

# 紧凑型光谱组束系统中光纤阵列扰动对光束质量的影响分析

王勇能<sup>1</sup>, 李福建<sup>2</sup>, 饶大幸<sup>2</sup>, 崔勇<sup>2\*</sup>, 赵晓晖<sup>2</sup>, 贺瑞敬<sup>2</sup>, 季来林<sup>2</sup>, 高妍琦<sup>2</sup>, 隋展<sup>2</sup>, 陈华才<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国计量大学光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018;

<sup>2</sup>中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800

**摘要** 定量分析光纤阵列位移及指向扰动偏差对合束激光光束质量因子  $M^2$  的影响规律是实现合束激光光束质量有效控制的前提。根据衍射积分推导了紧凑型光谱组束系统中光纤阵列存在不同位移、指向扰动时合束激光的远场光强分布, 利用 Heisenberg 不确定性原理推导出了合束激光光束质量因子  $M^2$  的表达式。在恒定的子束数目下, 分析了单路/多路光束分别存在位移、指向扰动偏差时合束激光光束质量因子  $M^2$  的变化情况, 并在一定的随机位移、指向扰动偏差下对不同于子束数量的合束激光的光束质量因子  $M^2$  进行了误差分析。结果显示: 合束激光光束质量因子  $M^2$  对沿光纤端面水平 ( $x$  轴) 方向的扰动量最为敏感, 需要控制在微米量级; 确定了光纤阵列的不同扰动量与合束激光光束质量因子  $M^2$  之间的定量关系, 给出了光纤阵列位移、指向精度控制要求; 当参与合束的子束数量超过 23 束时, 在特定的随机扰动量下, 合束激光的光束质量因子  $M^2$  的统计均值分别趋向各自的稳定值 1.37、1.34、1.25, 而标准差分别趋于 0.05、0.06、0.04。

**关键词** 光纤光学; 光纤阵列; 光束质量; 光谱组束; 紧凑型组束系统

中图分类号 TN241

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220826

## 1 引言

光纤激光器在高功率输出的同时具有光束质量好、抗干扰能力强、光-光转换效率高、占用空间小、散热性能优良、结构紧凑等特性, 已成为新一代高功率光源, 人们对其进行研究的热门方向包括提升单纤输出功率<sup>[1-5]</sup>、多路激光合束<sup>[6-7]</sup>及提升光纤激光器的光束质量<sup>[8-9]</sup>等。由于受激布里渊散射、模式不稳定、受激拉曼散射<sup>[10-14]</sup>等因素的影响, 单纤的输出能力提升受到了一定限制, 并且单纤的输出功率存在理论上的阈值<sup>[15]</sup>。尽管可以通过对窄线宽光纤激光器进行相位调制来展宽光谱进而抑制光纤中的受激布里渊散射效应<sup>[16]</sup>, 或者可以通过使用大模场、双锥形光纤来优化光纤放大器参数, 进而抑制受激布里渊散射效应和受激拉曼散射效应<sup>[17-19]</sup>, 但这些方法难以使光纤激光器的输出功率实现量级上的提升。多路激光合束是目前突破单纤输出功率的有效方法之一。常见的多路激光合束方法包括相干合束、空间合束、偏振合束和光谱合束<sup>[20-21]</sup>等。其中: 相干合束方法可以大幅提升合成激光的输出功率并使其保持较好的光束质量, 但该方法对参与合束的各子光束的相位控制要求极高, 一般需要采用锁相技术<sup>[22-23]</sup>配合相应的算法来控制相位, 工

程实现较为复杂; 空间合束可以提升合成激光的输出功率, 但会使合束激光的光束质量下降; 偏振合束尽管可以提升合束激光的输出功率, 但受限于偏振晶体的损伤阈值, 提升效果有限<sup>[21]</sup>, 且往往需要与相干合束方法结合使用<sup>[24]</sup>; 光谱合束方法利用光栅、棱镜等色散元件将多路不同波长的子光束合成, 以实现高功率激光输出, 而且合束过程中无须对各子光束的相位进行严格控制, 更为简便且能获得接近衍射极限的光束, 是目前实现高功率光纤激光输出较为理想、可靠的途径之一。

光束质量是评价光纤激光器输出性能优劣的重要指标之一。用于评价激光光束的参数包括发散角、激光亮度、桶中功率、环围能量和光束质量因子  $M^2$  等, 其中的光束质量因子  $M^2$  是评价光纤合束激光优劣的主要参数之一。用实际光束宽度与其远场发散角的乘积除以理论光束宽度与其远场发散角的乘积即可得到光束质量因子  $M^2$ ,  $M^2 \geq 1$ ,  $M^2$  越大表示光束质量越差。在光谱组束方法中, 合束激光输出功率的提升主要通过增加参与合束的子光束数目或增大子光束功率等方式实现, 但由于存在子光束扰动偏差、变换透镜像差、光栅热畸变、子光束光源线宽等影响因素, 相较于子光束, 合成激光的光束质量会发生退化。国内外针对合

收稿日期: 2022-05-07; 修回日期: 2022-06-14; 录用日期: 2022-07-04; 网络首发日期: 2022-07-15

通信作者: \*yong\_cui@126.com

成激光光束质量的影响因素开展了一系列研究,如:2004年,Aculight公司的研究人员<sup>[25]</sup>讨论分析了子光束线宽对合束激光光束质量因子 $M^2$ 的影响,并提出了利用三块衍射光栅实现光谱合束的新方法(其中:一块光栅用于光谱合束,锁定波长;另外两块光栅作为补偿光栅对,补偿由于光束线宽引起的额外色散),该方法成功地将合束激光的光束质量因子 $M^2$ 从11优化到2;2016年,中国工程物理研究院应用电子学研究所的颜宏团队<sup>[26]</sup>通过严格控制子束线宽拓展合成路数,基于双光栅色散补偿进行光谱合束,获得了光束质量因子 $M^2$ 为2.9、功率为9.6 kW的合束激光输出;2010年以来,四川大学电子信息学院的张艳、钟哲强等<sup>[27-29]</sup>利用衍射积分和光束非相干叠加原理先后建立了基于闪耀光栅、多层介质膜光栅的合成系统的光传输模型,讨论了光栅槽深、子光束入射角、光栅占空比等参数对合束激光光强分布的影响,并根据强度二阶矩方法推导了合束激光的光束质量因子表达式,同时分析了变换透镜像差对合束激光光束质量因子 $M^2$ 的影响;中国科学院上海光学精密机械研究所的周军团<sup>[30-31]</sup>针对子光束的扰动偏差、变换透镜像差及光栅热畸变等因素对合束激光光束质量因子 $M^2$ 的影响进行了相关研究,推导了光纤阵列存在水平位移扰动或指向扰动时合束激光的光强分布及 $M^2$ 表达式,分析了随机位移、指向扰动偏差对合束激光光束质量因子 $M^2$ 的影响,并通过实验验证了光栅热效应对合束激光光斑的影响。

在上述研究中,光谱组束系统的光纤阵列排布大多是将中心光纤对准变换透镜中心,其余子光纤关于中心光纤对称放置。不同波长的子光束以不同的角度入射至光栅,其衍射角满足光栅方程,所有子光束以相

同的衍射角从光栅表面衍射,形成合束激光。当需要对合束激光进行光束质量评价时,须用另一块变换透镜进行聚焦,以便测量。在此类传统型光谱组束系统中,各子光束的排布不够紧密,相邻光纤间隔甚至达到了mm量级,当扩展子光束数量时,会导致系统的占用空间较大。紧凑型光谱组束系统因光路空间复用以及光纤阵列的紧密排布设计而使得系统的占用空间较小。本团队通过理论仿真分析获得了光纤阵列位移、指向偏差加工精度及装调精度的控制需求,并确认了拓展合成光束数量不会显著提高精度控制需求,为后续研制高功率、高光束质量、小型化光纤激光器系统提供了有益参考。

## 2 紧凑型光谱组束系统的光场传输模型

传统型光谱组束系统、紧凑型光谱组束系统示意分别如图1(a)、(b)所示。在紧凑型光谱组束系统中,光纤阵列关于透镜中心轴偏心放置,但阵列中的中心光纤与合束输出光束焦点关于透镜中心轴对称,即使用同一块变换透镜对子光束先后进行准直、聚焦,光纤间隙也能控制在 $\mu\text{m}$ 量级,从而使得入射角与衍射角均接近光栅的利特罗角,因此衍射效率和组束效率大大提升,同时大大减小了系统的占用空间。由于加工误差、人工装配误差的存在,光纤阵列存在扰动偏差,从而影响了合束激光的光束质量因子 $M^2$ 。因此,在光纤阵列存在扰动偏差时,需要对紧凑型光谱组束系统中合束激光的光束质量因子 $M^2$ 进行误差分析,以获取该类光谱组束系统的扰动控制需求,从而指导系统设计。

