

高光束质量保持的 $(6+1) \times 1$ 泵浦/信号合束器研制王嘉伟¹, 李智贤^{1,2,3}, 付敏¹, 田鑫¹, 饶斌裕¹, 陈子伦^{1,2,3*}, 王泽锋^{1,2,3}¹国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;²国防科技大学南湖之光实验室, 湖南 长沙 410073;³国防科技大学高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073

摘要 研制了一款输入输出均为 $50 \mu\text{m}$ 大芯径信号光纤的高泵浦光耦合效率、高光束质量保持的 $(6+1) \times 1$ 反向泵浦/信号合束器。利用仿真软件分析了锥区长度、拉锥比例以及玻璃管折射率对泵浦光耦合效率的影响, 纤芯轴向偏移量对信号光传输效率及光束质量的影响。合束器的制作中, 使用半掺氟的薄壁玻璃管提高泵浦臂性能, 泵浦耦合效率大于 98.5%, 无主动制冷情况下温升小于 $10^\circ\text{C}/\text{kW}$ 。采用包层腐蚀变径技术保证信号光纤在组束过程中纤芯不变形, 并通过光束质量因子反馈对准熔接, 实现了高光束质量保持的合束器的研制, 光束质量退化比仅为 3.4%。在合束器信号光纤尾端制作包层光滤波器并熔接端帽构成一体化器件, 应用于单级主振荡功率放大结构的窄线宽激光系统中, 实现了 4.1 kW 近单模输出, 拉曼抑制比为 40.5 dB。

关键词 泵浦/信号合束器; 高功率光纤激光; 光束质量

中图分类号 TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL231120

1 引言

光纤激光器凭借其结构紧凑、转换效率高、亮度高、光束质量好以及热管理方便等优点广泛应用于工业加工、国防军事、生物医疗等领域^[1-3]。近年来, 随着光纤合束器和光纤光栅等器件的发展, 光纤激光器逐渐向全光纤结构转化, 其中泵浦/信号合束器承担着泵浦光耦合和信号光传输两项重要任务, 是目前全光纤结构光纤激光器的关键元器件之一^[4]。按照泵浦光注入方式, 泵浦/信号合束器分为侧面泵浦和端面泵浦两类。侧面泵浦/信号合束器将泵浦臂粘接在信号光纤的内包层, 具有光束质量佳、后向隔离度高等优势, 但泵浦臂数量较少导致其泵浦能力稍显不足, 在高功率光纤激光器中的应用还受到一定制约^[5-6]。相比而言, 端面泵浦/信号合束器在泵浦臂数量上更具优势, 可以实现更多的泵浦注入, 是高功率光纤激光系统的主流泵浦方式。

端面泵浦/信号合束器在制作过程中需要对信号光纤进行腐蚀、拉锥、切割、熔接等一系列操作, 会对信号光传输产生一定影响, 为此研究者们采取了不同的方法来降低信号光经过合束器产生的损耗及延缓光束质量退化。2017年, 中国科学院半导体研究所^[7]提出将信号光纤和泵浦光纤束先后分别与输出光纤熔接来实现信号光纤与输出光纤纤芯的精确对准, 制作的

$(6+1) \times 1$ 合束器的信号光通过率超过 97%, 但并未提及其光束质量变化情况。2018年, 中国科学院西安光学精密机械研究所^[8]使用自研的信号光纤制作了一款 $(6+1) \times 1$ 合束器, 信号光纤 ($30/220 \mu\text{m}$, NA 为 0.06) 与泵浦光纤 ($200/220 \mu\text{m}$, NA 为 0.22) 直径相同保证了光纤束的对称性, 将此合束器用于放大器中, 在输出功率为 2.67 kW 时, 光束质量因子 $M^2=1.41$ 。2021年, 中国工程物理研究院^[9]采用 M^2 反馈对准的方式研制了信号光纤为 $25/250 \mu\text{m}$ (NA 为 0.06)、输出光纤为 $20/400 \mu\text{m}$ (NA 为 0.06) 的 $(6+1) \times 1$ 合束器, 在 1 kW 激光注入时, 光束质量退化比约为 10%。2022年, 国防科技大学本课题组采用 CCD 相机反馈对准的方式研制了信号光纤和输出光纤均为 $25/400 \mu\text{m}$ (NA 为 0.06) 的 $(6+1) \times 1$ 合束器, 光束质量退化比仅为 2.2%^[10]。此外, 国内一些公司也具有较高的合束器研制水平: 西安中科汇纤光电科技有限公司可以生产单臂承载功率 800 W, 泵浦耦合效率超过 97%, 信号光插损为 0.1 dB~0.3 dB 的产品; 珠海光库科技股份有限公司可以生产单臂承载功率 500 W, 泵浦耦合效率不低于 97%, 光束质量退化比小于 10% 的产品。由于模式数目少, 模式控制难度低, 目前 LD 泵浦的高功率、高光束质量激光输出大都使用纤芯直径不超过 $30 \mu\text{m}$ 的掺铒光纤作为增益介质^[11], 为了避免模场失配导致光束质量劣化, 泵浦/信号合束器的研究也多基于纤芯

收稿日期: 2023-08-22; 修回日期: 2023-12-13; 录用日期: 2024-01-04; 网络首发日期: 2024-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(11974427)、湖南省自然科学基金(2019JJ20023)

通信作者: *zilun2003@163.com

直径不超过 30 μm 的少模信号光纤展开。

随着功率的不断提升,光纤激光系统中存在的热效应、非线性效应、模式不稳定现象等相继出现并关联叠加,造成了光束质量劣化和功率提升受限等诸多问题,基于反向泵浦/信号合束器实现的反向泵浦是抑制非线性效应和模式不稳定的有效手段^[12]。相比正向合束器,反向合束器要承载更高功率泵浦光的注入并实现放大后激光的高质量传输,对承载功率、光束质量保持等性能指标的要求更高。本文基于非线性效应阈值更高的大芯径(50 μm)多模信号光纤,研制了一款泵浦耦合效率大于 98.5%、光束质量退化比仅为 3.4% 的 (6+1) \times 1 反向泵浦/信号合束器。基于合束器制作一体化器件并应用于单级主振荡功率放大(MOPA)结构的窄线宽激光系统中,实现了 4.1 kW 近单模输出,拉曼抑制比大于 40 dB,表明其在高功率光纤激光系统中具有广阔的应用前景。

