性为 83.6%,MRAF 算法的光束均匀性为 87.2%,本文提出的稳相法获得方形平顶光束的光束均匀性为 97%。稳相法与空间光调制器结合时,整形结果受零级光影响,本文分析了零级光产生的原因并提出了解决方法,最后详细分析了影响稳相法光束整形质量的 3 个因素。

1 基本原理

1.1 光束整形原理

几何稳相法光束整形原理如图 1 所示。光束

整形的实质是,已知输入光束、输出光束的光场分布,求解中间相位变化的过程。复振幅分布的高斯光束入射空间光调制器,进行 $\varphi(x, y)$ 相位调制后,经过透镜进行傅里叶变换,在后焦面处聚焦,得到复振幅分布为 $U_{\text{out}}(x, y)$ 的平顶光束,从而达到光束整形的目的,因此光束整形的关键在于相位 $\varphi(x, y)$ 的计算。

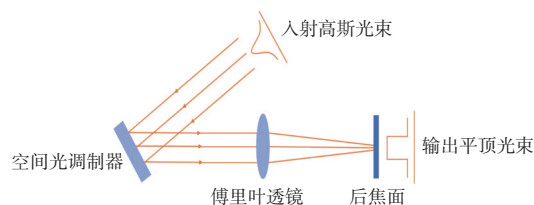


图 1 几何稳相法光束整形原理图

Fig. 1 Schematic diagram of beam shaping with geometric steady-phase method

根据菲涅尔衍射理论和傅里叶透镜的变换性质^[13],可以建立入射光场复振幅 $U_{\text{in}}(x, y)$ 、调制相位 $\varphi(x, y)$ 与输出光场复振幅 $U_{\text{out}}(x, y)$ 三者之间的数学关系,表达式如下:

$$U_{\text{out}}(u, v) = \frac{1}{i\lambda f} \exp\left(i\frac{k}{f}\right) \exp\left[i\frac{k}{2f}(u^2 + v^2)\right] \times \iint U_{\text{in}}(x, y) \exp[i\varphi(x, y)] \exp\left[-i\frac{k}{f}(ux + vy)\right] dx dy \quad (1)$$

式中: (x, y) 为空间光调制器处(透镜前焦面)的物面坐标; (u, v) 为透镜后焦面的像面坐标; λ 为入射高斯光束的波长; $k=2\pi/\lambda$ 则表示波数。由于入射光场复振幅 $U_{\text{in}}(x, y)$ 已知,通过公式(1)中设定不同的输出光场复振幅 $U_{\text{out}}(x, y)$,可以求出相对应的调制相位 $\varphi(x, y)$,即输出光束的形状参数为预先设定的 $U_{\text{out}}(x, y)$ 。本文设定的方形光束表达式为

$$U_{\text{out}}(x, y) = \exp\left(-\left(\frac{x^2}{w^2}\right)^m - \left(\frac{y^2}{w^2}\right)^m\right) \quad (2)$$

式中: w 为束腰半径; m 为超高斯阶数。阶数越高越接近方形,但光强降低。为了保证较好的光束形状且光束能量不会过低,本文采用的超高斯阶数为 $m=20$,实际中可以通过修改阶数 m 改变光束形状参数。

根据波动光学理论可知,光场的光强由光场的复振幅决定,且与复振幅的平方成正比。因此可以根据输出光场的复振幅分布得到输出光场的光强分布与相位 $\varphi(x, y)$ 之间的数学关系,表达式如下:

$$I_{\text{out}}(u, v) = |U_{\text{out}}(u, v)|^2 = \frac{1}{(\lambda f)^2} \left| \iint U_{\text{in}}(x, y) \exp[i\varphi(x, y)] \exp\left[-i\frac{k}{f}(ux + vy)\right] dx dy \right|^2 \quad (3)$$