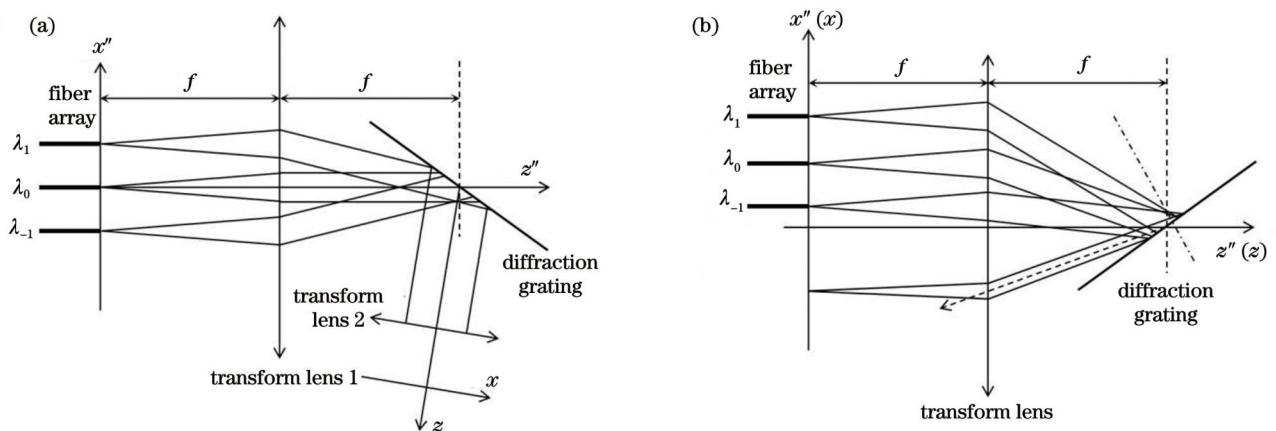


图1 光谱组束系统。(a)传统型光谱组束系统;(b)紧凑型光谱组束系统

Fig. 1 Spectral beam combination systems. (a) Traditional spectral beam combination system; (b) compact spectral beam combining system

### 2.1 光场衍射传输模型

假设透镜为理想的薄透镜,光栅为理想的多层介质膜光栅,不考虑透镜、光栅热畸变的影响,并将光源设为基模高斯光束,光纤阵列端面定为源平面。

由图2(a)可以看出,当光纤阵列处于理想无偏差状态时,将阵列端面、衍射光栅分别放置于变换透镜两侧一倍焦距处,可使光纤阵列中的输出光束第一次经过变换透镜后准直成平行光并入射至光栅,

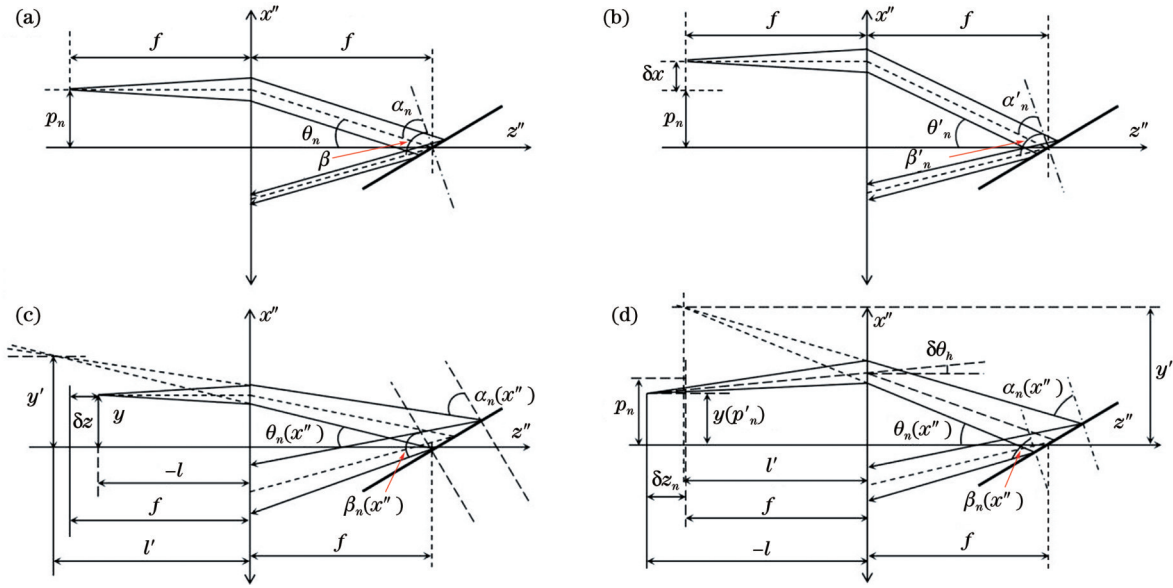


图 2 第  $n$  束子光束在不同偏差情况下的光路示意图。(a) 无偏差; (b)  $x$  轴位移偏差; (c)  $z$  轴位移偏差; (d) 水平指向偏差

Fig. 2 Schematics of light path of the  $n$ th subbeam in cases of different deviations. (a) Without deviation; (b)  $x$ -axis displacement deviation; (c)  $z$ -axis displacement deviation; (d) horizontal pointing deviation

各子光束衍射后以相同的衍射角  $\beta$  形成合束激光, 接着光束第二次经过变换透镜, 经透镜聚焦后仍保持为理想的高斯光束。第  $n$  路子光束在源场处的光场分布为

$$E_n^{x''}(x_0, 0) = E_0 \exp \left[ -\frac{(x_0 - p_n)^2}{\omega_0^2} \right], \quad (1)$$

式中:  $E_0$  为入射子光束的中心振幅;  $p_n$  为第  $n$  路子光束与光轴的距离;  $\omega_0$  为子光束的束腰半径;  $x_0$  表示子光束在  $x$  轴上的坐标。当第  $n$  路子光束存在  $x$  轴位移偏差  $\delta x$  ( $\delta x$  沿  $x$  正半轴方向时为正, 反之为负) 时, 子光束在衍射光栅上的入射角变为  $\alpha'_n$ , 由于其入射波长仍为  $\lambda_n$ , 根据光栅衍射方程

$$d(\sin \alpha'_n + \sin \beta'_n) = m\lambda_n, \quad (2)$$

可得第  $n$  路子光束存在  $x$  轴位移偏差时源场的光场分布为

$$E_n^{x''}(x_0, 0) = E_0 \exp \left[ -\frac{(x_0 - p_n - \delta x)^2}{\omega_0^2} \right], \quad (3)$$

式中:  $d$  为光栅常数;  $\beta'_n$  为光纤阵列仅存在  $x$  轴位移偏差时第  $n$  路子光束的衍射角;  $m$  为衍射级次 ( $m = \dots, -1, 0, 1, \dots$ ), 对于多层介质膜光栅, 为不失一般性, 取  $m = 1$ 。

当光纤阵列中的第  $n$  路子光束存在  $z$  轴位移偏差  $\delta z$  [称为离焦量  $\delta z$ , 如图 2(c) 所示,  $\delta z$  沿光轴方向为正, 反之为负] 时, 其经过透镜后不再为平行光束 ( $\delta z$  取正时, 经过透镜后表现为发散光束;  $\delta z$  取负时, 经过透镜后表现为会聚光束), 子光束经光栅衍射后仍为发散或会聚光束, 此时第  $n$  路子光束的源场光场分布为

$$E_n^{x''}(x_0, \delta z) = E_0 \exp \left[ -\frac{(x_0 - p_n)^2}{\omega_0^2} \right]. \quad (4)$$

当光纤阵列中的第  $n$  路子光束存在绕坐标原点水平指向偏差  $\delta \theta_h$  时 [如图 2(d) 所示,  $\delta \theta_h$  沿顺时针方向为正, 反之为负], 子光束产生离焦量  $\delta z_n$ , 并发生横向位移, 其与光轴间隔变为  $p'_n$ , 同时子光束的中心光线不再垂直入射至变换透镜, 而是以一定角度 (与光轴方向夹角为  $\delta \theta_h$ ) 入射至变换透镜, 此时第  $n$  路子光束的源场光场分布为

$$E_n^{x''}(x_0, \delta z_n) = E_0 \exp \left[ -\frac{(x_0 - p'_n)^2}{\omega_0^2} \right] \times \exp [jk_n \tan(\delta \theta_h) x_0], \quad (5)$$

