

小芯径掺铒光纤与单模光纤 低损耗接续的研究

刘雪峰 孙军强 王宏锴 黄德修

李再光

(华中理工大学光电子工程系, 武汉 430074) (激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘 要 报道了掺铒光纤放大器中降低掺铒光纤(EDF)与单模光纤(SMF)接续损耗的一种新方法. 采用在芯区直径较小的掺铒光纤端部拉锥的方法, 使得掺铒光纤中的传输模场在锥形区域内扩散, 从而与单模光纤中直径较大的本征模场良好匹配, 实现低损耗接续. 初步实验结果表明, 该方法可获得小于 1dB 的接续损耗.

关键词 掺铒光纤, 模场匹配, 锥形光纤.

1 引 言

目前掺铒光纤放大器研究中所面临的一个问题是小芯径掺铒光纤与标准单模光纤的接续损耗过大(3~5 dB). 对此, 人们已进行了大量的研究, 并提出了一些方法, 主要有热膨胀芯技术(TEC)、多段匹配光纤过渡技术、热成像实时监控技术等^[1,2], 这些方法虽然可以获得小于 0.1 dB 的接续损耗, 但却存在需要专用仪器、价格昂贵等问题, 如热膨胀芯技术需要工作温度在 1000 °C 以上的热扩散炉, 且扩散时间大于 10 hr; 这些问题是较难以解决的. 本文提出一种新的固定式接续方法, 即在掺铒光纤端部制作一段锥形波导区, 使其模场扩散, 与单模光纤中的本征模场良好匹配, 从而达到低损耗接续的目的.

2 理论分析

理论和实验研究表明, 最佳放大器性能要求掺铒光纤的芯径和模场直径比单模光纤的要小得多, 以提高泵浦光在掺铒光纤中的功率密度, 获得尽可能高的净增益. 例如, 目前进口的掺铒光纤芯区直径为 2.5 μm, 模场直径为 4 μm; 而标准单模光纤的芯区直径为 8.9 μm, 模场直径为 10.38 μm(1.54 μm 波段). 在不考虑角向偏差和熔接过程时, 两根模场半径分别为 ω_1 和 ω_2 的光纤的接续损耗可表示为:

$$\alpha = -10 \text{Log}_{10} \left[\left(\frac{2\omega_1\omega_2}{\omega_1^2 + \omega_2^2} \right)^2 \right] \quad (1)$$

将上述模场半径值代入(1)式, 可得到掺铒光纤与单模光纤的接续损耗 $\alpha = 3.46 \text{ dB}$; 此外, 掺

铒光纤与单模光纤相比, 具有外径小的特点(约 $105 \mu\text{m}$), 不同外径的两根光纤在熔接时, 由于电弧对两根光纤的加热情况不一样, 会造成接续处波导的破坏, 引起新的损耗, 这种损耗与两光纤外径之差成正比. 上述两个因素导致了掺铒光纤与单模光纤的接续损耗过大($3 \sim 5 \text{ dB}$), 从而影响了泵浦功率的高效率注入及信号光的有效输入与输出.

由(1)式可知, 两根光纤接续损耗低的必要条件是在接续处有 $\omega_1 \sim \omega_2$. 由导波光学可知, 当光纤归一化频率 v 小于一定值时, 光场在光纤中保持单模传输并可以用高斯近似描述, 在此, 本文采用 Marcuse 近似公式表示模场半径 ω ^[3]:

$$\omega = a(0.65 + 1.619v^{-3/2} + 2.879v^{-6}) \quad (1)$$

$$v = a \cdot k_0 \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2)$$

式中 a 为芯区半径, v 为芯区半径为 a 时的光纤归一化频率, k 为真空中的传播常数, n_1, n_2 为光纤芯区和包层折射率. 图 1 为根据(2)式计算出的掺铒光纤和单模光纤的 $\omega \sim a$ 理论曲线. 由图 1 可知, 减小芯径 a , 掺铒光纤中的模场半径将单调增大, 而单模光纤则存在一个极小值 $\omega^* = 5.16 \mu\text{m}$.

图 2 分别为只改变掺铒光纤和只改变单模光纤芯径时, 接续损耗与芯径关系的理论曲线. 由于改变单模光纤芯径可获得的最小模场半径远大于掺铒光纤的模场半径, 因此, 减小单模光纤芯径并不能实现最佳匹配, 而只有减小掺铒光纤芯径才能达到最佳匹配.

