



基于直角锥面变形镜的薄管激光光束质量提升新方法

何婷 田博宇 邱蝶 张彬

Novel method of improving beam quality of thin-wall tube laser based on right-angle cone deformable mirror

He Ting Tian Bo-Yu Qiu Die Zhang Bin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 179501 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210603

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210603>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于中红外光参量振荡器光束质量优化的90° 像旋转四镜非平面环形谐振腔型设计与分析

Design and analysis of 90° image rotating four-mirror non-planar ring resonator based on mid-infrared optical parametric oscillator beam quality optimization

物理学报. 2019, 68(17): 174201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182001>

自适应非凸稀疏正则化下自适应光学系统加性噪声的去除

Removal of additive noise in adaptive optics system based on adaptive nonconvex sparse regularization

物理学报. 2017, 66(12): 129501 <https://doi.org/10.7498/aps.66.129501>

国产部分掺杂光纤实现3 kW全光纤激光振荡输出

Home-made confined-doped fiber with 3-kW all-fiber laser oscillating output

物理学报. 2020, 69(23): 234205 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200620>

基于透射型体布拉格光栅的两通道2.5 kW光谱组束输出

2.5 kW average power, two-channel spectral-beam-combined output based on transmitting volume Bragg grating

物理学报. 2017, 66(8): 084204 <https://doi.org/10.7498/aps.66.084204>

基于瀑布型多重网格加速的复指数波前复原算法

Complex exponential reconstruction algorithm accelerated by cascadic multigrid method

物理学报. 2019, 68(10): 104209 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182137>

少模光纤放大器中的准静态模式不稳定实验研究

Quasi-static mode instability in few-mode fiber amplifier

物理学报. 2018, 67(14): 144203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180140>

基于直角锥面变形镜的薄管激光 光束质量提升新方法^{*}

何婷 田博宇 邱蝶 张彬[†]

(四川大学电子信息学院, 成都 610064)

(2021 年 3 月 31 日收到; 2021 年 4 月 26 日收到修改稿)

针对大遮拦比窄环宽薄管激光光束质量提升需求, 提出了一种基于直角锥面变形镜的薄管激光光束质量提升新方法. 采用直角锥面实现薄管激光离轴像差的自校正, 再利用驱动单元控制直角锥面变形镜的形变来进一步校正残余像差, 进而实现对薄管激光光束质量的提升. 以 48 单元直角锥面变形镜为例, 利用有限元分析方法建立了直角锥面变形镜的物理模型, 分析了直角锥面变形镜对薄管激光畸变波前的校正能力. 结果表明, 基于直角锥面变形镜的薄管激光光束质量提升新方法能够有效校正大遮拦比窄环宽薄管激光的波前畸变, 显著提升薄管激光光束质量.

关键词: 薄管激光, 直角锥面变形镜, 光束质量, 自适应光学

PACS: 95.75.Qr, 07.05.Tp

DOI: 10.7498/aps.70.20210603

1 引言

“之”字形光路薄管固体激光器 (solid-state zigzag tube lasers, SSZTLs) 作为一种新型固体激光光源^[1], 具有输出功率高、无边界效应、热稳定性强及结构紧凑等突出优势^[2–5], 在强激光技术领域具有潜在的应用价值. 然而, 由于其增益介质呈管状结构, SSZTLs 对加工误差及装调偏差极为敏感^[6], 导致其输出光束质量较差, 难以满足应用需求. 特别是 SSZTLs 的输出光束具有大口径、大遮拦比的特点, 其输出光束质量管控具有极高的难度与挑战^[7–10]. 基于自适应光学的光束净化技术在利用变形镜补偿光束波前畸变^[11], 改善激光器光束质量的同时, 还能够有效地提高激光器的输出功率^[12]. 传统的双压电变形镜^[13–15]、薄膜变形镜^[16–18]、微机电变形镜^[19–22] 受限于驱动器空间密

度与口径等问题, 均难以适用于这类大口径窄环宽环形光束的校正. Sun 等^[23] 提出了一种掠入射式桶形变形镜, 利用轴棱锥对窄环宽环形光束进行整形, 使其掠入射至桶形变形镜反射面, 通过大幅增加光束有效面积来改善校正效果, 出射光束最终再通过一组轴棱锥整形恢复为原始光强分布.

当 SSZTLs 存在加工误差和装调偏差时, 输出光束存在一系列以倾斜、离焦、像散和慧差为主的低阶波像差^[24–26], 严重影响光束质量. 通过引入直角锥面反射镜可使光束传输路径沿薄管径向翻转, 并再次返回管状增益介质内部传输, 实现离轴像差的校正^[27]. 在此基础上, 本文进一步提出基于直角锥面变形镜的薄管激光光束质量提升新方法, 即通过直角锥面的离轴像差自补偿效应实现离轴像差的校正, 而通过控制直角锥面变形镜的驱动单元实现残余像差的校正, 从而实现薄管激光光束质量的全面提升. 同时, 其对薄管激光器的体积影响较小,

^{*} 四川省科技计划项目 (批准号: 2018JY0553) 和中国科学院自适应光学重点实验室基金 (批准号: LAOF1801) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: zhangbinff@sohu.com

且能够有效地提高薄管激光器的输出功率. 以48单元直角锥面变形镜为例, 基于薄管激光具有的波像差特性, 对直角锥面变形镜的结构参数进行了优化, 并进一步分析了直角锥面变形镜对薄管同心度误差、薄管平行度误差、薄管锥度误差以及光源平行度误差等主要加工及装调误差的校正效果.

2 理论模型

基于直角锥面变形镜的薄管激光光束质量改善新方法, 其基本思想是: 利用薄管构型中任意径向对称分布光路的光学共轭特性来实现离轴像差的自补偿, 进而利用驱动单元控制直角锥面变形镜形变补偿残余像差. 该方法具备以下优势: 1) 无需光束整形且结构简单, 易于装调和控制; 2) 采用直角锥面可以使窄环宽环形光束在直角锥面变形镜镜面上的有效面积增大为 $\sqrt{2}$ 倍; 3) 光束在直角锥面变形镜镜面上的对称位置会反射两次, 可以增大变形镜的有效行程.

