

高功率激光器光束质量测量的衰减缩束仿真研究

单小琴 李天昊 朱日宏

Simulation of attenuation and compression in beam quality measurement of high power laser

SHAN Xiaoqin, LI Tianhao, ZHU Rihong

引用本文:

单小琴, 李天昊, 朱日宏. 高功率激光器光束质量测量的衰减缩束仿真研究[J]. 应用光学, 2024, 45(1): 199–205. DOI: 10.5768/JAO202445.0107001

SHAN Xiaoqin, LI Tianhao, ZHU Rihong. Simulation of attenuation and compression in beam quality measurement of high power laser[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(1): 199–205. DOI: 10.5768/JAO202445.0107001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0107001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

正交狭缝扫描式激光光束质量测量方法研究

Research on measurement method of laser beam quality with orthogonal slit scanning

应用光学. 2020, 41(4): 704–710 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0407003>

高能高功率激光参数测量技术研究

Study on parameters measurement technology of high energy and high power laser

应用光学. 2020, 41(4): 645–650 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0409001>

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>

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>

高功率固体激光器增益非均匀分布引起的效能亏损效应研究

Efficiency loss induced by non-uniform gain distribution in high power solid state lasers

应用光学. 2019, 40(4): 542–550 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0401003>

激光塑造大气透镜技术分析

Technical analysis of laser developed atmospheric lens

应用光学. 2021, 42(3): 527–533 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0307001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 01-0199-07

高功率激光器光束质量测量的衰减缩束仿真研究

单小琴¹, 李天昊², 朱日宏³

(1. 南京理工大学紫金学院 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210023; 2. 天津津航技术物理研究所, 天津 300308;
3. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘 要: 光束质量因子 M^2 是表征高功率激光器横模特性的主要参数, 针对目前光束质量分析仪只能用于小口径、低功率激光器光束质量评估的问题, 开展了高功率激光器光束质量测量的衰减缩束技术原理与仿真研究。建立了衰减缩束组件的仿真模型, 利用有限元的方法对光学元件在高功率激光下的热致像差进行研究, 得出热致像差的峰谷 (PV) 值小于 82 nm 时, 对光束质量因子的影响小于 5%。当光束通过衰减组件时, 如果发生退偏, 光束质量因子将偏小。基于泽尼克多项式和光束质量因子计算模型, 研究分析了缩束组件波前畸变对测量的影响, 并通过 Zemax 仿真分析看出, 在装调时入射光与缩束组件中心光轴夹角视场小于 7° 时, 对光束质量因子测量的影响小于 5%。

关键词: 高功率激光器; 光束质量因子; 衰减组件; 缩束组件

中图分类号: TN242

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0107001

Simulation of attenuation and compression in beam quality measurement of high power laser

SHAN Xiaoqin¹, LI Tianhao², ZHU Rihong³

(1. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology Zijin College, Nanjing 210023, China; 2. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China; 3. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Beam quality factor M^2 is the main parameter to characterize the transverse-mode property of high power laser. In view of the problem that beam quality analyzer can only be used to evaluate the beam quality of small caliber and low power laser, the principle and simulation of attenuation and compression technology of beam quality measurement of high power laser were studied. The simulation model of attenuation and compression module was established, and the thermal aberration of optical component under high power laser was studied by finite element method. The results show that the effect of the thermal aberration on the beam quality factor is less than 5% when the peak and valley (PV) value is less than 82 nm. If depolarization occurs when the beam passes through the attenuation component, the beam quality factor will be smaller. The influence of wavefront distortion caused by compression module on beam quality factor measurement was analyzed based on Zernick polynomial and beam quality factor calculation model. Through the Zemax simulation, the influence on beam quality factor measurement is less than 5% when the field of view between the incident light and the center optical axis of the attenuation and compression module is less than 7°.