式中:  $p'_n$  为第  $n$  路子光束仅存在绕坐标原点水平指向偏差  $\delta \theta_h$  时其与光轴间隔;  $\exp [jk_n \tan(\delta \theta_h) x_0]$  表示倾斜相位因子;  $k_n$  表示第  $n$  路子光束的波矢量。结合式 (1)、式 (3)~(5), 根据菲涅耳衍射积分<sup>[29]</sup>, 当第  $n$  路子光束分别处于无偏差、存在  $x$  轴位移偏差、存在  $z$  轴位移偏差、存在绕坐标原点水平指向偏差时, 其在变换透镜处的光场分布为

$$E_n^{x''}(x'', z''_0) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F} \left\{ E_n^{x''}(x_0, Z''_n) \right\} H(f_x, z''_0) \right\}, \quad (6)$$

$$H_0(f_x, z''_0) = \exp(jk_n z''_0) \exp(-jz''_0 \lambda_n \pi f_x^2), \quad (7)$$

式中:  $Z''_n$  为第  $n$  路子光束在源场  $z$  轴方向上的初始坐标;  $f$  为透镜焦距 (为正值);  $H_0(f_x, z''_0)$  表示从源坐标系到透镜端面的传递函数;  $z''_0$  表示第  $n$  路子光束从源平面至透镜端面的距离;  $E_n^{x''}(x_0, Z''_n)$  为第  $n$  路子光束的源场光场分布。当第  $n$  路子光束处于无偏差状态或仅存在  $x$  轴位移偏差时,  $z''_0$  为  $f$ ; 当第  $n$  路子光束仅存

在  $z$  轴位移偏差时,  $z''_0$  为  $f - \delta z$ ; 当第  $n$  路子光束仅存在绕坐标原点水平指向偏差时,  $z''_0$  为  $f - \delta z_n$ ,  $\delta z_n$  为  $p_n \sin(\delta\theta_n)$ 。当第  $n$  路子光束处于无偏差状态或仅存在  $x$  轴位移偏差时,  $E_n^x(x_0, Z''_n)$  分别用式(1)、式(3)代替,  $Z''_n$  取 0; 当第  $n$  路子光束仅存在  $z$  轴位移偏差时,  $E_n^x(x_0, Z''_n)$  用式(4)代替,  $Z''_n$  取  $\delta z$ ; 当第  $n$  路子光束仅存在绕坐标原点水平指向偏差时,  $E_n^x(x_0, Z''_n)$  用式(5)代替,  $Z''_n$  取  $\delta z_n$ 。结合透镜的透过函数<sup>[32]</sup>可知, 第  $n$  路子光束在透镜后焦面处的光场分布为

$$\mathcal{F}^{-1}\left\{\mathcal{F}\left\{E_n^x(x'', z''_0) * t_0(x'')\right\} H_1(f_x, z''_f)\right\}, \quad (8)$$

$$H_1(f_x, z''_f) = \exp(jk_n z''_f) \exp(-jz''_f \lambda_n \pi f_x^2), \quad (9)$$

式中:  $H_1(f_x, z''_f)$  表示从变换透镜端面到其后焦面的传递函数, 其中  $z''_f$  表示变换透镜端面到其后焦面的距离, 即  $z''_f = f$ 。考虑到光栅的坐标变换和衍射作用, 在第  $n$  路子光束中引入入射相位因子  $\varphi_m$ 、衍射相位因子  $\varphi_d$ 。当光纤阵列无偏差时,

$$\begin{cases} \varphi_m = \theta_n \\ \varphi_d = -(\beta - \theta_n - \alpha_n) \end{cases}, \quad (10)$$

$$\begin{cases} \theta_n = \arctan\left(\frac{p_n}{f}\right) \\ \alpha_n = \alpha_0 + \theta_0 - \theta_n \end{cases}, \quad (11)$$

式中:  $\theta_n$  为光纤阵列无偏差时第  $n$  路子光束经透镜会聚后与光轴方向形成的夹角;  $\alpha_n$  为光纤阵列无偏差时第  $n$  路子光束在光栅上的入射角;  $\beta$  为光纤阵列无偏差时第  $n$  路子光束的衍射角, 可由式(2)推导得出;  $\alpha_0$ 、 $\theta_0$  分别表示中心子光束的入射角和相对光轴的夹角,

$\theta_0 = \arctan\left(\frac{p_0}{f}\right)$ ,  $p_0$  表示中心光纤与光轴的距离。当

光纤阵列存在  $x$  轴位移偏差时,

$$\begin{cases} \varphi_m = \theta'_n \\ \varphi_d = -(\beta'_n - \theta'_n - \alpha'_n) \end{cases}, \quad (12)$$

$$\begin{cases} \theta'_n = \arctan\left(\frac{p_n + \delta x}{f}\right) \\ \alpha'_n = \alpha_0 + \theta_0 - \theta'_n \end{cases}, \quad (13)$$

式中:  $\theta'_n$  表示光纤阵列仅存在  $x$  轴位移偏差时第  $n$  路子光束经透镜会聚后与光轴方向形成的夹角;  $\alpha'_n$  表示

光纤阵列仅存在  $x$  轴位移偏差时第  $n$  路子光束在衍射光栅上的入射角;  $\beta'_n$  表示光纤阵列仅存在  $x$  轴位移偏差时第  $n$  路子光束的衍射角。

当光纤阵列仅存在  $z$  轴位移或绕坐标原点水平指向偏差时, 离焦量的存在使得经透镜传输后的光束不再是平行光束, 第  $n$  路子光束中每个位置  $x''$  处的光线在光栅上的入射角都不相同, 入射相位因子和衍射相位因子变为

$$\begin{cases} \varphi_m = \theta(x'') \\ \varphi_d = -[\beta_n(x'') - \theta_n(x'') - \alpha_n(x'')] \end{cases} \quad (14)$$

根据几何光学高斯公式<sup>[33]</sup>, 当光纤阵列仅存在  $z$  轴位移偏差时

$$\theta_n(x'') = \arctan\left(\frac{y' - x''}{-l'}\right) = \arctan\left(\frac{p_n f - x'' \delta z}{z''_0 f}\right), \quad (15)$$

该式是在物高  $y = p_n$  时推导得出的 ( $z$  轴位移不改变子光束与光轴的初始间隔), 其中:  $\theta_n(x'')$  表示该情况下第  $n$  路子光束经透镜会聚后与光轴方向形成的夹角,  $y'$  为像高,  $l'$  为像距。当光纤阵列仅存在绕坐标原点的水平指向偏差时,

$$\begin{aligned} \theta_n(x'') &= \arctan\left(\frac{y' - x''}{-l'}\right) = \\ &\arctan\left[\frac{p_n \cos(\delta\theta_h) f - x'' \delta z_n}{z''_0 f}\right], \end{aligned} \quad (16)$$

该式是在物高  $y = p_n \cos(\delta\theta_h)$  时推导得到的 (光纤阵列绕坐标原点的水平指向偏差改变了子光束与光轴的初始间隔), 其中  $\delta z_n = p_n \sin(\delta\theta_h)$ ,  $z''_0 = f - \delta z_n$ 。此时

$$\alpha_n(x'') = \alpha_0 + \theta_0 - \theta_n(x''), \quad (17)$$

式中:  $\alpha_n(x'')$  表示该情况下第  $n$  路子光束在衍射光栅上的入射角;  $\theta_n(x'')$  表示该情况下第  $n$  路子光束的入射角。考虑到源平面  $x''o''z''$  与观察平面  $xoz$  之间的坐标变换关系, 两段衍射传输过程为: 各子光束经变换透镜衍射传输至一倍焦距处; 各子光束从变换透镜后一倍焦距处重新衍射传输至变换透镜。入射光入射至光栅, 经光栅衍射后再次经过变换透镜, 源平面坐标系  $x''o''z''$  与观察平面坐标系  $xoz$  属于不同的坐标系, 但在衍射传输过程中光场在  $x$  方向上分布的数值模拟范围是一样的, 即  $x'' = x$ 。此时, 第  $n$  路子光束衍射至变换透镜上的光场分布为

$$\begin{cases} E_n^x(x, z_f) = \mathcal{F}^{-1}\left\{\mathcal{F}\left\{E_f^{x''}(x'', z''_f) * \exp[jk_n \tan(\varphi_m - \varphi_d)x'']\right\} H_2(f_x, z_f)\right\}, \\ H_2(f_x, z_f) = \exp(jk_n z_f) \exp(-jz_f \lambda_n \pi f_x^2) \end{cases}, \quad (18)$$