分析上式可知, 输出目标光束的光强由输入光束的波长 λ 、透镜焦距 f 、输入光束复振幅 $U_{\text{in}}(x, y)$ 以及调制相位 $\varphi(x, y)$ 等 4 个参数共同决定。在输入光束、透镜已知的条件下, 求解出调制相位 $\varphi(x, y)$, 即可得到近似的目标输出光束的光强。求解调制相位 $\varphi(x, y)$ 的方法主要有数值近似法和迭代算法, 本文采用数值近似法中的稳相法求解调制相位 $\varphi(x, y)$ 。下面详细介绍用稳相法求解式(3)的过程。

1.2 稳相法求解调制相位

稳相法是计算积分形式符合公式(4)的数值近似法, 其中 $g(z)$ 和 $f(z)$ 的数学表达式与 k 的取值无关, 并且 k 本身取值很大。为了使被积函数中指数因子的振幅是常数, 需要选择虚部 $f(z)$ 是常数的积分路线, 从而使得相位部分迅速振荡, 积分路线中只有稳相点附近才对积分结果占据主要作用。

$$\int g(z) \exp[ikf(z)] dz \quad (4)$$

选择积分路线是, 自 z_0 处开始某一稳相点沿 $f(z)$ 虚部为常数, 且到无穷远处都不与其他稳相点重合的积分路线。此时复杂的积分运算即可转变成普通数学运算, 可将公式(4)积分渐近近似为

$$\sqrt{-\frac{\pi}{2kf''(z_0)}} g(z_0) \exp(-i\pi/4) \exp[ikf(z_0)] \quad (5)$$

由式(5)可知, 其积分部分符合式(4)的特征, 因此可用稳相法求解调制相位。由于方形的特殊数学特性, 输出光束光场分布既可以使用超高斯模型, 也可以使用几何模型表示, 为了方便计算, 采用几何模型表示。方形目标光强的边长为 $2L$, 将输出光场的 u, v 分离, 可得到下式:

$$I_{\text{square}}(u, v) = I_{\text{square}}(u) I_{\text{square}}(v) \quad (6)$$

$$I_{\text{square}}(s) = \begin{cases} 1 & |s| \leq L \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

由于入射光场 $U_{\text{in}}(x, y)$ 中 x 和 y 也是可分离的, 则可变换成下式:

$$U_{\text{in}}(x, y) = U_{\text{in}}(x) U_{\text{in}}(y) \quad (8)$$

$$\exp[i\varphi(x, y)] = \exp[i\varphi(x)] \exp[i\varphi(y)] \quad (9)$$

因此, 根据式(7)、式(8)及式(9)可对式(3)做以下数学变形:

$$I_{\text{square}}(s) = \mu \left| \int U_{\text{in}}(t) \exp\left\{i\frac{k}{f}\left[\frac{f}{k}\varphi(t) - st\right]\right\} dt \right|^2 \quad (10)$$

式中 $(s, t) = (u, x)$ or (v, y) 。为了保证输入与输出的能量守恒, 引入能量守恒因子 μ 。使用稳相法对公式(10)进行积分渐近近似运算, 可得:

$$I_{\text{square}}(s) \approx \frac{\pi\mu}{2} \frac{U_{\text{in}}^2(t)}{\varphi''(t)} \quad (11)$$

根据能量守恒定律, 可得能量守恒因子 μ 的数学表达式为

$$\mu = \frac{2L}{\sqrt{\pi}\lambda f w_0} \quad (12)$$

对式(11)进行求解, 可得方形平顶光束的调制相位^[13]为

$$\varphi(t) = \frac{\sqrt{\pi}L}{\lambda f} \left[\frac{\sqrt{\pi}t}{2w_0} \operatorname{erf}\left(\frac{t}{w_0}\right) + \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{t^2}{w_0^2}\right) - \frac{1}{2} \right] \quad (13)$$

$$\operatorname{erf}(q) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^q \exp(-p^2) dp \quad (14)$$

至此, 方形调制相位 $\varphi(x, y)$ 用稳相法求解完毕, 可表示为

$$\varphi(x, y) = \varphi(x) + \varphi(y) \quad (15)$$

1.3 光束整形质量评价指标

评价输出光束整形质量的指标有能量利用率 η 和均匀性 δ 。其中能量利用率 η 用下式表示:

$$\eta = \frac{\iint I_{\text{out}} ds}{\iint I_{\text{in}} ds} \times 100\% \quad (16)$$