2 数值仿真

2.1 仿真模型建立

为了确定合束器制作的最佳参数,建立了基于腐蚀-穿管法的反向泵浦/信号合束器仿真模型。仿真模型结构及截面折射率分布如图 1 所示,借助玻璃管的束缚 6 根泵浦光纤紧密围绕在信号光纤周围形成锥形光纤束(TFB),并与输出光纤熔接。合束器的泵浦光纤为 220/242 μm ,纤芯折射率设为 1.45,包层折射率设为 1.433,对应数值孔径为 0.22;信号光纤和输出光纤均为 50/400 μm ,纤芯折射率设为 1.455,包层折射率设为 1.45,涂覆层折射率为 1.375,对应数值孔径为 0.12/0.46;石英玻璃管的折射率为 1.45,掺氟层的折射率为 1.433;背景折射率设为 1,网格划分为 0.5 μm 。边界条件设置为透明边界条件(simple TBC),它能使得辐射场更好地离开计算区域^[13]。

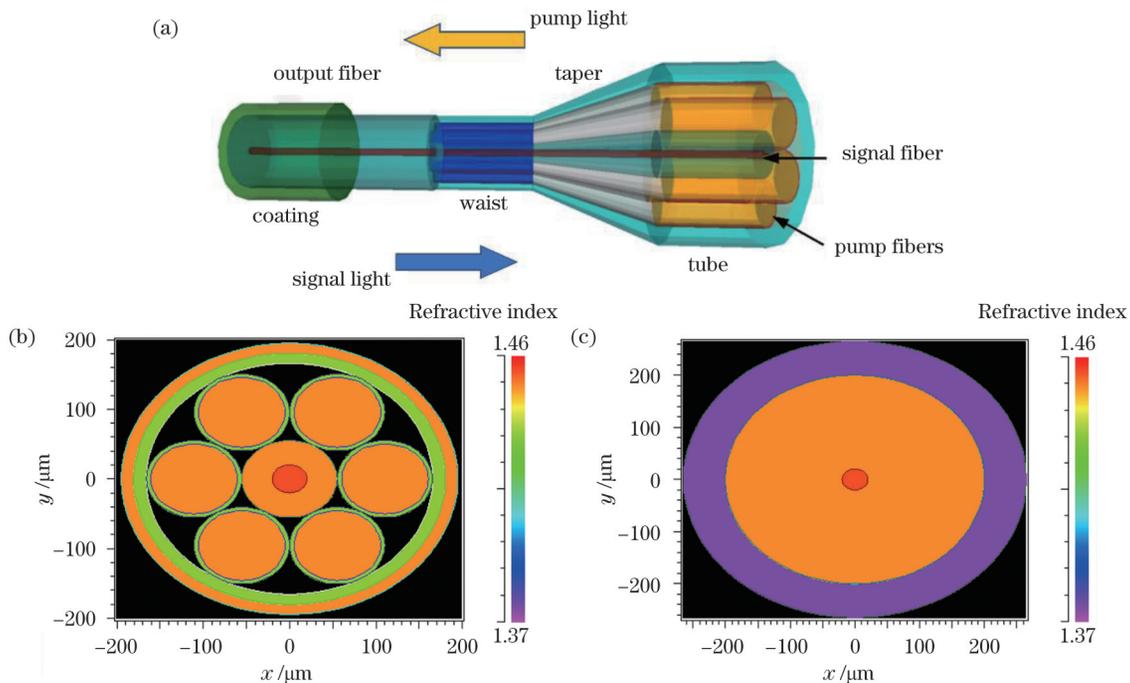


图 1 仿真模型示意图。(a)结构图;(b)腰区截面折射率分布;(c)输出光纤截面折射率分布

Fig. 1 Schematic diagram of the simulation model. (a) Structure diagram; (b) refractive index distribution of the waist section; (c) refractive index distribution of the output fiber section

2.2 泵浦光传输仿真

对于从泵浦光纤耦合进输出光纤内的泵浦光,若是传输角度过大,不满足由输出光纤内外包层所构成的全反射条件,则会泄漏到输出光纤的外包层以及涂覆层中去,称之为LPC(leakage power into the coating of output fiber)^[6]。光纤涂覆层为低折射率聚合物,主要为聚酰亚胺(失效温度在 300 $^{\circ}\text{C}$ 左右)或丙烯酸树脂(失效温度在 80 $^{\circ}\text{C}$ 左右),均远低于石英玻璃的失效温度,所以LPC引起的温升是造成合束器损坏的最主要原因^[14-15]。本节通过数值仿真,研究锥区长度、拉锥比例以及玻璃管折射率对泵浦光耦合率和LPC的影响。

由于泵浦光纤中可以存在成千上万个模式,选取 4 个高阶模来进行泵浦光传输特性仿真,其对应的有效折射率 n_{eff} 和能量分布如图 2 所示,可以看出,有效折射率越大的模式,能量越集中在纤芯,在锥形传输过程中越不易泄漏。

图 3 为合束器的泵浦耦合效率及LPC与锥区长度和腰区直径(拉锥比例)的关系,从图 3(a)中可以看出,随着锥区长度的增加,各个模式的耦合效率增加、LPC减少,并逐渐趋于稳定,有效折射率高的低阶模式率先趋于稳定,且耦合效率高、LPC低(LP_{6,6}模在锥区长度超过 2 mm 后即趋于稳定,耦合效率超过

