

文章编号 1004-924X(2015)02-0319-06

高功率高耦合效率光纤模场匹配器

王智勇, 张 晶*, 葛廷武, 孙 畅, 董繁龙

(北京工业大学 激光工程研究院 国家产学研激光技术中心, 北京 100124)

摘要: 为了提高大模场面积光纤到单模光纤的耦合效率, 利用加热扩芯的方法, 对单模光纤进行了热扩芯处理, 实现了大模场面积双包层光纤 15/130 μm 到单模光纤 6/125 μm 的模式匹配。对进行热扩芯处理的模场匹配器的传输损耗进行了理论分析; 利用自行搭建的中心波长为 1 064 nm 的激光光源分别测量了商用及自制的模场匹配器的传输损耗。实验结果表明: 采用加热扩芯的方法极大地提高了大模场面积光纤到单模光纤的模场匹配器的模式耦合效率。与商用的模场匹配器相比, 自制的模场匹配器具有更高的耦合效率和运行功率, 其热处理能力更强, 可靠性也更好, 运行功率可以达到 100 W; 在进行风冷的情况下, 稳定工作时间累计为 120 min, 最终可以获得 73 W 的单模光输出, 热处理能力为 27 W。模场匹配器性能的提高满足了高功率光纤元器件发展的需要, 有利于实现光纤激光系统的全光纤化。

关键词: 大模场光纤; 单模光纤; 热扩芯; 模场匹配器; 耦合效率

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10. 3788/OPE. 20152302. 0319

Highly coupling efficient mode-field adaptors for high power fiber lasers

WANG Zhi-yong, ZHANG Jing*, GE Ting-wu, SUN Chang, DONG Fan-long

(National Center of Laser Technology, Institute of Laser Engineering,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

* Corresponding author, E-mail: zhangjing90@emails.bjut.edu.cn

Abstract: To improve the coupling efficiency for a Large-mode-area Fiber (LMAF) and a Single-mode Fiber (SMF), a Thermally Expanded Core (TEC) technique was used to expand the core of SMF to implement the mode field adaptation for the LMA double clad fiber 15/130 μm and the SMF 6/125 μm . The transmission loss of the Mode Field Adaptor (MFA) made by TEC processing was analyzed theoretically, and a homemade MFA and a commercial MFA was respectively measured through a self-built fiber laser source with a 1 064 nm central wavelength. Experiment results show that the TEC technique dramatically improves the coupling efficiency of the MFA between the LMA and the SMF. In contrast with the commercial MFA, the homemade MFA is capable of a higher operating power, better heat treatment capacity and better reliability. The homemade MFA offers the operating power up to 100 W, and accumulated working time up to 120 min in an air-cooled condition. Furthermore, its single-mode output to be 73 W, and heat treatment capacity to be 27 W. The improvement of the

收稿日期: 2014-09-22; 修订日期: 2014-10-23.

基金项目: 科研基地建设-科技创新平台资助项目 (No. PXM2011_014204_09_000060)

performance of MFA meets the needs of the development of high-power fiber components and are suitable for achieving all-fiber-integration systems of fiber lasers.

Key words: large mode area fiber; single-mode fiber; thermally expanded core; mode field adaptor; coupled efficiency

1 引言

近年来,大模场面积光纤(Large Mode Area Fiber, LMAF)的应用和发展有效地抑制了光纤非线性和光纤端面损伤的不利影响,不仅实现了高功率高脉冲能量的激光输出,还加速了高功率光纤激光器和放大器的发展^[1-3]。但由于 LMAF 不满足单模条件,故降低了输出光束的质量;而且它与小芯径光纤熔接时损耗也较高^[4]。因此,如何实现 LMAF 与小芯径光纤的低损耗连接,实现二者之间的模式匹配,并保证在高功率下激光器系统具有较高的安全性和稳定性,以及良好的光束质量是非常具有挑战性的问题^[5-7]。

