

文章编号: 0258-7025(2007)03-0323-04

弯曲直径对多模光纤激光器输出性能的影响

李立波^{1,2}, 楼祺洪¹, 周 军¹, 董景星¹, 魏运荣¹, 李进延³

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800
² 中国科学院研究生院, 北京 100039; ³ 烽火通信科技股份有限公司, 湖北 武汉 430079)

摘要 大模场面积(LMA)多模光纤激光器的输出性能与光纤的弯曲程度有关。为研究两者之间的关系,在光纤不同弯曲直径下,对多模光纤激光器的输出性能进行了实验测量和理论计算。采用刀口法测量了不同弯曲直径下的激光光束质量因子 M^2 , 并对每种情况下光纤激光器的斜率效率进行了测量。光纤弯曲直径分别为 285 mm, 195 mm 和 130 mm 时,多模光纤激光器光束质量因子 M^2 为 2.88, 1.82 和 1.67, 斜率效率为 39%, 35% 和 34%。另外,对于实验所采用的大模场面积多模光纤,理论计算了各模式损耗与光纤弯曲直径的关系。

关键词 激光技术; 光纤激光器; 输出性能; 刀口法; 弯曲直径; 大模场面积多模光纤

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

Influence of Bending Diameter on the Output Capability of Multimode Fiber Laser

LI Li-bo^{1,2}, LOU Qi-hong¹, ZHOU Jun¹,
DONG Jing-xing¹, WEI Yun-rong¹, LI Jin-yan³

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China
³ FiberHome Telecommunication Technology Co., Ltd, Wuhan, Hubei 430079, China)

Abstract The output capability of large mode area (LMA) multimode fiber laser depends on the fiber bending. To study the relationship, the output capability of multimode fiber laser is measured under various bending diameters, and it also be calculated theoretically. Beam quality factor M^2 is measured by the means of knife edge for different bending of LMA fiber and the slope efficiency is measured separately. When bending diameters of 285 mm, 195 mm and 130 mm are used, the corresponding beam quality factors are 2.88, 1.82 and 1.67 with the slope efficiencies of 39%, 35% and 34% respectively. For the LMA multimode fiber used in the experiment, losses of different modes are calculated theoretically under various bending diameters.

Key words laser technique; fiber laser; output capability; knife edge; bending diameter; large mode area multimode fiber

1 引言

在各种类型的激光器中,光纤激光器以其优异的光束质量得到了人们极大的关注。但由于受到各种非线性效应的影响^[1],其输出功率较小,制约了它

在工业、医疗等领域的应用。为提高其输出功率,大模场面积多模光纤应运而生。大模场面积光纤的采用,使得光纤激光器的输出功率大幅上升^[2~5],同时也带来了光束质量变差的问题。为使大模场面积光纤激光器获得近衍射极限的光束输出,人们采用了

收稿日期:2006-07-17; 收到修改稿日期:2006-08-28

基金项目:上海市光科技项目(04DZ05120,05DZ22001)和中国科学院知识创新工程资助项目。

作者简介:李立波(1981—),男,湖北人,博士研究生,主要研究方向为高功率光纤激光器及其光束质量改善。

E-mail:flone81@163.com

导师简介:楼祺洪(1942—),男,浙江人,研究员,博士生导师,目前研究方向为高功率光纤激光器及固体激光器。

E-mail:qhlou@mail.shcnc.ac.cn

各种方法来抑制光纤中高阶模的振荡,包括优化光纤折射率的分布和光纤掺杂浓度、采用特殊的腔体结构、光纤弯曲等。其中最简单、最经济的方法是直接采用光纤弯曲^[6]。

根据 Marcuse 的弯曲损耗理论^[7,8],光纤弯曲会带来信号光的损耗,且不同模式的弯曲损耗不同。在相同的条件下,高阶模对于弯曲更为敏感,损耗也更大,这也是通过光纤弯曲的方法来抑制高阶模的原理。本文采用不同直径弯曲缠绕大模场直径多模光纤,测量了不同弯曲直径下光纤激光器的光束质量和输出功率,并与弯曲损耗理论计算结果进行了比较。

2 实验测量及分析

实验采用武汉邮电科学研究院提供的掺 Yb 双包层光纤,长约 9 m。光纤参数为: D 形内包层 400/450 μm ,数值孔径 0.37;掺 Yb 纤芯直径 26 μm ,数值孔径 0.10。

实验装置如图 1 所示。抽运光经过整形系统后,经透镜聚焦通过双色镜耦合进入双包层光纤。在输出端,采用双色镜滤掉抽运光,激光经聚焦透镜聚焦后,进入功率计,刀口紧置于功率计前。通过移动刀口的位置,来测量激光束的光斑直径。

