



·激光大气传输技术·

“之字形”光路薄管固体激光大气长程 传输光束质量分析*

张 彬¹, 田博宇¹, 何 婷¹, 张小民²

(1. 四川大学 电子信息学院, 成都 610064; 2. 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

摘 要: “之字形”光路薄管固体激光是一种结构紧凑、增益高且利于发射的新型激光光源。针对薄管固体激光光源及其大气长程传输过程中的光束质量退化问题, 提出了基于直角锥面变形镜的薄管激光校正方法, 进而通过建立薄管激光校正模型以及大气长程传输模型, 开展了薄管激光大气长程传输光束质量分析。首先, 针对大遮拦比窄环宽环形光束与发射系统的匹配问题, 提供了一种薄管激光环形光束整形变换方案, 有效实现了薄管激光的整形和变换。然后, 分析了薄管激光光源光束质量、大气湍流效应和热晕效应对整形变换后的薄管激光大气长程传输特性的影响, 进而明确了薄管激光大气长程传输光束质量退化机理。最后, 分析了直角锥面变形镜对薄管激光的光源畸变、大气湍流的低频分量 and 热晕导致的离焦相位等的校正效果。结果表明, 经过直角锥面变形镜的校正, 薄管激光光源光束质量明显改善, 大气长程传输后的远场光束质量有所提高。若进一步配合常规变形镜进行联合校正, 薄管激光大气长程传输后的远场光束质量可得到显著提升。

关键词: 薄管激光; 直角锥面变形镜; 自适应光学; 遮拦比变换; 大气湍流; 热晕

中图分类号: TN249

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210200

Beam quality analysis of solid-state zigzag tube lasers for long-distance propagation in atmosphere

Zhang Bin¹, Tian Boyu¹, He Ting¹, Zhang Xiaomin²

(1. School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China;

2. China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Solid-state zigzag tube laser (SSZTL) is a new type of solid-state laser source with structural compactness, high gain, as well as direct transmitting. To solve the problem that the beam quality of the tube laser significantly degrades during long-distance propagation in atmosphere, the method for improving the beam quality of the tube laser based on the right-angle conical deformable mirror have been proposed. The beam correction model and the beam propagation model in atmosphere of the tube laser have been built up and the beam quality of the tube laser after long-distance propagation in atmosphere have been analyzed. Firstly, a scheme for obscuration ratio transformation of annular tube lasers have been provided, based on which the matching of the small-aperture large-obscuration-ratio tube laser and the large-aperture small-obscuration-ratio Cassegrain system have been accomplished. Then, the impacts of the beam quality of the tube laser source, the atmosphere turbulence effect and the thermal blooming effect on the propagation characteristics of SSZTLs have been numerically studied, and the mechanism of the beam quality degradation of the tube laser in the procedure of the long-distance propagation in atmosphere have been revealed. To improve the beam quality of the tube laser in far field, the right-angle conical deformable mirror have been used to correct the aberrations of the tube laser source and the phase distortions induced by the turbulence and thermal blooming effects in atmosphere. The results show that the beam quality of the laser source have been significantly improved after correction. Also, the Strehl ratio in far field have been obviously improved, especially used together with conventional deformable mirror.

* 收稿日期: 2021-05-25; 修订日期: 2021-08-06

基金项目: 四川省科学计划资助项目(2018JY0553); 中国科学院自适应光学重点实验室基金(LAOF1801)

作者简介: 张 彬(1969—), 女, 博士, 教授, 从事强激光传输与调控技术研究。

Key words: tube laser; right-angle conical deformable mirror; adaptive optics; obscuration ratio transformation; atmosphere turbulence; thermal blooming

“之字形”光路薄管固体激光器(Solid-state Zigzag Tube Lasers, SSZTLs)是一种增益介质为大遮拦比、薄壁管状构型的新型固体激光光源^[1-2],因其具有结构紧凑、换热效率高、无边界效应以及热稳定性高等独特优势^[3],成为一种直接高效输出高能环形光束的潜在光源^[4],在制造业、激光输能和军事国防等领域展现出巨大的应用潜力^[5-7]。在实际工作中,固体激光器不可避免地存在加工和装调误差^[2],加之高功率运行时固有的热光效应^[4],致使其光束质量严重退化,因而高功率固体激光器的光束质量管控一直是高能激光应用的核心问题之一^[8]。此外,由于激光传输链路大气介质的湍流效应和热晕效应的影响^[9-10],致使其长程传输能力进一步受到限制。为保证高能激光有效作用于靶目标,常采用自适应光学技术对激光波前畸变进行主动补偿。然而,对于SSZTLs这类大遮拦比窄环宽光源,传统的变形镜受限于驱动器空间排布密度^[8],难以满足其像差校正需求。

为解决“之字形”光路薄管固体激光光源的光束质量管控问题,我们近期提出了一种基于直角锥面变形镜(Right-angle Conical Deformable Mirror, RCDM)的薄管激光光束质量提升新方法^[11]。其核心思路是利用直角锥面的离轴像差自补偿效应实现光源离轴像差的自校正,进而通过驱动单元控制直角锥面产生微形变以校正残余像差,从而实现薄管激光光源光束质量的全面提升。由于该方法设计的直角锥面变形镜采用了边缘驱动的排布方式,可以有效避免高功率激光校正的“印透效应”^[12-13]。本文着眼于“之字形”光路薄管固体激光大气长程传输光束质量管控问题,建立了“之字形”光路薄管固体激光长程传输与校正模型,以及薄管激光遮拦比变换模型,重点分析了直角锥面变形镜对薄管激光大气长程传输过程中的光源畸变、湍流和热晕综合效应的校正能力,并讨论了直角锥面变形镜对“之字形”光路薄管固体激光大气长程传输能力的提升效果。

1 理论模型

1.1 薄管激光校正模型

“之字形”光路薄管激光在长程传输过程中主要面临三类波前畸变:光源像差、大气湍流引入的位相扰动和热晕引入的位相畸变。在实际应用中,由于非理想加工和装调,薄管激光系统不可避免地产生诸多误差^[2],主要包括:管状增益介质内外壁轴线偏移导致的同心度误差 Δx 、内外壁轴线倾斜引起的平行度误差 $\Delta\theta$ 、系统中非理想锥面累积导致的锥度误差 $\Delta\alpha$ 以及种子源光轴倾斜引起的光源平行度误差 $\Delta\theta_s$ 。这些误差会导致以倾斜、离焦和慧差等低阶像差为主要成分的光源畸变^[4]。并且,传输链路中的大气湍流进一步对薄管激光器输出的环形光束附加扰动相位,致使其波前畸变中的高频成分增加。此外,由于高能激光自身对传输路径介质的加热作用而引起的热晕效应也随着时间的增长逐渐累积。

