

平顶光输出的全光纤信号合束器

黄建滨^{1,2*}, 初单萍², 张群生², 张大鹏², 王兴龙²

¹天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;

²珠海光库科技股份有限公司, 广东 珠海 519080

摘要 通过对光纤信号合束器的锥区与输出光纤进行特殊处理,并对输出光纤进行扭转处理,实现平顶光输出。测试结果表明,20/130 μm (纤芯直径为 20 μm ,包层直径为 130 μm) 光纤输入、100/120/360 μm (纤芯直径为 100 μm ,包层直径为 360 μm ,纤芯和包层之间低折射率层的直径为 120 μm) 光纤或者 200/220/360 μm 光纤输出的 4×1 信号合束器的光束强度分布都不是平顶分布,强度分布较为分散。对输出光纤进行扭转处理后,更多的光纤模式将被激发。在锥区与输出光纤之间过渡一段 200/220/360 μm 光纤,所得的 4×1 信号合束器在光束束腰 4.88 mm 内的强度分布均匀,呈现平顶分布。通过计算可知,该范围内的光束平坦度在 0.1 以下,并且该光纤信号合束器可以承受的信号功率在 2 kW 以上。

关键词 光纤光学; 光纤激光; 平顶光; 全光纤; 信号合束器

中图分类号 TN243

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1106005

All-Fiber Signal Combiner with Flat-Top Beam Output

Huang Jianbin^{1,2*}, Chu Danping², Zhang Qunsheng², Zhang Dapeng², Wang Xinglong²

¹School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering,

Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²Advance Fiber Resources (Zhuhai) Co., Ltd., Zhuhai, Guangdong 519080, China

Abstract The flat-top beam output is realized through special treatment of the cone area of the optical fiber signal combiner and output fiber and the torsion treatment of the output fiber. The experimental results show that the beam intensity distribution of 4 × 1 signal combiners with a 20/130 μm (the core diameter is 20 μm , the cladding diameter is 130 μm) fiber input and 100/120/360 μm (the core diameter is 100 μm , the cladding diameter is 360 μm , the diameter of the low refractive index layer between the core and cladding is 120 μm) fiber or 200/220/360 μm fiber output is not a flat-top distribution; the strength distribution is relatively scattered. More fiber mode will be excited by twisting the output fiber. Then, a 200/220/360 μm fiber was spliced between the cone area and output fiber. The intensity distribution of 4 × 1 signal combiner is uniform and has a flat-top distribution, and presents distribution in a 4.88 mm range close to the beam waist. The calculation results show that the flatness of the beam in that range is below 0.1. It also shows that the signal combiner can handle a signal power of more than 2 kW.

Key words fiber optics; fiber laser; flat-top beam; all-fiber; signal combiner

OCIS codes 060.3510; 140.3298; 140.3300

收稿日期: 2020-10-09; 修回日期: 2020-10-28; 录用日期: 2020-11-18

基金项目: 广东省“珠江人才计划”引进领军人才项目(2016LJ06D531)

*E-mail: jianbinhuang@fiber-resources.com

1 引言

激光具有方向性好、能量集中等优点,在通信、航天、科学研究、工业技术等领域具有广泛的应用。一般而言,激光器输出激光在空间上呈现高斯分布,由于在高功率、高能量体系下高斯光束的能量集中在光束中心,容易造成光学器件的损伤。同时,在高斯光束下,器件被非均匀加热,将极大影响输出光束质量。因此,在实际应用中,需要光束呈现特殊的形状或者光束分布^[1]。其中,平顶光束是一种非常重要的激光光束,例如在激光焊接领域,平顶光束可以使焊接的缝隙更匀滑。同样的,在激光雕刻、切割等领域,平顶光束都有广泛的应用^[2-3]。近些年来,随着激光工业的发展,人们提出了各种平顶光束整形方法,例如采用液晶空间光调制器^[1,4]、光阑法^[5]、微透镜阵列^[5-6]、非球面透镜组^[7]、双折射透镜组^[7]、光纤结构设计法^[8-9]等。这些技术在各自领域中都能发挥作用,然而都存在各自的优缺点,例如微透镜阵列对微透镜尺寸和焦距有很高的要求且容易产生干涉效应;液晶空间光调制器的损伤阈值低;双折射透镜组对入射光偏振有一定要求;利用光阑法后,光束能量损耗严重。信号合束器是一种将多个单模输出的激光合束成多模光纤输出的光纤器件^[10],在激光切割、激光焊接、激光雕刻等领域具有广泛的运用^[11-14]。本文提出了一种直接输出平顶光束的信号合束器,测试结果表明,该信号合束器承受功率大于 2 kW。