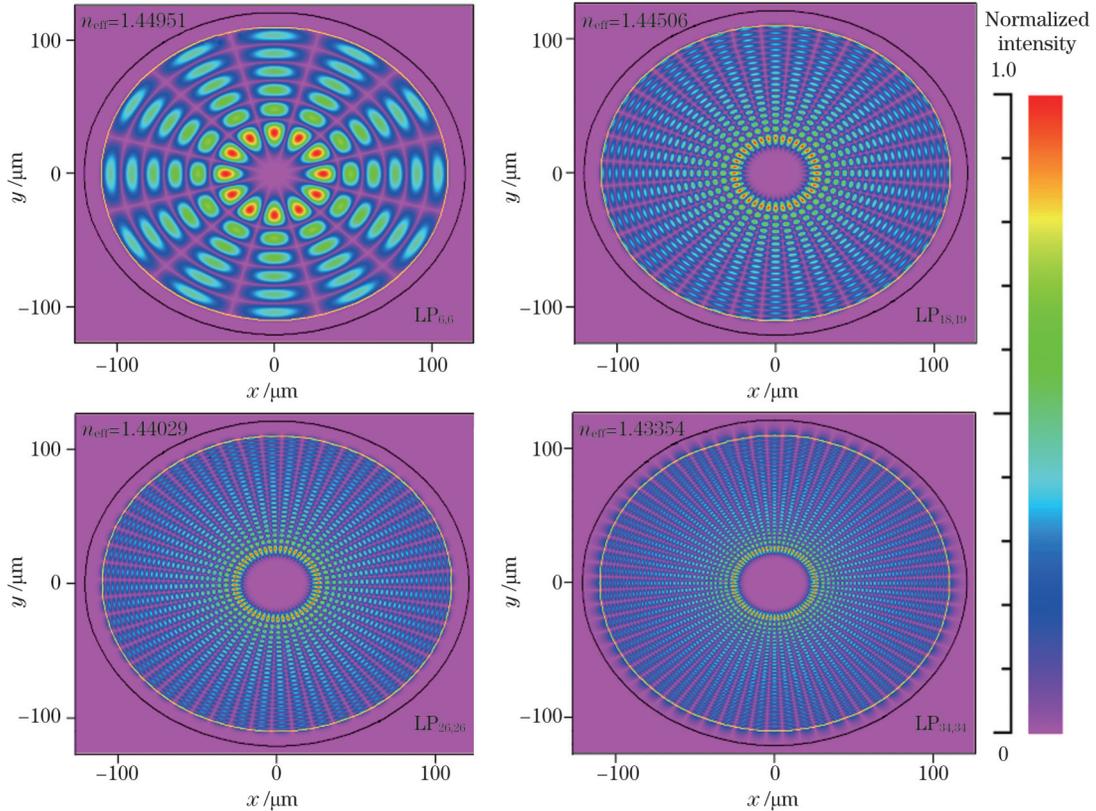


图 2 不同模式(LP₆₆, LP_{18,19}, LP_{26,26}和 LP_{34,34})的能量分布

Fig. 2 Field energy distribution images of LP₆₆, LP_{18,19}, LP_{26,26}, and LP_{34,34} mode

99.5%), 锥区长度达到 8 mm 后, 各模式的耦合效率和 LPC 均趋于稳定, 在合束器的制作中考虑到封装工艺以及拉锥设备的稳定性, 我们将锥区长度设置为 12 mm。从图 3(b) 中可以看出, 对于有效折射率高的低阶模式, 腰区直径的变化对泵浦性能的影响并不大, 而 LP_{34,34} 模的耦合效率提高了 20%, LPC 降低了 13%, 这说明对于有效折射率低的高阶模式, 增大腰区直径(降低拉锥比例)能显著提高耦合效率、降低 LPC, 由于泵浦光中存在大量高阶模式, 因此可以使用薄壁玻璃管

制作合束器以减小泵浦光纤拉锥比例, 提高器件的温度特性。图 3 中, 在相同情况下, 有效折射率越高的模式耦合效率越高, LPC 越低, 说明使用高亮度的泵浦源有利于改善合束器的性能。通过掺氟可以降低石英玻璃管的折射率, 图 4 展示了 LP_{26,26} 模在三种不同折射率分布玻璃管下的泵浦臂性能, 可见掺氟玻璃管性能最佳, 半掺氟玻璃管次之。但是氟离子的掺杂会破坏石英玻璃的氧硅四面体结构, 降低其机械强度和软化温度^[16], 不利于合束器的切割, 故选用半掺氟的玻璃管。

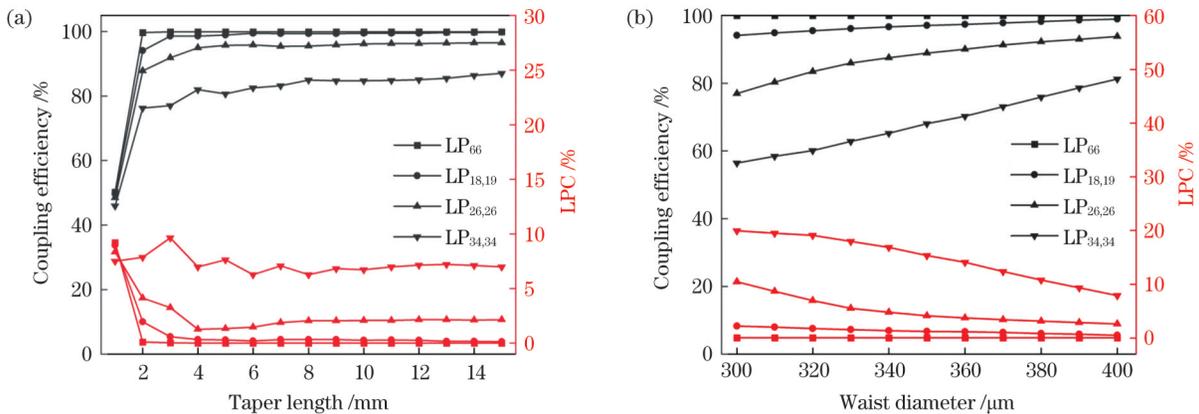


图 3 拉锥参数对泵浦耦合效率和 LPC 的影响。(a) 锥区长度; (b) 腰区直径

Fig. 3 Influence of taper parameters on pump coupling efficiency and LPC. (a) Taper length; (b) waist diameter

