

文章编号: 1001-3806(2009)05-0459-03

高功率密度光纤激光元器件传输特性测试系统

肖起榕, 田宁, 黄磊, 王东生, 巩马理*

(清华大学精密仪器与机械学系光子与电子研究中心摩擦学国家重点实验室, 北京100084)

摘要: 为了提高高功率密度下光纤激光元器件传输特性测量精度, 采用基于光纤标准测试方法的双光路测量结构, 设计了自动光功率比测量系统。对双光路系统的特点进行了理论分析和实验验证。利用固体微晶片激光器作为光源输出, 建立了折射率匹配法传输特性测试仪实验装置, 对掺镱双包层光纤的传输损耗特性进行了测量。实验中测得35m长掺镱双包层光纤对1064nm光的插入损耗为2.645dB, 测得100组数据对应的标准偏差为0.026dB。并在不同的条件下进行了多次重复实验, 重复测量误差不超过0.07dB。这一结果对于提高光纤激光元器件测试精度是有帮助的。

关键词: 光纤光学; 传输特性; 双光路; 光纤激光元器件; 插入损耗

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.05.004

Transmission characteristics measurement system of fiber laser devices in high power density

XIAO Qi-rong, TIAN Ning, HUANG Lei, WANG Dong-sheng, GONG Ma-li

(State Key Laboratory of Tribology, Center for Photonics and Electronics, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to improve the measurement accuracy of the transmission characteristics of the parts in high power fiber laser, an automated measurement system of power ratio was designed by means of the dual optical path measuring system with full consideration of the standard transmission measuring methods. The dual optical path measuring system was analyzed. With the measuring system equipped with a microchip solid laser and a unique refractive index matching cladding mode filter, the transmission loss of a double clad fiber laser was measured. In experiment, for a 35m of Yb-doped double cladding fiber its insert loss was 2.645dB at 1064nm and standard deviation is 0.026dB for 100 test data. Moreover, the repeated measurement error was less than 0.07dB proven by the experiments under different conditions. The result is useful to improve the measurement accuracy.

Key words: fiber optics; transmission characteristics; dual optical path; fiber laser device; insert loss

引言

光纤激光器作为第3代激光技术的代表, 具有其它激光器无可比拟的技术优越性。对它的研究已成为当今激光器的发展热点之一^[1-3]。在高功率密度下运转的光纤激光元器件相对于光纤通讯中的通用的光纤器件, 有着许多特殊的要求。比如光纤激光器件应用于激光腔内, 更关注器件的缺陷, 以及由此带来的损伤阈值下降^[4]; 同时对于光纤器件的传输特性通常也有着更高的要求, 对应的也就要求所采用的测量方法和测试仪器能达到更高的精度。但是, 以前的测试方法和测试设备都是围绕着单模和多模细光纤器件设计的(内包层直径不大于150 μm)^[5], 而在光纤激光器中,

常用的是内包层直径不小于200 μm 的粗光纤器件, 纤芯直径一般不小于20 μm 。因此, 绝大部分现有测试仪器和有些现在广泛应用的测试方法都不能直接应用。作者设计了一种新的测试方法——双光路同步测量, 很好地消除了光源辐射波动对测量精度的影响。对掺Yb双包层光纤插入损耗进行了实验测量, 得到了较高的精度。

1 系统设计

1.1 双光路结构

在国家标准和国际电报电话咨询委员会的建议中, 提供了截断法、反向散射法、插入损耗法3种实验方法^[6]。对于高功率密度光纤性能测试系统设计也必须基于这3种基本的实验方法。为了精确测量光纤激光元器件重点关注的光传输特性——插入损耗和回波损耗。综合比较3种基本实验方法的精度、通用性和易操作性后, 选择在损耗法基础上, 设计了该测量系

作者简介: 肖起榕(1985-), 男, 博士研究生, 现主要从事激光器及其相关研究。

* 通讯联系人。E-mail: gongmali@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2008-11-08; 收到修改稿日期: 2008-12-22

统。它将插入损耗法原理的两个步骤在1个系统内实现同时完成。双光路测量系统原理图如图1所示。

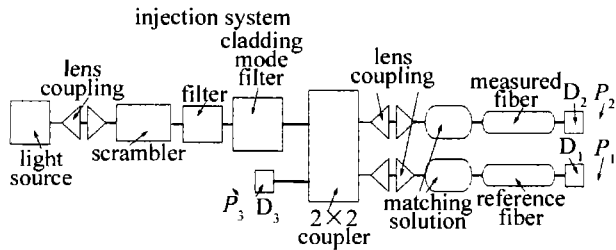


Fig. 1 Dual optical path for a fiber characteristics measurement system

该双光路测试系统从光源经由 2×2 耦合器到 D_1 端为第1阶段测量光路;从光源经由 2×2 耦合器到 D_2 端是第2阶段测量光路。每支光路均是符合国家标准,而且是针对光纤激光器适用的光纤元器件的特点设计,两路设计具有很高的对称性。通过测量参考光纤光功率变化,实时检测信号光输入功率变化,可以在后期实现两路光信号的同时检测,消除光源的波动影响,提高测量精度。