Key words: high power laser; beam quality factor; attenuation module; compression module

引言

高功率激光器是激光核聚变、激光武器、激光

制造等国家重点发展领域的核心部件^[1-3]。光束质量因子 M^2 是表征高功率激光器横模特性的主要参

收稿日期: 2023-08-07; 修回日期: 2023-08-30

基金项目: 国家自然科学基金 (61875087); 南京理工大学紫金学院校级科研项目 (2022ZXKX0401008)

作者简介: 单小琴 (1986—), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事光纤激光、精密光学测试技术研究。E-mail: xqshan_0128@163.com

数,该参数同时考虑了激光束宽和远场发散角,涵盖了激光近场与远场特性^[4-5]。分析光束质量有利于探索高功率激光的模场变化机理,从而更好地设计和制造激光装置;掌握上述参数还有助于评估激光近场和远场特性的动态变化,对激光模场进行控制和利用,从而改善激光的近场或远场特性。因此,光束质量测量在高功率激光器的研制和应用中具有重要作用。

目前,光束质量测量大都依靠光束质量分析仪。随着高功率激光技术的发展,大口径高功率激光的光束质量测量需求日益增加^[6]。例如,当前光纤激光器单纤输出功率达到百千瓦量级,为了抑制光学系统的热透镜效应,配合高功率激光器的光学系统口径也随着激光功率增加^[7]。光纤合束的 30 kW 级光纤激光器输出准直光束的口径达到 50 mm 量级,当前商用光束质量测量系统无法满足高功率大口径激光的光束质量测量。Spricon 公司的 BSQ SP920 和 Cinogy 公司的 Cinsquare 原理类似,只用于低功率激光器的光束质量评估。受到系统光学元器件尺寸以及探测器靶面尺寸的限制,上述设备可测激光的最大光束口径为 10 mm。Primes 公司的 FM+ 可以测量高功率激光光束质量,但仅适用于聚焦光斑,设备可测的最大光束口径为 5 mm。LQM+ 可用于高功率激光光束质量测量,设备可测的最大光束口径为 15 mm。因此,有必要研制高功率光束质量测量中的衰减缩束组件,以满足激光领域不断增加的测量口径及功率需求。

本文开展了高功率激光器光束质量测量的衰减缩束技术研究,建立了衰减缩束组件模型,并进行仿真分析,研究了高功率激光照射下,衰减缩束组件产生的波像差对光束质量因子 M^2 的影响。

1 光束质量测量原理

激光光束质量因子 M^2 作为衡量激光光束质量优劣的核心指标,可以定量反映出激光光束质量的好坏,是目前评价高功率光纤激光器光束质量最为理想的参数^[8]。光束质量因子 M^2 的定义表达式为

$$M^2 = \frac{\pi}{\lambda} w_0 \theta \quad (1)$$

式中: λ 表示激光波长; w_0 表示激光束腰宽度; θ 表

示激光远场半发散角。

光束质量因子 M^2 的测量原理主要是,基于光强二阶矩定义计算出激光的束宽,再利用双曲线拟合法计算出光束质量因子^[9-11]。为了避免激光测量实验中噪声、衍射效应等无用信息的干扰,还需要对光强计算区域进行自动校正。双曲线拟合法是目前测量光束质量因子 M^2 的公认方法,也是大多数商用光束质量分析仪所采取的计算方法^[12],其测量原理示意图如图 1 所示。

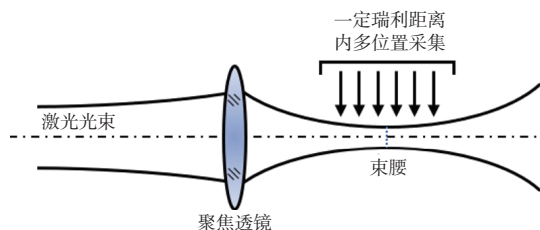


图 1 光束质量测量原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of beam quality measurement

激光在自由空间传播时,其轨迹呈双曲线分布^[4]。所以在求得激光在不同位置处的光强分布,并计算出其光斑束宽之后,便可将求得的束宽与其所在位置进行双曲线拟合,根据拟合出的曲线方程,获得激光束腰宽度和远场发散角,从而计算出激光的光束质量因子 M^2 。

2 衰减组件设计仿真

2.1 衰减组件热致相差对光束质量因子 M^2 的影响仿真

为了测量高功率激光光束质量,需将激光衰减至微瓦甚至以下量级。光学元件在强激光照射下会发生热形变,进而引发激光热致像差^[13]。利用 COMSOL Multiphysics 软件,基于有限元方法对激光热致形变进行了仿真,将热致像差添加到激光的复振幅分布上,并带入光束质量因子 M^2 计算模型,从而计算出激光热致像差对激光光束质量因子 M^2 的影响。