本文基于薄管激光器中薄管放大单元的加工误差与装调偏差来说明直角锥面变形镜对薄管激光畸变波前的校正. 图1为基于直角锥面变形镜的薄管激光畸变波前校正原理示意图. 其中, 直角锥面变形镜作为薄管激光振荡器腔外校正镜, 实现薄管激光畸变波前校正. 图1中包含两类加工误差与装调偏差: 一类是薄管激光器的加工误差与装调偏差, 包括: 薄管内外壁轴线偏移量 Δx 引起的同心度误差, 薄管内外壁轴线夹角 $\Delta\theta$ 引起的平行度误差, 薄管端帽锥角偏差 $\Delta\theta_a$ 引起的锥度误差以及光源与薄管轴线夹角 $\Delta\theta_s$ 引起的光源平行度误差; 第二类为直角锥面变形镜的加工误差与装调偏差,

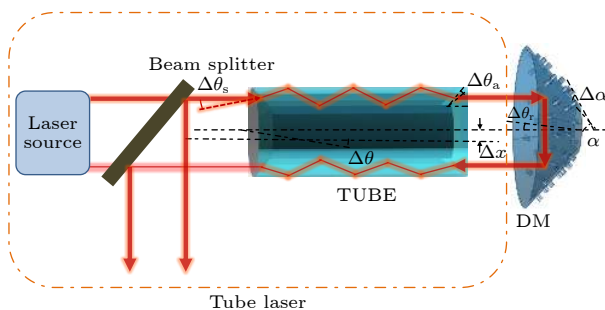


图1 基于直角锥面变形镜的薄管激光畸变波前校正原理示意图

Fig. 1. The principle schematic diagram of tube laser distortion wavefront correction based on the right-angle cone deformable mirror.

包括: 直角锥面变形镜轴线与薄管激光器轴线夹角 $\Delta\theta_r$ 引起的对准误差, 直角锥面变形镜的锥角偏差 $\Delta\alpha$ 引起的锥度误差. α 表示直角锥面变形镜的半锥角.

图2(a)为变形镜后表面的驱动器分布示意图. 变形镜后表面覆盖四圈驱动器, 每圈排布12个驱动器, 第一圈与第四圈设计为副驱动器, 第二圈与第三圈设计为主驱动器. 主驱动器与副驱动器角向排布偏移 15° 形成互补关系, 并共同进行像差校正. 图2(b)为变形镜侧视图, 驱动器垂直于镜面母线, 直角锥面变形镜高 H , 后表面底半径为 R_{Do} , 顶部半径为 R_{Di} , 前表面底半径为 r_{Do} , 顶部半径为 r_{Di} . 主驱动器外圈角向间距为 ΔC_{main_o} , 主驱动器内圈角向间距为 ΔC_{main_i} , 副驱动器外圈角向间距为 ΔC_{sub_o} , 副驱动器内圈角向间距为 ΔC_{sub_i} , 内外圈主驱动器径向间距为 ΔH_{main} , 内、外圈副驱动器径向间距为 ΔH_{sub} .

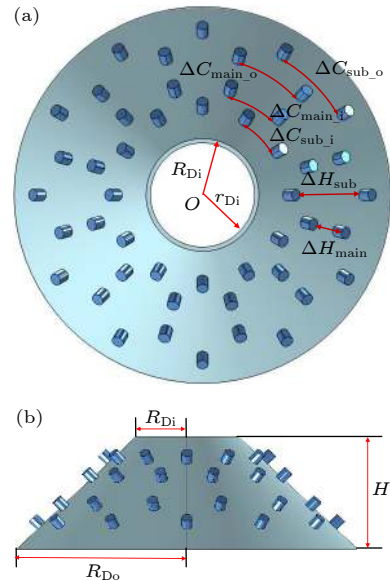


图2 直角锥面变形镜驱动器分布示意图 (a) 变形镜后表面视图; (b) 变形镜侧视图

Fig. 2. Schematic diagram of drive units arrangement of the right-angle cone deformable mirror: (a) Rear surface of deformable mirror; (b) side view of deformable mirror.

直角锥面变形镜的驱动单元垂直于其母线分布, 因此直角锥面变形镜极头的实际作用位移所引起的环形光束补偿量是镜面形变量在光束波面法线方向上的分量. 实际上, 直角锥面变形镜可等效为环形平面变形镜, 等效变形镜如图3所示. Δc_{main_i} , Δc_{main_o} 表示内外圈主驱动器角向间距,

Δc_{sub_o} , Δc_{sub_i} 表示内外圈副驱动器角向间距, Δh_{main} 表示主驱动器径向间距, Δh_{sub} 表示副驱动器径向间距, γ 表示驱动器角向夹角.

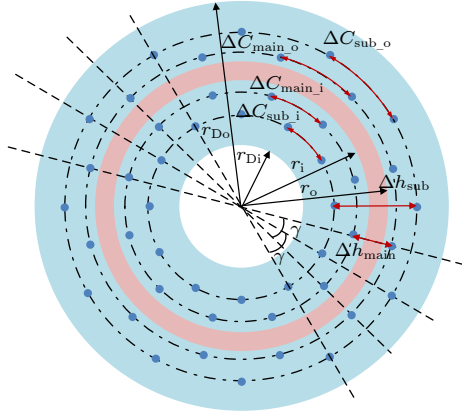


图 3 等效变形镜示意图

Fig. 3. The diagram of equivalent deformable mirror.

夏克哈特曼波前传感器与自适应闭环校正算法通常应用于 XOY 二维平面, 因而需要对直角锥面变形镜镜面有效形变区域进行坐标变换, 如图 4 所示.