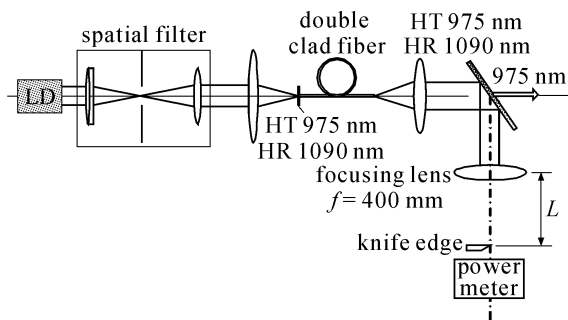


图 1 刀口法测量光斑直径实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of spot diameter measurement using knife edge

2.1 光纤弯曲直径对输出光束质量的影响

在光束传输方向上,光斑半径应满足光束传输方程^[9]

$$w^2(z) = w_0^2 + \left(\frac{M^2 \lambda}{\pi w_0}\right)^2 (z - L_0)^2, \quad (1)$$

式中 L_0 为某一参考面束腰 w_0 的位置。

在实验过程中,先后将光纤缠绕在直径分别为 285 mm, 195 mm 和 130 mm 的圆柱体上,分别测量光纤在不同弯曲直径下的输出光束质量。前后移动

刀口,测量在激光束传输方向上不同位置的光斑直径。采用 Origin 软件对测量结果按照式(1)进行非线性拟合计算,所得结果如图 2 所示。

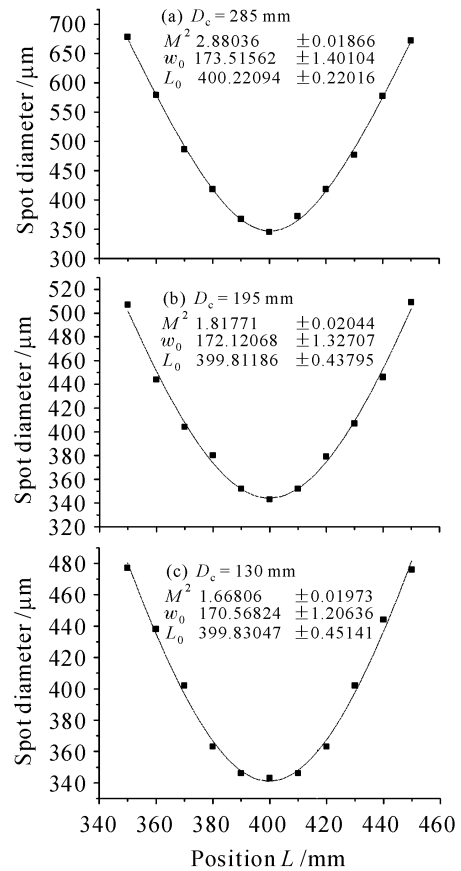


图 2 光斑直径非线性拟合曲线

Fig. 2 Nonlinear curve fit of spot diameter

由图 2 可看出,随着光纤弯曲直径的减小,光纤激光器输出光束质量因子 M^2 变小,光束质量变好。当弯曲直径 D_c 由 285 mm 变为 195 mm 时, M^2 因子由 2.88 减小为 1.82; 而 D_c 由 195 mm 变为 130 mm 时, M^2 因子由 1.82 减小为 1.67。结果表明,高阶模更易受到光纤弯曲的影响,随着弯曲直径的减小急剧减小。由于激光束中高阶模的减少,光束质量因子也随之减小,光束质量得到了提高。

此外,在弯曲直径 D_c 由 195 mm 减小为 130 mm 时, M^2 因子变化量较小,说明激光模式在此范围内损耗并不明显,损耗量比 D_c 由 285 mm 减小为 195 mm 时小。若进一步减小光纤的弯曲直径,使较低阶的激光模式具有较大的损耗量,则 M^2 因子将继续减小,直至最后具有单一的基模。