仿真参数设定如下:激光波长为 1080 nm,经扩束准直后光斑半径为 24.3 mm,激光模式为准单模模式分布,环境温度为 20 °C,光学元件采用 CORNING7980 熔石英玻璃(CORNING7980,泽远光学)。光学元件采用周边压环法固定,该光学元件参数如表 1 所示。

表 1 熔石英玻璃(CORNING7980) 参数

Table 1 Parameters of fused quartz glass (CORNING7980)

参数	C/m^{-1}	$\alpha/(1/\text{K})$	$C_p/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$k/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	E/GPa	μ
取值	0.09	0.57×10^{-6}	770	2201	1.38	72.7	0.16

注: c -吸收系数; α -热膨胀系数; C_p -恒压热容; ρ -密度; k -热导系数; E -杨氏模量; μ -泊松比。

使用 COMSOL Multiphysics 软件有限元方法对光学元件进行热形变分析时, 首先要对目标光学元件进行网格化划分, 其网格化后的模型如图 2(a) 所示。图 2(b) 为 CORNING7980 熔石英玻璃在 3 kW 激光功率下照射 300 s 时的瞬时温度分布仿真结果。温度从 CORNING7980 熔石英玻璃四周到中心逐渐升高, 在圆心处达到最高的 26.2 °C, 最高温升为 6.2 °C。图 2(c) 为 CORNING7980 熔石英玻璃在 3 kW 激光功率下的热形变分布仿真结果。

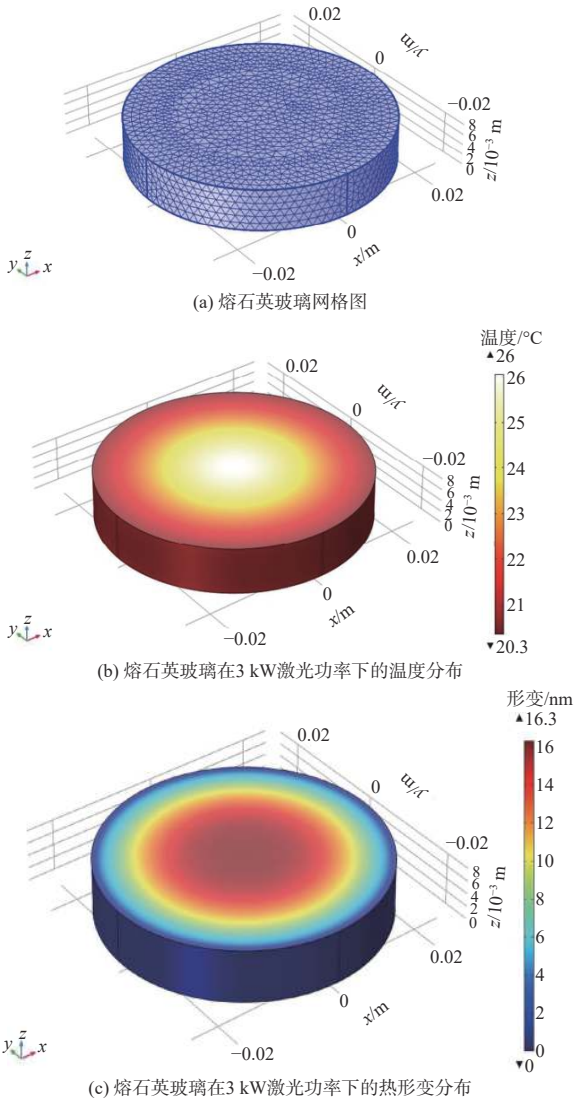


图 2 COMSOL 中 CORNING7980 熔石英玻璃仿真结果
Fig. 2 Simulation results of fused quartz glass (CORNING7980) in COMSOL

光学元件的形变在激光中心位置处最大, 然后慢慢减小至光学元件边缘无热形变位置, 在 300 s 时, 光学元件中心最大热形变为 16.3 nm。通过 COMSOL Multiphysics 软件有限元方法仿真出热形变后, 即可计算出激光热致像差。