2 结果分析

对于光纤而言,平顶光束并不是它传输的本征模式,而是光纤多个导模的叠加。由于信号合束器使用的是纤芯直径较大的多模光纤,支持的导模数近似为

$$M^2 \approx \frac{V^2}{2}, \quad (1)$$

式中: V 为光纤的归一化频率,定义为

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} NA, \quad (2)$$

式中: a 为光纤纤芯直径; λ 为光波长; NA 为光纤数值孔径。100/120/360 μm (纤芯直径为 100 μm ,包层直径为 360 μm ,纤芯和包层之间低折射率层的直径为 120 μm)光纤的 NA 值为 0.22,在波长为 1064 nm 时, V 值为 130,此时它所能支持的导模数 M 约为 8450。但这些模式并不会全部同时被激发。以工业上常用的进端光纤为 20/130 μm (纤芯直径为 20 μm ,包层直径为 130 μm)光纤、出端光纤为 100/120/360 μm 光纤的 4×1 光纤信号合束器为例。测试时,合束器的 4 个输入端分别接上 4 台连续高功率光纤激光器作为输出端,光源的输出波长为 1080 nm,用 Primes 公司生产的 LQM 仪器对合束器输出端与 100/120/360 μm 光纤激光器输出接头(QBH)进行测试,测试时每条臂同时输入功率 500 W。图 1 是 100/120/360 μm 光纤输出的 4×1 信号合束器的输出光束强度分布测试图。由图 1(a) 光束强度二维分布可知,该光束的光强分布不均匀,光束能量主要分布于光束的上半部分。图 1(b) 和图 1(c) 分别表示 X 和 Y 方向的光强分布,光束强度分布并不呈现平顶光束分布。这是由于激光进入该信号合束器后只能激发 100/120/360 μm 光纤传输的部分模式,且这些模式的阶数相对较低,这些模式的叠加并不呈现平顶分布。

为了激发输出光纤中更多的模式,对光纤进行扭转处理^[15]。扭转方法如图 2(a) 所示,对光纤去除一段涂覆层后,固定于夹具上,夹具可以自由旋转。夹具转到一定角度后,用火焰对扭转部分进行加热处理,使光

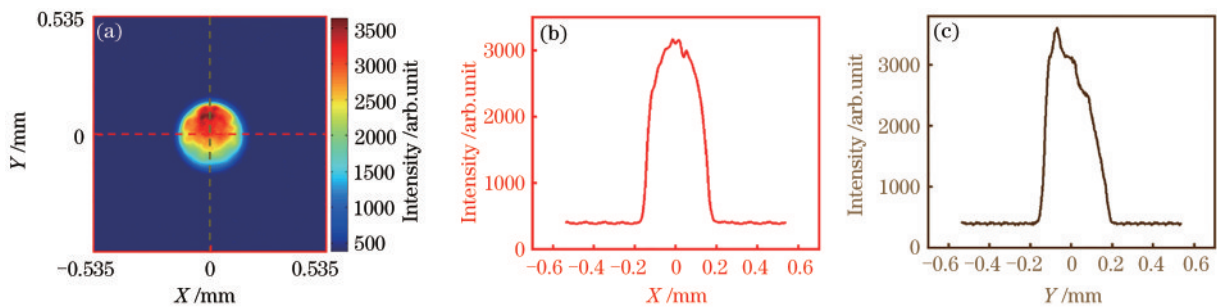


图 1 100/120/360 μm 光纤输出的 4×1 光纤信号合束器的光束强度测试图。(a) 光束强度分布图; (b) X 方向的光束强度分布; (c) Y 方向的光束强度分布

Fig. 1 Intensity distribution of the 4×1 fiber signal combiner with the 100/120/360 μm fiber output. (a) Intensity distribution; (b) intensity distribution in X direction; (c) intensity distribution in Y direction