图1给出了基于直角锥面变形镜的“之字形”光路薄管固体激光系统校正方案示意图。种子光以线偏振态注入,利用 90° 转子配合双管结构补偿全内反射导致的p偏振光与s偏振光相位差,通过 $\lambda/4$ 波片控制种子激光和输出激光的偏振态配合偏振分束镜实现放大光束的分离。种子源输出的环形光束通常为小口径光束,通常需要将其变换为大口径的环形光束,以便在放大过程中获得足够高的增益。同时,为了有效抑制放大过程中的热致波前畸变,薄管增益介质通常为薄壁结构,以获得足够高的换热效率。这类大遮拦比的环形光束因其窄环宽的特点,将面临着使用常规变形镜校正难的问题。然而,直角内锥面反射镜的平行回射特性使环形光束径向翻转后再次返回薄管增益介质中传输,因而利用管状结构中的共轭光路,可实现薄管激光光源离轴像差的自校正^[4,14],从而避免变形镜驱动单元密度不足造成校正困难的问题。对于光源残余的低阶像差以及传输链路附加的位相畸变,则进一步通

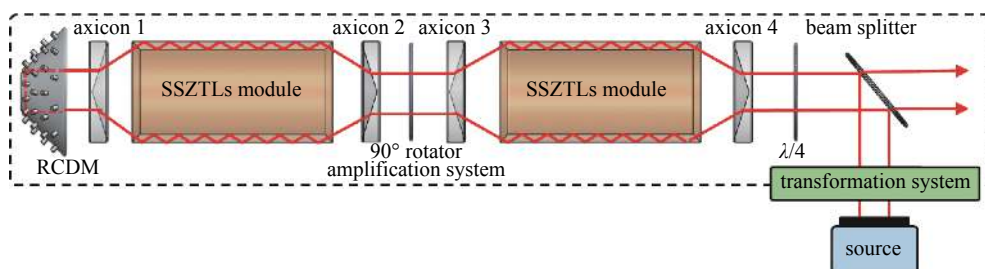


Fig. 1 Schematic illustration of solid-state zigzag tube lasers (SSZTLs) correction based on the right-angle conical deformable mirror (RCDM)

图1 基于直角锥面变形镜的薄管激光校正方案

过驱动器使直角锥面产生微形变实现主动校正。

1.2 薄管激光变换模型

薄管激光是一种大遮拦比、窄环宽的环形光束，其遮拦比和口径通常与种子源和发射系统均不匹配，故而在长程传输前需要对其进行遮拦比和口径变换，使薄管激光系统输出的环形光束与种子源和发射系统匹配后，再进行后续传输、放大和发射。图2给出了一种薄管激光整形变换方案，通过正负轴棱锥镜组和扩束单元的组合可实现环形光束遮拦比和口径的同时调控。在该方案中，采用正负轴棱锥镜组作为环形光束遮拦比变换器件，通过改变锥镜间距即可实现遮拦比调控，而卡塞格林扩束单元则作为环形光束口径变换器件，用于实现环形光束口径调控。

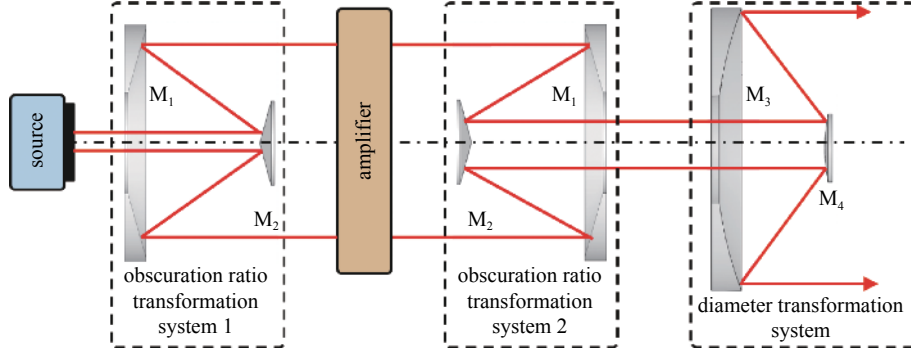


Fig. 2 Schematic illustration of obscuration ratio transformation system

图2 薄管激光整形变换系统

根据几何关系，将内径为 R_i 、外径为 R_o 的入射环形光束变换为遮拦比为 ε 环形光束的正负轴棱锥镜间距 d

$$d = \frac{\varepsilon R_o - R_i}{(1 - \varepsilon) \sin \theta} \quad (1)$$

式中： θ 为轴棱锥镜的锥角。

假设种子源输出 LG_{01} 拉盖尔高斯模式^[15]

$$LG_{01}(r, 0, \varphi) = A_{01} \frac{\sqrt{2}rw_0}{w^2} L_0^1\left(\frac{2r^2}{w^2}\right) \exp\left(-\frac{r^2}{w^2}\right) \quad (2)$$

式中： A_{01} 为振幅系数， w_0 为基模束腰半径， L_0^1 表示一阶拉盖尔多项式。

忽略变换和放大过程中的光场衍射效应，则发射光束的光场 E_0 可以表示为

$$E_0(r, 0, \varphi) = LG_{01}\left[r/M^2 - (d_1 - d_2) \sin \theta, 0, \varphi\right] \exp(i\varphi_{\text{tube}}) \quad (3)$$

式中： φ_{tube} 表示薄管激光光源的总波前畸变， d_1 和 d_2 分别为遮拦比变换系统1和遮拦比变换系统2的正负轴棱锥镜间距， M 为卡塞格林扩束单元的放大率。

1.3 大气长程传输模型

在傍轴近似条件下，介质中光场的传播方程可以表示为^[16]

$$2ik \frac{\partial E}{\partial z} = \nabla_{\perp}^2 E + k^2 \left(\frac{n^2}{n_0^2} - 1 \right) E \quad (4)$$

式中： k 为光场的波数， n 和 n_0 分别表示受扰动和无扰动条件下的介质折射率。令 E_n 表示式(4)在平面 z_n 处的解，则在二阶近似条件下^[16]，利用二阶对称分裂算子可将平面 z_{n+1} 处的解 E_{n+1} 表示为

$$E_{n+1} = \exp\left(-\frac{i}{4k} \Delta z \nabla_{\perp}^2\right) \exp\left[-\frac{ik}{2} \int_{z_n}^{z_{n+1}} \left(\frac{n^2}{n_0^2} - 1\right) dz\right] \exp\left(-\frac{i}{4k} \Delta z \nabla_{\perp}^2\right) E_n \quad (5)$$