式中: $\iint I_{\text{in}} ds$ 是空间光调制器充当反射镜情况下, 在后焦面处测得的输入光束的强度; $\iint I_{\text{out}} ds$ 是在后焦面处测得的输出光束的强度。均匀性 δ 可用下式表示:

$$\delta = (1 - I_{\text{RMSE}}) \times 100\% \quad (17)$$

$$I_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{(u,v) \in s} \left[\frac{I(u,v) - \bar{I}}{\bar{I}} \right]^2}{n-1}} \quad (18)$$

式中: I_{RMSE} 为输出光束顶部光强的均方根误差值; $I(u, v)$ 为取样区 s 中 (u, v) 的强度; $\bar{I}$ 为 s 中平均光强; n 为 s 中取样点数。由式(17)可知, I_{RMSE} 的值越小, 输出光束的均匀性越高。

2 仿真与实验

实际整形系统与理想整形系统存在差异, 因此仿真结果只具备参考意义, 不能代表实际整形结果, 还需要在实际整形系统中进行稳相法光束整形实验, 与仿真结果形成对比。

2.1 稳相法实验光路设计与搭建

本文使用的稳相法是基于傅里叶变换设计的,需要经过傅里叶变换才能输出平顶光束,设计的稳相法光束整形光路图如图2所示。

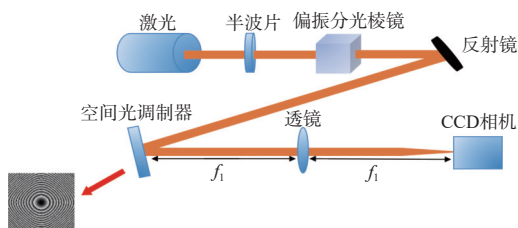


图2 稳相法光束整形实验光路图

Fig. 2 Optical path diagram of beam shaping experiment with geometric steady-phase method

根据图2设计的实验光路,搭建了如图3所示的稳相法光束整形实验平台。空间光调制器位于透镜的前焦面,相机位于透镜的后焦面,相机采集输出光束的图像。

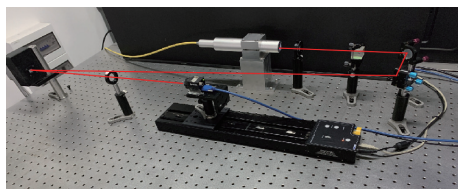


图3 稳相法光束整形实验平台

Fig. 3 Experimental platform of beam shaping with geometric steady-phase method

实验中使用的激光器为安扬皮秒激光器,型号为PicoYL-15,波长为1064nm,输出光斑直径为7.5mm,偏振方向为随机偏振。使用的透镜 $f_1=300$ mm,空间光调制器型号为滨松公司的X10468-02,分辨率为1024×280 pixels,像素尺寸为12.5 μm 。

2.2 稳相法实验结果

入射光束的束腰半径为3.6 mm,方形平顶光束的边长设置为3.5 mm,利用稳相法计算出输出光束为方形的相位全息图,分别进行仿真实验,并加载到空间光调制器中进行了实际整形实验,结果如表1所示。

对比表1中的仿真结果与实验结果可知,方形输出光束实验结果的光束表面轮廓上存在亮点,这个点是零级光。观察剖面强度曲线可知,零级光对输出光束的能量分布影响很大。实验结果的能量利用率为91.3%,与仿真结果98%的能量利用率相差7%,这部分能量损耗主要是由于空间光调制器的衍射效率引起的,属于不可避免的系统误差。由于零级光会影响输出光束均匀性,实验结

果中方形输出光束的均匀性为83.9%,与仿真结果98.3%光束均匀性相差较大,因此需要分析零级光产生的原因。

表1 稳相法光束整形实验结果与仿真结果对比

Table 1 Comparison of experimental results and simulation results of beam shaping by geometric steady-phase method