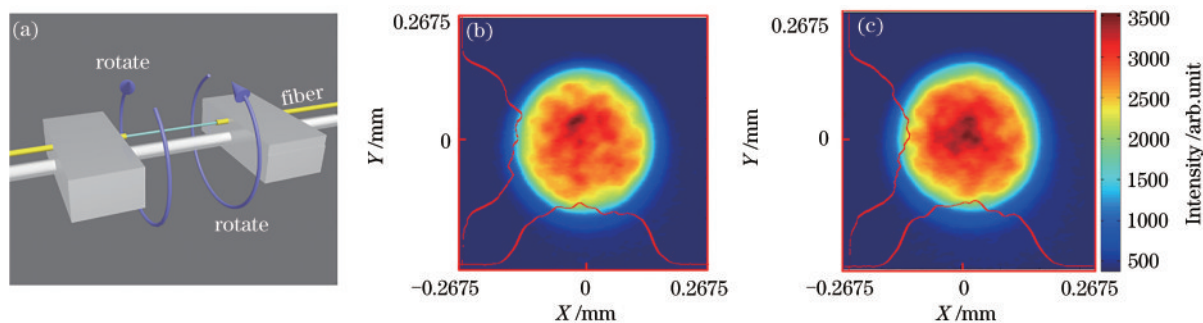


图 2 输出光纤扭转后的 4×1 信号合束器的光束强度测试图。(a) 扭转示意图; (b) 扭转 100° ; (c) 扭转 720°
 Fig. 2 Intensity distribution of the 4×1 signal combiner with the twisted output fiber. (a) Schematic of the fiber twist; (b) twist angle is 100° ; (c) twist angle is 720°

纤达到熔融状态, 然后关闭火焰, 待光纤冷却后就能保持扭转状态。图 2(b) 和图 2(c) 分别是出端光纤扭转角度为 100° 和 720° 时的光束强度分布, 测试时, 在所用合束器后接一段扭转光纤进行测试, 测试使用的 QBH 与输出光纤不扭转时使用的 QBH 相同。出端光纤扭转后, 光场强度分布发生变化。与图 1 对比, 图 2 所示的光场强度分布更为均匀, 这是由于出端光纤扭转后, 光纤有所弯曲, 且内部存在应力, 光纤内激发出更多的模式, 但光场强度分布仍不呈现平顶分布。

为了进一步激发输出光纤中更多的模式, 考虑在锥区与输出光纤之间过渡一段 $200/220/360 \mu\text{m}$ 光纤, $200/220/360 \mu\text{m}$ 光纤的 NA 值为 0.22, 在波长为 1064 nm 时的 V 值为 260, 此时所能支持的导模数 M 约为 16900。图 3 是 $20/130 \mu\text{m}$ 光纤输入、 $200/220/360 \mu\text{m}$ 光纤输出的 4×1 光纤信号合束器的光场强度分布。从图 3(a) 光束强度二维分布图可知, 该光束的光强分布不均匀, 光强分布较为分散。图 3(b) 和图 3(c) 分别表示 X 和 Y 方向的光强分布, 光强分布并不呈现平顶光束分布。这是由于激光进入该合束器后也只能激发 $200/220/360 \mu\text{m}$

光纤的部分模式, 这些模式的叠加未能呈现平顶分布。然而, 与 $100/120/360 \mu\text{m}$ 光纤输出的信号合束器相比, 从光束的光场强度分布来看, 此时 $200/220/360 \mu\text{m}$ 光纤输出中更多的模式被激发, 可以将这些光导入到 $100/120/360 \mu\text{m}$ 光纤中, 使得在 $100/120/360 \mu\text{m}$ 光纤中能够激发更多模式。

基于上述分析, 制作了平顶光输出的信号合束器。制作流程如图 4 所示。首先, 4 根 $20/130 \mu\text{m}$ 光纤去除一段涂覆层后按方形排列, 穿入玻璃管中, 组束完成后的光纤和玻璃管在热源加热下达到熔融状态, 并在电机牵引下, 拉制成双锥结构, 如图 4(a) 所示; 然后, 用切刀在合适位置将双锥结构切开, 得到如图 4(b) 所示的锥区; 接着, 如图 4(c) 所示, 对锥区和去除一段涂覆层并切平后的 $200/220/360 \mu\text{m}$ 光纤进行熔接, 值得一提的是, 图 3 所示的结果为这一步骤所得合束器的测试结果; 再对 $200/220/360 \mu\text{m}$ 光纤的另一端去除一段涂覆层后进行拉锥, 使拉锥后的光纤纤芯直径小于 $100 \mu\text{m}$, 如图 4(d) 所示; 如图 4(e) 所示, 对出端光纤进行扭转处理; 最后, 如图 4(f) 所示, 对拉锥后的 $200/220/360 \mu\text{m}$ 光纤与扭