式中： Δz 表示平面 z_n 与 z_{n+1} 的间距。式(5)表明，非均匀介质中的光场传输问题可以简化为如下三步：第一步为自由空间中距离为 $\Delta z/2$ 的衍射；第二步对光场附加 Δz 距离内介质折射率涨落造成的总扰动相位；第三步同样为自由空间中距离为 $\Delta z/2$ 的衍射。其中， Δz 距离内折射率涨落造成的总扰动相位包含湍流相位和热晕相位两部分。湍流相位可由功率谱反演法构建^[9]，而热晕相位的求解则相对复杂。式(5)中第二项，受热气体折射率与密度的关系可以表示为^[17]

$$\frac{n^2}{n_0^2} - 1 \approx 2(n_0 - 1) \frac{\rho_1}{\rho_0} \quad (6)$$

式中: ρ_0 为介质初始密度, ρ_1 为介质密度扰动, 可由流体力学方程表征^[18]

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + v \nabla \rho_1 = -\frac{(\gamma - 1)\alpha}{C_s^2} I \quad (7)$$

式中: C_s 为介质中的声速, α 为介质的吸收系数, v 为传输链路中的横向风速, γ 为介质的比热容比, I 表示光强。利用有限差分算法求解流体力学方程(7), 经整理后, 介质密度扰动 ρ_1 可表示为

$$\rho_1(x, y, t + \Delta t) = \left[\rho_1(x, y, t) + \frac{v_x \Delta t}{\Delta x} \rho_1(x - \Delta x, y, t + \Delta t) + \Delta t \frac{(\gamma - 1)\alpha}{C_s^2} I \right] \frac{\Delta x}{\Delta x + v_x \Delta t} \quad (8)$$

假设方程(5)的初始条件 E_0 为卡塞格林发射系统输出的环形光场分布, 联立式(3)、(5)、(6)和(8)可求得光传输路径的光场分布。图3给出了光传输方程组的求解流程。

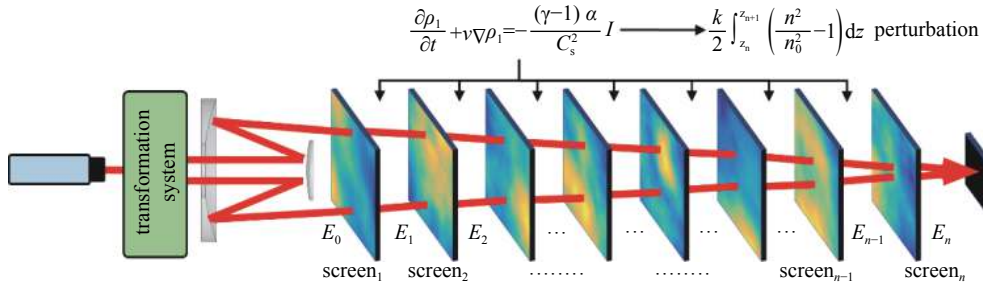


Fig. 3 Schematic illustration of beam propagation in perturbed medium

图3 扰动介质中光场传输求解流程示意图

采用 β 因子评价远场的光束质量, 其定义为^[19]

$$\beta = \frac{r}{r_L} \quad (9)$$

式中: r_L 与 r 分别为薄管激光系统输出环形光束在衍射极限下的焦斑半径与实际远场焦斑的半径, 本文以 86.5% 周围能量所对应的桶半径定义焦斑的半径。

采用斯特列尔比 SR 评价远场光强峰值强弱, 其定义为^[20]

$$SR = \frac{I}{I_L} \quad (10)$$

式中: I_L 与 I 分别为环形光束在衍射极限下的焦斑峰值光强与实际远场焦斑的峰值光强。

2 薄管激光长程传输特性分析

本文计算中所采用的参数如下: “之字形”光路薄管激光增益介质为 Nd:YAG 晶体(折射率 $n=1.82$), 内半径 $R_i=26$ mm, 外半径 $R_o=31$ mm。直角锥面变形镜后表面覆盖四环压电陶瓷驱动器, 每环排布 12 个驱动器, 最内侧与最外侧两环为副驱动器, 内侧两环为主驱动器。每环驱动器角向均匀排布, 主驱动器与副驱动器角向排布偏移 15° 交错排布, 薄管环形光束入射至两环主驱动器之间的有效校正区域, 由主副驱动器共同进行像差校正。压电陶瓷驱动器口径 $D_d=3$ mm, 主驱动器径向间距为 11 mm。直角锥面变形镜基底材料为 BK7 玻璃, 反射面镀有高反膜系($\lambda=1064$ nm)。校正后的环形光束经遮拦比变换后由卡塞格林系统扩束为口径 0.5 m 光束发射, 发射系统焦距 $f=5000$ m。

2.1 薄管激光遮拦比变换特性

本文以内半径 $R_i=26$ mm, 外半径 $R_o=31$ mm 的大遮拦比、窄环宽薄管激光, 与放大率 $M=5$ 、主镜有效口径 $D=0.5$ m、主次镜遮拦比 $\varepsilon=0.5$ 的发射系统匹配为例进行分析。计算中, 轴棱锥次镜 M_1 口径 25 mm, 锥角 $\theta=150^\circ$; 轴棱锥主镜 M_2 外口径 70 mm, 内口径 25 mm, 锥角 $\theta=-150^\circ$; 卡塞格林扩束单元主镜 M_3 外口径 110 mm, 内口径 40 mm, 曲率半径 0.5 m; 卡塞格林扩束单元次镜 M_4 口径 25 mm, 曲率半径 0.1 m, 主次镜间距 $d_2=0.2$ m。通过正负轴棱锥镜组和扩束单元的组合同时调控环形光束遮拦比和口径, 实现全链路环形光束的传输匹配。图4给出了变换前后的薄管激光光强分布。

