

光纤端面处理对光纤激光器输出性能的影响

朱 辰, 李 尧, 王雄飞, 林佶翔, 赵 鸿

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要:从光纤端面的不同处理方法(抛磨法、切割法)入手,对各自工艺展开了较深入的探索,测试了经不同方法处理后光纤端面的表面粗糙度:抛磨端面的表面粗糙度达到0.6nm,切割端面的表面粗糙度为24nm。研究了不同端面处理方法对光纤激光器输出性能(输出功率、光束质量)的影响。

关键词:光纤激光器;高功率;热效应;端面损伤

中图分类号:TN248

文献标识码:A

Influence of the Fiber Facet on the Output Quality of Fiber Lasers

ZHU Chen, LI Yao, WANG Xiong-fei, LIN Ji-xiang, ZHAO Hong

(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: The difference of the two methods of fiber facet handling was discussed. We tested the Ra of the facet after polishing or cleaving the fiber facet. The Ra of the polished facet was 0.6nm, though the Ra of the facet was only 24nm. The influence of the fiber facet on the output power and beam quality of fiber lasers was also researched.

Key words: fiber lasers; high power; thermal effect; facet damage

1 引 言

与传统的灯泵、二极管泵浦 YAG 激光器相比,光纤激光器无论从体积、光束质量、散热性能、插头效率、可靠性等方面均有显著的优势。特别随着包层泵浦技术的出现,高功率的光纤激光器逐渐成为一种现实,其输出功率日益提高,单纤输出功率超过1000W的单模、单偏振的光纤激光器已经有所报道^[1-2]。但是值得注意的是,随着输出功率的提高,光纤激光器承受的极高的功率密度会导致光纤受到致命性的破坏,有可能导致光纤涂覆层的损伤、光纤断裂乃至纤芯熔化,从而严重影响激光功率的提高和输出功率的复现。因此光纤的激光损伤成为高功率光纤激光器运转过程中一个不可忽视的问题。

理论和实验均表明,光纤的激光损伤主要发生在光纤的近泵浦端区域,光纤损伤现象通常为光纤

端面的损伤及近泵浦端光纤涂敷层的损伤。

在端面泵浦中,双包层光纤的泵浦端面既作为泵浦光的入射端口,又作为谐振腔的一部分,需要承受泵浦光和振荡激光两方面的压力。端面的平均温度很高,对散热造成很大的压力,激光产生的热及泵浦光的泄漏等原因都易造成端面的损伤。另外,在高功率条件下,光纤端面的污染物会吸收光功率,导致光纤端面的损伤^[3]。

超光滑表面是减少光学元件散射损失,提高其抗破坏阈值的一种有效手段。超光滑表面是指表面粗糙度小于0.5nm(rms)的表面。为了提高光纤端面的光学质量,从而有效提高端面的抗损伤性能,本

作者简介:朱 辰(1977-),男,1999年毕业于浙江大学光电系,现从事激光器技术研究。E-mail:zhuch@sina.com

收稿日期:2008-03-06

文从抛磨法和切割法两种不同的光纤端面处理方法入手,对各自工艺展开了较深入的探索,测试了经处理后光纤端面的表面粗糙度,并研究了不同处理方法对光纤激光器输出性能的影响。

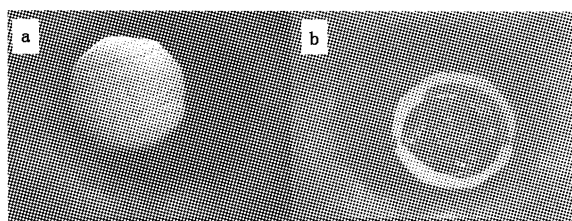
2 光纤端面处理对光纤激光器输出性能的影响

2.1 抛磨法处理光纤端面工艺的改进

在抛磨工艺中,实现超光滑表面加工的关键在于实现表面材料原子量级的去除。超光滑表面加工从某种意义上讲是一种“超级”抛光技术。抛光是超光滑表面加工的关键环节,最终的光学表面质量由抛光决定^[4]。高质量光滑表面的抛光是以沥青或纤维等弹性材料作磨盘,配以抛光液或研磨膏来达到技术要求。