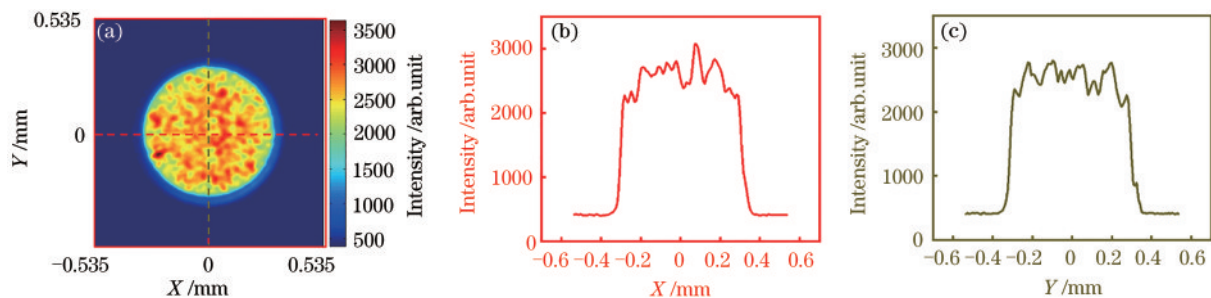


图 3 $200/220/360 \mu\text{m}$ 光纤输出的 4×1 信号合束器的光束强度测试图。(a) 光束强度分布; (b) X 方向的光束强度分布; (c) Y 方向的光束强度分布

Fig. 3 Intensity distribution of the 4×1 signal combiner with the $200/220/360 \mu\text{m}$ fiber output. (a) Intensity distribution; (b) intensity distribution in X direction; (c) intensity distribution in Y direction

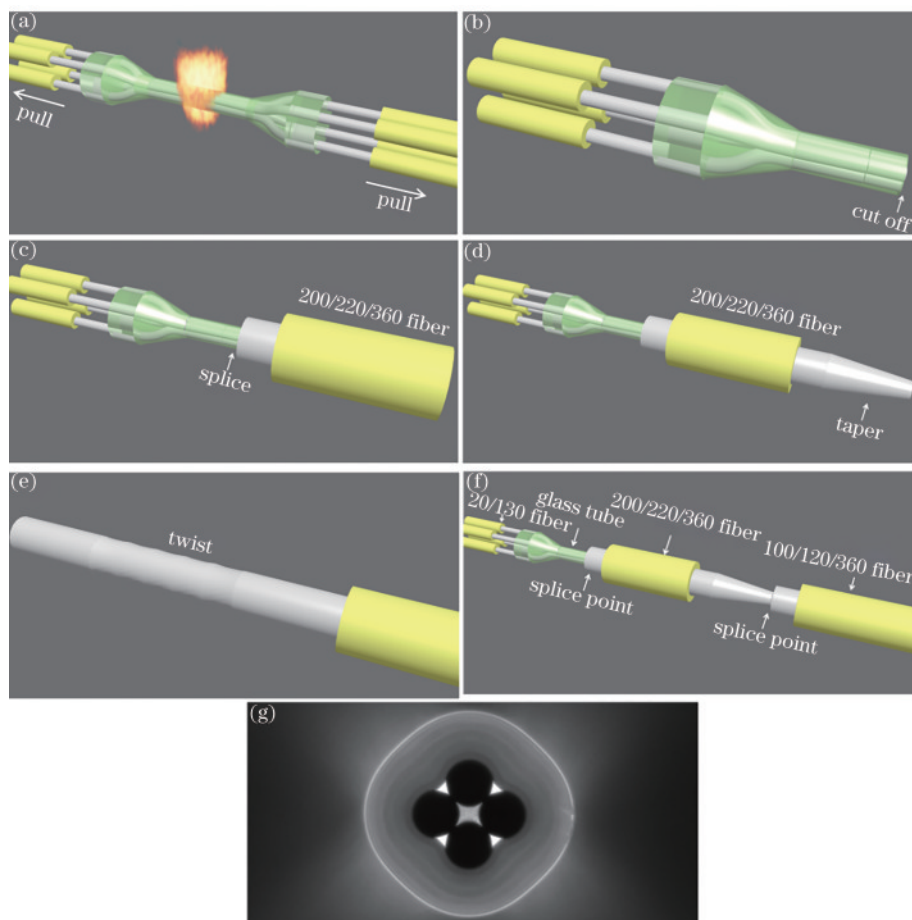


图 4 平顶光输出的信号合束器的制作流程。(a)锥区控制;(b)锥区切割;(c)锥区与 200/220/360 μm 光纤熔接;(d)200/220/360 μm 光纤拉细;(e)100/120/360 μm 光纤扭转;(f)成品;(g)锥区端面