相比于高功率光纤激光器的快速发展,高功率光纤元器件的研究却很少,特别是有关高功率光纤模式匹配器的相关报导极为有限。Travers 等人^[1]利用空间耦合方式实现了 LMAF 到单模光纤(Single-mode Fiber, SMF)的模式匹配,但空间结构增加了激光器的不稳定性及复杂性,阻碍了输出功率的提高,也不符合光纤激光器系统结构全光纤化的发展趋势。Hofmann 等人^[8]利用渐变折射率光纤的多模干涉效应,实现了 LMAF-20 μm 光纤到 SMF-28 μm 光纤的模式匹配,插入损耗可以达到 0.5 dB。但光纤的多模干涉效应所能承受的功率较低,在高功率下容易造成光纤的损毁,对激光系统的安全性以及稳定性存在着威胁。光纤熔融拉锥技术^[9-10]在拉锥过程中容易破坏光纤波导结构的均匀对称性,对精度要求较高,且不适合包层相差较小的光纤熔接处理^[11]。商用的模场匹配器(Mode Field Adaptor, MFA)大多是由 SMF 到 LMAF 的模式匹配,如加拿大 ITF LABS、深圳朗光科技有限等公司的模场匹配器,但是这些产品承诺的最大运行功率仅仅为几十瓦,远远不能满足高功率激光器的应用需要。

本文利用加热扩芯(Thermally Expanded Core, TEC)的方法对 SMF 进行了处理,实现了大模场双包层无源光纤 15/130 μm 到单模光纤

6/125 μm 的模式匹配,并对比研究了未采用 TEC 处理的 MFA 的传输损耗。利用自行搭建的中心波长为 1 064 nm 的激光光源分别测量了商用与自制的 MFA 的传输损耗。实验结果表明:采用 TEC 方法极大地提高了 LMAF 到 SMF 的 MFA 的模式匹配效率。与商用的 MFA 相比,自行制作的 MFA 具有更高的耦合效率和运行功率,以及更好的热处理能力和可靠性,并且 TEC 方法操作简单、成本低廉,有利于高功率光纤 MFA 的商品化发展^[12-14]。

2 理论分析

相对于 LMAF, SMF 的模场直径是比较小的,因此若将两者直接熔接将会产生较大的熔接损耗。如果不考虑外部因素,如轴心错位、轴心倾斜、熔接点附近的物理变形等原因,那么它们之间的损耗主要源于模场失配。如果光纤中只存在基模 LP01,那么可以用高斯分布近似 LP01 的模场分布,则 LMAF 与 SMF 由模场失配所引起的损耗为^[12]:

$$\alpha_1 = -20 \log \frac{2\omega_1 \times \omega_2}{\omega_1^2 + \omega_2^2}, \quad (1)$$

其中: ω_1, ω_2 分别是 SMF 与 LMAF 的模场半径。图 1 为损耗 α_1 与 ω_1, ω_2 的关系。

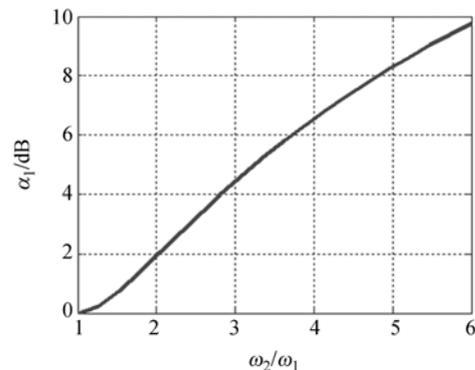


图 1 损耗 α_1 与 ω_2/ω_1 的关系图

Fig. 1 Relation between loss α_1 and ω_2/ω_1

为了减小 LMAF 和 SMF 之间的模场差异,通过加热的方式对 SMF 进行扩芯,使 LMAF 与 SMF 之间的模场匹配达到了减小二者之间传输损耗的目的。基于 TEC 的 LMAF 到 SMF 的模场适配器结构如图 2 所示。

假设 LMAF 与 SMF 之间的模场完全匹配,那么通过 TEC 法制作的 MFA 的传输损耗则主要由锥形纤芯区域引起。由光波导的渐变条件^[12]可知:锥区长度应该大于纤芯中相邻两耦合模式波的耦合长度,即光纤锥区中任何一处的锥角应该小于该模式在光纤中的衍射角,则绝热条件为:

$$\theta_1 < \theta_d, \quad (2)$$

其中:光纤中任意一处的锥角 $\theta_1 = \frac{dR}{dz}$, 高斯光束的衍射角 $\theta_d = 2\lambda/\pi n_0 \omega_0$ 。

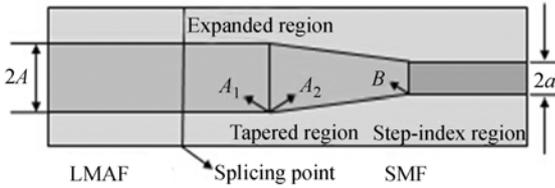


图 2 利用加热扩芯(TEC)方法制作的光纤模场适配器的结构示意图

Fig. 2 Schematic illustration of mode field adaptor between LMAF and SMF by TEC method