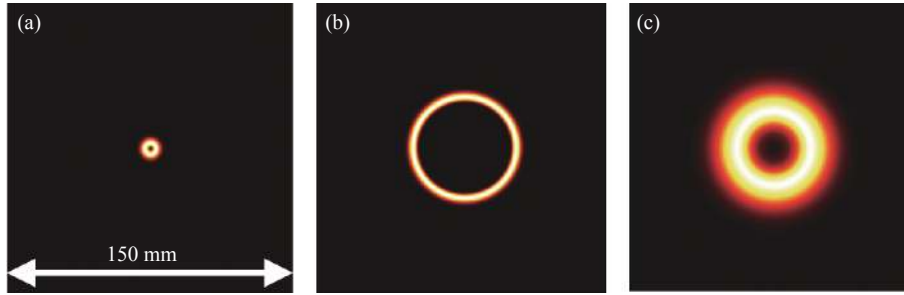


Fig. 4 Intensity distribution of SSZTLs after transformation

图 4 变换前后的薄管激光光强分布

图 4(a)给出了种子源的光强分布,此时的环形光束为 $w_0=5\text{ mm}$ 的小遮拦比、小口径 LG_{01} 拉盖尔高斯模式^[2,4,21]。当遮拦比变换单元 1 的轴棱锥镜间距 $d_1=50\text{ mm}$ 时,经过遮拦比变换单元 1 变换后得到内半径 $R_i=26\text{ mm}$ 、外半径 $R_o=31\text{ mm}$ 、遮拦比 $\varepsilon=0.84$ 的薄管激光,如图 4(b)所示。于是,小遮拦比、小口径的环形光束变换变为大遮拦比、大口径的环形光束,该窄环宽环形光束与薄管增益介质尺寸相匹配,可进一步在薄管增益介质中传输与放大。当遮拦比变换单元 2 的锥镜间距 $d_2=42\text{ mm}$ 时,薄管激光放大系统输出的窄环宽环形光束经过遮拦比变换单元 2 变换为内半径 $R_i=5\text{ mm}$ 、外半径 $R_o=10\text{ mm}$ 、遮拦比 $\varepsilon=0.5$ 的环形光束,再进一步经过卡塞格林扩束系统变换后,输出的环形光束内半径 $R_i=25\text{ mm}$ 、外半径 $R_o=50\text{ mm}$ 、遮拦比 $\varepsilon=0.5$,如图 4(c)所示,该大口径、合适遮拦比的环形光束可与发射系统相匹配。由此可见,使用图 2 所示的薄管激光整形变换系统,通过合理改变系统参数,可实现薄管激光全链路的光束匹配,有利于薄管激光的发射及其大气长程传输。

2.2 薄管激光光源畸变的校正与传输特性

为了便于讨论且不失一般性,假定光束变换系统为理想光学元件而不引入额外像差,计算中仅考虑同心度误差 Δx 、平行度误差 $\Delta\theta$ 、锥度误差 Δa 以及光源平行度误差 $\Delta\theta_s$ 等几类典型薄管加工及装调误差对薄管激光远场光束质量的影响。图 5 给出了当薄管分别具有 $\Delta x=1\text{ }\mu\text{m}$ 同心度误差、 $\Delta\theta=20\text{ }\mu\text{rad}$ 平行度误差、 $\Delta a=200\text{ }\mu\text{rad}$ 锥度误差、 $\Delta\theta_s=100\text{ }\mu\text{rad}$ 光源平行度误差以及存在上述全部误差时,薄管激光在 5 km 自由空间中传输后的靶面光强分布。

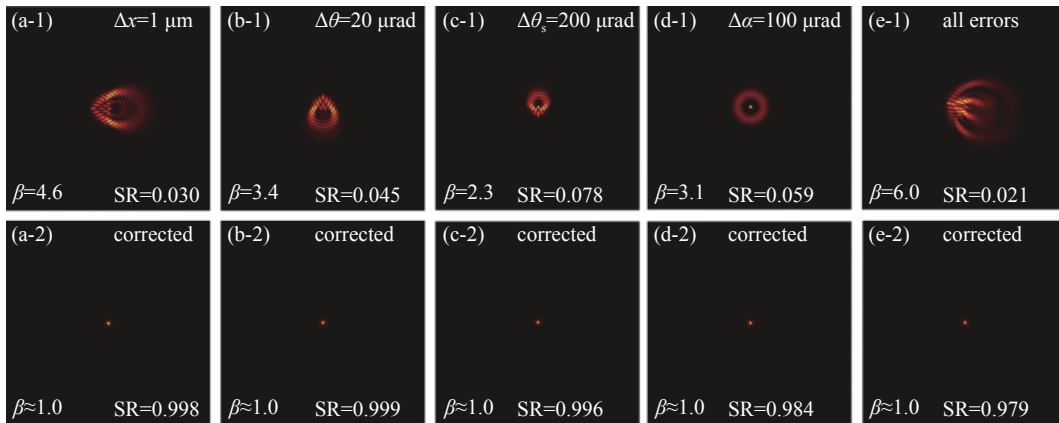


Fig. 5 Intensity distribution of annular laser beam on target plane after 5 km propagation in free space with (a) concentricity error $\Delta x=1\text{ }\mu\text{m}$; (b) parallelism error of tube $\Delta\theta=20\text{ }\mu\text{rad}$; (c) taper error $\Delta a=200\text{ }\mu\text{rad}$; (d) parallelism error of source $\Delta\theta_s=100\text{ }\mu\text{rad}$; (e) errors.

图 5 薄管激光在 5 km 自由空间中传输后的靶面光场分布: (a)同心度误差 $\Delta x=1\text{ }\mu\text{m}$; (b)平行度误差 $\Delta\theta=20\text{ }\mu\text{rad}$; (c)锥度误差 $\Delta a=200\text{ }\mu\text{rad}$; (d)光源平行度误差 $\Delta\theta_s=100\text{ }\mu\text{rad}$; (e)全部误差。

薄管激光光源的波前畸变可分为两类:一类是由同心度误差、平行度误差和光源平行度误差所导致的以离轴像差为主的波前畸变。这类误差将导致薄管激光的远场光强分布出现非均匀弥散,其光斑尺寸沿某一方向明显拉伸,致使薄管激光在长程传输过程中出现严重的光束扩展与质心漂移。另一类为锥度误差所导致的以轴上像差为主的波前畸变。这类误差使薄管激光的远场光强以光轴为中心均匀扩散。从图 5(a1)~(e1)可以看出,薄管激光光源存在加工及装调误差时,其远场光束质量将受到严重影响,薄管激光难以有效聚焦于远场靶面,远场的峰值光强相比于理想情况有数十倍的下降,因而光源因加工及装调误差而引入的波前畸变严重制约了薄管激光的长程传输与聚焦能力。欲提升薄管激光的长程传输能力,则首先需要对光源光束质量进行严格控制。进一步分析图 5(a2)~

(e2)可知,利用直角锥面变形镜对薄管激光光源像差进行校正后,薄管激光的远场光束质量得到了极大的改善,远场光斑尺寸接近衍射极限,峰值强度也接近理论值。此外,由离轴像差导致的远场质心漂移也得到了有效控制。图6进一步给出了利用直角锥面变形镜校正前后薄管激光光束质量 β 因子随加工及装调误差的变化。