Fig. 4 Manufacturing process of the flat-top beam output signal combiner. (a) Tapering of the cone area; (b) cut off the cone area; (c) splicing between the tapered fiber bundle and 200/220/360 μm fiber; (d) tapering of the 200/220/360 μm fiber; (e) twist of the 100/120/360 μm fiber; (f) the finished product; (g) cross section of the tapered fiber bundle

转后 100/120/360 μm 光纤进行熔接,得到最终的信号合束器。图 4(g)是拉锥完成并切平后的锥区的端面,可以看到 4 根光纤分布均匀,且光纤与光纤之间、光纤与玻璃管之间融合较好。

对光纤信号合束器进行测试。测试所用 QBH 与图 1 和图 2 所用 QBH 相同。图 5 是光束束腰处的光场强度分布,其中图 5(a)是光场强度的二维分布,可以看出,光场强度分布较为均匀。图 5(b)和 5(c)分别是 X 和 Y 方向上的光场强度分布,在这两个方向上,光场强度呈现平顶分布。图 5(d)为光场强度的三维分布图,可以看出,此时的光场强度呈现平顶分布。

为了描述平顶光束的特征,用归一化的均方根 σ 描述光束的平坦度^[16],表达式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{I_i - \bar{I}}{I_{\max}} \right)^2}, \quad (3)$$

式中: I_i 为光束上某一点的光强; I_{\max} 为光束最大光强; \bar{I} 为光束光强平均值。 σ 值越大,表明光束的光强变化大,光束的平坦度越差。计算时,按照 $4 - \sigma$ 原则确定光斑范围,由(3)式可得图 5 所示平顶光束的 σ 值为 0.065,表明该光束的光强呈现均匀分布的状态。

为了反映光束的陡峭程度,引入参数 Ω ,它的表达式为

$$\Omega = \frac{S_{10\%} - S_{90\%}}{S_{10\%}}, \quad (4)$$

式中: $S_{10\%}$ 和 $S_{90\%}$ 分别为光束强度为峰值强度的 10% 和 90% 时光束的有效面积。 Ω 值越小,表明光束越陡峭,光束能量集中在平顶部分。由(4)式可得图 5 所示平顶光束的 Ω 值为 0.604。