如图 3 所示, 根据 ISO 11146 国际标准, 建立多位置光斑法的 M^2 因子测量模型^[14]。首先生成待测激光复振幅 $\tilde{E}$, 通过 COMSOL 软件仿真出衰减组件由于热透镜效应所产生的波前畸变, 将波前畸变添加到复振幅 $\tilde{E}$ 上得到 $\tilde{E}_1$ 。然后根据角谱衍射公式, 获取激光在自由空间中不同位置的光强分布 $\tilde{I}_1$ 。再基于光强二阶矩定义计算不同位置激光光斑束宽, 对不同位置的激光束宽进行双曲线拟合, 最终计算出衰减组件热透镜效应下的光束质量因子 M_1^2 。

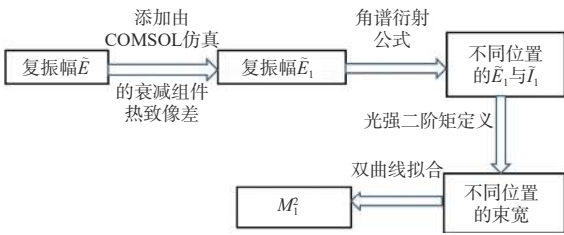


图 3 仿真热致像差对激光光束质量变化的流程图
Fig. 3 Flow chart of simulation of thermal aberration on laser beam quality change

图 4 计算了热致像差的峰谷(PV)值与激光光束质量因子 M^2 的关系。仿真中所采用的激光光强

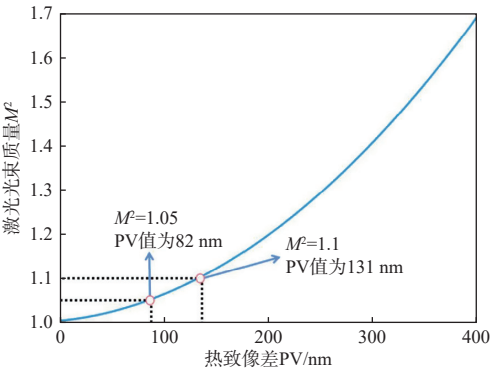


图 4 激光热致像差的大小对激光光束质量的影响
Fig. 4 Effect of laser thermal aberration on laser beam quality

为类高斯分布。由图 4 可知,当热致像差的峰谷(PV)值为 131 nm 时,激光的光束质量因子 M^2 由 1.00 变为 1.10;当热致像差的峰谷(PV)值为 82 nm 时,激光的光束质量因子由 1.00 变为 1.05。因此,根据上述仿真可得,在高功率光纤激光光束质量因子 M^2 测量中,若光学元件激光热致像差的峰谷(PV)值小于 82 nm 时,其对激光光束质量因子 M^2 的影响小于 5%。

2.2 衰减组件偏振特性对光束质量因子 M^2 的影响仿真

当高功率激光按照一定角度通过衰减组件时,由于反射光和折射光中的 s 波和 p 波的反射系数和透射系数不同,光的偏振态将发生改变,以至于在测量激光光束质量因子 M^2 时会产生误差。通过仿真研究衰减组件的偏振特性对激光光束质量因子 M^2 的影响,仿真程序流程如图 5 所示,包括本征模计算、参考光生成、虚拟传输及拟合计算 4 个步骤。