参数	仿真结果	实验结果
相位图		
光束表面轮廓		
剖面强度曲线		
光束均匀性/%	98.3	83.9
能量利用率/%	98.9	91.3

2.3 零级光产生原因及解决方法

2.3.1 零级光产生原因分析

本实验所用空间光调制器的光学表面由像素排列构成,像素排列结构如图4所示。图4中 b 表示像素间距为12.5 μm ,填充率 $u=(a/b)^2$,可计算出像素尺寸 $a=12.3$ μm ,因此像素之间存在0.2 μm 的间隙。此时空间光调制器类似一个正交光栅,实际观察到的输出光束包含2个部分:一部分是相位调制后的平顶光束,另一部分是空间光调制器液晶表面正交光栅结构衍射效应引起的零级光。由空间光调制器自身结构引起的衍射效应而产生的零级光无法避免,只能将零级衍射光与平顶光束分离。

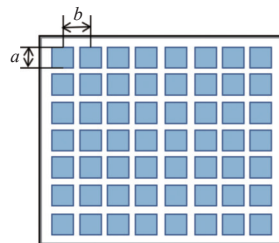


图4 空间光调制器液晶表面像素排列图

Fig. 4 Pixel arrangement on liquid crystal surface of spatial light modulator

2.3.2 零级光移除方法

对于实验结果中出现的零级光可以通过叠加闪耀光栅直接移除。闪耀光栅的相位表达式为

$$\phi_{\text{blazed}}(x,y)=\frac{2\pi}{T_{\text{blazed}}}\bmod\left(bx+cy,T_{\text{blazed}}\right)\quad(19)$$

稳相法获得的调制相位 $\varphi(x,y)$ 与闪耀光栅相位 $\phi_{\text{blazed}}(x,y)$ 叠加的表达式为

$$\phi_2=\bmod\left(\phi(x,y)+\phi_{\text{blazed}}(x,y),2\pi\right)\quad(20)$$

相位叠加结果如图 5 所示。

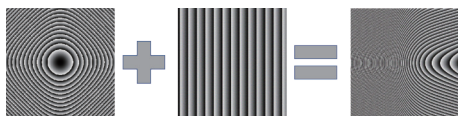


图 5 叠加闪耀光栅
Fig. 5 Superimposed shining grating

2.3.3 移除零级光的实验结果

移除零级光后, 稳相法光束整形的实验结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出, 移除零级光后输出光束的均匀性得到显著改善, 方形输出光束的均匀性为 97.2%, 与理想系统下的光束均匀性非常接近。由于零级光无法从根本上避免, 只能移除, 因此能量利用率降低是不可避免的, 移除零级光后, 方形输出光束的能量利用率为 72.3%。

表 2 移除零级光与不移除零级光实验结果对比

Table 2 Comparison of experimental results with and without removing zero-order light

参数	移除零级光	不移除零级光
相位图		
光束表面轮廓		
剖面强度曲线		
光束均匀/%	97.2	83.9
能量利用率/%	72.3	91.3

2.4 稳相法与传统整形方法实验结果对比

将稳相法与传统的 GS 算法、MRAF 算法生成方形平顶光束的实验结果进行对比。这 3 种方法均使用图 3 所示实验平台展开实验, 且实验过程中都存在零级光, 实验结果中均通过叠加闪耀光栅移除, 方形平顶光束的边长均为 3.5 mm, 实验结果如表 3 所示。

表 3 三种方法生成方形平顶光束实验结果

Table 3 Experimental results of square flat-top beam generated by three methods

参数	整形方法		
	GS	MRAF	稳相法
相位全息图			
光束表面轮廓			
剖面强度曲线			
光束均匀性/%	83.6	87.2	97.2
能量利用率/%	69.2	61.2	72.3

从表3可以看出,GS算法的光束均匀性为83.6%,MRAF算法的光束均匀性为87.2%,本文提出的稳相法的光束均匀性高达97.2%,因此本文提出的稳相法在均匀性上明显优于传统方法。从能量利用率上看,稳相法的能量利用率与GS算法的能量利用率均在70%左右,是目前光束整形算法中能量利用率最高的两种算法。