2.3 信号光传输仿真

合束器制备过程中光纤束与输出光纤的熔接对于

器件内信号光的传输特性影响巨大, 本节针对熔接时信号光纤纤芯轴向偏移对信号光传输的影响建立模型

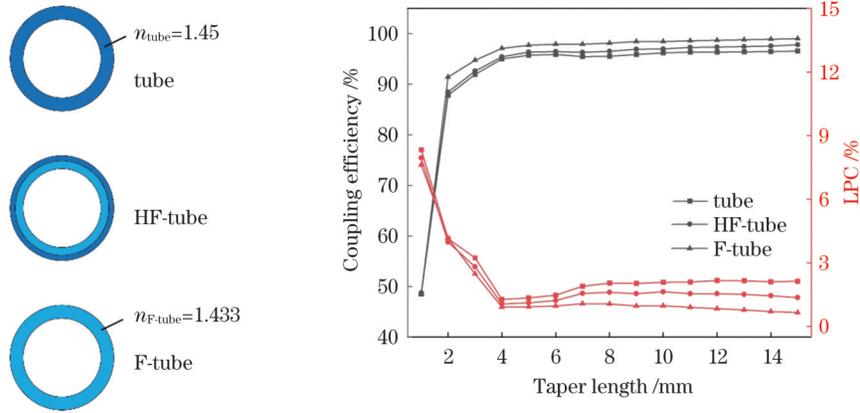


图 4 泵浦耦合效率和 LPC 与玻璃管折射率的关系

Fig. 4 Theoretical relationships between coupling efficiency and LPC with index of tube

并进行相应的理论仿真。在基模高斯光入射的情况下,仿真结果如图 5 所示,从图 5(a)中可以看到,随着偏移量 L 的增加,信号光总体通过率和基模占比率都呈现下降趋势,但基模占比下降的程度要远远大于总体通过率,当偏移量为 $10 \mu\text{m}$ 时,信号光通过率仍能保持在 96% 以上,但此时基模的占比率不足 70%。这说

明多模信号光纤熔接时纤芯的偏移量会将纤芯中的基模转换为高阶模式,对信号光的总体通过率影响不大。从图 5(b)中也可以看到,信号光的光束质量因子 M^2 的大小随着 L 增加而显著增大。可见对于大芯径多模信号光纤, M^2 因子要比传输效率对偏移量的变化敏感得多。

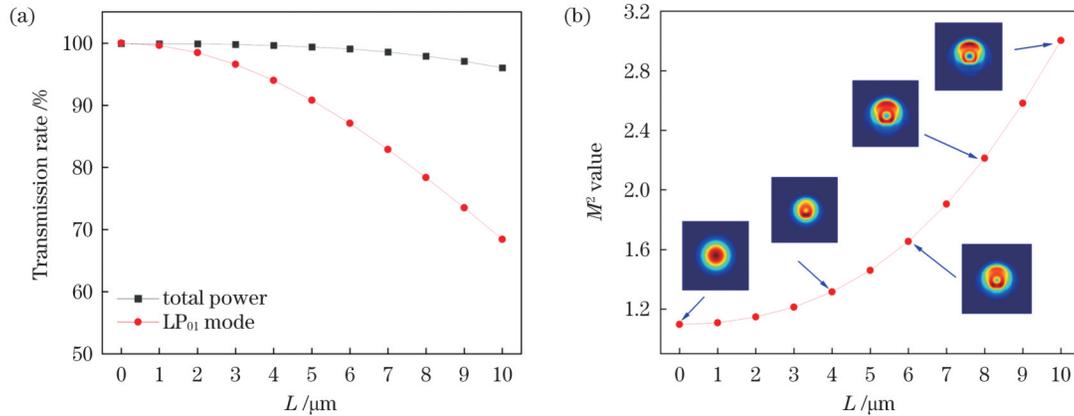


图 5 纤芯偏移量对信号臂性能的影响。(a)信号光通过率;(b) M^2

Fig. 5 Effect of the core off-axis value on the performance of signal fiber. (a) Signal transmission rate; (b) M^2 value

3 合束器的制作、测试与应用

3.1 合束器的制作

采用腐蚀-穿管法制作合束器主要分为以下步骤: 1) 玻璃管的拉锥。将石英玻璃管拉锥到内径略大于三倍泵浦光纤包层直径,使得泵浦光纤可以呈正六边形整齐紧密排布在石英管中。2) 泵浦光纤的组束。将 7 根泵浦光纤穿入图 6(a) 所示的 7 孔管,并单独标识中间的占位泵浦纤;将剥除涂覆层的泵浦光纤穿入拉锥过的玻璃管并抽出中间的占位光纤。3) 泵浦光纤束的拉锥。利用熔融拉锥设备将光纤束腰区直径拉锥到略小于输出光纤直径(为了保证在反馈对准熔接时有较大的调节余量,束腰直径一般比光纤直径小 $5 \sim 10 \mu\text{m}$),即形成带有中心孔隙的光纤束,如图 6(b) 所示。4) 信号光纤的穿入与烧实。将包层腐蚀后的信号光纤穿入带有中心孔隙的泵浦光纤束,仅利用高温

熔融加热使光纤束烧实,而不对其进行拉锥。5) 光纤束的切割。通过在线切割的方式将烧实的光纤束在腰区切断,切割端面控制在 1° 以内,切割后的合束器端面如图 6(c) 所示。6) 输出光纤的熔接。采用在线反馈对准的方式将合束器与输出光纤熔接。通过对信号光纤进行腐蚀-穿管-烧实,理论上可以实现任意尺寸的信号纤与泵浦纤匹配,且无需对信号光纤进行拉锥,是一种具有很强普适性以及高光束质量保持特性合束器的制作方法。

由于腐蚀后的信号光纤直径约为 $110 \mu\text{m}$,在穿入过程中遇到阻力很容易折断,所以腐蚀后的信号光纤尺寸应比中心孔隙小 $1 \sim 2 \mu\text{m}$,这样既能保证信号光纤顺利穿入泵浦光纤束,也便于烧实。但是,这就会导致信号纤不一定位于光纤束几何中心,若是直接采用熔接机的包层对准功能很有可能会造成信号光纤与输出光纤纤芯产生轴向偏移,因此需要采用反馈对准的