我们采用散粒磨料手工操作的方法对光纤端面进行抛磨加工,抛磨过程分为粗磨、细磨、抛光三步。

在最初的实验中,由于对光纤端面抛磨工艺掌握的还不够,因此光纤端面抛磨后的质量较差,在100倍放大镜下观察,可以明显看到光纤端面的划痕,如图1(a)所示。纤芯区域的划痕尽管不会直接导致端面的损伤,但是划痕很容易捕获污染物从而增大了光纤端面损伤的机会。我们将具有这样端面的光纤构成连续激光器进行了多次实验,发现在很低的泵浦功率下就会发生端面的炸裂,损伤时激光器的输出功率通常在10W量级。图1(b)为实验中炸裂的光纤端面。实验中所用光纤样品为掺Yb双包层光纤,内包层形状为八角形,直径400 μm 。



(a) 实验前

(b) 实验后

图1 抛磨处理获得的光纤端面

为了改善光纤端面的光学质量,我们对抛磨工艺进行了不断摸索。在抛光时使用颗粒直径分别为10 μm ,5 μm ,0.5 μm 的三种抛光介质分三个阶段对光纤端面进行抛光。为保证抛光的精密度,避免光纤端面出现划痕,抛光时严格控制抛磨压力和抛磨时间,总抛磨时间在3h以上。通过以上工艺的改进,提高了光纤端面的质量。在光纤放大观察仪下,表面无明显划伤;光纤端面的崩边现象不明显。使用Zigo表面粗糙度仪对抛磨处理后的光纤端面的表面粗糙度进行测试。在一个相对小的取样面积内

(0.2mm $\times$ 0.2mm)对不同位置进行多次测量取平均值。光纤端面粗糙度在10nm量级。图2为抛磨处理后的光纤端面及表面粗糙度的测试结果,rms=13.284nm,Ra=9.607nm。

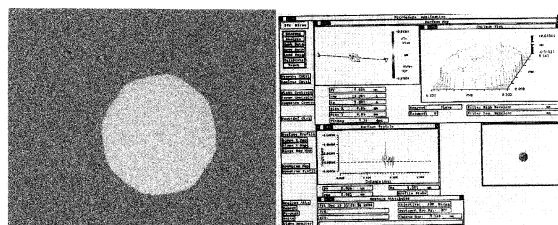


图2 抛磨处理后的光纤端面及表面粗糙度测试结果

为了获得更好光学质量的端面,在最关键的抛光这一过程,我们接下来又采取了较大的改进措施。首先提高了抛光料的粒度,选用国内可以生产的最细磨料对光纤端面进行抛光;同时增长抛光加工时间至原来的2倍;另外将原来使用的国产沥青胶板改为软硬度更加适合的进口沥青胶板。经过以上的改进,实验获得了较好的效果。经测试,改进抛磨工艺后,表面粗糙度提高到rms=0.7753nm,Ra=0.6243nm。图3为改进抛磨工艺后的测试结果。

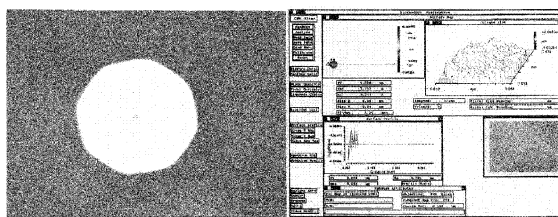


图3 改进抛磨工艺后光纤端面及表面粗糙度测试结果

2.2 用切割刀处理光纤端面

除了抛磨法外,我们还尝试使用光纤专用切割刀处理光纤端面。由于我们所需加工的双包层光纤内包层直径较大,为400 μm ,且形状为八角型,因此切割难度较大,端面极易损坏,切割后端面的平面度、表面粗糙度均不佳。图4是切割法处理后光纤端面的照片及用表面粗糙度的测试结果,从图中可以明显看出光纤端面的平面度较差。测得的表面粗糙度Ra=24.8175nm,比用抛磨法处理的结果大了1个数量级。

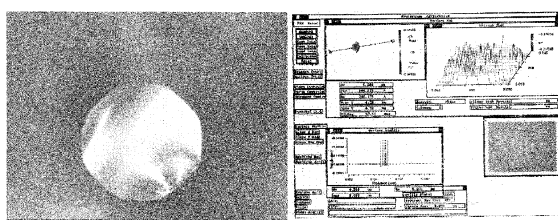


图4 切割法处理后的光纤端面后及表面粗糙度测试结果

2.3 端面处理对光纤激光器输出功率的影响

首先测试了端面处理对泵浦光入纤效率的影响。

使用工作波长 975nm, 最大输出功率 200W 的高功率二极管激光器作为泵浦源, 将其输出的激光经过光学耦合系统后耦合进长度为 15cm 的短光纤, 从光纤的另一端测量入纤功率。光纤端面经过不同工艺处理, 用这种方法来测试端面处理对泵浦光入纤效率的影响。图 5 为测试后的实验结果, 抛磨法处理光纤端面后入纤效率为 84.9%, 而切割法处理后, 经过短光纤泵浦光入纤效率 68.1%, 用抛磨法处理光纤端面提高了光纤的入纤效率。