假设 SMF 的加热区域沿着光纤轴向方向为光滑的线性锥型,折射率保持阶跃折射率分布,那么当光波从 MLAF 的左端传输到点 A₁ 是没有损耗的,而由点 A₂ 到点 B 的下锥区的损耗则由锥区长度决定^[13-14]。当锥区长度为 0 时,损耗最大;随着锥区长度的逐渐增加,损耗逐渐减小,当锥区长度 L 等于特征长度 L_C 时,损耗减小趋势变缓;当 L ≫ L_C 时,损耗几乎基本不变;因此当 L > L_C 时,锥区为渐变锥,理论上此时的传输损耗很小。

特征长度 L_C 表示为^[13]:

$$L_C = \sqrt{r_{\max}(r_{\max} - 1)\pi n_0 \alpha_{\text{SMF}}^2 / \lambda}. \quad (3)$$

当锥区足够长(L ≫ L_C)时,MFA 的功率传输系数是由点 A₂ 和 B 的功率转化系数 T_{A₂} 和 T_B 共同决定的,T_{A₂} 和 T_B 的表达式分别为^[13]:

$$T_{A_2} = \{1 + [r_{\max}(r_{\max} - 1)\pi n_0 \alpha_{\text{SMF}}^2 / \lambda L]^2\}^{-1}, \quad (4)$$

$$T_B = \{1 + [\frac{1}{2}(r_{\max} - 1)\pi n_0 \alpha_{\text{SMF}}^2 / \lambda L]^2\}^{-1}. \quad (5)$$

则 MFA 的总功率传输系数 T_t 为:

$$T_t = T_{A_2} \times T_B, \quad (6)$$

其中:纤芯扩大倍数 r_{max} = A/α。

那么通过 TEC 的 LMAF 到 SMF 的 MFA 的损耗表示为:

$$\alpha_2 = -10\log T_t. \quad (7)$$

由上式可知,当 L → ∞ 时,T_t → 1,则 α₂ → 0。

3 实验结果与分析

实验中所用的光纤是 Nufern 的 1060xp 单模光纤和大模场双包层无源(LMA-DCF-GDF) 15/130 μm,具体参数见表 1。

表 1 实验中所用的光纤参数(在 1 060 nm 波长)

Tab. 1 Parameters of fibers used in experiment (@ 1 060 nm)

光纤	1060xp	LMA-DCF-GDF-
		15/130 μm
纤芯直径/μm	5.8	15
数值孔径 NA	0.14	0.08
模场直径/μm	6.5	13.5



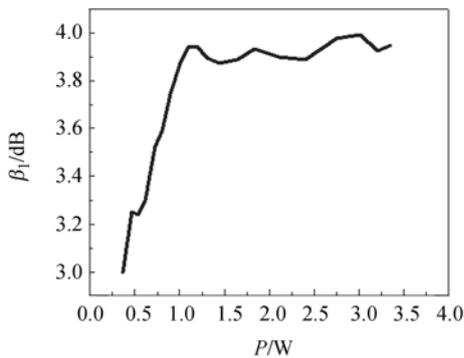
图 3 模场适配器的测量装置示意图

Fig. 3 Schematic illustration of measuring device for mode field adaptor

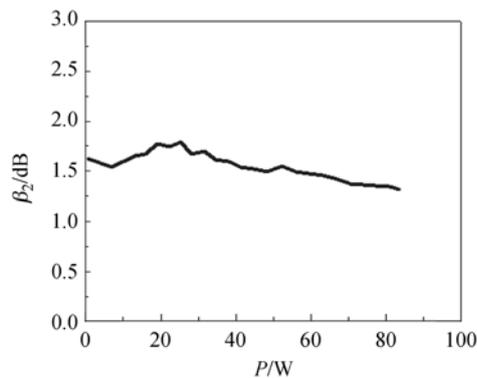
若光纤内只存在基模 LP₀₁ 模式,那么在未对 SMF 进行 TEC 的情况下,由式(1)计算可得 MFA 由模场失配引起的损耗。在对 SMF 进行 TEC 处理的情况下,若 LMAF 与 SMF 之间的模场能够完全匹配,如图 2 所示,则 SMF 的特征长度 L_C = 368.66 μm (n_c = 1.447, 2.59)。在实验中,一般热扩芯后的锥区长度 L ≥ 3 mm, L_C = 368.66 μm,那么按照以上理论,当 L = 3 mm 时,则 α₂ = 1.16 dB。