式中:  $H_2(f_x, z_f)$  表示从透镜后焦面到透镜端面的传递函数, 其中  $z_f = f$ 。经透镜会聚后, 第  $n$  路子光束在传输距离  $z$  处的光场分布为

$$\begin{cases} E_n^x(x, z) = \mathcal{F}^{-1}\left\{\mathcal{F}\left\{E_n^x(x, z_f) * t_0(x)\right\} H_3(f_x, z)\right\}, \\ H_3(f_x, z) = \exp(jk_n z) \exp(-jz \lambda_n \pi f_x^2) \end{cases}, \quad (19)$$

式中： $H_3(f, z)$  表示变换透镜后合束光自由传输的传递函数，其中  $z$  表示在变换透镜后观察面的取样位置。根据非相干叠加原理<sup>[31]</sup>，将  $n$  路子光束的光强叠加便可得到合束激光的光强分布。

### 2.2 由 Heisenberg 不确定性原理定义光束质量因子 $M^2$

强度二阶矩方法<sup>[34-35]</sup>通过拟合光束强度最大值  $1/e^2$  的宽度随衍射传输距离  $z$  变化的曲线来计算光束

质量因子  $M^2$ 。基于此方法计算  $M^2$  的准确性和速度受限于计算机本身的最大可用计算内存，计算结果要求越准确，所需的计算时间就越长。因此，需要一种快速且准确表征光束质量因子  $M^2$  的方法。

由于空间光场  $f(x)$  与频域场  $F(\xi)$ 、合束激光近场  $E(x)$  与远场  $\tilde{E}(\xi_1)$  分别满足互为傅里叶变换对条件，结合  $M^2$  的取值特性，根据傅里叶变换关系及 Heisenberg 不确定性原理<sup>[36]</sup>可得出合束激光的  $M^2$  为

$$M^2 = \frac{4\pi}{\lambda z} \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} (x - \dot{x})^2 |E(x)|^2 dx}{\int_{-\infty}^{\infty} |E(x)|^2 dx}} \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} (\xi - \dot{\xi})^2 |\tilde{E}(\xi)|^2 d\xi}{\int_{-\infty}^{\infty} |\tilde{E}(\xi)|^2 d\xi}} \in [1, +\infty), \quad (20)$$

式中： $\dot{x}$ 、 $\dot{\xi}$  分别表示合束激光近场、远场光强分布在  $x$  轴上的重心； $\lambda$  为合束激光的中心波长。当且仅当  $E(x) = A \exp(-Bx^2)$  时，即合束激光为理想高斯基模光束时，式(20)才等于 1。当光纤阵列存在加工误差、人工装配误差等外在扰动时， $\dot{x}$ 、 $\dot{\xi}$  相较于理想状态时发生偏移，合束激光的  $M^2$  增大，光束质量发生退化。

## 3 光纤阵列存在扰动时合束激光光束质量因子 $M^2$ 的误差分析

### 3.1 光纤阵列处于理想无偏差状态时合束激光光束质量因子 $M^2$ 的仿真分析

取光纤数量为  $N$ ，相邻子光束等间隔依次排布，第  $n$  路子光束到光轴的距离为  $p_n = p_0 + n\Delta p$ ， $n = -\frac{(N+1)}{2}, \dots, -1, 0, 1, \dots, \frac{(N+1)}{2}$ 。在仿真分析中，子光束数量  $N$  取 11，设置源平面各子光束初始振幅  $E_0 = 1 \text{ V/m}$ ，其他参数设定如表 1 所示。计算得到了 11 路子光束在源平面以及合束激光在透镜焦面处的光强分布，如图 3 所示。

表 1 组束系统的光学参数

Table 1 Optical parameters of beam combining system

Parameter	Value	Parameter	Value
$f/\text{mm}$	200	$\alpha_0/(\text{°})$	64.77
$d/\text{mm}$	1/1740	$p_0/\text{mm}$	6.70
$\omega_0/\mu\text{m}$	12.50	$\Delta p/\text{mm}$	0.40
$\lambda_0/\text{nm}$	1055.00	$m$	1

由图 3(a) 可知，源平面处的 11 路子光束以等间隔  $\Delta p$  排布，中心光纤到光轴的距离  $p_0 = 6.70 \text{ mm}$ ，子光束束腰半径为  $12.50 \mu\text{m}$ 。由图 3(b) 可知，合束激光的最高光强值在  $x$  轴上的坐标位置与中心光纤关于光轴 ( $x=0$ ) 严格对称，且各子光束在观察平面焦面处的峰值位置一致，各子光束在此处的远场光束宽度差距很小，为  $\mu\text{m}$  量级。在理想无偏差情况下，合束激光的光束质量因子  $M^2$  为 1.00，与单个子光束保持着相当的光束质量。

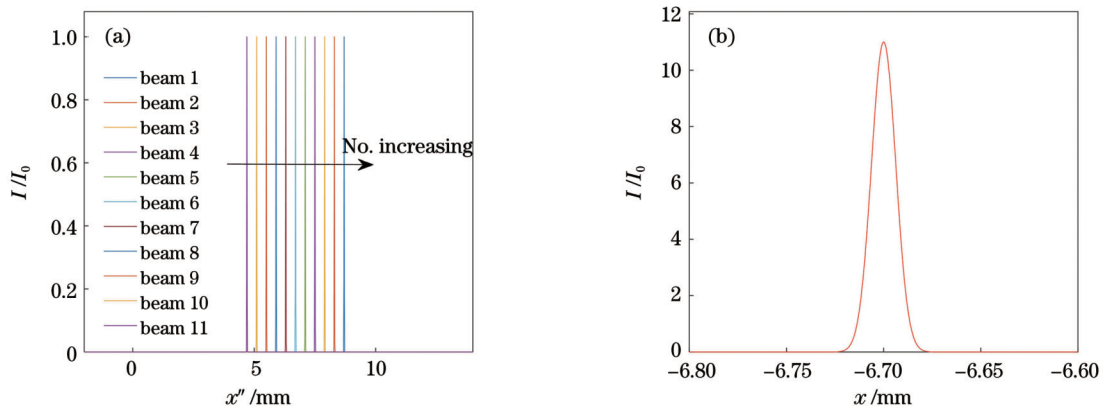


图 3 光束在不同平面上的光强分布 ( $I_0$  为中心子光束在源场的最大光强值)。(a) 各子光束在源平面上的光强分布；(b) 合束激光在透镜焦面处的光强分布

Fig. 3 Intensity distribution of beams at different planes ( $I_0$  is the maximum intensity of central subbeam in the source plane). (a) Intensity distribution of each subbeam in source plane; (b) intensity distribution of combined laser at focal plane of lens

3.2 单根光纤或光纤阵列整体存在位移/指向扰动  
偏差时合束激光光束质量因子  $M^2$  的误差分析  
为简单起见,首先分析单根光纤存在位移或指向

扰动偏差时合束激光光束质量因子  $M^2$  的变化情况。  
表 2 给出了仅中心光纤存在特定位移偏差和指向偏差  
时合束激光的光束质量因子  $M^2$ 。

表 2 在中心光纤扰动影响下的合束激光的光束质量因子  $M^2$   
Table 2 Beam quality factor  $M^2$  of combined laser affected by central disturbance

Beam deviation		$M^2$
Displacement deviation in $x$ direction $\delta x / \mu\text{m}$	-30	1.8969
	30	1.898
Displacement deviation in $z$ direction $\delta z / \text{mm}$	-1	1.8053
	1	1.7471
Horizontal pointing deviation around coordinate origin $\delta\theta_h / \text{mrad}$	-40	1.6105
	40	1.7962

仅中心光纤存在位移偏差或绕坐标原点水平指向  
偏差时,合束激光的光束质量因子  $M^2$  随扰动的变  
化如图 4 所示。结果表明,合束激光的光束质量因  
子  $M^2$  对中心光纤沿光纤端面水平 ( $x$  轴) 方向  
的位移偏差最为敏感,当中心光纤沿光纤端面方  
向的位移偏差量  $\delta x$  仅为  $30 \mu\text{m}$  时,合束激光