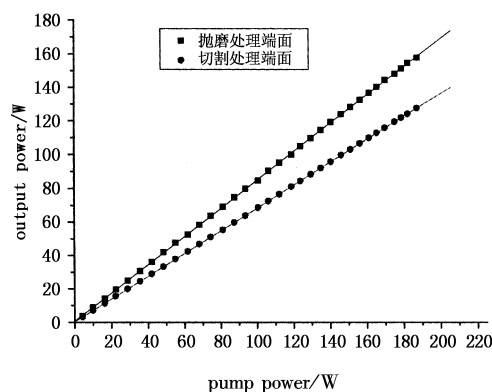


图5 15cm 短光纤对泵浦光的入纤效率

为了验证不同光学质量的端面对光纤激光抗损伤性能的影响, 构成端面泵浦的连续光纤激光器进行实验。实验中使用掺 Yb 双包层光纤, 长 16m, 对端面进行不同的工艺处理分别进行测试。

表 1 列出了采用不同工艺处理光纤端面后连续光纤激光器的实验结果。可见端面表面粗糙度的改善在一定程度上提高了光纤端面的抗损伤性能。图 6 为光纤激光器输出特性曲线。

表 1 不同端面处理工艺构成光纤激光器的实验对比

端面处理方法	最大泵浦电流/A	最大输出功率/W	斜效率/%	光纤损伤情况
抛磨法 (Ra = 1nm)	28	72.7	62.9	泵浦端面炸裂
抛磨法 (Ra = 0.6nm)	39(可提供的最大泵浦电流)	99.20	61.6	未损伤
切割法 (Ra = 24nm)	25	53.86	67.1	泵浦端面炸裂

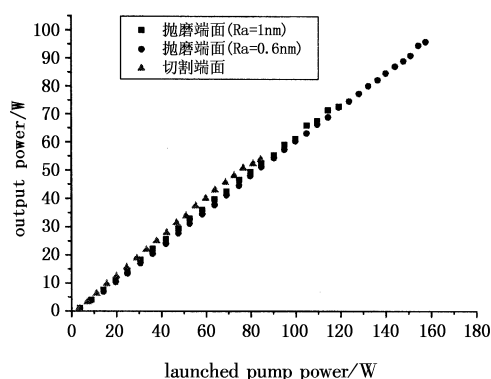


图6 光纤激光器输出功率随泵浦功率的变化

光学元件经表面处理后表面疵病主要由划痕和麻点组成, 其中划痕居多。对位于光学元件端面划痕附近的空间光强分布进行数值模拟, 结果表明: 光纤端面的划痕不仅影响透射波的光强分布, 同时由于其反射作用, 会在光纤内形成驻波, 形成对激光光强分布的调制, 从而容易引起光纤端面的损伤。但是结果也说明在划痕尺寸与光波波长可比拟的情况下, 划痕对光强分布的调制作用较为明显, 易造成光纤端面损伤。我们的光学端面表面粗糙度远小于光波波长, 因此端面的损伤机理还有待完善。

2.4 端面处理对输出激光光束质量的影响

在相同的泵浦条件下, 测试光纤激光器输出激光的光束质量因子 M^2 , 研究端面处理对光束质量的影响。我们所采用的方法是中华人民共和国国家军用标准在固体激光器测试方法中针对光束质量规定的测试方法。利用光束分析仪分别测量物方光束束腰直径 d_0 及光束发散角 θ , 然后将两者及波长 λ 的值代入公式 $M^2 = \frac{\pi}{4\lambda} \cdot d_0 \cdot \theta$ 计算出光束质量因子 M^2 。

对于我们实验中的光纤激光器, 对光纤端面采取抛磨处理后, 输出激光的发散角为 1.327mrad, 物方束腰直径为 1.525mm, 计算后 M^2 为 1.49。对光纤端面采取切割法处理后, 输出激光的发散角为 10.1524mrad, 物方束腰直径为 3.6267mm, 计算后 M^2 为 27.27。

影响激光光束质量的原因主要是由于光束变形造成的, 由于光纤端面采用切割法处理后端面的平面度变差, 造成光波波相差变大, 从而严重影响了输出激光的光束质量。遗憾的是, 由于光纤端面尺寸太小, 目前还没有找到一种很好的方法来对端面的平面度进行定量测量。