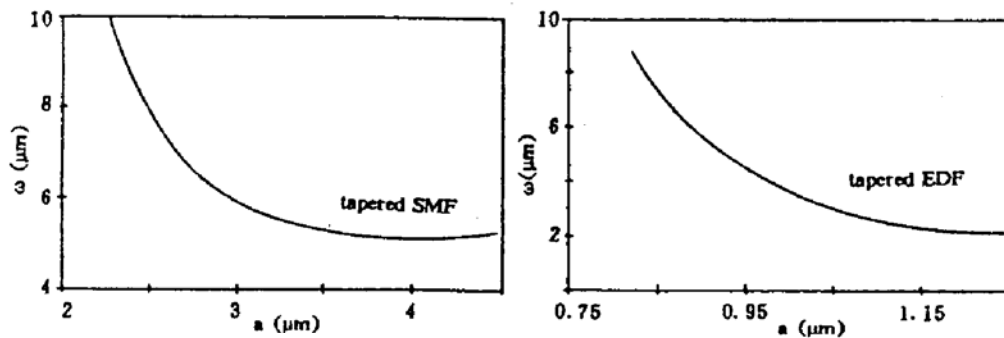


Fig. 1 Mode waists vs. core radius for tapered SMF and tapered EDF

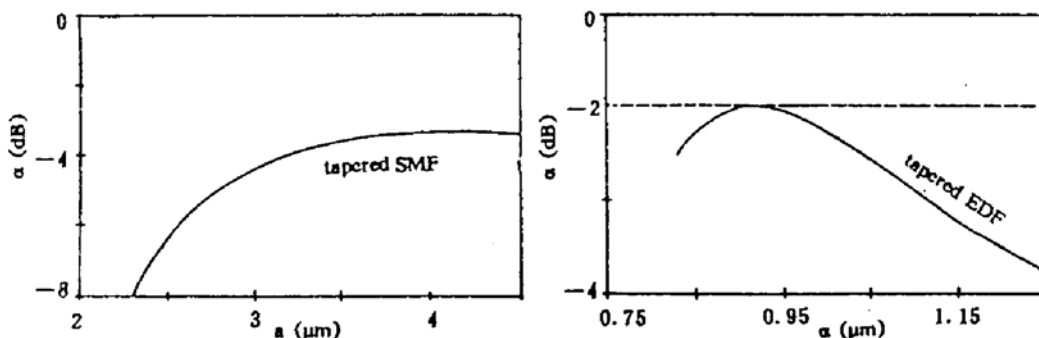


Fig. 2 Connecting loss vs. core radius for tapered SMF and tapered EDF

3 改变掺铒光纤输出模场的方法

本文所采用的改变掺铒光纤输出模场的方法是在掺铒光纤端部制作一锥形过渡区. 将一段裸掺铒光纤置于光纤熔接机上, 对中间的一段小区域进行低电流加热. 在放电的同时, 沿

轴向拉伸掺铒光纤, 则加热区将形成一锥形收缩段; 拉伸时, 光纤芯区与包层同时被拉细, 拉伸前后的光纤芯区与包层直径之比不变. 停止加热后, 用金刚石刀具在收缩段上特定位置切割, 即可在掺铒光纤末端获得一段锥形过渡区^[4]. 模场在锥形过渡区中的传播会由于波导的畸变而产生传输损耗, 但由于锥形过渡区较短, 轴向对称度高, 外形过渡平滑, 则这种传输损耗可以忽略.

4 实验结果及分析

实验中, 采用传输功率法监测光纤焊接质量, 采用切断法测量接续损耗. 监测光源为 BH 掩埋异质结激光器, 激射波长为 $1.54 \mu\text{m}$, 探测器为 InGaAs PIN; 掺铒光纤芯区直径为 $2.5 \mu\text{m}$, 外径为 $105 \mu\text{m}$; 单模光纤芯区直径为 $8.9 \mu\text{m}$, 外径为 $125 \mu\text{m}$. 图 3 为不同锥端直径的掺铒光纤与单模光纤熔接前后的接续损耗实验曲线. 由图 3 可以看出拉锥法对提高掺铒光纤与单模光纤的模式耦合有明显的作用, 当掺铒光纤的锥端直径在 $80 \sim 85 \mu\text{m}$ 之间时, 可获得很好的模式耦合效果; 但熔接之后, 不拉锥的掺铒光纤与单模光纤的接续损耗却并不是最大的(图 3 中的 A 点). 这主要是由于拉锥之后, 掺铒光纤的外径变小, 与单模光纤外径的差别加大, 熔接时, 放电电流大, 则掺铒光纤的锥端被破坏; 放电电流小, 掺铒光纤与单模光纤无法良好接续. 这两种情况都会造成接续损耗增大.