的光束质量因子  $M^2$  从理想情况下的 1.00 退化到了 1.90。若合束  
激光的光束质量因子  $M^2$  需控制在 1.40 以内,则中  
心光纤沿光纤端面 ( $x$  轴)、光轴方向 ( $z$  轴)、水平指  
向方向的位移偏差量须分别控制在  $-18 \mu\text{m} \leq \delta x \leq$   
 $18 \mu\text{m}$ 、 $-0.65 \text{ mm} \leq \delta z \leq 0.68 \text{ mm}$ 、 $-35 \text{ mrad} \leq \delta\theta_h \leq$   
 $34 \text{ mrad}$ 。

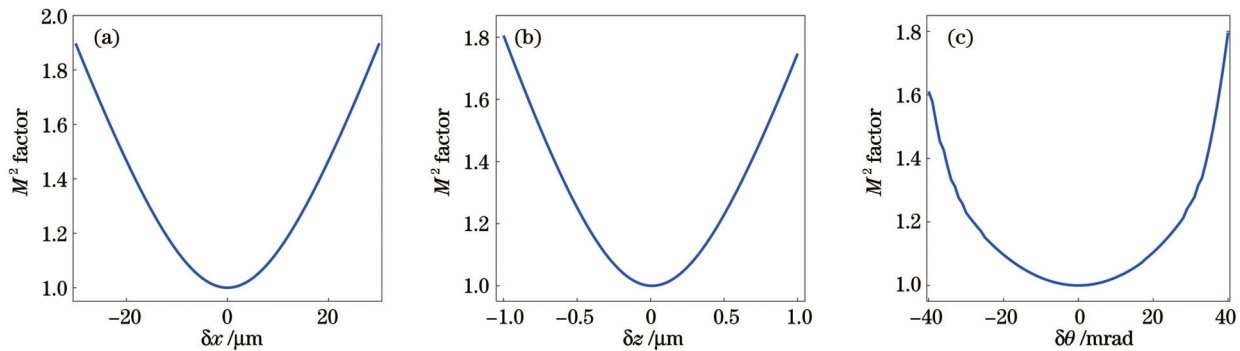


图 4 仅中心光纤存在不同偏差时合束激光的光束质量因子曲线。(a)存在  $x$  轴位移偏差;(b)存在  $z$  轴位移偏差;(c)存在水平指向偏差  
Fig. 4 Beam quality factor curve of combined laser when only central fiber is in different deviations. (a) In  $x$ -axis displacement  
deviation; (b) in  $z$ -axis displacement deviation; (c) in horizontal pointing deviation

当光纤阵列中子光纤的排布为理想情况而光纤阵  
列整体存在偏差时,合束激光的光束质量会发生恶化。

表 3 给出了光纤阵列整体仅存在特定位移偏差或指向  
偏差时合束激光的光束质量因子  $M^2$ 。

表 3 在光纤阵列整体扰动影响下合束激光的光束质量因子  $M^2$   
Table 3 Beam quality factor  $M^2$  of combined laser affected by disturbance of whole fiber array

Beam deviation		$M^2$
Displacement deviation in $x$ direction $\delta x / \text{mm}$	-0.6	1.7588
	0.6	1.7749
Displacement deviation in $z$ direction $\delta z / \text{mm}$	-5	1.5944
	5	1.6955
Horizontal pointing deviation around coordinate origin $\delta\theta_h / \text{mrad}$	-60	1.8673
	60	1.8524

图 5 给出了光纤阵列整体仅存在位移偏差或指向  
偏差时合束激光光束质量因子  $M^2$  的变化情况,可见,  
合束激光光束质量因子  $M^2$  对光纤阵列整体在  $x$  方向

的位移偏差最为敏感。若要满足合束激光的光束质量  
因子  $M^2 \leq 1.4$ ,则光纤阵列整体沿光纤端面 ( $x$  轴)、光  
轴方向 ( $z$  轴)、水平指向方向的位移偏差量须分别控

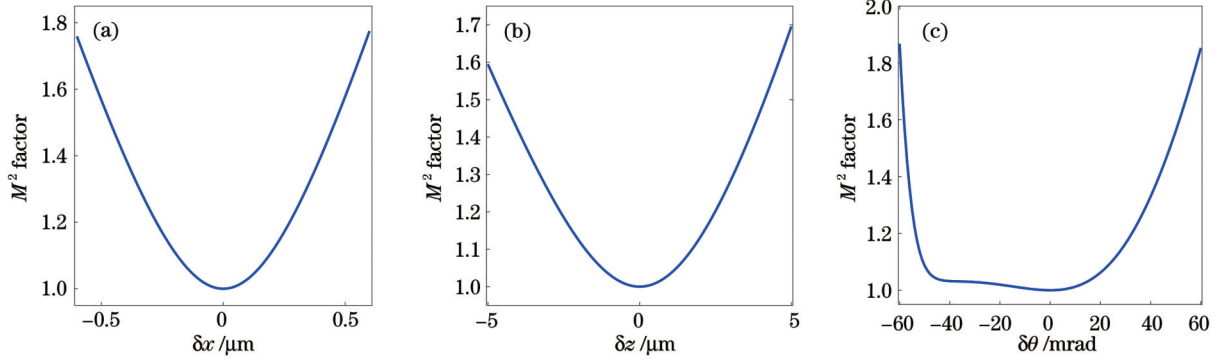


图 5 光纤阵列整体存在不同偏差时合束激光的光束质量因子曲线。(a)存在  $x$  轴位移偏差；(b)存在  $z$  轴位移偏差；(c)存在水平指向偏差

Fig. 5 Beam quality factor curve of combined laser when entire optical fiber array is in different deviations. (a) In  $x$ -axis displacement deviation; (b) in  $z$ -axis displacement deviation; (c) in horizontal pointing deviation

制在  $-0.40 \mu\text{m} \leq \delta x \leq 0.40 \mu\text{m}$ 、 $-3.9 \text{ mm} \leq \delta z \leq 3.6 \text{ mm}$ 、 $-56 \text{ mrad} \leq \delta \theta_n \leq 43 \text{ mrad}$ 。在合束激光光束质量因子  $M^2$  相同的要求 (如  $M^2 \leq 1.40$ ) 下,相较于单根中心光纤,光纤阵列整体的位移、指向偏差的装调精度要求较低。

### 3.3 光纤阵列存在随机位移、指向偏差时合束激光光束质量因子 $M^2$ 的误差分析

除装配误差这一影响因素外,对合束激光光束质量影响较大的还包括光纤阵列的机械加工误差,特别是光纤阵列中各子光纤存在的随机位移、指向偏差。根据概率和统计理论<sup>[37]</sup>中的中心极限定理,大量的独立随机事件呈正态分布,即

$$f(i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_i} \exp\left[-\frac{(i - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right] \sim N(\mu_i, \sigma_i^2), \quad (21)$$

式中:  $i = x, z, \theta$ , 分别表示光纤阵列在  $x, z$  和水平指向方向的随机偏差量;  $\mu_i$  代表误差均值,对于独立且同分布的随机变量,合束激光的偏差均值为 0;  $\sigma_i$  表示误差标准差。当随机分布的置信度约为 99.7% 时,可信区间为  $[-3\sigma_i, 3\sigma_i]$ , 此时光纤阵列中第  $n$  根光纤的  $x$  轴位移偏差、 $z$  轴离焦量、水平指向  $\theta$  方向偏差分别设为

$\delta x_n, \delta z_n, \delta \theta_n$ 。图 6 给出了第  $n$  路光纤存在随机水平指

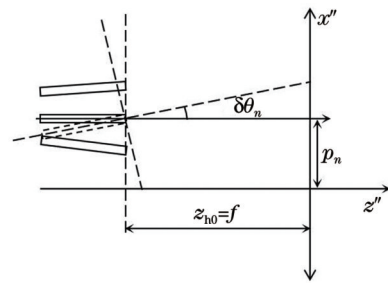


图 6 第  $n$  路子光束存在随机水平指向偏差

Fig. 6 Random horizontal pointing deviation in the  $n$ th subbeam 向偏差时的光路示意图。

取光纤数量  $N$  为 11, 对随机位移偏差和指向偏差的标准差都循环计算 500 次, 以保证模拟结果的可靠性。统计合束激光光束质量因子  $M^2$  的分布, 并利用二阶多项式进行拟合, 拟合结果如图 7 所示。光束质量因子  $M^2$  与光纤阵列随机误差之间的拟合关系分别为  $M_x^2 = 0.0117\sigma_x^2 + 0.0090\sigma_x + 0.9971$ 、 $M_z^2 = 10^{-6}(8.8086\sigma_z^2 + 414.74\sigma_z) + 0.9948$ 、 $M_\theta^2 = 0.0016\sigma_\theta^2 + 0.0057\sigma_\theta + 0.9948$ 。结果显示, 合束激光的光束质量因子  $M^2$  对光纤阵列  $x$  方向的随机位移偏差最敏感。