3 结 论

经过我们的测试和实验研究,分析了不同端面处理方法对光纤端面光学质量及光纤激光器输出特性的影响。经过工艺摸索和改进,抛磨法处理的端面表面粗糙度逐渐提高,最终达到0.6nm,使光纤激光器获得了较高的输出功率而未发生端面损伤。而切割端面的表面粗糙度、平面度均不佳,因而导致光纤激光器的输出性能下降很多,在较低的泵浦功率下就发生了端面损伤,输出激光的光束质量也变差。

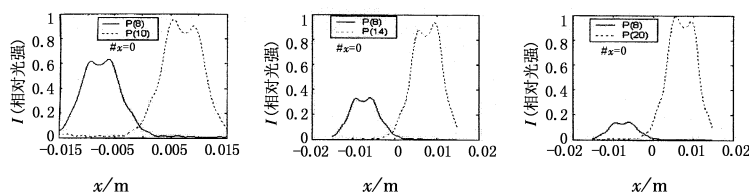
表面形貌极大的影响着光学元件的性能,合理地表征和评定表面形貌是一项具有重要意义的课题。表面粗糙度的理论与标准虽然已经取得巨大的发展,但是它们只能得到真实表面的有限信息,对于真实表面的形貌特征还无法全面准确描述。此外表面粗糙度的参数与光学元件的使用性能也不能完全对应。因此如何选择参数来全面准确描述光纤端面

的形貌特征,并将其与光纤激光器的性能相联系是值得考虑的问题。

参考文献:

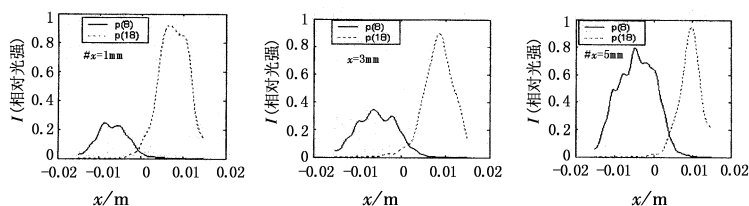
- [1] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1kW continuous-wave output power[J]. Electron. Lett., 2004, 40:470 - 471.
- [2] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36kW continuous-wave output power[J]. Optics Express, 2004, 12(25):6088 - 6092.
- [3] Brown D C, Hoffmann H J. Thermal, stress, and thermo-optic effects in high average power double-clad silica fiber lasers[J]. IEEE J. Quantum Electron, 2001, 37: 207 - 217.
- [4] 蔡立. 光学零件加工技术[M]. 北京:兵器工业出版社, 2007, 96 - 100.

(上接第443页)



(a) P(8)和P(10) (b) P(8)和P(14) (c) P(8)和P(20)

图4 光栅位置不动,光强随所选支线的变动的计算结果



(a) #x=1mm (b) #x=2mm (c) #x=3mm

图5 固定的两条支线输出光强度随光栅 G_1 的位置的变化而变化

5 结束语

本文建立了具有同空间特性的双频可调谐 TEA CO_2 激光器的理论模型,并对光场在水平方向的分布进行了数值计算,计算结果表明:两支线输出光场在水平方向的空间重叠性随所选两支线的波长差的减小而改善;各支线的输出光场随光栅有效使用面积的增大而增强,这与我们早期的实验研究是相符合的。

参考文献:

- [1] R V Ambartsum ina, V S Letokhov, et al. Isotope selective chemical reaction of BCl_3 in s strong infrared laser field [J]. Sov. Phys-JEPT Lett., 1974, 20:273 - 275.
- [2] Suzuki, Kazuya. Separation of boron isotopes by infrared laser [J]. JAER I-Conf, 1995, 2:1019 - 1026.
- [3] 谭吉春,潘大任. 双频 CO_2 激光多光子离解 CF_3CHCl 分离氘 [J]. 光子学报, 1981, 11:183 - 185.
- [4] 张力军,李育德,等. 双频 CO_2 激光多光子离解分离同位素的研究 [J]. 激光与红外, 2006, 36(3):178 - 180.
- [5] 许德富,李育德. 具有同空间特性的双波长可调谐 TEA CO_2 激光器 [J]. 光学技术, 2005, 31(3):384.
- [6] 王裕明. 光栅谐振腔的理论分析 [J]. 激光, 1982, 9(6):365.
- [7] 彭先兆,吴谨,等. 柱面镜 - 光栅谐振腔模式与频率选择特性 [J]. 光子学报, 1999, 19(9):1189 - 1192.