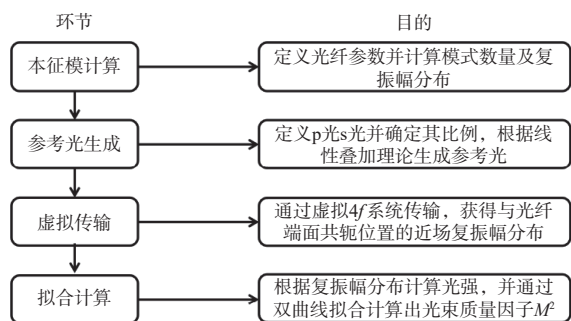


图 5 偏振特性仿真流程图

Fig. 5 Flow chart of polarization characteristics simulation

首先,仿真需要根据给定的光纤参数和波长确定光纤中能传输的(linear polarization mode, LP)线偏振模的种类和数目,并计算出所支持传输的本征模的复振幅分布。参数设定为:光纤纤芯直径 d_1 为 20 μm ,包层直径 d_2 为 400 μm ,纤芯数值孔径 NA 为 0.06,包层数值孔径 a 为 0.46,归一化频率 v 为 3.49,激光波长 λ 为 1080 nm。LP 模共有 6 种类型,分别为 LP₀₁、LP₀₂、LP_{11e}、LP_{11o}、LP_{21e}、LP_{21o}。通过改变 x 方向与 y 方向上偏振光的系数可以达到控制 p 光与 s 光的目的。由本征模的线性叠加理论,可以得到归一化的参考光纤端面复振幅。为了仿真计算激光光束质量因子 M^2 ,还需要获得相机靶面处的复振幅分布,于是需要将光纤端面的复振幅通过 4f 系统虚拟传输,获得与光纤端面共轭位置的复振幅分布。要求在设置一个合适的像

元尺寸下,图像的像元数量要足够多,即图像分辨率要足够高。表 2 给出了本文仿真中,偏振移相干涉前图像矩阵的参数设置情况。

表 2 仿真中虚拟传输图像矩阵参数列表

Table 2 Parameters of virtual transmission image matrix in simulation

参数	变量名	参数值
图像尺寸/mm	L	4
像元尺寸/mm	δ	0.002
分辨率/pixel	$M \times M$	2 000 × 2 000

在获得待测远场复振幅分布后,构建虚拟 4f 系统,获得 4f 系统中与光纤端面共轭位置的近场复振幅分布。需要指出的是,在参数设置方面,为了防止近场和远场光斑尺寸差异过大,使得像元数量过多,造成仿真程序内存占用量大、运行缓慢等问题的出现,这里第 1 透镜焦距 f_1 的设置不宜过大,通过更改第 2 透镜焦距 f_2 的参数值,可获得合适的系统放大率。表 3 给出了仿真中虚拟 4f 系统的参数设置情况。

表 3 仿真中虚拟 4f 系统参数列表

Table 3 Parameters of virtual 4f system in simulation

参数	变量名	参数值
第1透镜焦距/mm	f_1	10
第2透镜焦距/mm	f_2	300
4f系统放大率	Γ	30

在仿真生成参考光的远场复振幅分布后,便可以根据复振幅分布计算光强,并通过双曲线拟合方法计算出不同偏振态下的激光光束质量因子 M^2 。

图 6 为仿真不同偏振态下的光束质量因子,图 6(a) 为 s 光退偏情况下的仿真情况,可以看出,退偏光在 x 方向与 y 方向的光束质量因子 M^2 分别为 1.766 与 1.760;图 6(b) 为 p 光退偏下的仿真情况,可以看出,退偏光在 x 方向与 y 方向的光束质量因子 M^2 分别为 1.805 与 1.852;图 6(c) 为正常偏振光的仿真,可以看出,偏振光在 x 方向与 y 方向的光束质量因子 M^2 分别为 1.818 与 1.932。通过上述数据分析,可以看出单一偏振方向的光束质量因子与原始输出光的光束质量因子不同,当光束通过衰减组件时,如果发生退偏现象,将会影响其