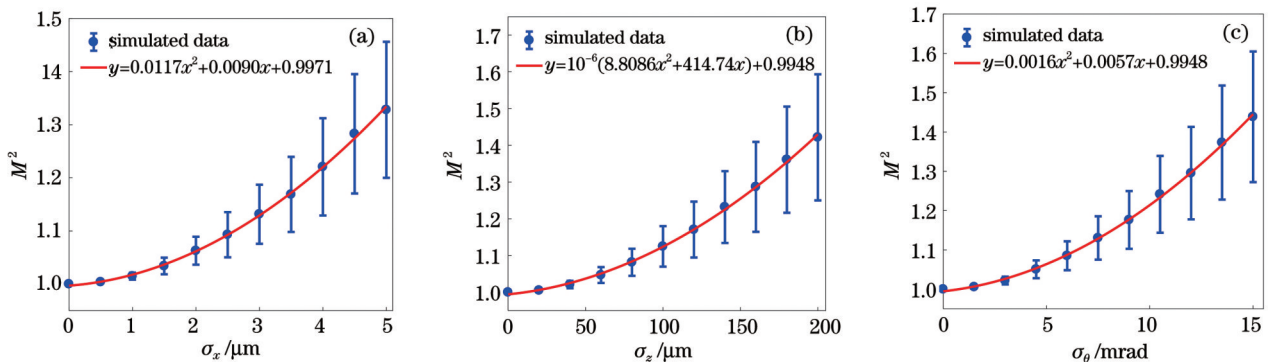


图 7 全光纤阵列存在随机偏差时合束激光光束质量因子  $M^2$  的统计结果。(a)存在  $x$  轴位移偏差  $\sigma_x$ ; (b)存在  $z$  轴位移偏差  $\sigma_z$ ; (c)存在水平指向偏差  $\sigma_\theta$

Fig. 7 Statistical results of beam quality factor  $M^2$  of combined laser when all fiber array in random deviations. (a) In  $x$ -axis deviation  $\sigma_x$ ; (b) in  $z$ -axis deviation  $\sigma_z$ ; (c) in horizontal pointing deviation  $\sigma_\theta$

同时,在三类随机偏差下,合束激光  $M^2$  的统计分布特征都表现为:统计分布均值  $\mu_{M^2}$  及误差范围  $\sigma_{M^2}$  都随着随机偏差的标准差  $\sigma_x$ 、 $\sigma_z$  和  $\sigma_\theta$  增加而增大。在实际情况下,光纤阵列中的随机偏差往往会同时存在。取  $N$  为 11,图 8 给出了随机偏差  $\sigma_x$  与  $\sigma_z$ 、

$\sigma_x$  与  $\sigma_\theta$ 、 $\sigma_z$  与  $\sigma_\theta$  协同影响下合束激光光束质量因子  $M^2$  的分布。参考当前光纤阵列的加工制备水平,控制位移偏差  $\sigma_x \leq 2 \mu\text{m}$ 、 $\sigma_z \leq 100 \mu\text{m}$  及指向偏差  $\sigma_\theta \leq 5 \text{mrad}$ ,可将合束激光的光束质量因子  $M^2$  控制在 1.30 以下。

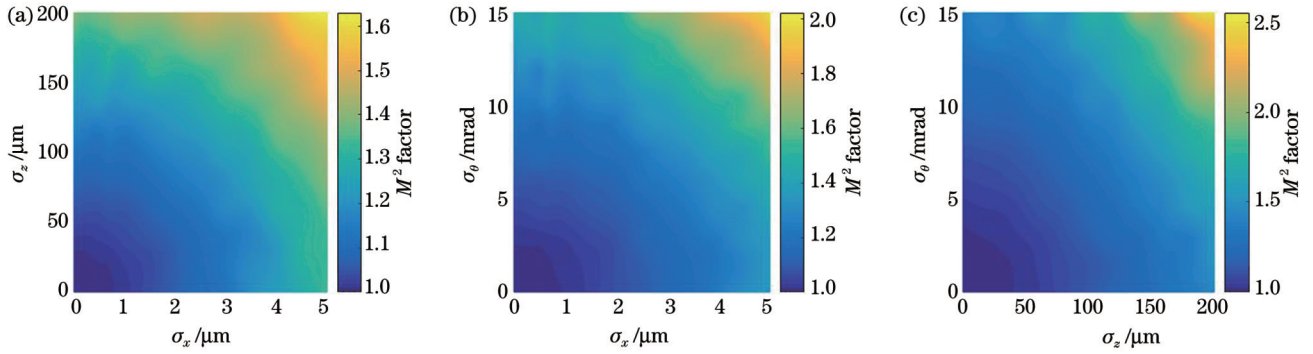


图 8 不同随机偏差下合束激光光束质量因子  $M^2$  的统计结果。(a) 随机  $x$  轴位移偏差  $\sigma_x$  和  $z$  轴位移偏差  $\sigma_z$ ; (b) 随机  $x$  轴位移偏差  $\sigma_x$  和水平指向偏差  $\sigma_\theta$ ; (c) 随机  $z$  轴位移偏差  $\sigma_z$  和水平指向偏差  $\sigma_\theta$

Fig. 8 Statistical results of beam quality factor  $M^2$  of combined laser when all fiber array in random deviations. (a) Random  $x$ -axis displacement deviation  $\sigma_x$  and  $z$ -axis displacement deviation  $\sigma_z$ ; (b) random  $x$ -axis displacement deviation  $\sigma_x$  and horizontal pointing deviation  $\sigma_\theta$ ; (c)  $z$ -axis displacement deviation  $\sigma_z$  and horizontal pointing deviation  $\sigma_\theta$

为了尽可能地增加参与合束的光纤数量,需要分析拓展光纤阵列尺度对合束激光光束质量的影响。如图 9 所示,在固定的光纤阵列位移偏差和指向偏差下,模拟并计算了参与合束的光纤从 7 路增加到 51 路时,合束激光光束质量因子  $M^2$  的分布。对于  $\sigma_x=5 \mu\text{m}$ 、 $\sigma_z=150 \mu\text{m}$ 、 $\sigma_\theta=10 \text{mrad}$  三种情况,当  $N < 23$  时,合束激光的光束质量因子  $M^2$  的统计均值随参与合束光纤

数量的增加而均缓慢增大,但其标准差均逐渐减小;当  $N \geq 23$  时,合束激光的光束质量因子  $M^2$  的均值随参与合束光纤数量的增加而均趋于稳定值,即  $M_x^2 = 1.37$ ,  $M_z^2 = 1.34$ ,  $M_\theta^2 = 1.25$ , 标准差分别趋于 0.05、0.06、0.04,体现了紧凑型光谱组束系统在光纤数量方面的可拓展性,有望大幅提升光纤合束系统的输出功率。

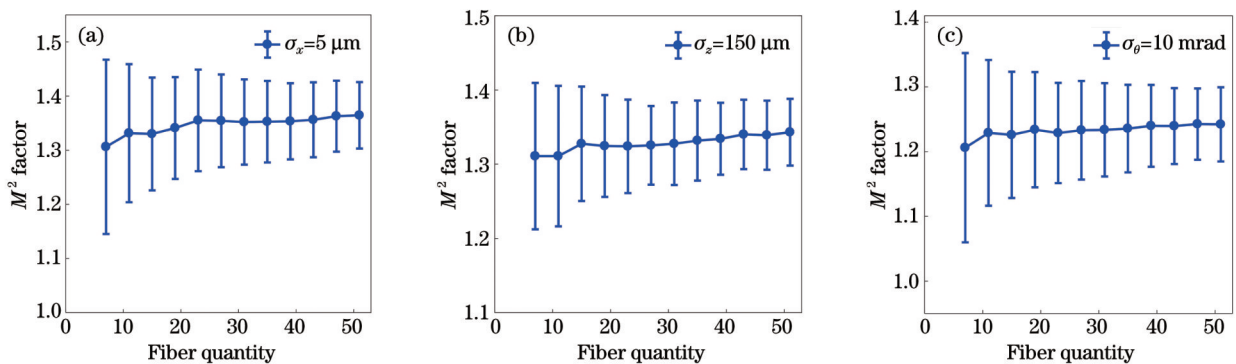


图 9 在不同随机偏差的标准差下,合束激光光束质量因子  $M^2$  的统计结果随光纤阵列尺度的变化。(a)  $\sigma_x=5 \mu\text{m}$ ; (b)  $\sigma_z=150 \mu\text{m}$ ; (c)  $\sigma_\theta=10 \text{mrad}$