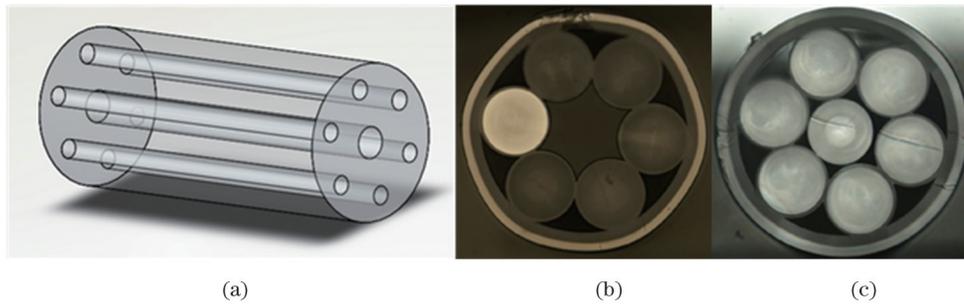


图6 合束器制作关键阶段。(a) 7孔管结构示意图;(b)带有中心孔隙的光纤束显微图像;(c)穿入信号光纤的光纤束显微图像
Fig. 6 Key stage of combiner fabrication. (a) Structure diagram of the seven-hole glass tube; (b) microscopic image of the TFB with central pore; (c) microscopic image of the TFB after the central fiber inserted

方式进行合束器熔接。反馈熔接结构如图7所示,使用中心波长为1060 nm的高稳定度单模放大自发辐射(ASE)光源(尾纤为SMF 6/125 μm,谱宽为45 nm)作为注入光源,经模场适配器(MFA)和包层光滤除器(CLS)后与合束器的输出光纤熔接,输出光纤的另一端放在熔接机内与切割完成的光纤束进行反馈对准。

实验中,将功率和 M^2 因子(二阶矩)分别作为反馈对准的指标,可以发现:轴向偏移量在5 μm范围内时,功率并没有明显的变化;轴向偏移量为0.5 μm时,就能观察到明显的 M^2 因子变化,这与第2节的信号光仿真结果得出的结论是一致的,为此我们选用对轴向偏移量更为敏感的 M^2 因子作为反馈对准的指标。

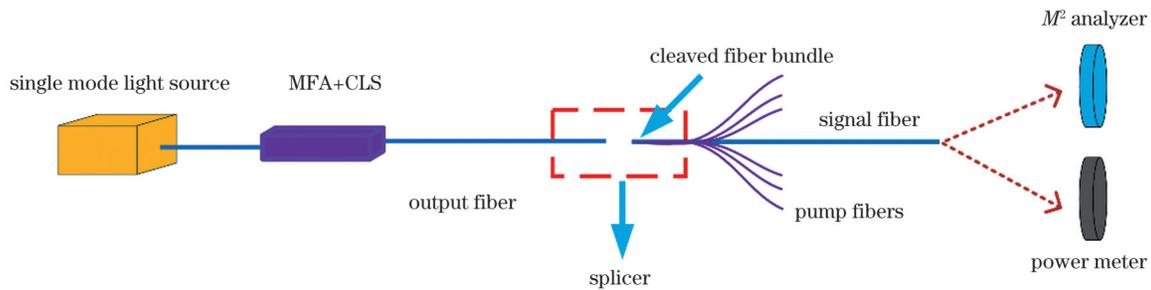


图7 反馈熔接结构示意图
Fig. 7 In-line alignment splicing structure

良好的切割角度是实现高质量熔接的首要条件,合束器拉锥过程中,在热源开始和结束加热的位置会由于温度变化不均匀产生应力集中,降低合束器的抗拉强度,通过优化切割刀振幅和频率并采用亚临界切割法保证了在较小的轴向拉力下获得小于1°的切割角度。亚临界切割是指首先设置一个较低的拉力,让切割刀上来产生初始划擦点,此时它还不足以沿光纤端面传播,等待设定的划擦延迟时间后,按一定的步进量增加拉力,再次等待设定的时间,重复以上过程,直到切开端面。熔接是热源加热的同时用高精度运动机构平缓推进使光纤和光纤束熔合在一起的过程,通过对比熔接前后的光束质量变化发现,热源参数设置以使光纤束略塌缩为宜,在减小玻璃管与泵浦光纤空隙的同时尽可能保持泵浦光纤与信号光纤之间的空隙,这样既能保证熔接强度,也不会由于过度加热而造成信号光纤变形从而影响光束质量,此时对应的放电强度为80 bit,放电时间为7500 ms。此外由于玻璃管的存在,光纤束的熔点要比输出光纤的熔点低,所以在加热时需要将热源向光纤方向调节,这样可以保证输出光纤熔融的同时光纤束不过度熔化。图8(a)和图8(b)分别给出了对准后与熔接后的显微镜以及光斑图像,

熔接后的光束质量要优于对准后的光束质量,也证明了熔接参数设置的合理性。

3.2 合束器的测试

使用Reci,DAB1200泵浦源(NA约为0.17)对合束器的泵浦臂性能进行测试,将未封装的合束器架空放

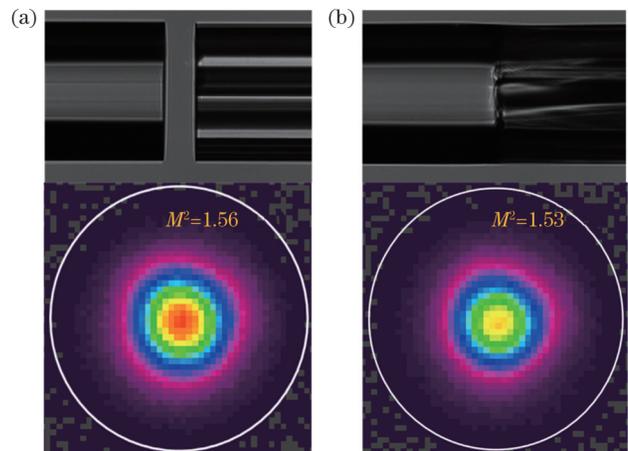


图8 合束器熔接过程的显微镜以及光斑图像。(a)对准后;
(b)熔接后
Fig. 8 Microscopic images and spot images during the splicing of the combiner. (a) After alignment; (b) after splicing