光束质量因子 M^2 , 使最终得到的光束质量因子 M^2 结果偏小。

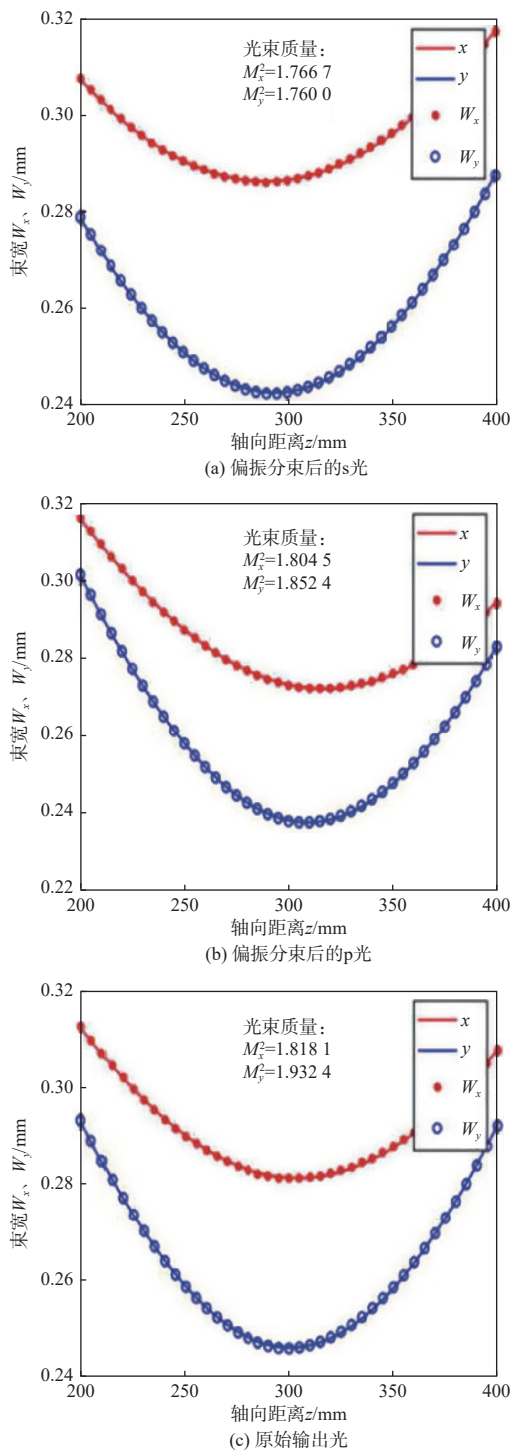


图6 仿真不同偏振态下的光束质量因子
Fig. 6 Simulation of beam quality factors under different polarization states

3 缩束组件设计原理与仿真

望远镜系统是实现激光缩束准直的常用手

段。缩束组件的光学系统由透镜组构成, 采用伽利略型系统, 中心波长 1064 nm 的单模光纤激光器作为光源, 光纤激光由参考面平行射出, 经镜片 1 汇聚后再经镜片 2 准直出射, 出射光斑直径为入射光斑直径的三分之一, 其中镜片 1、2 所用材料均为熔石英, 如图 7 所示。

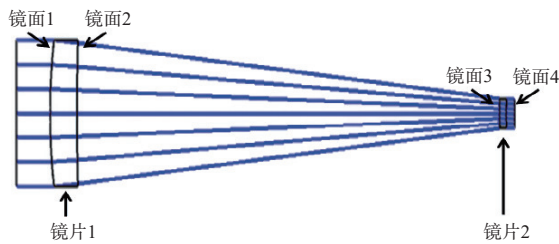


图7 缩束组件设计光路
Fig. 7 Optical path design of compression module

在光束质量测量系统中, 望远系统的制造及装调误差会产生波前畸变, 影响光束质量因子 M^2 的测量。为了准确计算出光束质量因子 M^2 , 建立了缩束组件仿真模型, 如图 8 所示。首先生成待测激光复振幅 $\tilde{E}$, 通过 Zemax 软件仿真出缩束组件由于制造、装调所产生的波前畸变, 将波前畸变添加到复振幅 $\tilde{E}$ 上得到 $\tilde{E}_2$ 。然后根据角谱衍射公式获取激光在自由空间中不同位置的光强分布 $\tilde{I}_2$ 。再基于光强二阶矩定义, 计算不同位置的激光光斑束宽, 并对不同位置的激光束宽进行双曲线拟合, 最终计算出光束质量因子 M^2_2 。使用 Zemax 软件对因缩束组件视场变化而产生的波像差进行仿真, 分析由于视场改变缩束组件产生的波像差对激光光束质量因子的影响。

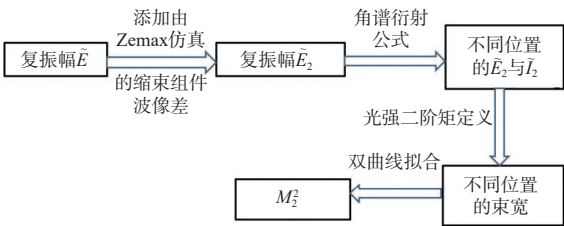


图8 仿真缩束组件波像差对激光光束质量因子流程图
Fig. 8 Simulation flow chart of compression module wave aberration on laser beam quality factor