Fig. 9 Variation of statistical results of beam quality factor  $M^2$  of combined laser with fiber array scale under standard deviations of different random deviations. (a)  $\sigma_x=5 \mu\text{m}$ ; (b)  $\sigma_z=150 \mu\text{m}$ ; (c)  $\sigma_\theta=10 \text{mrad}$

## 4 结 论

本文建立了紧凑型光谱组束系统的衍射传输理论模型,同时考虑了光纤阵列沿光纤端面水平( $x$ 轴)方向的位移偏差、光纤阵列  $z$  轴位移偏差及光纤阵列绕坐标原点指向偏差对合束激光光束质量的影响。在设定参与合束光纤数量为 11 束的情况下进行了模拟计

算,结果表明:当光纤阵列理想无偏差时,合束激光的光束质量因子  $M^2$  为 1.00,且合束激光光束质量因子  $M^2$  对  $x$  方向的位移偏差最敏感;当中心光纤沿光纤端面水平方向的位移偏差量  $\delta x$  仅为  $30 \mu\text{m}$  时,合束激光的光束质量因子  $M^2$  从 1.00 退化到 1.90;若要控制合束激光的光束质量因子  $M^2 \leq 1.40$ ,则中心光纤沿光纤端面( $x$ 轴)、光轴方向( $z$ 轴)、水平指向方向的位移偏差



量分别须控制在  $[-18 \mu\text{m}, 18 \mu\text{m}]$ 、 $[-0.65 \text{ mm}, 0.68 \text{ mm}]$ 、 $[-35 \text{ mrad}, 34 \text{ mrad}]$ ;若需要控制合束激光的光束质量因子  $M^2 \leq 1.40$ , 相较于单根中心光纤, 光纤阵列整体允许存在的位移偏差和指向偏差的范围更大, 分别为  $[-0.40 \text{ mm}, 0.40 \text{ mm}]$ 、 $[-3.9 \text{ mm}, 3.6 \text{ mm}]$ 、 $[-56 \text{ mrad}, 43 \text{ mrad}]$ , 装调精度要求更低。结合当前光纤阵列的加工水平, 当控制位移偏差  $\sigma_x \leq 2 \mu\text{m}$ 、 $\sigma_z \leq 100 \mu\text{m}$  及指向偏差  $\sigma_\theta \leq 5 \text{ mrad}$  时, 可将合束激光的光束质量因子  $M^2$  控制在 1.30 以下。在设定最大参与合束光纤数量为 51 束的情况下, 模拟了拓展光纤阵列尺度对合束激光光束质量的影响, 结果表明, 在位移偏差  $\sigma_x = 5 \mu\text{m}$ 、 $\sigma_z = 150 \mu\text{m}$  或指向偏差  $\sigma_\theta = 10 \text{ mrad}$  的条件下, 当参与合束的光纤数量超过阈值 (23 束) 时, 合束激光的光束质量因子  $M^2$  的统计均值分别趋于 1.37、1.34、1.25, 标准差分别趋于 0.05、0.06、0.04。模拟分析结果较好地论证了紧凑型光谱组束系统在实现高功率、高光束质量、小型化光纤激光器方面的技术可行性。本文模型可以推广到多种光谱组束系统, 用于开展系统的理论建模和数值分析。

### 参 考 文 献

- [1] Jeong Y, Sahu J K, Baek S, et al. Cladding-pumped ytterbium-doped large-core fiber laser with 610 W of output power[J]. Optics Communications, 2004, 234(1/2/3/4/5/6): 315-319.
- [2] Meleshkevich M, Platonov N, Gapontsev D, et al. 415 W single-mode CW thulium fiber laser in all-fiber format[C]//2007 European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference, June 17-22, 2007, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2007.
- [3] Zellmer H, Willamowski U, Tünnermann A, et al. High-power cw neodymium-doped fiber laser operating at 9.2 W with high beam quality[J]. Optics Letters, 1995, 20(6): 578-580.
- [4] Pask H M, Archambault J L, Tünnermann A, et al. Operation of cladding-pumped  $\text{Yb}^{3+}$ -doped silica fibre lasers in 1  $\mu\text{m}$  region[J]. Electronics Letters, 1994, 30(11): 863-865.
- [5] Jeong Y, Sahu J K, Williams R B, et al. Ytterbium-doped large-core fibre laser with 272 W output power[J]. Electronics Letters, 2003, 39(13): 977-978.
- [6] Chu X C, Zhao S H, Shi L, et al. Expansion of the channel number in spectral beam combining of fiber lasers array based on cascaded gratings[J]. Optics Communications, 2008, 281(15/16): 4099-4102.
- [7] Tian J Y, Zhang J, Peng H Y, et al. High power diode laser source with a transmission grating for two spectral beam combining[J]. Optik, 2019, 192: 162918.
- [8] Zhan S B, Wu Z L, Hu J B, et al. Investigation on ultimate efficiency of spectral beam combining based on an external cavity[J]. Optik, 2018, 158: 1519-1532.
- [9] Wu Z, You S D, Zhang M J, et al. Effect of thermal errors of a transform lens on beam properties in spectral beam combining systems[J]. Optik, 2020, 219: 164994.
- [10] 石顺祥, 陈国夫, 赵卫, 等. 非线性光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003: 203-205.  
Shi S X, Chen G F, Zhao W, et al. Nonlinear optics[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2003: 203-205.
- [11] 姜玉峰. 单频激光多通放大器和 SBS 相位共轭镜[D]. 北京: 北京工业大学, 2010: 25.  
Jiang Y F. Multi-pass amplifier of single frequency laser and SBS phase conjugation mirror[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010: 25.
- [12] 梁慧生, 闫明鉴, 郑云瀚, 等. 高功率光纤激光器受激拉曼散射致模式不稳定研究[J]. 激光与红外, 2021, 51(11): 1440-1445.  
Liang H S, Yan M J, Zheng Y H, et al. Mode instability induced by stimulated Raman scattering in high power fiber laser[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(11): 1440-1445.
- [13] 郑也, 倪庆乐, 张琳, 等. 受激拉曼散射对高功率激光传输特性影响研究[J]. 中国激光, 2021, 48(7): 0701005.  
Zheng Y, Ni Q L, Zhang L, et al. Influence of stimulated Raman scattering on propagation properties of high-power laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(7): 0701005.
- [14] 陶蒙蒙, 叶锡生, 叶景峰, 等. 同带泵浦千瓦级掺铽光纤激光器输出特性理论模拟[J]. 中国激光, 2022, 49(1): 0101019.  
Tao M M, Ye X S, Ye J F, et al. Modeling in-band pumped kW level high-power Tm-doped fiber lasers via simulations[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101019.
- [15] Zhu J J, Zhou P, Ma Y X, et al. Power scaling analysis of tandem-pumped Yb-doped fiber lasers and amplifiers[J]. Optics Express, 2011, 19(19): 18645-18654.
- [16] 楚秋慧, 郭超, 颜冬林, 等. 高功率窄线宽光纤激光器的研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(12): 121004.  
Chu Q H, Guo C, Yan D L, et al. Recent progress of high power narrow linewidth fiber laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(12): 121004.
- [17] 陈晓龙, 楼风光, 何宇, 等. 高效率国产化 10 kW 光纤激光器[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0336001.  
Chen X L, Lou F G, He Y, et al. Home-made 10 kW fiber laser with high efficiency[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0336001.
- [18] 陈晓龙, 何宇, 徐中巍, 等. 10 kW 高效率 1070 nm 光纤放大器的理论与实验研究[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 1006001.  
Chen X L, He Y, Xu Z W, et al. Theoretical and experimental investigation of a 10-kW high-efficiency 1070-nm fiber amplifier[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1006001.
- [19] 安毅, 杨欢, 肖虎, 等. 国产双锥形光纤实现 4 kW 单模激光输出[J]. 中国激光, 2021, 48(1): 0115002.  
An Y, Yang H, Xiao H, et al. 4-kW single-mode laser output using homemade double-tapered fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0115002.
- [20] 来文昌, 马鹏飞, 肖虎, 等. 高功率窄线宽光纤激光技术[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(12): 121001.  
Lai W C, Ma P F, Xiao H, et al. High-power narrow-linewidth fiber laser technology[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(12): 121001.
- [21] 刘小溪. 光纤激光外腔光谱组束技术研究[D]. 北京: 中国航天科技集团公司第一研究院, 2018: 1-2.  
Liu X X. Research on external cavity spectral beam combining of fiber lasers[D]. Beijing: The First Academy of China Aerospace Science and Technology Corporation, 2018: 1-2.
- [22] 闫爱民, 刘立人, 刘德安, 等. 光纤激光阵列锁相和孔径装填技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(8): 33-39.  
Yan A M, Liu L R, Liu D A, et al. Recent progress in phase-locking and aperture filling of fiber laser arrays[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(8): 33-39.
- [23] 马阎星, 司磊, 周朴, 等. 高功率光纤激光相干合成关键技术[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(1): 38-42.  
Ma Y X, Si L, Zhou P, et al. The key technologies in coherent beam combination of high power fiber laser[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(1): 38-42.
- [24] 王双义, 林殿阳, 王超, 等. 光纤组束研究的新进展[J]. 激光技术, 2005, 29(6): 657-661.  
Wang S Y, Lin D Y, Wang C, et al. Recent progress of fiber beam combination[J]. Laser Technology, 2005, 29(6): 657-661.
- [25] Liu A P, Roy M, Tracy V, et al. Spectral beam combining of high power fiber lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5335: 81-88.
- [26] 马毅, 颜宏, 彭万敬, 等. 基于多路窄线宽光纤激光的 9.6 kW 共孔径光谱合成光源[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0901009.  
Ma Y, Yan H, Peng W J, et al. 9.6 kW common aperture spectral