实验中通过图 3 所示的测量装置对 MFA 进行测量。首先测量激光通过 LMAF-15/130 μm 的功率,记为 P₀,再测量直接熔接 SMF 后的光功率,记为 P₁,则实际测量得到的损耗 β₁ = -10log P₁/P₀;激光通过热扩芯制作的 MFA 功率记为 P₂,则实际测量得到的损耗 β₂ = -10log P₂/P₀。

由图 4 (a)可知,在未对 SMF 进行 TEC 的情况下,即将 LMAF 与 SMF 直接熔接时,MFA 在功率较低(小于 4 W)的情况下,其匹配效率会随着功率的上升不断地下降,损耗由 3 dB 增加到 4 dB,大于理论计算值 2.83 dB。最初耦合损耗主要是由模场失配引起的,但随着功率的增大,激光中不仅存在基模 LP01,还有高阶模式出现,并且功率越高,激发出的高阶模式所占比例越大,而 SMF 不支持高阶模式,因此耦合损耗不断增大。



(a) 未对 SMF 扩芯的情况
(a) Without TEC



(b) 对 SMF 扩芯的情况
(b) With TEC

图 4 两种方法制作的 MFA 的损耗图

Fig. 4 Losses of MFAs by two methods and their input powers

从图 4(b)可以看出,利用 TEC 方法制作的 MFA 在进行了包层光剥离的情况下,其匹配效率会随着功率的增加(功率为 0.5~84 W)趋于稳定,损耗基本在 1.5 dB 左右,即匹配效率可达 74%。最后将功率升至 100 W,MFA 的效率仍维

持在 73%(图中未画出),此时 MFA 具有 27 W 的热处理能力。损耗在 25 W 之前呈现逐渐变大的趋势,在 25 W 时达到最大,其原因在于功率加大到 25 W 之前,没有对 MFA 进行冷却处理。在功率达到 25 W 之后,采用风冷处理。在 100 W 的情况下,累计稳定的工作时长可以达到 120 min。测量值大于理论计算值的原因是在理论模型中假设 TEC 光纤的折射率保持阶跃分布,而实际上扩芯后的光纤折射率是类高斯分布,此时光波从 MFA 的左端传输到点 A_1 ,存在一定的损耗。

图 5 为实验室中对某商用 MFA 进行包层光剥离时得到的 MFA 损耗图。随着功率的增加,MFA 的耦合损耗由最初的 1.66 dB 下降至 1.25 dB,耦合效率提高;而随着功率的进一步增大,当功率为 31.2 W 时,耦合损耗升高到 2.16 dB,MFA 耦合效率下降。其原因在于:一方面可能是由于高阶模的出现,另一方面可能是热积累导致光波导中传输损耗的增加。实验中继续升高功率,耦合效率下降严重,因此功率过大很可能会烧毁商用 MFA,损坏整个激光系统,所以在实验中只测量到 31.2 W。从图中可知此商用 MFA 的最佳运行功率小于 30 W。

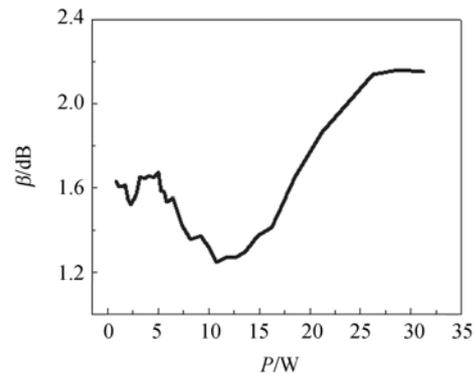


图 5 商用模场匹配器的损耗图

Fig. 5 Loss of commercial MFA and its input power

对比以上的实验结果可知,应用 TEC 处理制作的 MFA 比未进行处理的 MFA 的模式匹配效率有了较大的提高。与商用的 MFA 相比,虽然 TEC 法制作的 MFA 在低功率下的耦合效率稍低,但它所能承受的功率更高,可以达到 100 W,这是目前商用 MFA 无法达到的运行功率。

4 结 论

为了实现高功率光纤激光器系统的全光纤化,本文通过对 SMF 进行 TEC 处理制作了 LMA-DCF-GDF-15/130 μm 光纤到 SMF-6/125 μm 的 MFA,并利用自行搭建的激光光源对制作的 MFA 进行了测量。实验结果表明:自制的 MFA 在输入 1 064 nm 的激光时,运行功率可达 100 W,在风冷条件下的稳定工作时间累计为 120 min,最后可以获得 73 W 的单模输出,热处理能