为了减少由于外径差别而造成的熔接损耗, 本文用 HF 腐蚀单模光纤, 使得腐蚀后的单模光纤外径与掺铒光纤的锥端直径相吻合, 由于腐蚀后的单模光纤外径仍很大, 故单模光纤中的模场不会因此而受到影响. 图 4 给出了带锥形端的掺铒光纤与腐蚀后的单模光纤熔接后的接续损耗实验曲线. 实验结果表明, 腐蚀后的接续损耗明显降低, 当锥端直径为 $85 \mu\text{m}$ 时, 接续损耗达到最佳值 0.802 dB , 与不拉锥和腐蚀的情况相比, 接续损耗获得 2.3 dB 的提高.

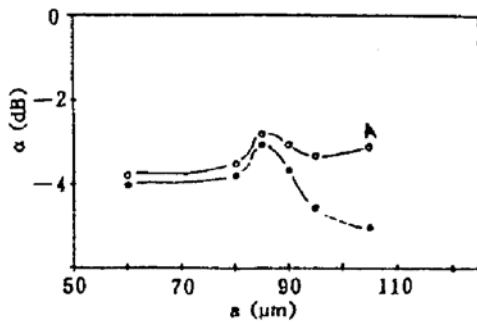


Fig. 3 The experiment results of connecting loss vs. core radius for tapered EDF to unetched SMF

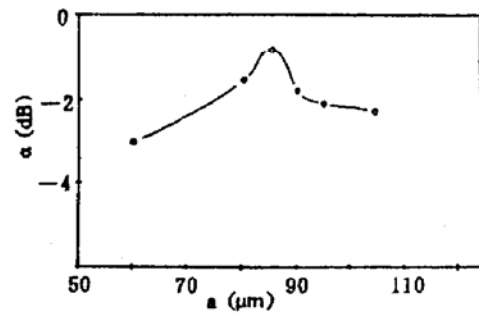


Fig. 4 The experiment results of connecting loss vs. core radius for tapered EDF to etched SMF

结 论 理论分析和初步实验结果表明, 采用在小芯径掺铒光纤端部拉锥的方法可以明显改善掺铒光纤放大器中的掺铒光纤与单模光纤的接续损耗, 而且该方法价格低廉, 无需专门仪器; 为了消除熔接时光纤外径不一致而引起的熔接损耗, 本文对单模光纤进行了腐蚀处理, 使之与掺铒光纤的锥端直径相吻合, 以上方法的采用使得最终所获得的最佳接续损耗值达 0.802 dB . 作者预计, 对熔接条件(熔接时间、熔接电流)的优化将会进一步降低接续损耗.

参 考 文 献

- [1] Kazuo Shiraishi, Yoshizo Aizawa, Shojiro Kawakami, Beam expanding fiber using thermal diffusion of the dopant. *J. Lightwave Technology*, 1990, 8(8): 1151~1160
- [2] W. Zheng, S. Wong, O. Hulten *et al.*, Erbium-doped-fiber splicing with a real-time control technique. in *Technical Digest of OFC/IOOC' 93, San Jose*, (Optical Society of America), 1993, 4~5
- [3] M. J. Holmes, F. P. Payne, D. M. Spirit, Matching fibers for low loss coupling into fiber amplifiers. *Electron. Lett.*, 1990, 26: 2102~2104
- [4] Giok Djan Khoe *et al.*, Progress in monomode optical-fiber interconnection devices. *J. Lightwave Technology*, 1984, LT-2(3): 217~227
- [5] D. Marcuse, *Theory of Dielectric Optical Waveguides*. Academic Press, 1974: 145

Study on Low Loss Connecting between Small Core Diameter Er³⁺-Doped Fiber and Single Mode Fiber

Liu Xuefeng Sun Junqiang Wang Honger Huang Dexiu

(Department of Optoelectronic Engineering Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Li Zaiguang

(National Laboratory of Laser Technology, Wuhan 430074)

(Received 10 June 1993; revised 30 August 1993)

Abstract A new method of decreasing connecting loss between Er³⁺-doped fiber (EDF) and single mode fiber (SMF) is presented in this paper. The low connecting loss has been obtained by tapering Er³⁺-doped fiber, which makes the transmission mode of Er³⁺-doped fiber expand so that it matches the transmission mode of single mode fiber perfectly. The connecting loss less than 1 dB has been obtained with this method in the experiment.

Key words Er³⁺-doped fiber, mode matchment, tapered fiber.