以出射环形光束中心为坐标原点建立柱面坐标系, ρ 轴指向环形光束径向, 出射光束沿 Z 轴传输至直角锥面变形镜. A_m 为环形光束环宽中点处任意一位置, 其柱坐标系下的坐标为 $(r_m, \theta, 0)$. d_D 表示原点沿 Z 轴至直角锥面变形镜底部的距离. d_m 为 A_m 沿 Z 轴至 A'_m 的距离. 由几何关系可以得到直角锥面变形镜前表面底半径 r_{D0} 、半锥角 α , A_m 点矢径 r_m 、距离 d_m 及 d_D 的关系, 即

$$r_{D0} = r_m + (d_m - d_D) \tan \alpha. \quad (1)$$

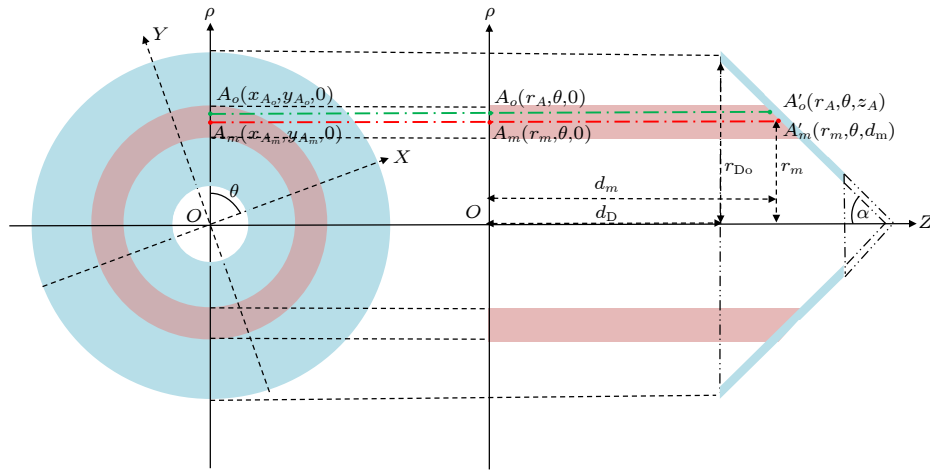


图 4 坐标变换示意图

Fig. 4. The diagram of coordinate transformation.

在环形光束上任取一点 A_o , 其柱坐标系下的坐标表示为 $(r_A, \theta, 0)$. A'_o 为 A_o 入射至直角锥面变形镜上的入射点, 其柱坐标系下坐标为 (r_A, θ, z_A) , 于是, 由几何关系并结合 (1) 式可得

$$z_A = d_D + \frac{r_{D0} - r_A}{\tan \alpha}. \quad (2)$$

联立 (1) 式与 (2) 式, 可推导出平面坐标系与柱面坐标系的变换关系为

$$\begin{cases} x_{A'_o} = r_A \cos \theta, \\ y_{A'_o} = r_A \sin \theta, \\ z_{A'_o} = \frac{r_{D0} + d_D \tan \alpha - r_A}{\tan \alpha}. \end{cases} \quad (3)$$

3 结果与分析

在实际应用中, 由于薄管激光系统的装调偏差以及管状增益介质加工误差, 不可避免地会造成薄管激光光束质量的退化. 其中, 薄管同心度误差 Δx 、薄管平行度误差 $\Delta \theta$ 、薄管端帽锥角的锥度误差 $\Delta \theta_a$ 、光源平行度误差 $\Delta \theta_s$ 是主要的误差来源, 会导致输出光束存在以倾斜、离焦、像散和慧差为主的一系列低阶波像差, 最终造成薄管激光光束质量退化, 严重影响薄管激光器的实际应用. 其中, 薄管同心度误差对光束质量的影响最为严重也最难控制, 因而本文以薄管同心度误差为例进行分析. 图 5 给出薄管增益介质具有 $1 \mu\text{m}$ 同心度误差时输出光束畸变波前的波像差分解及远场光强分布.

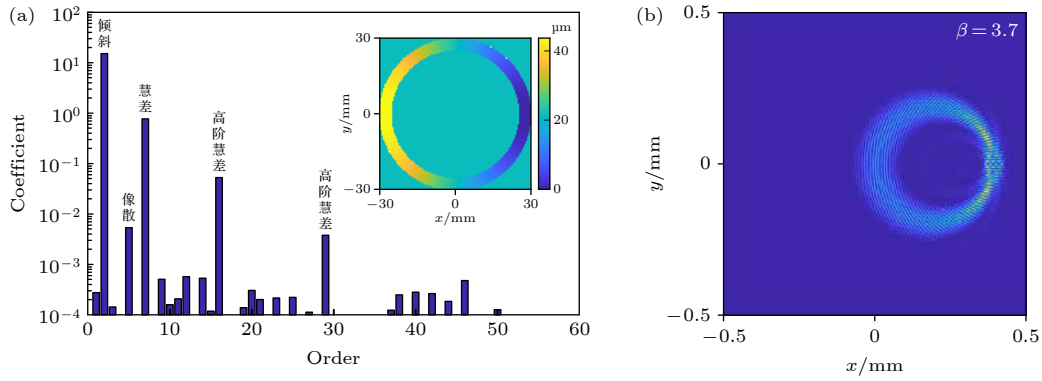


图5 薄管同心度误差为 $1\ \mu\text{m}$ 时的波像差分解及远场光强分布 (a) 薄管同心度误差 $1\ \mu\text{m}$ 时畸变波前波像差分解; (b) 远场光强分布
Fig. 5. The wavefront aberration decomposition and far-field intensity distributions with the concentricity error of $1\ \mu\text{m}$: (a) The wavefront aberration decomposition; (b) far-field intensity distribution.

分析图 5(a) 可知, 当薄管同心度误差为 $1\ \mu\text{m}$ 时, 薄管激光波像差主要包含以倾斜和慧差为主的离轴像差及以像散为主的轴上像差, 其中倾斜占比最大. 从图 5(b) 可看出, 远场光强分布近似为环形, β 因子为 3.7, 光束质量较差, 难以满足实际应用需求, 需要采取必要手段对其光束质量进行有效改善.