2.2 光纤弯曲直径对光纤激光器输出功率的影响

光纤弯曲直径较大时,激光模式损耗较小,因而存在不少高阶模式,所以输出功率较高。随着光纤弯曲直径减小,高阶模被损耗,激光输出功率也将随

之降低。为研究光纤弯曲对输出功率的影响,对光纤不同弯曲直径下的输出功率进行了测量,结果如图 3 所示。

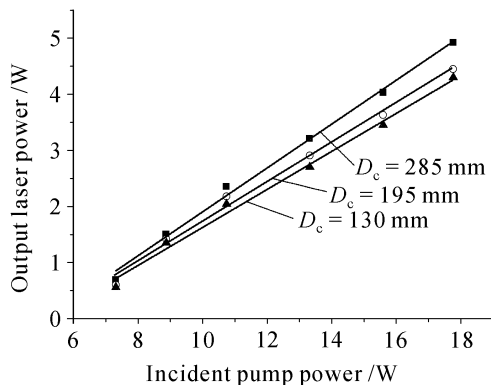


图 3 输出功率与抽运功率的关系

Fig. 3 Output power versus incident power

图 3 中,斜率效率随着弯曲直径的减小而变小。弯曲直径由 285 mm 减小为 195 mm 时,斜率效率由 39% 减小为 35%;由 195 mm 减小为 130 mm 时,斜率效率由 35% 变为 34%。结果表明由于光纤弯曲,使得原本束缚在纤芯内的一部分高阶模式激光不再满足全反射条件,通过包层逸出,导致斜率效率降低。相比而言,弯曲直径由 285 mm 减小为 195 mm 时斜率变化量较由 195 mm 减小为 130 mm 时的相应值大,这与两种变化条件下前者激光模式损耗更大的实验结果一致。

同时还发现,弯曲直径的变化对激光激发阈值影响并不明显。表明在实验所采用的弯曲条件下,基模 LP₀₁ 并无明显损耗。

3 实验结果及讨论

对于特定的光纤,其弯曲损耗表示为^[7]

$$2\alpha = \frac{2ak^2 \exp\left(2\gamma a - \frac{2\gamma^3 R}{3\beta_g^2}\right)}{e_v \sqrt{\pi\gamma R V^2}}, \quad (2)$$

对于实验所采用的光纤,纤芯半径 a 为 13 μm ,数值孔径 NA 为 0.10,内包层折射率为 1.450,归一化频率 V 为 7.49。将各参数代入(2)式,可得出弯曲直径 D_c 与弯曲损耗间的关系曲线,如图 4 所示。

由图 4 可看出,在相同的弯曲直径下,高阶模式损耗更大。当弯曲直径 D_c 为 285 mm 时,高阶模式 LP₄₁ 损耗量非常小,可忽略不计,而更高阶的模式已损耗完。 D_c 减小为 195 mm 时,其弯曲损耗约为 0.8 dB/m,光纤实际弯曲长度以 8 m 计算,LP₄₁ 模的损耗量约为总量的 77%;此时 LP₁₂ 模的弯曲损耗小

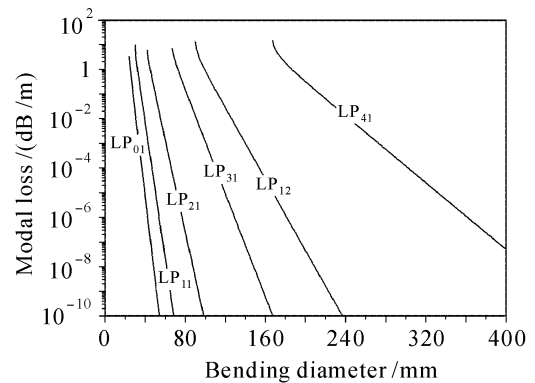


图 4 不同模式的弯曲损耗曲线

Fig. 4 Bending loss curves of different modes

于 10^{-6} dB/m,可忽略不计。 D_c 为 130 mm 时,LP₄₁ 已完全损耗完,LP₁₂ 模损耗约为 5×10^{-3} dB/m,基本上还未开始损耗。

由分析可知,在所选择的弯曲范围内,只涉及到高阶模式 LP₄₁ 的损耗,其他低阶模式基本上没什么损耗。当弯曲直径由 285 mm 减小为 195 mm 时,LP₄₁ 模大幅减小,导致激光器输出功率减小,斜率效率下降,光束质量变好。比较而言,弯曲直径由 195 mm 减小为 130 mm 时,LP₄₁ 模损耗量较小,斜率效率减小值也相对较小,光束质量 M^2 变化量也较小。

定义弯曲损耗为 2 dB/m 所对应的弯曲直径为模式的临界弯曲直径(此时模式的损耗量约为 97.5%)。由图 4 可看出,LP₁₁ 模的临界弯曲直径约为 36 mm,即为获得近衍射极限的激光束,实验用光纤的弯曲直径应小于 36 mm。

4 结 论

实验测量表明,光纤弯曲直径的减小,有利于光纤激光器中高阶模式的损耗和光束质量的改善;同时由于激光模式的损耗,导致激光器斜率效率减小。理论计算值较好地验证了实验测量结果。受实验光纤弯曲强度的制约,未进一步研究小弯曲直径下光纤激光器的输出性能。可以预见,在光纤弯曲强度允许的条件下,可通过弯曲直径的减小获得近基模输出。