置以便观察温度,持续注入 500 W 的泵浦光 5 min,测得的效率和温升均未出现明显波动,温升最高点为输出光纤涂覆层剥口处。表 1 为不同厚度、不同折射率玻璃管制作的合束器泵浦性能测试结果,为尽可能消除拉锥、切割、熔接、剥除等设备稳定性对结果的影响,每种类型的合束器分别制作三支,取平均值。可以看出:玻璃管折射率相同时,对应泵浦光纤拉锥比例更小的薄壁玻璃管的泵浦性能更佳;相同厚度的玻璃管,折射率更低

表 1 不同玻璃管制作的合束器泵浦性能

Table 1 Pump performance of combiners made of different tubes

Tube size / μm	Tube material	Taper ratio	Coupling efficiency /%	Temperature rise coefficient /($^{\circ}\text{C}/\text{kW}$)
800/1000	Silica	2.27	98.0	14.7
850/1000	Silica	2.14	98.3	12.4
850/1000	Fluoride-doped silica	2.14	98.5	9.5

使用实验室自行搭建的 3 kW 级准单模光纤振荡器对封装后的合束器信号臂性能进行测试,该激光器输出尾纤尺寸为 25/400 μm 。测试结果如图 9 所示,图 9(a)为激光器经模场适配器后由尾纤为 50/400 μm 的端帽输出的光束质量测量结果, $M^2=1.47$,图 9(b)为激光器经模场适配器和合束器后由端帽输出的光束质量

的半掺氟玻璃管的泵浦性能更佳,这也验证了第 2 节数值仿真得出的结论。综上,本文选用了 850/1000 μm 的薄壁掺氟玻璃管制作合束器。需要说明的是,实验表明在将合束器封装到夹具中时,通过使用折射率为 1.37 的紫外固化胶覆盖涂覆层剥口处,可以将温升系数降低 40% 左右,此外在合束器使用过程中,可以通过导热硅脂将其固定在水冷板上来进行主动制冷,合束器具备承载数千瓦泵浦光注入并稳定运行的能力。

测量结果, $M^2=1.52$,可见信号光通过合束器后的 M^2 退化比小于 4%。除此之外,合束器的信号光通过率大于 98%。为消除光纤状态对测试结果的影响,尽可能保证接入合束器前后测试系统其他光纤状态不变,并确保合束器光纤弯曲半径足够大。这也证明了基于腐蚀-穿管法研制的合束器可以实现信号光的高质量传输。

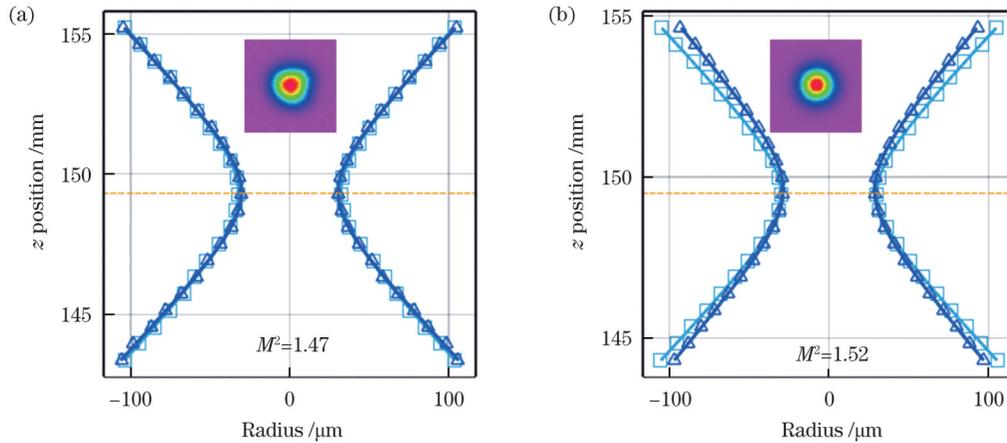


图 9 信号光光束质量测试结果。(a)未经合束器输出;(b)经合束器输出

Fig. 9 Test results of signal light beam quality. (a) Before transmitting the combiner; (b) after transmitting the combiner

3.3 基于合束器的一体化器件制备及应用

在合束器的信号光纤尾端制作包层光滤除器并熔接端帽,制成合束器-滤除-端帽一体化器件。减少光纤熔点的同时可以有效缩短传能光纤长度,增强了光纤激光系统的紧凑性和稳定性,有利于系统的高功率运行和高光束质量保持。将制备的一体化器件应用于简单 MOPA 结构的窄线宽激光系统中,其种子为具有外部反馈的复合腔结构窄谱振荡器,由两个带宽为 3 nm 的高反光纤光栅、双包层掺镱光纤(YDF)与一个带宽 0.05 nm 的低反光纤光栅构成复合腔^[17],种子激光输出后接入一个 50:50 耦合器,其中一个输出臂接入 220 m 长的 20/400 μm 传能光纤,光纤尾端切平角给种子提供弱反馈,另一个输出臂接入放大级^[18]。系

统的放大级结构如图 10 所示,泵浦源为 8 组 976 nm 稳波长半导体激光(WS LDs),每组可提供约 1100 W 的泵浦功率,在前向泵浦合束器前,包层光滤除器(CLS1)用来滤除后向泵浦光,增益光纤为 12.5 m 的 20/400 μm YDF,NA 为 0.06/0.46,在 976 nm 处的吸收系数约为 1.11 dB/m。基于反向泵浦/信号合束器的一体化器件与 YDF 熔接,承担反向泵浦光注入、包层光滤除、信号光的传输与输出等任务,后端传能光纤(GDF 50/400 μm)总长度为 1.2 m,有效减弱了激光在传输过程中的拉曼效应。