3.1 直角锥面变形镜参数优化

一般情况下, 在制备加工允许的范围内, 变形镜驱动器密度越大, 变形镜校正能力越好. 此外, 变形镜的校正能力还与驱动器半径及间距密切相关. 由于薄管激光的主要波像差为倾斜、离焦、像散和慧差等低阶波像差, 而离轴像差可通过直角锥面的自补偿效应进行校正. 因此, 取环域离焦、环域像散作为待校正波前, 分析驱动器半径及主驱动器径向间距对变形镜校正能力的影响. 假设待校正波前峰谷 (peak-valley, PV) 值为 $1\ \mu\text{m}$, 以单一驱动单元的面形影响函数作为基底函数获得完整面形变形函数, 利用最小二乘法反演获得各驱动器所施加的驱动位移得到拟合面形, 进而得到残余波前^[28]. 图 6 给出了残余波前 PV 值随驱动器半径及主驱动器径向间距的变化.

从图 6 可以看出, 驱动器半径取 $1.5\ \text{mm}$ 、主驱动器径向间距取 $11\ \text{mm}$ 时, 环域离焦与环域像散均能得到较好的校正. 后续讨论中, 将 48 单元直角锥面变形镜驱动器半径选取为 $1.5\ \text{mm}$, 主驱动器径向间距为 $11\ \text{mm}$.

基于上述优化结果得到直角锥面变形镜参数如下: 镜面材料为 BK7 玻璃^[23], 镜面厚度 H_M 为 $2\ \text{mm}$, 驱动器材料为压电陶瓷 (piezoelectric, PZT),

半径 r 为 $1.5\ \text{mm}$, 高 H_P 为 $3\ \text{mm}$. 表 1 和表 2 分别列出了变形镜材料力学参数和结构参数.

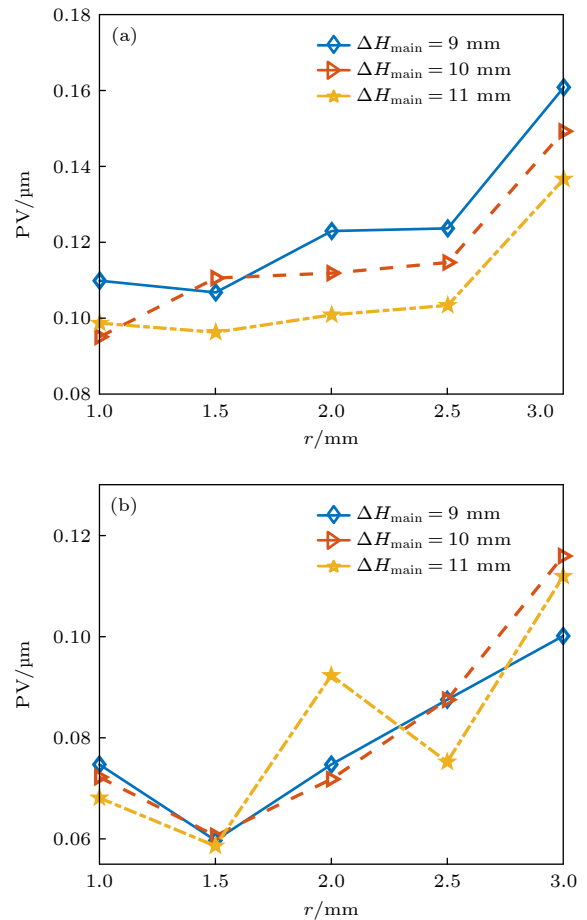


图6 直角锥面变形镜的参数优化 (a) 环域离焦残余波前 PV 值随驱动器半径与主驱动器径向间距的变化; (b) 环域像散残余波前 PV 值随驱动器半径与主驱动器径向间距的变化

Fig. 6. Parameters optimization: (a) The PV variation of annular defocusing residual wavefront; (b) the PV variation of annular astigmatism residual wavefront.

表 1 材料力学参数
Table 1. Material parameters.

Parameters	BK7	PZT
Young's modulus/Gpa	81	70
Poisson's ratio	0.17	0.33
Density/(kg·m ⁻³)	2400	7700

 表 2 直角锥面变形镜变形镜结构参数
Table 2. The parameters of the right-angle cone deformable mirror.

Parameters	Value	Parameters	Value
r_i	26 mm	H	30.7 mm
r_o	31 mm	ΔH_{sub}	25 mm
α	45°	ΔH_{main}	11 mm
γ	30°	ΔC_{sub_o}	19.5 mm
r_{Di}	11.2 mm	ΔC_{sub_i}	10.3 mm
r_{Do}	41.8 mm	ΔC_{main_o}	16.9 mm
R_{Di}	13.2 mm	ΔC_{main_i}	12.9 mm
R_{Do}	43.8 mm		

3.2 直角锥面变形镜的校正效果分析

基于直角锥面变形镜的结构参数优化结果, 进

一步分析了直角锥面变形镜对薄管激光畸变波前的校正能力. 为了评估直角锥面变形镜对薄管激光畸变波前的校正能力, 首先利用理想加工和装调的直角锥面变形镜对单一误差下薄管激光畸变波前进行校正. 图 7 给出了校正前后光束质量 β 因子随主要加工及装调误差的变化. 由图 7 可知, 在未使用直角锥面变形镜时, 随着加工及装调误差的增大, 薄管激光光束质量迅速退化. 当使用直角锥面变形镜校正后, β 因子均降到 1.02 以下, 从而验证了直角锥面变形镜可有效地抑制薄管激光器的主要加工误差和装调误差, 包括薄管同心度误差、薄管平行度误差、薄管锥度误差及光源平行度误差引起的光束质量退化.