图 9 为 0°视场下缩束组件的波前图及其各项系数。通过 Zemax 软件进行波前分析, 当激光波长 λ 为 1080 mm 时, PV 值为 0.0039 λ , 低于 $\lambda/10$ 的设计要求, 其主光线 RMS 为 0.0011 λ ^[15]。

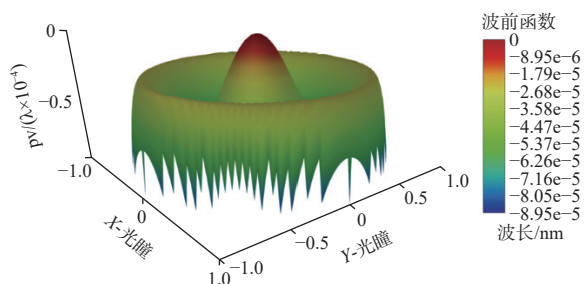
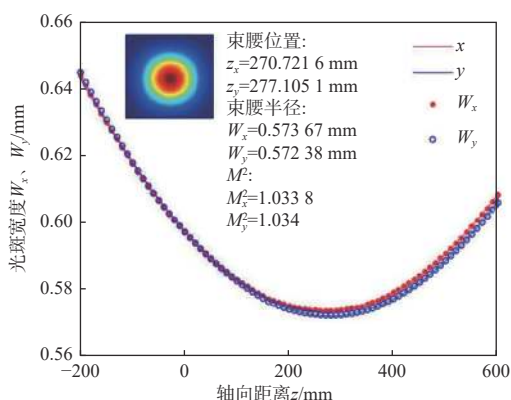


图9 0°视场下缩束组件的波前图

Fig. 9 Wavefront diagram of compression module under 0° field of view

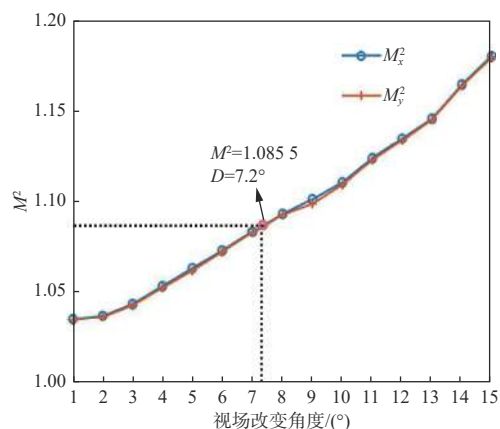
图10为0°视场下添加缩束组件的激光光束质量因子 M^2 的拟合曲线。通过对激光光束质量因子 M^2 模型进行计算,便可以仿真出此时在0°视场下缩束组件的激光光束质量因子 M^2 。光束 x 方向束腰位置为270 mm,光束 y 方向束腰位置为277 mm, x 方向束腰半径为0.573 mm, y 方向束腰半径为0.572 mm, x 方向的光束质量因子 M_x^2 为1.0338, y 方向的光束质量因子 M_y^2 为1.0340。

图10 0°视场下缩束组件的激光光束质量因子 M^2 拟合曲线Fig. 10 Fitting curves of laser beam quality factor M^2 for compression module under 0° field of view

继续增加 x 方向视场角度,在Zemax中得到不同视场下的泽尼克系数。随着 x 方向视场角度的增大, x 方向的倾斜项、彗差项、离焦项、像散项及球差项系数均增大, y 方向的倾斜项及彗差项系数保持不变,其中 x 方向倾斜项系数的增加幅度最大。将上述数据添加到激光光束质量因子 M^2 的计算模型中,计算得到其对应视场的激光光束质量因子 M^2 。

图11为仿真不同视场角下的光束质量因子 M^2 。可以看出,随着 x 方向视场角度的增大,水平方向光束质量因子 M_x^2 与竖直方向光束质量因子

M_y^2 逐渐恶化。当视场从0°增大到7.2°时,光束质量因子 M^2 从1.0330增大到1.0855。仿真得到的7.2°视场的光束质量因子 M^2 相比于0°视场的光束质量因子 M^2 增大5%。通过此仿真可知,为了后续实验的准确性,在安装缩束组件时,要保证入射光与缩束组件中心光轴夹角视场小于7°(影响小于5%),否则对光束质量因子 M^2 的测量影响较大。