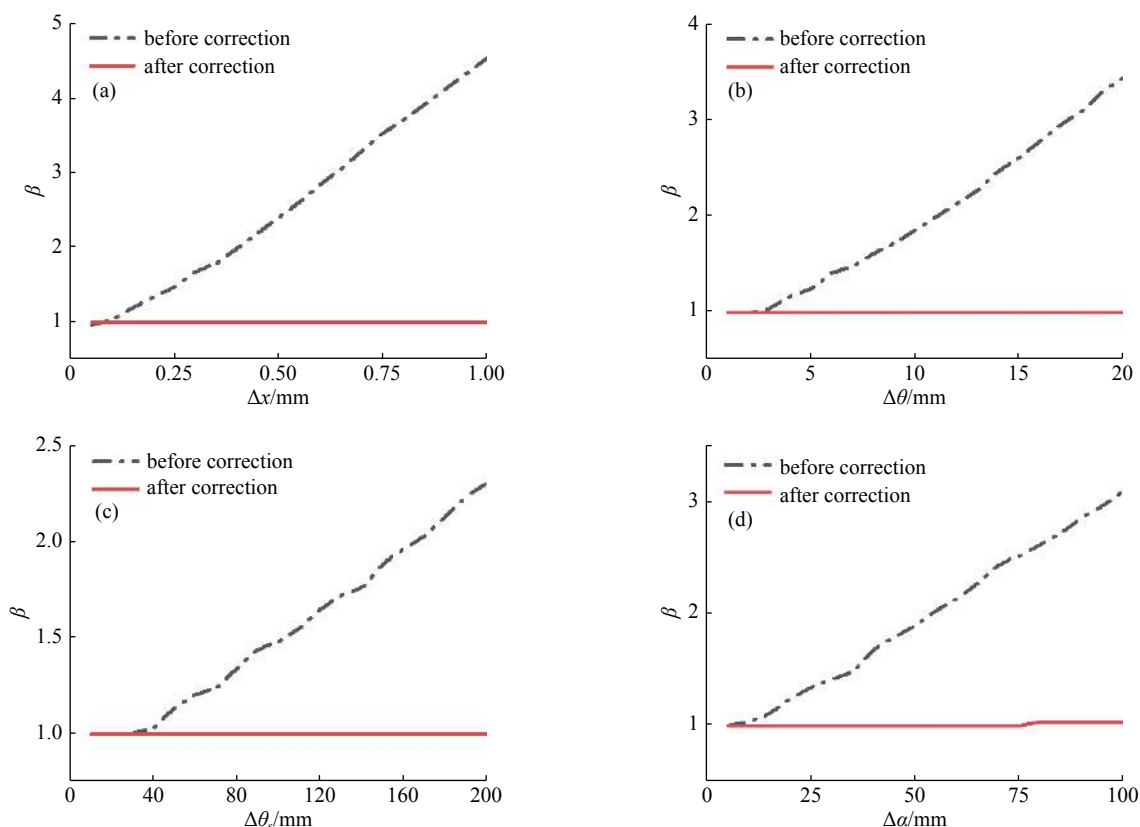


Fig. 6 Beam quality of annular laser beams before and after correction

图 6 校正前后薄管激光的远场光束质量

从图6可以看出,在未使用直角锥面变形镜对薄管激光光源进行校正时,随着加工及装调误差的增大,薄管激光长程传输后远场的光束质量迅速退化。然而,校正后的薄管激光的远场光束质量 β 因子接近1,其聚焦能力得到大幅改善。由此可见,直角锥面变形镜对多种类型、不同程度的光源畸变均具有很好的校正能力,从而可为薄管激光在大气中的高质量长程传输提供可能。

2.3 薄管激光的大气长程传输特性

针对薄管激光的大气长程传输问题,首先考虑低功率条件下聚焦薄管激光在大气湍流中的传输(即无热晕效应)。计算中,利用直角锥面变形镜同时校正薄管激光光源的静态畸变和大气湍流导致的波前畸变。由于直角锥面变形镜是一种特殊构型的边缘驱动变形镜,其有效驱动单元的空间密度有限,因而仅能对大气湍流引入的相位扰动中的低频分量进行校正。图7给出了利用直角锥面变形镜校正光源静态畸变和低频大气湍流畸变后的聚焦薄管激光远场光强分布。计算中,折射率结构常数 $C_n^2=1\times 10^{-14}$ 时表征强湍流, $C_n^2=1\times 10^{-15}$ 时表征中等强度湍流。

分析图7可知,由于大气湍流导致的波前畸变中既有低频成分也有高频成分,薄管激光的远场焦斑整体在上

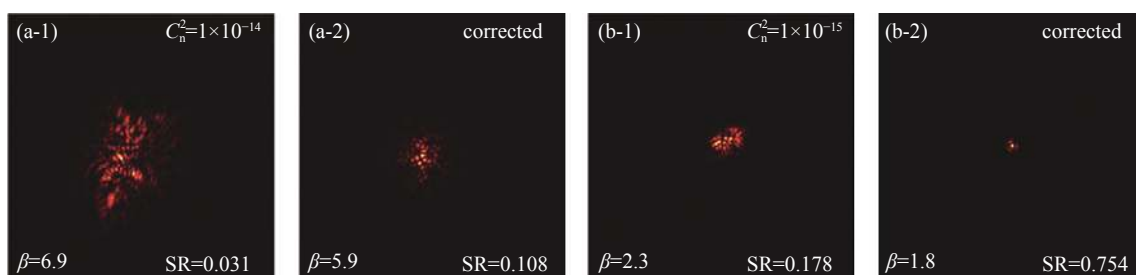


Fig. 7 Intensity distribution of annular laser beam on target plane after 5 km propagation in turbulence: (a) $C_n^2=1\times 10^{-14}$; (b) $C_n^2=1\times 10^{-15}$.

图 7 薄管激光在 5 km 大气湍流中传输后的靶面光场分布: (a) $C_n^2=1\times 10^{-14}$; (b) $C_n^2=1\times 10^{-15}$ 。

出现扩展的同时,焦斑内部也会出现较多散斑。并且,大气湍流强度越强,光束的扩展越严重,焦斑内部的散斑也越多。在利用直角锥面变形镜对大气湍流引入位相扰动的低频成分进行校正后,远场焦斑的能量集中度有所改善,靶面斯特列尔比明显提高。需要指出的是,薄管激光经大气长程传输后的光束质量并未出现大幅提升,特别是强湍流情况下,校正后焦斑内部仍存在较多散斑,其主要原因是直角锥面变形镜仅能有效校正大气湍流引入位相畸变的低频分量,而对高频分量的校正效果较差的缘故。

为了说明薄管激光长程传输的光束扩展和质心漂移情况,图8给出了聚焦薄管激光在大气湍流中传输时,其光斑平均半径 \bar{w} 和质心漂移 Δr 随传输距离的变化情况。