在实际应用中, 薄管激光器通常不只含有单一加工误差和装调偏差, 其光束质量的退化是多误差耦合作用的结果. 参考之前的理论研究工作 [6,27], 本文进一步分析直角锥面变形镜对不同程度的薄管加工误差及装调偏差引起的波前畸变的校正效果, 如图 8 所示. 图 8(a)—(c) 分别为薄管同心度误差 Δx 为 1 μm 、薄管平行度误差 $\Delta\theta$ 为 5 μrad 、

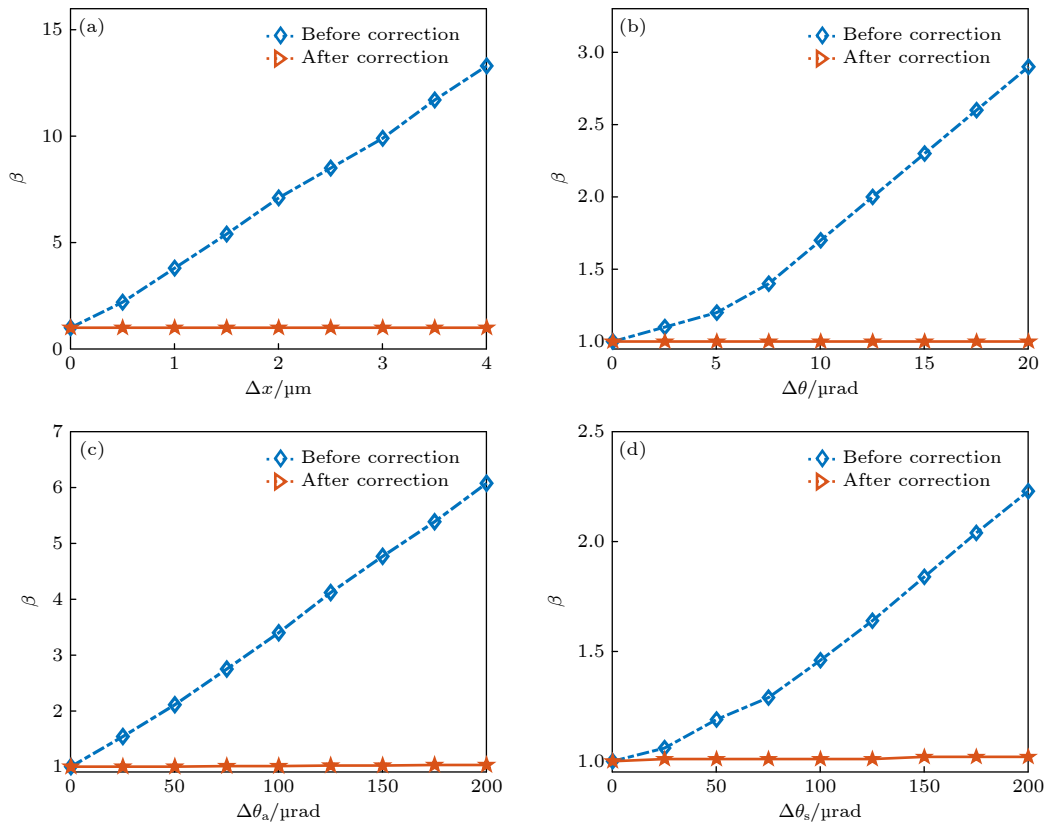


图 7 校正前后 β 因子变化 (a) β 因子随薄管同心度误差变化; (b) β 因子随薄管平行度误差变化; (c) β 因子随薄管锥度误差变化; (d) β 因子随光源平行度误差变化

Fig. 7. The curves of β factor: (a) Tube's concentricity error; (b) tube's parallelism error; (c) tube's taper error; (d) source's parallelism error.