图11 不同视场角度下的光束质量因子 M^2 Fig. 11 Beam quality factor M^2 at different field angles

4 结论

针对目前光束质量分析仪只能用于小口径、低功率激光器光束质量评估的问题,本文开展了高功率激光器光束质量测量的衰减缩束技术仿真研究。建立了衰减缩束组件的仿真模型,基于泽尼克多项式和光束质量因子计算模型,研究分析了缩束组件波前畸变对激光光束质量测量的影响,并通过Zemax仿真分析出在实验装调时,入射光与缩束组件中心光轴夹角视场小于7°时,对光束质量因子测量的影响小于5%。建立了激光热致像差的理论计算模型,仿真得出热致像差的PV值小于82 nm时,其对光束质量的影响小于5%。建立了激光偏振特性对光束质量影响的仿真模型,得出当光束通过衰减组件时,若发生退偏,将导致光束质量测量结果偏小。

参考文献:

- [1] SHI W, FANG Q, ZHU X S, et al. Fiber lasers and their applications[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(28): 6554-6568.
- [2] ZERVAS M N, CODEMARD C A. High power fiber lasers: a review[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in*

- Quantum Electronics, 2014, 20(5): 219-241.
- [3] RICHARDSON D J, NILSSON J, CLARKSON W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(11): B63-B92.
- [4] AHEARN T S, STAFF R T, REDPATH T W, et al. The use of the Levenberg-Marquardt curve-fitting algorithm in pharmacokinetic modelling of DCE-MRI data[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2005, 50(9): 85-92.
- [5] 冯国英, 郑世杰, 谭建昌, 等. 光纤激光模场及表征技术进展[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33(3): 210097.
- FENG Guoying, ZHENG Shijie, TAN Jianchang, et al. Progress on mode field distribution and characterization technology of the optical fiber laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33(3): 210097.
- [6] KOESTER C J, SNITZER E. Amplification in a fiber laser[J]. *Applied Optics*, 1964, 3(10): 1182-1186.
- [7] 陈欣, 唐顺兴, 郭亚晶, 等. 高功率激光参数测量中高倍率衰减方案[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(增刊1): 48-54.
- CHEN Xin, TANG Shunxing, GUO Yajing, et al. Attenuation of high rate in parameter measurement of high power laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S1): 48-54.
- [8] 冯国英, 周涛桓, 高春清. 激光模场及光束质量表征[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 120-121.
- FENG Guoying, ZHOU Taohuan, GAO Chunqing. Laser mode field and beam quality characterization[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 120-121.
- [9] Lasers and laser-related equipment-Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios-part 2: general astigmatic beams: ISO 11146-2: 2005[S]. Italy: International Organization for Standardization, 2005.
- [10] HAN Z G, MENG L Q, HUANG Z Q, et al. Determination of the laser beam quality factor (M^2) by stitching quadriwave lateral shearing interferograms with different exposures[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(27): 7596-7603.
- [11] SIEGMAN A E. Defining, measuring, and optimizing laser beam quality[J]. SPIE, 1993, 1868: 2-12.
- [12] SIEGMAN A E. How to (maybe) measure laser beam quality[J]. OSA Trends in Optics and Photonics Series, 1998, 17(2): 184-199.
- [13] 王天明, 李斌成, 赵斌兴, 等. 高功率激光作用下光学元件非线性热效应研究[J]. *激光技术*, 2022, 46(6): 729-735.
- WANG Tianming, LI Bincheng, ZHAO Binxing, et al. Nonlinear thermal effects of optical components irradiated by high-power laser beam[J]. *Laser Technology*, 2022, 46(6): 729-735.
- [14] 周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. 激光原理[M]. 6版. 北京: 国防工业出版社, 2010: 67-70.
- ZHOU Bingkun, GAO Yizhi, CHEN Tirong, et al. Laser Principle[M]. 6th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 67-70.
- [15] 林晓阳. ZEMAX光学设计超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014: 42-45.
- LIN Xiaoyang. ZEMAX super learning manual for optical design[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2014: 42-45.