上述结果表明,光束在束腰处呈现平顶分布。同样的,对光束传播方向上不同平面进行测试,结果如图 6 所示。图 6(a)是光斑半径沿 Z 轴的变化情

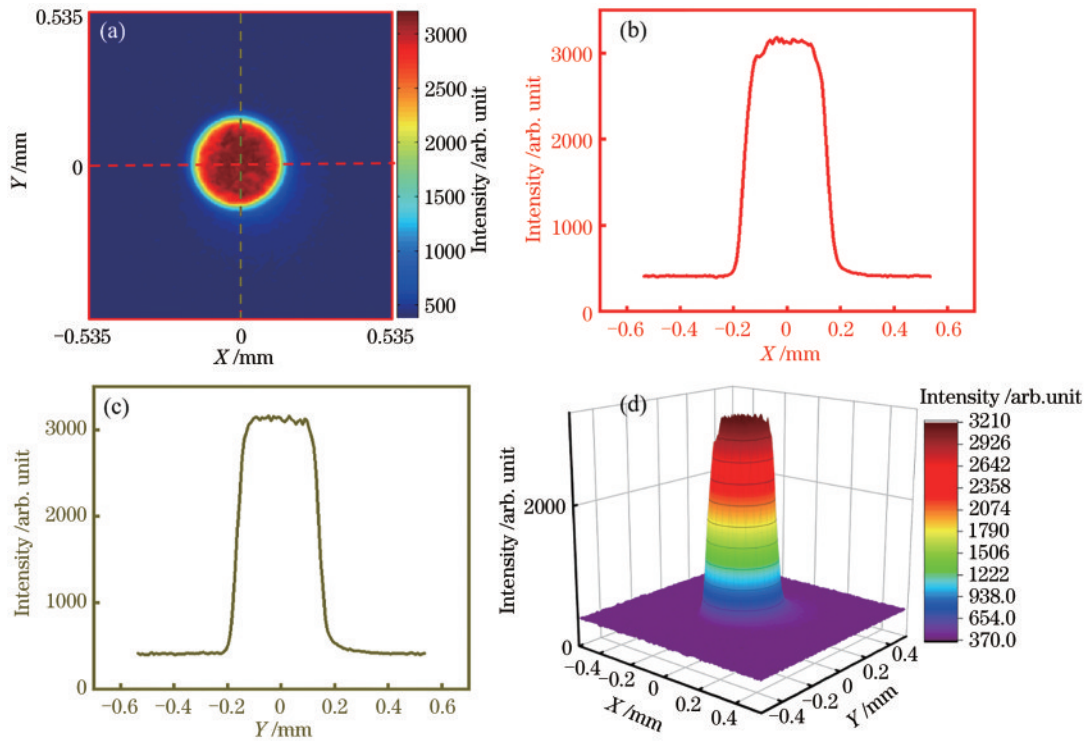


图 5 平顶光输出的光纤信号合束器的光强分布。(a)二维分布;(b)X方向分布;(c)Y方向分布;(d)三维分布

Fig. 5 Intensity distribution of the flat-top beam output fiber signal combiner. (a) 2D distribution; (b) X direction distribution; (c) Y direction distribution; (d) 3D distribution

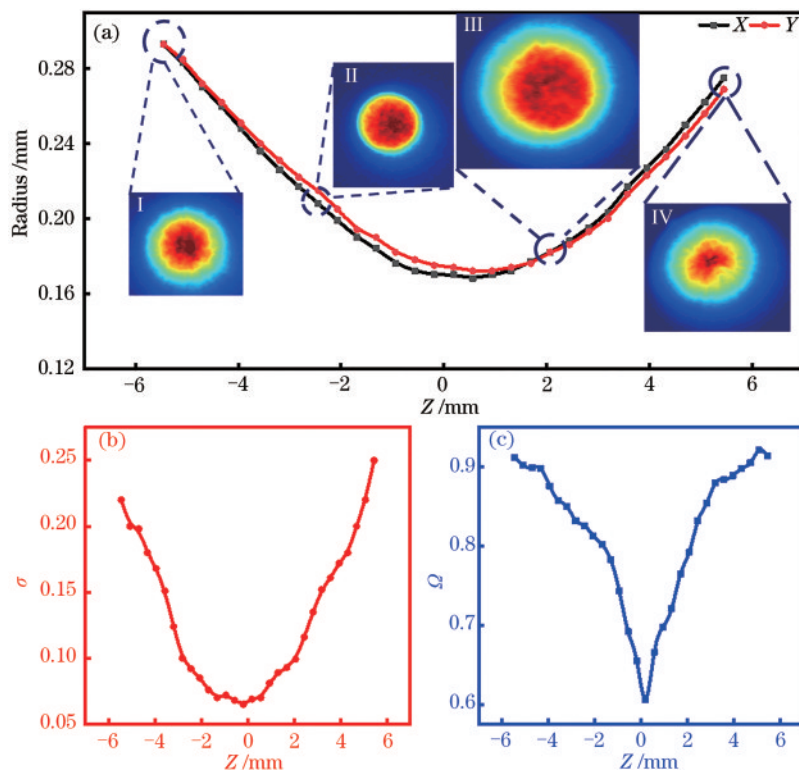


图 6 不同平面测试结果。(a)光斑半径与坐标 Z 的关系,插图分别对应不同平面上光束的二维光强分布;(b) σ 随 Z 的变化;(c) Ω 随 Z 的变化

Fig. 6 Experimental results at different planes. (a) Beam radius as a function of the Z axis, the insets show the 2D intensity distribution of the beam at different planes; (b) σ as a function of Z; (c) Ω as a function of Z