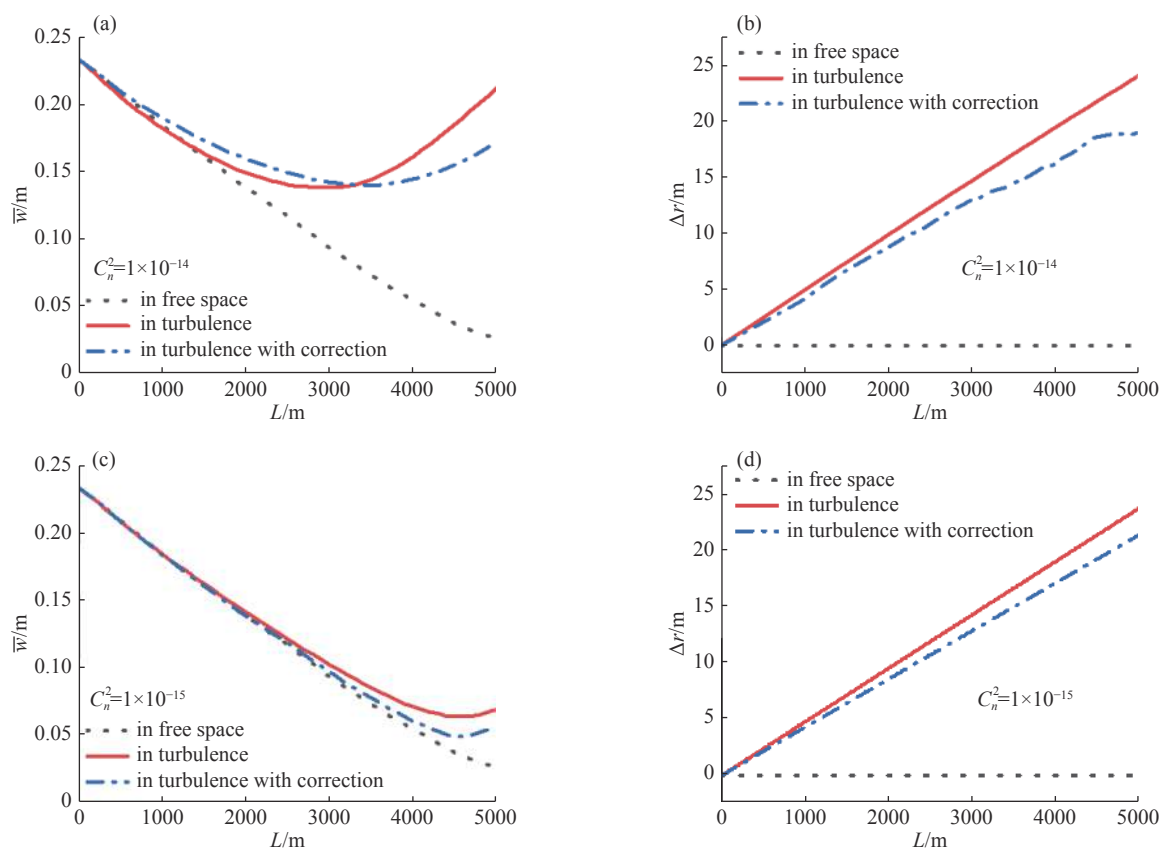


Fig. 8 Variation of \bar{w} and Δr of laser beam for different propagation distance

图8 光斑平均半径 \bar{w} 和质心漂移 Δr 随传输距离的变化

从图8可以看出,随着传输距离的增加,光斑平均半径 \bar{w} 先逐渐减小而后再进一步增大。在大气长程传输初期,聚焦效应占主导地位,大气湍流导致的光束扩展较弱,因而光斑平均半径 \bar{w} 先逐渐减小。随着传输距离的进一步增大,湍流效应对光束的影响愈发严重,从而使得光斑平均半径 \bar{w} 开始逐渐增大。特别是,随着大气湍流强度的增强,光斑平均半径 \bar{w} 的极小值点越早出现,靶面上的光斑平均半径 \bar{w} 越大。经直角锥面变形镜校正后,薄管激光光斑平均半径 \bar{w} 的极小值点相比于未校正时滞后出现,且靶面上的光斑平均半径 \bar{w} 有所降低,表明薄管激光在大气湍流中的长程传输能力在一定程度上得到了改善。进一步分析图8(b)、(d)可知,大气湍流会导致聚焦薄管激光远场焦斑的质心偏离光轴,且传输距离越大,大气湍流强度越强,焦斑质心漂移 Δr 越严重。值得指出的是,直角锥面变形镜所具备的使薄管激光径向翻转特性,使得直角锥面变形镜仅能附加中心对称的共轭波前分布。因此,在对薄管激光光源畸变进行校正时,利用薄管激光离轴像差自校正的特性,直角锥面变形镜可以同时校正光源离轴像差与轴上像差。然而,在对大气湍流进行校正时,直角锥面变形镜仅能校正轴上像差,因而由离轴像差导致的质心漂移 Δr 并未获得明显改善。

当高功率薄管激光在大气中传输时,不仅会受到大气湍流效应的影响,还会由于激光加热大气而出现非线性热晕效应。在无湍流的大气中,由于激光加热空气,致使空气膨胀向四周扩散,出现中心密度低边缘密度高的非均匀气体分布,产生类似于“负透镜”的自散焦效应。此外,横向风会导致受热空气产生横向移动,自散焦的同时还会出现光束的自偏移。随着时间的增长,热晕相位高频分量会逐渐累积,当传输链路中同时存在湍流时,高频相位进一步增大,进而导致远场焦斑的弥散与焦斑内部的高频散斑。图9给出了10 kW薄管激光经5 km大气传输后

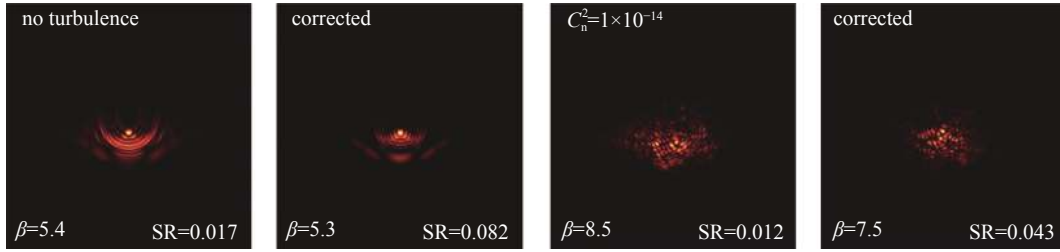


Fig. 9 Intensity distribution of high-power annular laser beam on target plane after 5 km propagation (steady-state thermal blooming)

图 9 高功率薄管激光 5 km 传输后的靶面光场分布(稳态热晕)

的靶面光场分布, 路径中有效横向风速 $v=1$ m/s。

从图 9 可以看出, 当使用直角锥面变形镜对热晕效应校正后, 远场焦斑仍具有较多的高频成分, 光束质量并未得到显著改善, 但远场焦斑主峰强度却明显提高。这是因为直角锥面变形镜仅能校正自散焦导致的离焦相位, 从而改善远场焦斑的峰值强度。图 10 给出了高功率聚焦薄管激光在大气湍流中传输时, 其光斑平均半径 \bar{w} 和质心漂移 Δr 随传输距离的变化情况。