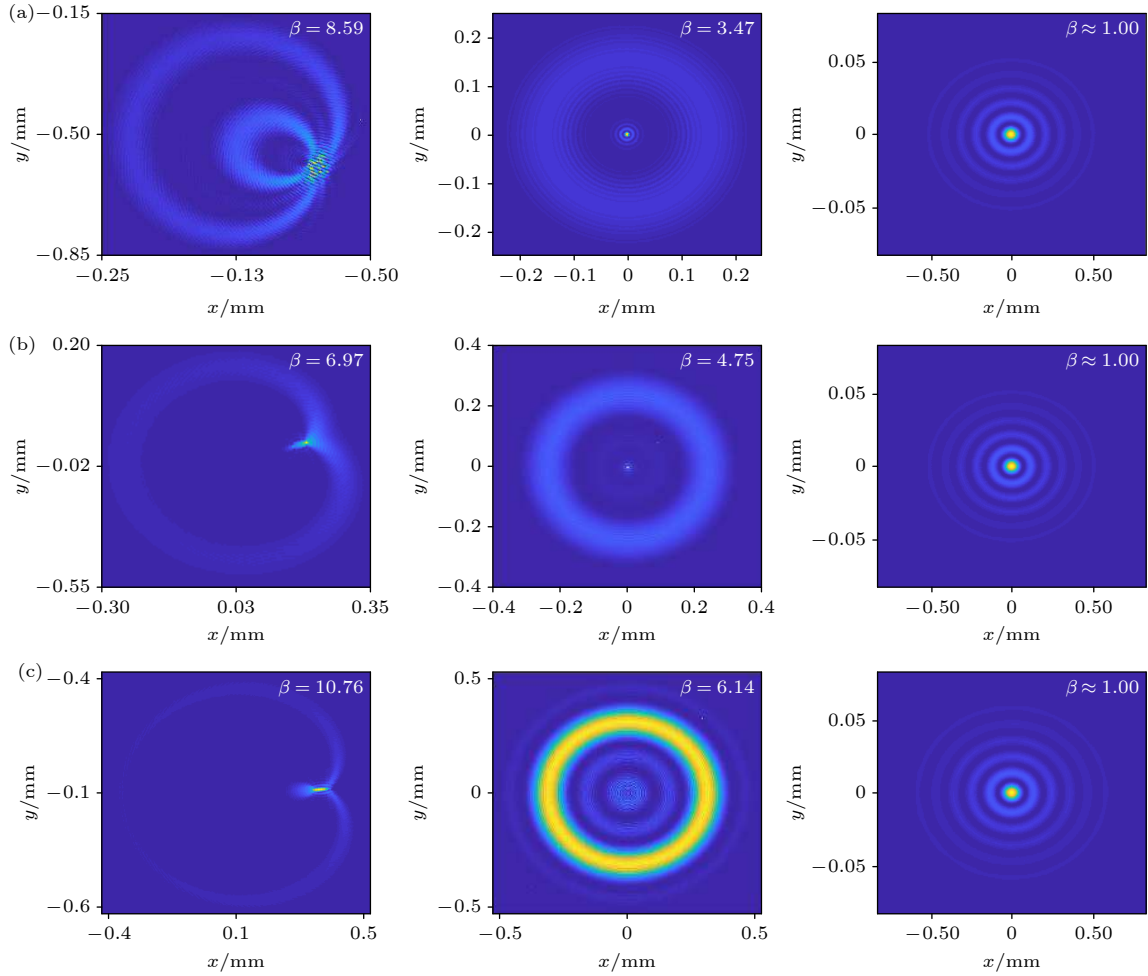


图 8 多误差耦合作用下校正前后远场光强分布及 β 因子 (a) $\Delta x = 1 \mu\text{m}$, $\Delta \theta = 5 \mu\text{rad}$, $\Delta \theta_a = 100 \mu\text{rad}$, $\Delta \theta_s = 100 \mu\text{rad}$; (b) $\Delta x = 0.5 \mu\text{m}$, $\Delta \theta = 15 \mu\text{rad}$, $\Delta \theta_a = 150 \mu\text{rad}$, $\Delta \theta_s = 200 \mu\text{rad}$; (c) $\Delta x = 1 \mu\text{m}$, $\Delta \theta = 10 \mu\text{rad}$, $\Delta \theta_a = 200 \mu\text{rad}$, $\Delta \theta_s = 150 \mu\text{rad}$

Fig. 8. Far-field intensity distributions and β factor before and after correction under multi-error coupling: (a) $\Delta x = 1 \mu\text{m}$, $\Delta \theta = 5 \mu\text{rad}$, $\Delta \theta_a = 100 \mu\text{rad}$, $\Delta \theta_s = 100 \mu\text{rad}$; (b) $\Delta x = 0.5 \mu\text{m}$, $\Delta \theta = 15 \mu\text{rad}$, $\Delta \theta_a = 150 \mu\text{rad}$, $\Delta \theta_s = 200 \mu\text{rad}$; (c) $\Delta x = 1 \mu\text{m}$, $\Delta \theta = 10 \mu\text{rad}$, $\Delta \theta_a = 200 \mu\text{rad}$, $\Delta \theta_s = 150 \mu\text{rad}$.

薄管锥度误差 $\Delta \theta_a$ 为 $100 \mu\text{rad}$ 、光源平行度误差 $\Delta \theta_s$ 为 $100 \mu\text{rad}$ 时, 薄管同心度误差 Δx 为 $0.5 \mu\text{m}$ 、薄管平行度误差 $\Delta \theta$ 为 $15 \mu\text{rad}$ 、薄管锥度误差 $\Delta \theta_a$ 为 $150 \mu\text{rad}$ 、光源平行度误差 $\Delta \theta_s$ 为 $200 \mu\text{rad}$ 时, 薄管同心度误差 Δx 为 $1 \mu\text{m}$ 、薄管平行度误差 $\Delta \theta$ 为 $10 \mu\text{rad}$ 、薄管锥度误差 $\Delta \theta_a$ 为 $200 \mu\text{rad}$ 、光源平行度误差 $\Delta \theta_s$ 为 $150 \mu\text{rad}$ 时, 不采取校正措施 (第一列)、直角锥自校正 (第二列) 及直角锥面变形镜校正后 (第三列) 的远场光强分布及光束质量 β 因子. 从图 8(a)–(c) 第一列可以看出, 在没有采取任何校正措施的情况下, 由于加工及装调误差的存在, 薄管激光的远场光强分布出现明显畸变, 能量集中度下降. 由图 8(a)–(c) 第二列可知, 利用直角锥的自补偿效应校正离轴像差后, 光束质量明显提升. 图 8(a)–(c) 第三列表明, 在直角锥

自校正的基础上, 进一步结合直角锥面变形镜的镜面形变对残余像差进行校正后, 能量集中度大幅度提升, 光束质量显著改善, β 因子降至接近 1. 由此可见, 直角锥面变形镜可有效地校正加工及装调误差导致的薄管激光波前畸变, 显著提升薄管激光光束质量.

为进一步说明直角锥面变形镜在实际应用中的可行性, 进一步分析了直角锥面变形镜存在锥度误差和对准误差时, 其对不同程度的加工误差及装调偏差耦合作用下的薄管激光畸变波前的校正效果. 计算中, 薄管激光参数与图 8 一致. 基于数值仿真研究结果 [29], 假设直角锥面变形镜同时具有 $20 \mu\text{rad}$ 锥度误差及 10 mrad 对准误差, 并采用相同锥度误差和对准误差的直角锥作为对照组, 分别给出了直角锥及直角锥面变形镜校正后的薄管激