窄线宽系统的光束质量随功率变化如图 11(a)所示,可以看出随着功率的增加,系统的光束质量与光斑形态均保持较好,并未出现明显的退化,在功率 4182 W

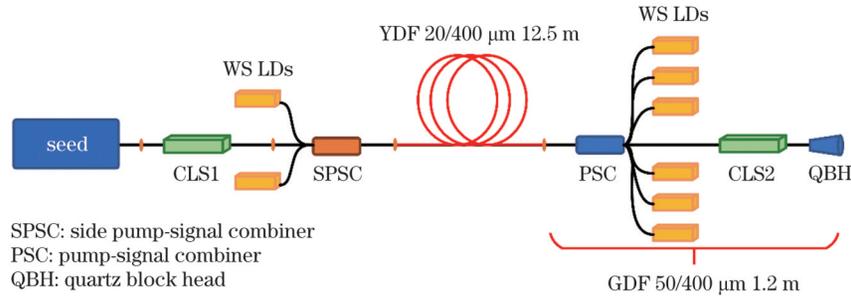


图 10 窄线宽激光系统放大级结构图

Fig. 10 Structure diagram of amplifier stage of narrow line width laser system

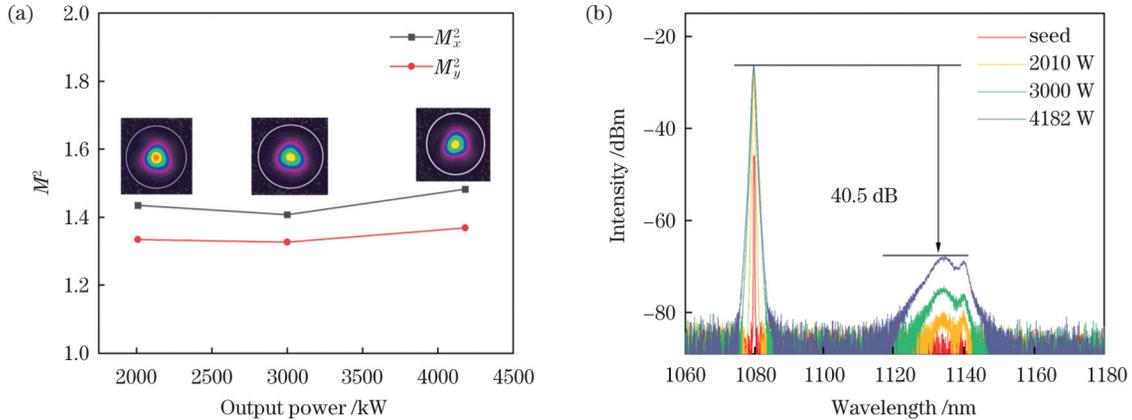


图 11 放大器不同功率下的输出特性。(a)光束质量;(b)光谱

Fig. 11 Output characteristics of fiber amplifier at different output powers. (a) Beam quality; (b) spectra

时的光束质量 $M_x^2=1.48$ 、 $M_y^2=1.36$ 。系统在不同功率下的光谱如图 11(b)所示,在功率 4182 W 时 3 dB 线宽为 0.44 nm, 20 dB 线宽为 2.14 nm, 拉曼抑制比为 40.5 dB。

4 结 论

基于本文所述的腐蚀-穿管法可以实现任意尺寸的信号纤与泵浦纤匹配,且信号光纤无需经过拉锥处理,泵浦/信号合束器的光束质量可以得到有效保持。通过理论分析和实验验证,证明了采用半掺氟薄壁玻璃管可以提高合束器泵浦臂性能,以及 M^2 因子更适合作为大芯径多模信号光纤反馈对准的指标,最终研制出了泵浦耦合效率大于 98.5%, 光束质量退化比仅为 3.4% 的 $(6+1) \times 1$ 泵浦/信号合束器,在无主动制冷的情况下温升小于 $10^\circ\text{C}/\text{kW}$ 。基于该合束器制成少熔点一体化器件,在减小熔接损耗的同时使系统结构更加紧凑,在高功率、高光束质量光纤激光系统中有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 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 Optical Physics, 2010, 27(11): B63-B92.
- Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: a review[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 0904123.
- 周朴, 冷进勇, 肖虎, 等. 高平均功率光纤激光的研究进展与发展趋势[J]. 中国激光, 2021, 48(20): 2000001.
Zhou P, Leng J Y, Xiao H, et al. High average power fiber lasers: research progress and future prospect[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(20): 2000001.
- 王小林, 张汉伟, 杨保来, 等. 高功率掺镱光纤振荡器: 研究现状与发展趋势[J]. 中国激光, 2021, 48(4): 0401004.
Wang X L, Zhang H W, Yang B L, et al. High-power ytterbium-doped fiber laser oscillator: current situation and future developments[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(4): 0401004.
- Lei C M, Li Z X, Zhang H, et al. Taper-fused side pump combiner for all-fiber lasers and amplifiers: a review[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 130: 106353.
- Lei C M, Chen Z L, Gu Y R, et al. Loss mechanism of all-fiber cascaded side pumping combiner[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2018, 6: e56.
- Zou S Z, Chen H, Yu H J, et al. High-efficiency $(6+1) \times 1$ pump - signal combiner based on low-deformation and high-precision alignment fabrication[J]. Applied Physics B, 2017, 123(12): 288.
- Zheng J K, Zhao W, Zhao B Y, et al. High pumping-power fiber combiner for double-cladding fiber lasers and amplifiers[J]. Optical Engineering, 2018, 57(3): 036105.
- Liu Y, Huang S, Wu W J, et al. 5-kW-level Bi-directional high-efficiency pump and signal combiner with negligible beam quality degradation[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(1): 7108806.
- Li Z X, Fu M, Xiao H, et al. Designation of pump-signal combiner with negligible beam quality degradation for a 15 kW tandem-pumping fiber amplifier[J]. Photonics, 2022, 9(9): 644.
- 杨保来, 王鹏, 奚小明, 等. LD 泵浦高平均功率、高光束质量掺镱光纤激光振荡器与放大器研究进展[J]. 光学学报, 2023, 43(17): 1714005.
Yang B L, Wang P, Xi X M, et al. Review of high average power and high beam quality LD-pumped ytterbium-doped fiber laser oscillators and amplifiers[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(17): 1714005.