2.5 生成光束应用效果展示与说明

本文提出的方法可以获得边缘陡峭、均匀性高的整形光束,可用于对均匀性和边缘陡度要求很高的领域,如对镀膜材料(膜很薄,同时不能伤害基底)进行划线去膜,对半导体材料(如Low-K)刻槽等,应用示意图如图6所示。

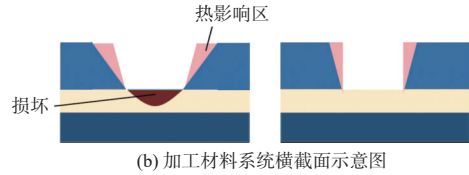
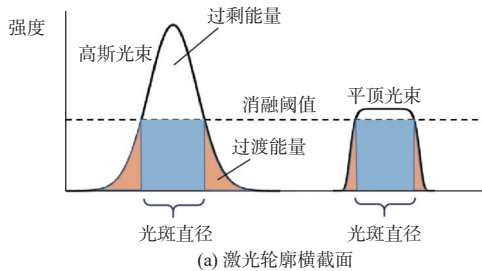


图6 高斯光束(左)和整形后(右)激光束应用效果示意图
Fig. 6 Application effect of Gaussian light (left column) and reshaped laser beam (right column)

由此可见,本文提出的方法在对平顶光束均匀性要求较高的激光加工领域具有广阔的应用前景。

3 影响因素分析

上述实验结果是经过若干次实验,寻找到最优参数呈现出来的最佳结果。在寻找最优参数过程中,总结了3个影响稳相法光束整形质量的因素,分别是全息图与入射光束重合度、离焦以及入射光束束腰半径。为了分析3个因素对接收面光强的影响,本文推得了公式(22)~(24),并利用仿真与实验对其进行验证。

下面对这3个影响因素从公式出发,结合实验现象展开分析。输出光强与入射复振幅及调制相位的关系为

$$I_{\text{square}}(u, v) = \frac{2L}{\sqrt{\pi}\lambda f w_0} \left| \int U_{\text{in}}(x, y) \exp \left\{ i \frac{k}{f} \left[\frac{f}{k} \varphi(x, y) - (ux - vy) \right] \right\} dx dy \right|^2 \quad (21)$$

从公式(21)可知,调制相位 $\varphi(x, y)$ 与输入光束复振幅 $U_{\text{in}}(x, y)$ 的坐标是一一对应的,当全息图中心与入射光束中心不重合时,会影响输出光束的光强分布。输出光束的均匀光强分布在透镜的后焦面,因此需要分析输出光束在离焦处的光强分布变化规律,从而准确寻找到最优焦平面。另外一个重要影响因素是入射光束的束腰半径,当计

算全息图时入射光束束腰半径与实际束腰半径不符时,其对输出光束的光强分布也会影响。因此有必要分析此时输出光束光强的变化规律,以便准确寻找到实际入射光束的束腰半径。

3.1 全息图与入射光束重合度对整形质量的影响

全息图与入射光束重合度对光强的影响可表示为

$$I_{\text{square}}(u, v) = \frac{2L}{\sqrt{\pi}\lambda f w_0} \left| FFT \left(\exp \left(-\frac{(x + \Delta x)^2 + (y + \Delta y)^2}{2\omega_0^2} \right) \exp(i\varphi(x, y)) \right) \right|^2 \quad (22)$$

式中: Δx 为入射光束沿 x 轴的偏移量; Δy 为沿 y 轴的偏移量。改变 Δx 与 Δy ,用于衡量入射光束与全息图的重合程度,根据公式(22)得到图7所示的仿真图。

在实验中全息图加载到空间光调制器时,默认在液晶表面中心,因此需要将入射光束调整至空间光调制中心,分析入射光束与全息图错位时输出光束的变化规律,从而快速判断输入光束在全