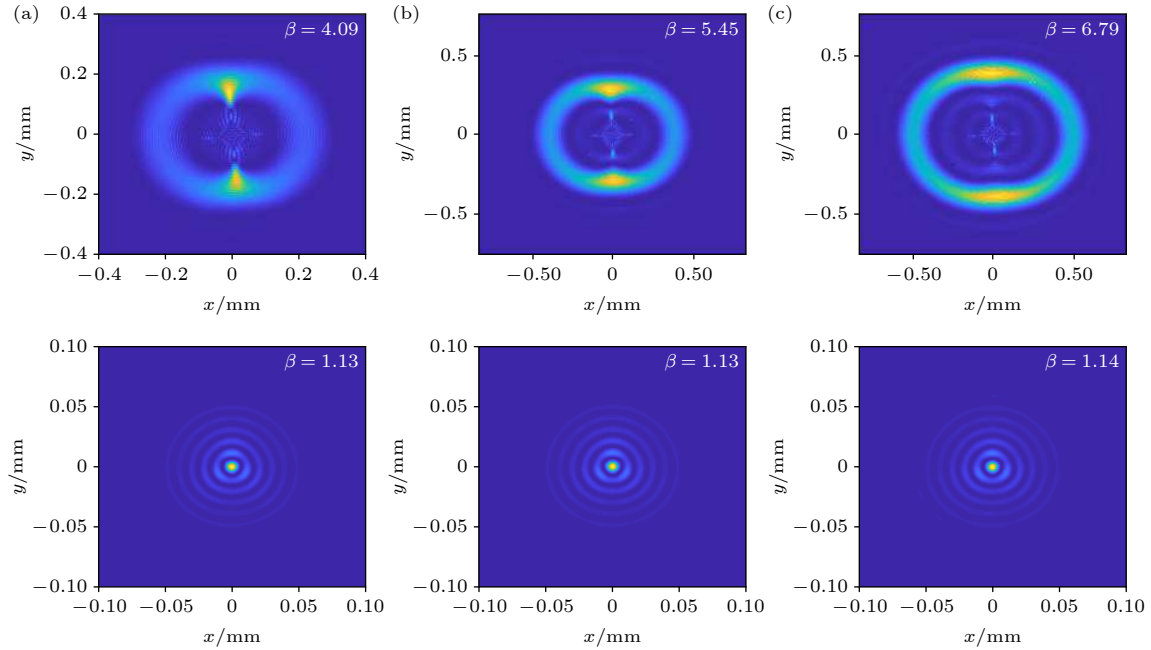


图9 非理想直角锥面变形镜校正后远场光强分布及 β 因子 (a) $\Delta x = 1 \mu\text{m}$, $\Delta\theta = 5 \mu\text{rad}$, $\Delta\theta_a = 100 \mu\text{rad}$, $\Delta\theta_s = 100 \mu\text{rad}$; (b) $\Delta x = 0.5 \mu\text{m}$, $\Delta\theta = 15 \mu\text{rad}$, $\Delta\theta_a = 150 \mu\text{rad}$, $\Delta\theta_s = 200 \mu\text{rad}$; (c) $\Delta x = 1 \mu\text{m}$, $\Delta\theta = 10 \mu\text{rad}$, $\Delta\theta_a = 200 \mu\text{rad}$, $\Delta\theta_s = 150 \mu\text{rad}$

Fig. 9. Comparisons of far-field intensity distribution and β factor under nonideal circumstances: (a) $\Delta x = 1 \mu\text{m}$, $\Delta\theta = 5 \mu\text{rad}$, $\Delta\theta_a = 100 \mu\text{rad}$, $\Delta\theta_s = 100 \mu\text{rad}$; (b) $\Delta x = 0.5 \mu\text{m}$, $\Delta\theta = 15 \mu\text{rad}$, $\Delta\theta_a = 150 \mu\text{rad}$, $\Delta\theta_s = 200 \mu\text{rad}$; (c) $\Delta x = 1 \mu\text{m}$, $\Delta\theta = 10 \mu\text{rad}$, $\Delta\theta_a = 200 \mu\text{rad}$, $\Delta\theta_s = 150 \mu\text{rad}$.

光远场光强分布及光束质量 β 因子,如图9所示.

从图9(a)—(c)第一行可以看出,仅采用直角锥镜进行自校正时,由于受到其自身加工装调误差的影响,薄管激光的能量集中度显著下降,光束质量严重退化.在图9(a)—(c)第二行可以看出,直角锥面变形镜的校正能力受到加工装调误差的影响较小,薄管激光光束质量仍得到了显著的改善.分析其原因在于:直角锥面变形镜的加工误差及装调偏差可通过直角锥面变形镜自身的镜面形变进行补偿.由此可见,在实际应用场景中,即使当直角锥面变形镜存在一定程度的加工误差及装调偏差时,直角锥面变形镜仍然能有效改善薄管激光光束质量.

4 结 论

为改善窄环宽薄管激光光束质量,我们提出了一种基于直角锥面变形镜的薄管激光光束质量改善新方法.该方法通过直角锥面对薄管激光的自补偿效应以校正离轴像差,再利用驱动单元控制直角锥面变形镜的形变来校正残余像差,从而实现对薄管激光畸变波前的校正.本文以48单元直角锥面变形镜为例,基于薄管激光波像差特性,对48单

元直角锥面变形镜的驱动器半径与主驱动器径向间距进行优化.在此基础上,模拟分析了直角锥面变形镜对薄管激光加工和装调误差引起的波前畸变的校正效果.结果表明,针对薄管激光器的加工及装调误差引起的光束质量严重退化问题,利用本文提出的薄管激光光束质量改善新方法,经过直角锥面变形镜校正后,薄管激光的光束质量能得到显著提升.同时,该方法不仅仅适用于大遮拦比窄环宽激光器,通过优化器件体积、口径、驱动器排布方式等,亦可用于遮拦比较小的环形光束和实心光束.需要指出的是,相较于传统变形镜,对于这类小遮拦比和实心光束,直角锥面变形镜并不具备独特的优越性.此外,本文提出的薄管激光光束质量改善新方法在高阶像差及非旋转对称光束的校正上具有局限性,在实际应用中,应结合具体应用场景综合考虑予以使用.

参考文献

- [1] Dong J, Wang G Y, Ren Y Y 2013 *Chin. J. Laser.* **40** 27 (in Chinese) [董俊, 王光宇, 任滢滢 2013 *中国激光* **40** 27]
- [2] Wittrock U, Weber H, Eppich B 1991 *Opt. Lett.* **16** 1092
- [3] Clarkson W A, Shori R K, Savich M 2015 *Conference on Solid State Lasers* San Francisco, USA, February 7, 2015 p934216