参 考 文 献

- 1 Jens Limpert, Fabian Röser, Thomas Schreiber *et al.*. High-power ultrafast fiber laser systems [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2006, 12(2):233~244
- 2 Dong Xue, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. A 110-W fiber laser with homemade double-clad fiber [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, 3

- (6):345~347
- 3 Lou Qihong, Zhu Jianqiang, Zhou Jun *et al.*. 133 W pulsed high average power fiber amplifier with double clad fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4):552
楼祺洪,朱健强,周 军等. 双包层光纤放大器获得 133 W 高平均功率脉冲激光输出[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4):552
- 4 Lingfeng Kong, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. 133-W pulsed fiber amplifier with large-mode-area fiber [J]. *Opt. Eng.*, 2006, **45**(1):010502-1~010502-2
- 5 Zhou Jun, Lou Qihong, Zhu Jianqiang *et al.*. A continuous-wave 714W CW fiber laser with China-made large-mode-area double-clad fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7):1119~1120
周 军,楼祺洪,朱健强等. 采用国产大模场面积双包层光纤的 714 W 连续光纤激光器[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7):1119~1120
- 6 Adrian Carter, Bryce Samson. New technology advances applications for high-power fiber lasers [J]. *Military & Aerospace Electronics*, 2005, **16**(7):16~21
- 7 Dietrich Marcuse. Curvature loss formula for optical fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(3):216~220
- 8 Dietrick Marcuse. Field deformation and loss caused by curvature of optical fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(4):311~320
- 9 Lü Baida. Propagation and Control of High-Power Lasers [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999. 64~70
吕百达. 强激光的传输与控制[M]. 北京:国防工业出版社, 1999. 64~70

LASER2007' Harbin

第十八届全国激光学术会议第一轮通知

中国光学学会与中国电子学会联合主办的系列会议——第十八届全国激光学术会议,定于2007年8月在黑龙江哈尔滨举行。本次会议将为我国激光与光电子新老学者提供探讨新思想、新概念、新技术的交流平台,促进学术领域的科技创新和科技成果转化。多名院士和著名专家到会作大会报告,各分会设立高水平的邀请报告。欢迎积极投稿,踊跃参加。同时欢迎各公司、企事业单位刊登广告、到会展示科技成果产品和发布信息。

会议时间:2007年8月,会期4天

会议地点:中国·黑龙江·哈尔滨

主办单位:中国光学学会、中国电子学会

承办单位:哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室

名誉主席:周炳琨院士

会议主席:范滇元院士、周寿桓院士

会议副主席:姚建铨、彭堃堃、朱健强、王 骥、王树国

秘书长:陈德应

会议主题/征稿范围:1) 激光物理(激光器动力学、激光等离子体物理、X光激光、激光光谱等);2) 非线性光学与量子光学;3) 全固态激光器及新型激光器;4) 激光信息及处理技术;5) 激光生物与激光医学;6) 工业激光及其应用;7) 激光材料、薄膜及元器件;8) 光束传输、控制及光束特性

征文要求:将500~800字摘要(用于审稿)和300字提要(用于出版)各一份,以电子邮件附件的形式发送至:Laser2007@hit.edu.cn,摘要应能准确反映研究成果的创新点,包括研究目的、方法结果、结论等内容。不引用参考文献、数学公式和化学式。不接受已在国内外正式出版刊物上发表过的论文,提交截稿日期为2007年5月31日。

来稿需注明论文题目、作者姓名、单位、通讯地址(包括邮编、电话、E-mail等)、关键词3~6个。题目用小三号黑体,摘要用宋体小四号字按word格式编排,务必在左上角标明所属征稿范围的第几类。一般不接受书面邮寄件。经审稿录用的论文,将由《中国激光》以增刊形式出版。

会议秘书组联系人及联系电话:

陈德应 0451-86402837,何伟明 0451-86412710-214,

程元丽 0451-86402920,王春晖 0451-86402910,王瑞环 0451-86413164

传真:0451-86413164,E-mail:Laser2007@hit.edu.cn,网页:www.Laser2007.hit.edu.cn

地址:黑龙江哈尔滨南岗区一匡街2号哈工大科学园3031信箱(王瑞环收),邮编:150001

中国光学学会激光专业委员会

中国电子学会量子电子学与光电子学分会

哈尔滨工业大学

可调谐激光技术国家级重点实验室

哈尔滨工业大学光电子技术研究所(代章)

二〇〇七年一月二十二日