息图的位置,调整输入光束,使其与全息图中心重合。

入射光束与全息图错位时的光斑能量分布图如图8所示。从图8可以看出,入射光束与全息图中心重合时,输出光斑能量才是对称分布的,当入射光束偏离全息图中心时,输出光束的能量分布也会随入射光束偏离。例如,入射光束在全息图左侧时,输出光斑就会呈现左边能量高,右边能量低的能量分布,与仿真结果一致。

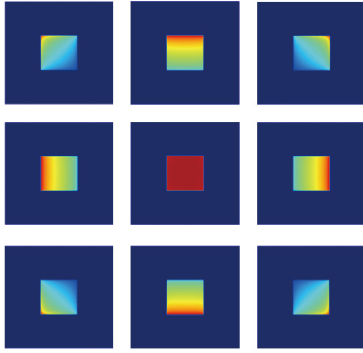


图 7 入射高斯光束与全息图错位时输出光斑的仿真图

Fig. 7 Simulation diagram of output spot when incident Gaussian beam misaligned with hologram

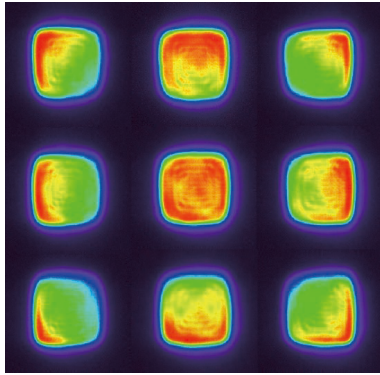


图 8 入射高斯光束与全息图错位时输出光斑的能量分布

Fig. 8 Energy distribution of output spot when incident Gaussian beam misaligned with hologram

3.2 离焦对稳相法光束整形质量的影响

焦平面处光强分布公式为

$$I_{\text{square}}(u, v) = \frac{2L}{\sqrt{\pi}\lambda f w_0} \left| \text{FFT} \left(\exp \left(-\frac{x^2 + y^2}{2\omega_0^2} \right) \exp(i\varphi(x, y)) \right) \right|^2 \quad (23)$$

为了分析离焦对光束整形质量的影响, 令 Δf 为接收面与焦平面的距离。若 $\Delta f > 0$, 入射光经透镜聚焦, 即作傅里叶变换后, 在远离焦平面处做菲涅尔衍射; 若 $\Delta f < 0$, 入射光直接做菲涅尔衍射。离焦时输出光束的变化仿真图如图 9 所示。

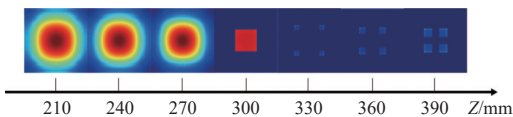


图 9 离焦时输出光束的变化仿真图

Fig. 9 Simulation diagram of output beam change during defocusing

根据图 1 稳相法光束整形原理, 高斯光束在空间光调制器进行相位调制后, 经过透镜进行傅里

叶变换, 会在透镜的后焦面输出平顶光束。在实验过程中, 通常无法准确找到焦平面所在位置, 因此本文给出了离焦时输出光束的变化规律。由于在不同离焦处, 相机采集到的图像会出现暗淡或过曝的情况, 无法观测到输出光束的光强分布。为了更好地反映各个位置输出光束的光强分布, 采集各幅图像时相机设置了不同的曝光时间, 结果如图 10 所示。

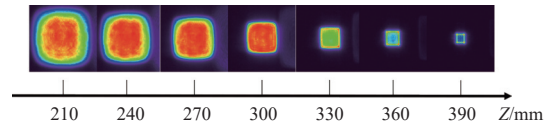


图 10 离焦时输出光束的变化规律

Fig. 10 Variation of output beam during defocusing

在图 10 中, Z 轴坐标表示该平面与透镜的距离, 实验采用 $f = 300 \text{ mm}$ 的透镜, 因此 $Z = 300 \text{ mm}$ 处即为焦平面。从图 10 可以看出, 离焦时输出光束的变化规律为: 在焦平面右边, 输出光束顶部能量逐渐凸起, 并且光斑尺寸变大; 在焦平面左边, 输出光束顶部能量逐渐下凹, 并且光斑尺寸逐渐变小, 符合仿真结果。在实验过程中, 可根据离焦时输出光束的变化规律, 准确快速地找到焦平面所在位置。