- beam combination system based on multi-channel narrow-linewidth fiber lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0901009.
- [27] Zhang Y, Zhang B. Analysis of beam quality for the laser beams after spectral beam combining[J]. Optik, 2010, 121(13): 1236-1242.
- [28] Wu Z, Zhong Z Q, Yang L, et al. Beam properties in a spectral beam combining system based on trapezoidal multilayer dielectric gratings[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2016, 33(2): 171-179.
- [29] 吴真, 钟哲强, 杨磊, 等. 基于多层介质膜光栅的谱合成系统光束特性分析[J]. 物理学报, 2016, 65(5): 054205.  
Wu Z, Zhong Z Q, Yang L, et al. Analysis of characteristics of combined beam in spectral beam combining system based on multilayer dielectric grating[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(5): 054205.
- [30] 柏刚, 杨依枫, 晋云霞, 等. 光谱合成激光光束特性的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(4): 040004.  
Bai G, Yang Y F, Jin Y X, et al. Research progress on laser beam characteristics in spectral beam combining system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(4): 040004.
- [31] Bai G, Shen H, Yang Y F, et al. Theoretical analysis of beam quality degradation in spectral beam combining of fiber laser array with beam deviation[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 105: 281-287.
- [32] Voelz D G. Computational Fourier optics: a MATLAB tutorial [M]. Bellingham: SPIE Press, 2011.
- [33] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2016.  
Yu D Y, Tan H Y. Engineering optics[M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [34] 邓小玖, 谢莉莎, 刘彩霞. 光束质量与光束质量因子[J]. 广西物理, 2003, 24(2): 9-12.  
Deng X J, Xie L S, Liu C X. Beam quality and beam quality factor [J]. Physics of Guangxi, 2003, 24(2): 9-12.
- [35] 曾秉斌, 徐德衍, 王润文. 激光光束质量因子  $M^2$  的物理概念与测试方法[J]. 应用激光, 1994, 14(3): 104-108.  
Zeng B B, Xu D Y, Wang R W. Physical concept and measurement on laser beam quality factor  $M^2$ [J]. Applied Laser, 1994, 14(3): 104-108.
- [36] Stein E M, Shakarchi R. Fourier analysis: an introduction[M]. Princeton: Princeton University Press, 2003.
- [37] 约瑟夫·古德曼. 统计光学[M]. 陈家璧, 秦克诚, 曹其智, 等译. 2 版. 北京: 科学出版社, 2018: 8.  
Joseph W G. Statistical optics[M]. Chen J B, Qin K C, Cao Q Z, et al., Transl. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2018: 8.

## Effects of Fiber Array Disturbance on Beam Quality in Compact Spectral Beam Combining System

Wang Yongneng<sup>1</sup>, Li Fujian<sup>2</sup>, Rao Daxing<sup>2</sup>, Cui Yong<sup>2\*</sup>, Zhao Xiaohui<sup>2</sup>, He Ruijing<sup>2</sup>, Ji Lailin<sup>2</sup>, Gao Yanqi<sup>2</sup>, Sui Zhan<sup>2</sup>, Chen Huacai<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Optics and Electronics, China Jiliang University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China;

<sup>2</sup>Shanghai Institute of Laser Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China

### Abstract

**Objective** High power, high beam quality, and compact miniaturization are the development goals of fiber lasers. Spectral beam combination is an effective means to overcome the bottleneck of single-fiber output power and can achieve a high power output of fiber lasers. In most existing spectral beam combining systems, the gap between adjacent subfibers is generally of the order of millimeters or even larger; consequently, the entire system occupies a large space. Therefore, a compact spectral beam combining system based on a precision fiber array is proposed in this study. Many factors affect the beam quality of a combined laser in a spectral beam combining system, including lens aberration, laser line width, grating thermal distortion, and fiber array disturbance, which degrade the beam quality of the combined laser. Research on the influence of fiber array disturbance deviation on beam quality is relatively scarce. Therefore, this study focused on the effects of fiber array disturbance on beam quality factor of a combined laser. Quantitative analysis of the effects of fiber array displacement and pointing disturbance deviation on beam quality factor of the combined laser provides a means of realizing effective control of combined laser beam quality. Unlike in similar studies, this study conducted error analysis of the axial displacement deviation of the fiber array by the  $M^2$  factor of the combined laser, which makes the theoretical model more practical.

**Methods** Diffraction propagation theory enables us to derive the light field distribution at each position of a subbeam affected by displacement and pointing deviation. In the observation plane where the combined laser is formed, the near- and far-field light intensities of each subbeam are incoherently superimposed based on the incoherent superposition principle. The traditional intensity second-moment method is used to calculate beam quality factor of the beam by fitting the relationship between the beam width and propagation distance. Due to the limitations of computer memory and performance, large calculation errors are introduced in the results, resulting in low calculation efficiency. Therefore, based on the Heisenberg uncertainty principle, the expression of beam quality factor of the combined laser under the effects of horizontal displacement, axial displacement, and horizontal pointing deviation was derived in this study.

**Results and Discussions** Under the condition of a constant number of subbeams, variations in beam quality factor of the combined beam with displacement and pointing disturbance deviation of a single-channel/multi-channel beam were simulated and analyzed, and error analysis of beam quality factor of the combined laser with different numbers of subbeams under a certain random displacement and pointing disturbance deviation was conducted. The results are as follows. 1) The beam quality factor of the

combined laser is the most sensitive to the disturbance along the horizontal ( $x$ -axis) direction of the end face of the optical fiber, which must be controlled in the order of microns (Figs. 4, 5, 7, and 8). 2) The quantitative relationship between the different disturbances of the optical fiber array and beam quality factor of the combined laser was determined, and the specific control requirements of the displacement and pointing accuracy of the optical fiber array were described (Figs. 4, 5, 7–9). 3) When the number of subbeams in the beam combination exceeds 23, under a specific random disturbance, the statistical means of the beam combining laser beam quality factor tend to their respective stable values of 1.37, 1.34, and 1.25, and the standard deviations tend to 0.05, 0.06, and 0.04, respectively (Fig. 9).

**Conclusions** In this study, a compact spectral beam combining system is proposed, and an error analysis of the optical fiber array disturbance deviation of the combined laser beam quality is theoretically conducted. The rationality and feasibility of the compact spectral beam combining system are explained to some extent, where these can be extended to other spectral beam combining systems. The specific control requirements of various errors are described. This study provides guidance for the development of high-power and high-beam-quality fiber lasers.

**Key words** fiber optics; optical fiber array; beam quality; spectral beam combination; compact beam combining system