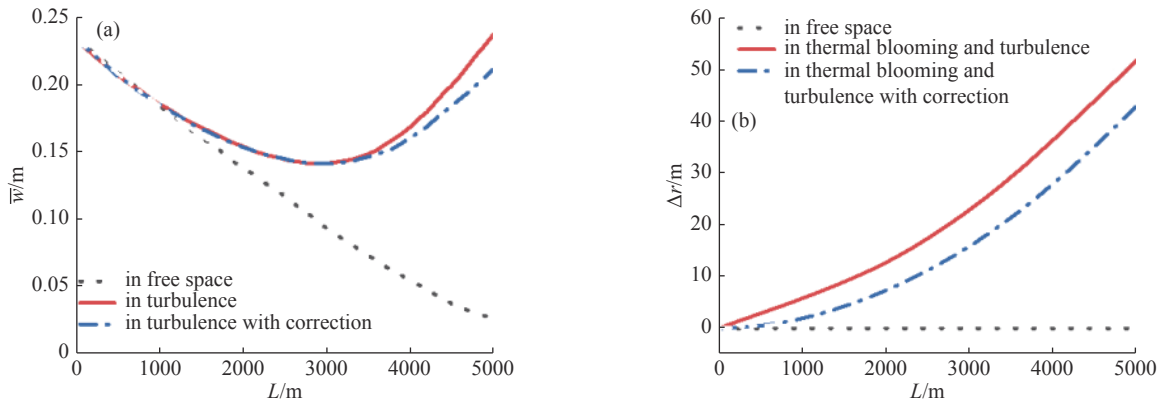


Fig. 10 Variation of \bar{w} and Δr of laser beam for different propagation distance (with correction by right-angle conical deformable mirror)

图 10 光斑平均半径 \bar{w} 和质心漂移 Δr 随传输距离的变化(直角锥面变形镜校正)

从图 10 可以看出, 校正后的高功率薄管激光靶面上的光斑平均半径 \bar{w} 有所降低, 但由于欠缺对离轴像差的校正能力, 远场的质心漂移 Δr 并未得到明显改善。总体上来说, 直角锥面变形镜对大气湍流和热晕效应均具有一定的校正能力, 可以在一定程度上提升聚焦薄管激光远场斯特列尔比。然而, 若要对薄管激光大气传输过程中引入的波前畸变有效校正, 仍需要进一步与常规多单元数变形镜进行联用。图 11 进一步给出了利用 137 单元变形镜^[22]校正后, 大气长程传输后的靶面光斑平均半径 \bar{w} 和质心漂移 Δr 随传输距离的变化。需要指出的是, 137 单元变形镜重点针对湍流和热晕进行校正, 而光源畸变则主要由直角锥面变形镜进行消除, 其主要原因在于薄管激光光源波前畸变 PV 值可达数十 μm 量级, 仅利用常规变形镜无法同时对光源畸变和大气传输畸变进行校正。

从图 11 可以看出, 由 137 单元变形镜校正后的薄管激光大气长程传输后在靶面上的光斑平均半径 \bar{w} 明显降

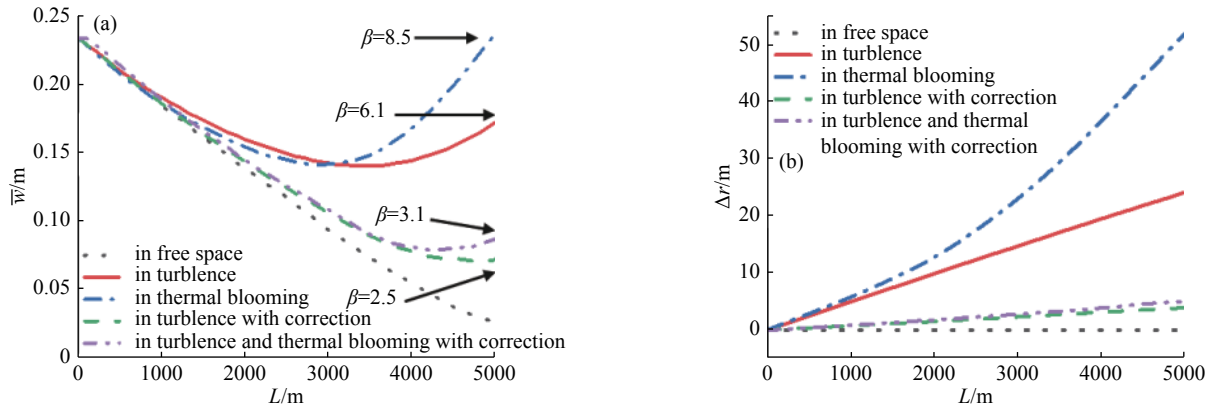


Fig. 11 Variation of \bar{w} and Δr of laser beam for different propagation distance (with correction by 137-unit deformable mirror)

图 11 靶面光斑平均半径 \bar{w} 和质心漂移 Δr 随传输距离的变化(137 单元变形镜校正)

低,质心漂移效应也明显减弱。由此可见,即使在薄管激光光源不可避免地存在加工及装调误差条件下,其输出薄管激光在直角锥面变形镜和常规变形镜的联合校正下的大气长程传输能力得到了显著的提升,远场光束质量明显改善。

3 结 论

针对“之字形”光路薄管固体激光在应用中亟待解决的整形变换、波前校正与长程传输等问题,开展了薄管固体激光大气长程传输光束质量分析。为解决薄管激光与发射系统的匹配问题,提出了一种薄管激光环形光束整形变换方案。该方案利用轴棱锥镜组和卡塞格林扩束单元组合,可实现大遮拦比、窄环宽环形光束遮拦比与口径的同时调控,为大遮拦比、窄环宽薄管激光的传输应用提供了可能。在此基础上,分析了薄管激光光源光束质量、大气湍流效应和热晕效应等对薄管激光长程传输特性的影响及规律。研究结果表明,薄管激光光源存在的加工及装调误差引入的波前畸变将严重限制薄管激光长程传输能力,而大气湍流和热晕效应则会进一步导致薄管激光远场焦斑出现弥散与漂移。为此,提出了基于直角锥面变形镜的薄管激光光束校正方法,进而分析了直角锥面变形镜对薄管激光光源的波前畸变、大气湍流的低频分量和热晕导致的离焦相位等的校正效果。结果表明,经过直角锥面变形镜的校正,薄管激光光源的波前畸变得到了有效控制,光源光束质量显著提高,大气长程传输光束质量也得到一定程度的改善,靶面光斑斯特列尔比有所提升。通过进一步与常规变形镜联用,可实现薄管激光大气长程传输光束质量的显著改善。

参考文献:

- [1] Savich M. High power tube solid-state laser with zigzag propagation of pump and laser beam[C]//Proceedings of SPIE 9342, Solid State Lasers XXIV: Technology and Devices. 2015: 934216.
- [2] Tian Boyu, Zhong Zheqiang, Huang Cong, et al. Analysis on beam quality of solid-state tube MOPA system with zigzag beam path[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11: 1501311.
- [3] Wittrock U, Weber H, Eppich B. Inside-pumped Nd: YAG tube laser[J]. Optics Letters, 1991, 16(14): 1092-1094.
- [4] Tian Boyu, Yu Jiangchuan, Zhang Bin. Theoretical study on beam quality and thermal stability in solid-state zigzag tube laser amplifier[J]. Optical Engineering, 2020, 59: 076104.
- [5] Williams M D, Conway E J. Space laser power transmission system studies[R]. Langley: NASA, 1982.
- [6] Cook J R, Albertine J R. The Navy's high-energy laser weapon system[C]//Proceedings of SPIE 2988, Free-Electron Laser Challenges. 1997: 264-271.
- [7] Venkatesan K. The study on force, surface integrity, tool life and chip on laser assisted machining of Inconel 718 using Nd: YAG laser source[J]. Journal of Advanced Research, 2017, 8(4): 407-423.
- [8] Sun Chuang, Wang Deen, Deng Xuwei, et al. Numerical analysis of a novel two-stage enlargement and adaptive correction approach for the annular aberration compensation[J]. Optics Express, 2019, 27(18): 25205-25227.
- [9] Herman B J, Strugala L A. A. Method for inclusion of low-frequency contributions in numerical representation of atmospheric turbulence[C]//Proceedings of SPIE 1221, Propagation of High-Energy Laser Beams Through the Earth's Atmosphere. 1990: 183-192.
- [10] Zhang Yuqiu, Ji Xiaoling, Li Xiaoqing, et al. Thermal blooming effect of laser beams propagating through seawater[J]. Optics Express, 2017, 25(6): 5861-5875.
- [11] 何婷, 田博宇, 邱蝶, 等. 基于直角锥面变形镜的薄管激光光束质量提升新方法[J/OL]. 物理学报. (2021-05-10). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFQ&dbname=CAPLAST&filename=WLXB20210506004>. (He Ting, Tian Boyu, Qiu Die, et al. Novel method for improving beam quality of thin-wall tube laser based on right-angle cone deformable mirror[J/OL]. Acta Physica Sinica. (2021-05-10). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFQ&dbname=CAPLAST&filename=WLXB20210506004>)
- [12] Laslandes M, Hugot E, Ferrari M. Active optics: deformation systems compensating for optical aberrations with a minimum number of actuators[C]//Proceedings of SPIE 8450, Modern Technologies in Space- and Ground-based Telescopes and Instrumentation II. 2012: 84500J.
- [13] 余江川, 田博宇, 钟哲强, 等. 大遮拦比薄管激光环域像差校正方法[J]. 中国激光, 2020, 47: 0905001. (Yu Jiangchuan, Tian Boyu, Zhong Zheqiang, et al. Method for annular aberration correction of large-aperture thin-wall tube lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47: 0905001)
- [14] 李佳, 田博宇, 余江川, 等. 双管级联薄管激光放大器环域像差自补偿方法[J]. 中国激光, 2021, 48: 1301006. (Li Jia, Tian Boyu, Yu Jiangchuan, et al. Method for self-correction of annular off-axis aberrations in two-stage tube laser amplifiers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48: 1301006)
- [15] Arora R K, Lu Z. Graphical study of Laguerre-Gaussian beam modes[J]. IEE Proceedings—Microwaves, Antennas and Propagation, 1994, 141(3): 145-150.
- [16] Fleck Jr J A, Morris J R, Feit M D. Time-dependent propagation of high energy laser beams through the atmosphere[J]. Applied Physics, 1976, 10(2): 129-160.
- [17] Walsh J L, Ulrich P B. Thermal blooming in the atmosphere[M]//Strohbehn J W. Laser beam propagation in the atmosphere. Berlin Heidelberg: Springer, 1978: 223-320.
- [18] Landau L D, Lifshitz E M. Course of theoretical physics, Vol. 6 Fluid mechanics[M]. Oxford: Pergamon Press, 1959: 6.

- [19] 杜祥琬. 实际强激光远场靶面上光束质量的评价因素[J]. *中国激光*, 1997, 24(4): 327-332. (Du Xiangwan. Factors for evaluating beam quality of a real high power laser on the target surface in far field[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1997, 24(4): 327-332)
- [20] Mahajan V N. Strehl ratio of a Gaussian beam[J]. *Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision*, 2005, 22(9): 1824-1833.
- [21] Tian Boyu, Yu Jiangchuan, Zhang Bin. A method for generating LG_{0l} vortex beams with tunable topological charges based on tube lasers[J]. *Optics Communications*, 2021, 491: 126939.
- [22] 林旭东, 刘欣悦, 王建立, 等. 基于压电陶瓷促动器的连续镜面变形镜研制进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51: 090003. (Lin Xudong, Liu Xinyue, Wang Jianli, et al. Progress of the continuous surface deformable mirror based on piezo-ceramic actuator[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51: 090003)

《强激光与粒子束》入选《WJCI 报告 (2020 STM)》

近日,《世界期刊影响力指数(WJCI)报告》(以下简称《WJCI 报告》)网络版发布,《强激光与粒子束》入选《WJCI 报告 (2020 STM)》。《WJCI 报告》是由中国科学技术信息研究所、《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、清华大学图书馆、万方数据有限公司、中国高校科技期刊研究会联合研制的期刊评价报告。该报告是中国科学技术协会专题资助课题《面向国际的科技期刊影响力综合评价方法研究》(2019KJQK004)的成果,入选了“科创中国”项目。《WJCI 报告》旨在建立一个全新的期刊评价体系,入选期刊均被认为是具有地区代表性和学科代表性的优秀期刊。《强激光与粒子束》本次入选《WJCI 报告》电子技术(Q3)、电子物理学(Q3)、原子分子物理学(Q4)、高能物理学(Q4)学科。

WJCI 报告较为全面、客观、综合地评价科技期刊在当今社会对全球科技创新活动提供的出版传播服务及其学术影响力,客观反映了以中国为代表的新兴科技大国的真实贡献,为世界学术期刊的学术影响力提供更为客观的统计方法和综合排序,推动世界科技期刊公平评价、同质等效使用。经严格评议,WJCI 报告最终收录全球科技期刊 14287 种,约占全球活跃科技期刊 6 万种的四分之一,很好地体现了地区代表性和学科代表性。WJCI 报告共收录中国科技期刊 1426 种,专家审议后普遍认为这些期刊与该报告

的其他期刊一样,达到了国际优秀期刊的水平。其中,中国期刊进入 WJCI-Q1 区的期刊有 172 种,占全球 Q1 期刊 4.6%,占中国来源期刊的 12.1%;中国入选 Q2 区期刊有 345 种,占全球 Q2 期刊 8%,占中国入选期刊 24.2%。中国 Q1Q2 区期刊排重后共 488 种,占全球 Q1Q2 期刊的 6.61%,占中国统计源期刊的 34.22%。

《强激光与粒子束》编辑部