3.3 入射束腰半径不准确对整形质量的影响

入射束腰半径对光强的影响可表示为

$$I_{\text{square}}(u, v) = \frac{2L}{\sqrt{\pi}\lambda f w_0} \left| \text{FFT} \left(\exp \left(-\frac{x^2 + y^2}{2\omega_1^2} \right) \exp(i\varphi(x, y)) \right) \right|^2 \quad (24)$$

式中, ω_1 为入射束腰半径, 与生成全息图所用的高斯光束腰半径不一致, 以此衡量束腰半径不准确对整形质量的影响。设置入射束腰半径从 3.0 mm 变化到 4.2 mm , 计算全息图的束腰半径在 3.6 mm 时, 输出光束的表面轮廓仿真结果如表 4 所示。

稳相法光束整形的全息图是根据入射光束的束腰半径计算的, 当计算全息图的束腰半径与实际入射束腰半径相匹配时才能达到理想的整形效果。实验过程中, 相关参数的设置与仿真保持一致, 其输出光束的表面轮廓与剖面强度曲线如表 5 所示。

从表 5 可以看出, 计算全息图的束腰半径从 3.0 mm 变化到 4.2 mm 时, 输出光束顶部能量呈现出下凹逐渐分布均匀, 再从分布均匀到凸起的变化规律, 剖面强度曲线的变化更为直观。在实验过程中, 可将输出光束的能量分布与表 5 对比, 从

而判断计算全息图束腰半径与实际束腰半径的大小,然后有方向地调整计算全息图的束腰半径,使之准确、快速与实际束腰半径相匹配,从而得到最佳的整形效果。

表 4 入射束腰半径不匹配对整形质量的影响仿真结果

Table 4 Simulation results of impact of mismatch for incident beam waist radius on shaping quality

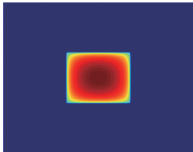
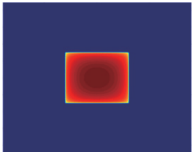
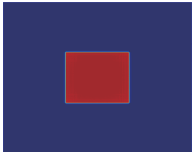
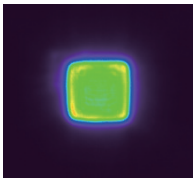
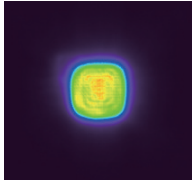
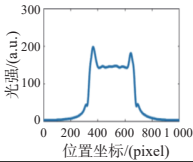
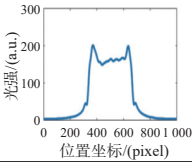
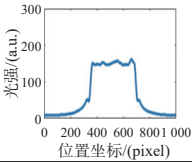
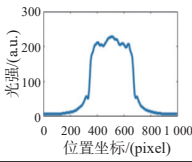
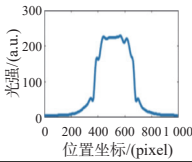
参数	输入束腰半径/mm				
	3.0	3.3	3.6	3.9	4.2
光束表面轮廓					

表 5 入射束腰半径不匹配对整形质量的影响实验结果

Table 5 Experimental results of impact of mismatch for incident beam waist radius on shaping quality

参数	输入束腰半径/mm				
	3.0	3.3	3.6	3.9	4.2
光束表面轮廓					
剖面强度曲线					

4 结 论

本文针对目前光束整形方法存在不能同时保证能量利用率与光束均匀性的问题,提出了基于稳相法光束整形技术。首先根据标量衍射理论及透镜的傅里叶变换性质得到输入输出光场复振幅与调制相位的数学关系;再利用稳相法求解该数学关系,得到生成方形平顶光束的相位表达式;然后根据方形的相位表达式编码出对应的相位全息图;最后模拟理想系统下稳相法光束整形的效果。仿真结果显示,稳相法光束整形的能量利用率为 98.9%,光束均匀性为 98.3%。在实际整形系统下展开实验,并将实验结果与仿真结果进行了对比。实验结果显示,稳相法光束整形的能量利用率为 91.3%,与仿真结果较为接近;由于输出光束受零级光束干扰,光束均匀性仅为 83.9%。随后分析出零级光是由液晶空间光调制器的光栅结构造成的,这种影响无法从根本上解决,选择叠加闪耀光栅移除零级光,最终获得了能量利用率为 72.3%,