- 1714005.
- [12] 陈子伦, 李智贤, 王蒙, 等. 高功率光纤激光器用关键无源器件研究进展[J]. 光学学报, 2023, 43(17): 1714004.
Chen Z L, Li Z X, Wang M, et al. Research progress on key passive devices for high-power fiber lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(17): 1714004.
- [13] Hadley G R. Transparent boundary condition for the beam propagation method[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1992, 28(1): 363-370.
- [14] 丁星, 葛廷武, 张雪霞, 等. 高功率光纤激光器涂覆层切口热效应的研究[J]. 激光与红外, 2017, 47(4): 443-447.
Ding X, Ge T W, Zhang X X, et al. Study on thermal effect of the coating cut with high power fiber laser[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(4): 443-447.
- [15] 庄园, 周次明, 范典. 光纤金属涂覆方法研究综述[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(5): 0500002.
Zhuang Y, Zhou C M, Fan D. Review of metal-coated methods for optical fiber[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(5): 0500002.
- [16] 折胜飞, 刘波, 常畅, 等. 基于下陷内包层设计的大芯径掺氟光纤表征及性能[J]. 光子学报, 2019, 48(11): 1148013.
She S F, Liu B, Chang C, et al. Characterization and properties of large-core fluorine-doped fibers based on depressed inner cladding design[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(11): 1148013.
- [17] 田鑫, 饶斌裕, 王蒙, 等. 简单MOPA结构窄线宽激光突破5 kW 近单模输出[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(12): 121002.
Tian X, Rao B Y, Wang M, et al. 5 kW near single mode output of narrow linewidth laser with simple MOPA structure[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34(12): 121002.
- [18] Tian X, Rao B Y, Wang M, et al. A novel structure for Raman suppression in narrow linewidth fiber amplifier[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2023, 35(21): 1175-1178.

Research on High Beam Quality (6+1)×1 Pump-Signal Combiner

Wang Jiawei¹, Li Zhixian^{1,2,3}, Fu Min¹, Tian Xin¹, Rao Binyu¹, Chen Zilun^{1,2,3*}, Wang Zefeng^{1,2,3}

¹College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

²Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

³Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China

Abstract

Objective Fiber lasers have been widely used in various fields including medicine, industrial processing, and national defense, because of their excellent beam quality, high conversion efficiency, straightforward heat management, and flexible operation. The pump-signal combiner occupies a crucial role in efficiently coupling the pump light to the double-cladding fiber, for signal light transmission, and is one of the most critical fiber laser components. Transverse mode instability (TMI) and nonlinear effects have been identified as bottlenecks for further improvement in fiber laser power. Counter-directional pumping and large-mode-area double-cladding fibers are helpful for suppressing nonlinear effects, which are beneficial for fiber laser power improvement. Most existing research on pump-signal combiners focuses on the few-mode signal fibers with core diameters smaller than 30 μm . In this study, the fabrication method for a counter-directional (6+1)×1 pump-signal combiner based on a large-core (50 μm) multimode signal fiber is introduced, with higher thresholds for nonlinear effects. The proposed pump-signal combiner achieves high pump-coupling efficiency alongside high-beam quality.

Methods By conducting numerical simulations and experimental validations, the effects of the taper length and ratio, and refractive index of the glass tube on the coupling efficiency of the pump light were analyzed. The effect of the core axial offset on the transmission efficiency and beam quality of the signal light was also investigated. Consequently, the optimal parameters for fabricating the pump-signal combiner were obtained. During the pump-signal combiner fabrication process, signal fiber tapering was avoided by pre-tapering the pump fiber and signal fiber corrosion. While optimizing the cutting and fusion parameters, the tapered fused bundle (TFB) and output fiber were spliced using an inline feedback alignment. Subsequently, the pump and signal arm performances were tested using laser diodes (Reci, DAB 1200, 915 and 976 nm wavelengths) and a 3 kW fiber oscillator, respectively. Finally, an integrated device based on the proposed pump-signal combiner was fabricated and applied to a narrow-linewidth laser system, which included an end cap and a cladding light stripper.

Results and Discussion Numerical simulations and comparative experiments show that selecting an appropriate taper length, reducing the taper ratio of the pump fiber, and using a low-refractive-index glass tube can improve the pump-arm performance of the pump-signal combiner (Figs. 3 and 4 and Table 1). To achieve this, a pump-signal combiner was fabricated using a semi-fluoride thin-walled glass tube. The proposed pump-signal combiner achieved a pump coupling efficiency of over 98.5% and a temperature rise coefficient below 10 $^{\circ}\text{C}/\text{kW}$ without active cooling. It could be observed that the fiber core offset during multimode signal fiber fusion results in fundamental mode conversion to higher-order modes. Although this may not significantly impact the overall signal light passing rate, the M^2 factor, which is more sensitive to the axial offset, was selected as the feedback alignment indicator (Fig. 5). During the M^2 feedback fusion process, fusion quality and strength are ensured by maintaining the angle of cleavage within 1° and controlling a slight collapse of the TFB (Fig. 8). Consequently, the beam quality degradation ratio is only 3.4% (Fig. 9). The

integrated device based on the pump-signal combiner effectively reduces the number of splice points and the transmission fiber length, thus, enhancing fiber laser system compactness and stability. When applied in a narrow linewidth system based on a simple MOPA structure, at 4182 W output power, the beam quality is $M_x^2=1.48$, $M_y^2=1.36$, 3 dB linewidth is 0.44 nm, 20 dB linewidth is 2.14 nm, and the Raman suppression ratio is 40.5 dB (Fig. 11).

Conclusions The proposed pump-signal combiner fabrication method enables signal and pump fiber matching of any size without the necessity for signal fiber tapering. Hence, the beam quality of the pump-signal combiner can be effectively maintained. Through theoretical analysis and experimental verification, it is demonstrated that the use of a semi-doped fluorine thin-walled glass tube can improve pump arm performance. Additionally, the M^2 factor is confirmed as a suitable indicator for aligning large-core multimode signal fibers. Consequently, development of a $(6+1)\times 1$ pump-signal combiner was achieved with a pump coupling efficiency of over 98.5% and beam quality degradation of only 3.4%. The temperature increase coefficient was maintained below 10 °C/kW without active cooling. Based on the proposed pump-signal combiner, an integrated device without splice points was fabricated to reduce fusion loss and to ensure a more compact system. The proposed solution has broad application prospects for high-power, high-beam-quality fiber laser systems.

Key words pump-signal combiner; high-power fiber lasers; beam quality