- [4] Li N, Zhang W Q, Liu Y, Tang X J 2018 *Chin. J. Las.* **45** 17 (in Chinese) [李宁, 张伟桥, 刘洋, 唐晓军 2018 *中国激光* **45** 17]
- [5] Li M, Zhou T J, Xu L, Gao Q S, Zhang J, Wu Y C, Wang D, Hu H, Tang C, Yu Y, Wu Z H, Li J M, Shi Y, Zhao N 2018 *Acta Opt. Sin.* **38** 198 (in Chinese) [李密, 周唐建, 徐浏, 高清松, 章健, 邬映臣, 汪丹, 胡浩, 唐淳, 于益, 吴振海, 李建民, 石勇, 赵娜 2018 *光学学报* **38** 198]
- [6] Tian B Y, Zhong Z Q, Huang C 2019 *IEEE Photonics J.* **11** 1
- [7] Burger L, Litvin I, Ngcobo S, Forbes A 2015 *J. Opt.* **17** 015604
- [8] Cornelissen S A, Bierden P A, Bifano T G, Lam C V 2009 *J. Micro-Nanolith. Mem.* **8** 767
- [9] Tokovinin A, Thomas S, Vdovin G 2004 *SPIE Proceedings Advancements in Adaptive Optics* Glasgow, USA, October 25, 2004 p580
- [10] Li M, Hu H, Gao Q S, Wang J T, Zhang J, Wu Y C, Zhou T J, Xu L, Tang C, Zhao N, Liu P 2017 *IEEE Photonics J.* **9** 1
- [11] Yan H, Lei X, Liu W J, Wang S, Gao Y, Dong L Z, Yang P, Xu B 2012 *High Pow. Las. Part. Beam.* **24** 1663 (in Chinese) [晏虎, 雷翔, 刘文劲, 王帅, 高源, 董理治, 杨平, 许冰 2012 *强激光与粒子束* **24** 1663]
- [12] Yang P, Ning Y, Lei X 2010 *Opt. Express* **18** 7121
- [13] Vdovin G, Loktev M, Simonov A, Gruneisen M T, Gonglewski J D, Giles M K 2005 *SPIE Optics + Photonics* San Diego, USA, August 18, 2005 p5894940 B
- [14] Wittrock U, Verpoort S 2010 *Appl. Opt.* **49** G37
- [15] Verpoort S, Rausch P, Wittrock U 2012 *SPIE Proceedings Mems Adaptive Optics VI* San Francisco, USA, January 21, 2012 p852909
- [16] Bayanna A R, Louis R E, Chatterjee S, Mathew S K, Venkatakrishnan P 2015 *Appl. Opt.* **54** 1727
- [17] Lu J S, Su G 2012 *SPIE Optical Engineering + Applications* San Diego, USA, October 17, 2012 p84880D
- [18] Bartsch D U, Freeman W R, Fainman Y, Zhu L, Sun P C 1999 *Appl. Opt.* **38** 168
- [19] Wallace Ce B P, Hampton P J, Bradley C H, Conan R 2006 *Opt. Express* **14** 10132
- [20] Guzmán D, Juez F, Myers R, Guesalaga A, Lasheras F S 2010 *Opt. Express* **18** 21356
- [21] Mathur V, Vangala S R, Qian X, Goodhue W D, Khoury J 2009 *IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics* Tampa, USA, August 17, 2009 p156
- [22] Hembrecht M A, He M, Kempf C J, Olivier S S, Bifano T G, Kubby J 2012 *MEMS Adaptive Optics VI* San Francisco, USA, February 6, 2012 p825307
- [23] Sun C, Lei H, Wang D, Deng X, Zheng Y 2019 *Opt. Express* **27** 9215
- [24] Wittrock U, Weber H, Eppich B 1989 *Fourth International Meeting of the EUREKA HPSSL Project EU226* Berlin, Germany, October 12, 1989 p1175
- [25] Loiko P A, Yumashev K V, Kuleshov N V, Savitski V G, Calvez S, Burns D 2009 *Opt. Express* **17** 23536
- [26] Tashiro W H 2000 *Opt. Commun.* **175** 189
- [27] Tian B Y, Yu J C, Zhang B 2020 *Opt. Eng.* **59** 1
- [28] Harvey J E, Callahan G M 1978 *Adaptive Optical Components I*, Washington, D. C., USA, August 8, 1978 p50
- [29] Li J, Tian B Y, Yu J C 2021 *Chin. J. Las.* **48** 67 (in Chinese) [李佳, 田博宇, 余江川, 张彬 2021 *中国激光* **48** 67]

Novel method of improving beam quality of thin-wall tube laser based on right-angle cone deformable mirror^{*}

He Ting Tian Bo-Yu Qiu Die Zhang Bin[†]

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

(Received 31 March 2021; revised manuscript received 26 April 2021)

Abstract

Aiming at improving the beam quality of thin-wall tube laser, a novel method based on the right-angle cone deformable mirror is proposed. In the method, a reflector with inner right-angle conical surface is used, and the annular laser beam successively passes through the opposite sides of the tube, compensating for the off-axis aberrations of the annular laser beam. Next, the residual aberrations are corrected by the deformation of the right-angle cone mirror to further improve the beam quality. The physical model of the right-angle cone deformable mirror is built up by using the finite element analysis method, followed by optimizing the structural parameters of the right-angle cone deformable mirror. The preliminarily optimized right-angle cone deformable mirror driven by 48 actuators with a radius of 1.5 mm for each actuator and an interval of 11 mm between actuators is then utilized to correct the beam quality of the thin-wall tube laser. Results indicate that the output beam quality of the thin-wall tube laser degrades rapidly with the increasing of the tube's concentricity error, parallelism error, taper error and source's parallelism error. Fortunately, the beam quality is significantly improved by using the right-angle cone deformable mirror and the β factor greatly decreases. In addition, the performance of the non-ideal right-angle cone deformable mirror with a 20- μ rad taper error and a 10-mrad collimation error is compared with that of the ideal mirror, and the results show that the β factor is controlled within 1.14 after having been corrected by the non-ideal right-angle cone deformable mirror. Therefore, the simulation results theoretically prove that the novel method can effectively eliminate the typical aberrations caused by the errors from fabrication and alignment and correct the wavefront distortion of the large-aperture thin-wall tube laser, thus significantly improving the beam quality.

Keywords: tube laser, right-angle cone deformable mirror, beam quality, adaptive optics

PACS: 95.75.Qr, 07.05.Tp

DOI: 10.7498/aps.70.20210603

^{*} Project supported by the Sichuan Provincial Science and Technology Program, China (Grant No. 2018JY0553) and the Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences (Grant No. LAOF1801).

[†] Corresponding author. E-mail: zhangbinff@sohu.com