况,从图 6(a)插图不同平面的光斑分布可以看出,随着与光束束腰处的距离增大,光斑半径增大,光强大于光束最大光强的 90% 的分布范围将减小。图 6(b)是光斑平坦度沿 Z 轴的变化情况,随着与光束束腰处的距离增大,光束的平坦度指数 σ 也将相应增大,表明平顶效果变差,但 σ 在 0.1 以下时,Z 所对应的宽度范围为 4.88 mm 左右,在这个范围内可以认为光束的平顶效果较好。图 6(c)是 Ω 与 Z 的关系图,随着与光束束腰处的距离增大,光束对的陡峭度指数 Ω 也将相应增大,表明光束强度分布趋于平缓,将更接近高斯分布时的情况。

对上述信号合束器的传输效率进行测试,测试时所用光源为波长为 1080 nm 的高功率连续光纤激光器。对每一条输入臂单独输入激光进行效率测试,输入的激光功率为 1 kW,测得的该信号合束器的传输效率如表 1 所示。

表 1 信号合束器各个输入臂的传输效率

Table 1 Transmission efficiency of each port of the combiner

Port No.	Efficiency / %
1	96.1
2	96.4
3	96.2
4	96.5

3 结 论

通过制作进端为 20/130 μm 光纤、出端为 100/120/360 μm 光纤的 4 \times 1 信号合束器,实现了光束在束腰附近 4.88 mm 范围内的平顶光输出。该平顶光的平坦度为 0.065。该结果有望运用于激光切割和激光焊接等领域,对于提高切割和焊接效果具有积极意义。

参 考 文 献

- [1] Li S S, Wang Y L, Lu Z W, et al. High-quality near-field beam achieved in a high-power laser based on SLM adaptive beam-shaping system[J]. Optics Express, 2015, 23(2): 681-689.
- [2] Fried N M, Hung V C, Walsh J T. Laser tissue welding: laser spot size and beam profile studies[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1999, 5(4): 1004-1012.
- [3] Fuse K. Beam shaping for advanced laser materials processing[J]. Laser Technik Journal, 2015, 12(2): 19-22.
- [4] Han W, Cheng W, Zhan Q W. Flat-top focusing with full Poincaré beams under low numerical aperture illumination[J]. Optics Letters, 2011, 36(9): 1605-1607.
- [5] Dickey F M, Weichman L S, Shagam R N. Laser beam shaping techniques[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4065: 338-348.
- [6] Homburg O, Bayer A, Mitra T, et al. Beam shaping of high power diode lasers benefits from asymmetrical refractive micro-lens arrays[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6876: 68760B.
- [7] Lin Y, Hu J S. Laser beam shaping techniques[J]. Laser Journal, 2008, 29(6): 338-348.
林勇, 胡家升. 激光光束的整形技术[J]. 激光杂志, 2008, 29(6): 338-348.
- [8] Wu C J, Liu R X, Xu Y. Design and simulation of flat-top microstructure fiber[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9449: 94491U.
- [9] Mayeh M, Farahi F. Laser beam shaping and mode conversion in optical fibers[J]. Photonic Sensors, 2011, 1(2): 187-198.
- [10] Noordegraaf D, Maack M D, Skovgaard P M W, et al. All-fiber 7 \times 1 signal combiner for incoherent laser beam combining[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7914: 79142L.
- [11] Shiner B. Delivering power[J]. Nature Photonics, 2010, 4(5): 290.
- [12] Kliner D A V, Chong K, Franke J, et al. 4-kW fiber laser for metal cutting and welding[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7914: 791418.
- [13] Shen Y P, Chen C, Gao M, et al. Technological characteristics in fiber laser cutting of medium-thickness aluminum alloy sheet[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0102008.
沈义平, 陈聪, 高明, 等. 光纤激光切割中厚铝合金板工艺特性研究[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0102008.
- [14] Lu W, Ma X Y, Duan A Q, et al. Weld formation and stability analysis of fiber laser beam welded BTi6431S titanium alloy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 131405.
芦伟, 马旭颀, 段爱琴, 等. BTi6431S 钛合金光纤激光焊接成形及稳定性分析[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 131405.
- [15] Zhou H, Chen Z L, Zhou X F, et al. All-fiber 7 \times 1 signal combiner for high power fiber lasers[J]. Applied Optics, 2015, 54(11): 3090-3094.
- [16] Xu C L, Yan K, Gu C, et al. All-fiber laser with flat-top beam output using a few-mode fiber Bragg grating[J]. Optics Letters, 2018, 43(6): 1247-1250.