力达到 27 W。从实验结果对比可知,通过 TEC 制作的 MFA 极大地提高了不同纤芯直径光纤之间模场匹配的耦合效率,增强了 MFA 承受的光功率能力和热处理能力。此外 TEC 实现简单、成本低廉,有利于高功率 MFA 的商品化发展。但是由于在实验中热扩芯后的 SMF 的折射率分布是类高斯型,不是理想化的渐变型,因此造成 TEC 后的 SMF 与 LMAF 的熔接损耗比理论计算值偏大。下一步的工作是改进模型,以便进一步优化实验,使 MFA 获得更高的耦合效率。

参考文献:

- [1] TRAVERS J C, RULKY A B, CUMBERLAND B A, *et al.*. Visible supercontinuum generation in photonic crystal fibers with a 400 W continuous wave fiber laser [J]. *Optics Express*, 2008, 16 (19): 14435-14447.
- [2] WAN P, YANG L M, LIU J. High pulse energy 2 μm femtosecond fiber laser [J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 1798-1803.
- [3] ANDREW S R, KADWANI P, LAWRENCE SHAH A S, *et al.*. 1 μJ , sub-500 fs chirped pulse amplification in a Tm-doped fiber system [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(2):121-123.
- [4] FAUCHER M, LIZE Y K. Mode field adaptation for high power fiber lasers [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics, Optical Society of America*, 2007;CFI7.
- [5] 侯静,陈胜平,陈子伦,等. 高功率超连续谱光源研究进展与关键技术分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(080010):1-13.
- HOU J, CHEN SH P, CHEN Z L, *et al.*. Recent developments and key technology analysis of high power supercontinuum source [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(080010):1-13. (in Chinese)
- [6] 董繁龙,赵方舟,葛廷武,等. 全光纤激光器光束质量的优化[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(4): 844-849.
- DONG F L, ZHAO F ZH, GE T W, *et al.*. Optimization of beam quality for all-fiber lasers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4):844-849. (in Chinese)
- [7] 高静,于峰,匡鸿深,等. 纳秒声光调 Q 光纤激光器产生超连续谱[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(5): 1138-1142.
- GAO J, YU F, KUANG H SH, *et al.*. Generation of supercontinuum spectra from acousto-optic Q-switched nanosecond fiber lasers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5):1138-1142. (in Chinese).
- [8] HOFMANN P, MAFI A, JOLLIVET C, *et al.*. Detailed investigation of mode-field adapters utilizing multimode-interference in graded index fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30 (14): 2289-2298.
- [9] KERTTULA J, FILIPPOV V, USTIMCHIK V, *et al.*. Mode evolution in long tapered fibers with high tapering ratio [J]. *Optics Express*, 2012, 20 (23):25461-25470.
- [10] 胡欣,张文攀,殷瑞光,等. 激光在锥形多模光纤中的耦合效率与传输模式[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(2):372-375.
- HU X, ZHANG W P, YIN R G, *et al.*. Coupling efficiency and transmission mode of laser beam in tapered multimode fiber [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2):372-375. (in Chinese)
- [11] ZHOU X, CHEN Z, ZHOU H, *et al.*. Mode-field adaptor between large-mode-area fiber and single-mode fiber based on fiber tapering and thermally expanded core technique [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(22):5053-5057.
- [12] ZHOU X, CHEN Z, CHEN H, *et al.*. Mode field adaptation between single-mode fiber and large mode area fiber by thermally expanded core technique [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 47:72-75.
- [13] SHIRAISHI K, YANAGI T, KAWAKAMI S. Light-propagation characteristics in thermally diffused expanded core fibers [J]. *Journal of Light-*

wave Technology, 1993, 11(10): 1584-1591.

- [14] RATUSZEK M. Analysis of loss of single mode telecommunication fiber thermally diffused core

areas [C]. *Lightguides and Their Applications III. International Society for Optics and Photonics*, 2007: 660817-660817-6.

作者简介:



张 晶(1990—),女,吉林四平人,硕士研究生,2012年于大连民族学院获得学士学位,主要从事脉冲光纤激光器,光纤放大器以及超连续谱光纤激光器方面的研究工作。E-mail: zhangjing90@emails.bjut.edu.cn

导师简介:



王智勇(1970—),男,重庆人,研究员,博士生导师,1992年于北京理工大学获得学士学位,1995年、1998年于北京工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事大功率半导体激光器,大功率半导体激光关键器件制备与集成,大功率光纤激光器方面的研究工作。E-mail: zywang@bjut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)