光束均匀性为 97.2% 的方形平顶光束。本文分析了影响稳相法光束整形质量的 3 个因素,为寻找最优参数提供了依据。

参考文献:

[1] FENG Z X, FROESE B D, LIANG R G, et al. Simplified freeform optics design for complicated laser beam shaping.[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(33): 9308-9314.

[2] HWANG S J, KIM T S, LEE J M, et al. Design of square-shaped beam homogenizer for petawatt-class Ti: sapphire amplifier.[J]. *Optics Express*, 2017, 25(9): 9511-9520.

[3] ZHAO T Z, FAN Z W, XIAO H, et al. Realizing Gaussian to flat-top beam shaping in traveling-wave amplification[J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 33226-33235.

[4] LIU D, WANG Y T, ZHAI Z S, et al. Dynamic laser beam shaping for material processing using hybrid holograms[J]. *Optics and Laser Technology*, 2018, 102(102): 68-73.

- [5] YANG L, EL-TAMER A, HINZE U, et al. Parallel direct laser writing of micro-optical and photonic structures using spatial light modulator[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 70: 26-32.
- [6] DEV K, ASUNDI A. Polarization modulation study of transmissive liquid crystal spatial light modulator using digital holographic polariscope[J]. *Optics and Laser Technology*, 2013, 47: 323-328.
- [7] ATSUSHI S, ATSUSHI O, MASANORI T, et al. Spatial cross modulation method using a random diffuser and phase-only spatial light modulator for constructing arbitrary complex fields.[J]. *Optics Express*, 2014, 22(4): 3968-3982.
- [8] KUANG Z, LI J N, EDWARDSON S, et al. Ultrafast laser beam shaping for material processing at imaging plane by geometric masks using a spatial light[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 70: 1-5.
- [9] 李明伟, 于晓晨, 邵晓阳, 等. 基于平行玻璃板的半导体激光器阵列光束整形[J]. *应用光学*, 2013, 34(5): 864-869.
- LI Mingwei, YU Xiaochen, SHAO Xiaoyang, et al. Beam shaping of semiconductor laser arrays based on parallel glass plates[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(5): 864-869.
- [10] CHANG C L, XIA J, YANG L, et al. Speckle-suppressed phase-only holographic three-dimensional display based on double-constraint Gerchberg-Saxton algorithm.[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(23): 6994-7001.
- [11] PANG H, LIU W J, CAO A X, et al. Speckle-reduced holographic beam shaping with modified Gerchberg-Saxton algorithm[J]. *Optics Communications*, 2018, 433: 44-51.
- [12] MATTHEW P, BRIAN D. A high-accuracy algorithm for designing arbitrary holographic atom traps.[J]. *Optics Express*, 2008, 16(3): 2176-2190.
- [13] 吕乃光. 傅里叶光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- LYU Naiguang. Fourier optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [14] ROMERO L A, DICKEY F M. Lossless laser beam shaping[J]. *JOSA A*, 1996, 13(4): 751-760.
- [15] DICKEY F M, HOLSWADE S C. Gaussian laser beam profile shaping[J]. *Optical Engineering*, 1996, 35(11): 3285-3295.
- [16] 何杰铃, 魏凌, 杨金生, 等. 基于变形镜激光束整形系统中的相位拟合优化方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(2): 020101-1-8.
- HE Jielling, WEI Lin, YANG Jinsheng, et al. Optimization method of phase fitting in laser beam shaping system based on deformable mirror[J]. *Advances in Lasers and Optoelectronics*, 2016, 53(2): 020101-1-8.