图1中,耦合器的传输矩阵元素为 a_{31} 和 a_{41} , 光学耦合系数为 κ_1, κ_2 。在参考光纤出端处,测量信号光功率 P_2 , 忽略参考光纤损耗,并通过耦合比计算得到被测光纤输入信号光功率 P_0 , 在被测光纤输出端处,测量信号功率 P_1 , 定义插入损耗为^[4]:

$$A(\lambda)(\text{dB}) = 10 \lg \left(\frac{P_1}{P_2} \times \frac{a_{31} \times \kappa_2}{a_{41} \times \kappa_1} \right) \quad (1)$$

式中, λ 为波长。系统只要标定 $k = \frac{a_{31} \times \kappa_2}{a_{41} \times \kappa_1}$, 测得 P_1, P_2 , 即可计算得到插入损耗。

双光路测量系统有以下特点:

(1) 该系统可以消除插入损耗法测量时,由于两步测量时间差引起的光源波动对测量精度的影响。插入损耗法测量原理^[6]如图2所示。

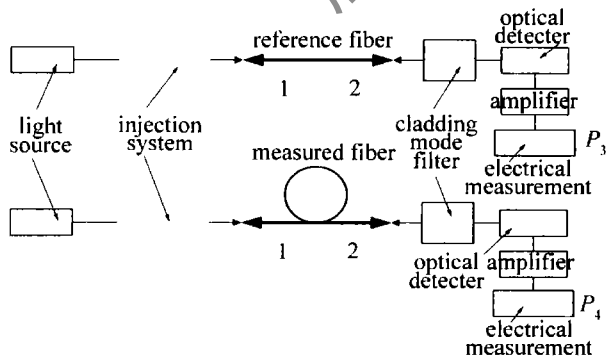


Fig. 2 Measuring fiber attenuation by means of insertion loss method

首先将和待测光纤同型号的很短的参考光纤(自身的损耗相对待测光纤可以忽略)装调于图2中的系统,测量输出功率 P_3 ; 然后取下参考光纤,换入被测光纤,调整使耦合达到最佳耦合后,测量此时的输出功率 P_4 , 则被测光纤的衰减可由下式计算得到:

$$A = 10 \lg \left(\frac{P_3}{P_4} \right) (\text{dB}) \quad (2)$$

由于光纤两次插入前后,不能获得完全相同的稳态功率分布。而且, P_1 和 P_2 本身是一个波动的量,影响其不稳定的主要原因是光源的输出功率的漂移。若光源输出光功率 P 的波动是 ΔP , 光源耦合到注入系统的耦合效率是 η_1 , 注入系统对光功率的损耗系数是 η_2 , 注入系统耦合到参考光纤和待测光纤的耦合系数理想情况下均设为 κ , 则参考光纤的输出理想情况下可表示为 $P_1 = (P + \Delta P_1) \times \eta_1 \times \eta_2 \times \kappa$, 设待测光纤的损耗系数为 ξ , 则理想情况下,待测光纤的输出可表示为 $P_2 = (P + \Delta P_2) \times \eta_1 \times \eta_2 \times \kappa \times \xi$ 。因为光源的波动的随机性, $\Delta P_1, \Delta P_2$ 的值在时间上具有随机性,导致分两步测量得到的 P_2 和 P_1 的比值不等于待测光纤的衰减系数 ξ 。

对于选用的插入损耗法测量原理的误差和精度分析,由于插入损耗法测量光纤衰减 A 的表达式写成下式,对其微分得到:

$$\Delta A = \frac{10}{\ln 10} \cdot \left(\frac{\Delta P_1}{P_1} - \frac{\Delta P_2}{P_2} \right) \quad (3)$$

则由(3)式表明,衰减 A 的不确定性 ΔA 与插入前后测得的 P_2 和 P_1 的不确定度有关。 P_2 和 P_1 测量的不确定度主要是由于光源的输出功率的漂移的不确定度、耦合系统耦合效率的不确定度、光电探测读数的不确定度决定。而双光路测量方法完全消除了光源输出功率波动的影响。后两个不确定度可以通过合理设计耦合透镜组和提高光电探测精度来解决。

(2) 采用匹配液包层滤模器,能够适用于高功率光纤激光的粗光纤包层模滤除,并且滤除效率高。对于多模光纤的测量系统,不加控制的注入条件通常激励高阶有损耗的模式,所有激发模式所携带的总功率在光纤长度上的衰减系数不相同,这种模式会导致瞬态损耗并使得光纤衰减和长度不成正比。为获得精确的可重复测量结果,测量时必须保证光纤中功率分布稳定,满足稳态功率分布条件。采用扰摸、滤模和包层模剥除装置,通过强烈的几何扰动促使光纤中的激光模式尽快达到稳态分布^[7-8]。

滤模器在试验中采用绕棒式,即把光纤用较小的张力缠绕在一根直径约 20 mm 的圆柱体上。同时达到了扰摸效果。包层模滤除采用折射率匹配液包层模滤除器,将一段光纤的涂敷层剥去,并浸在折射率等于或稍大于包层折射率的匹配液中。参考文献[9]中也验证了折射率匹配液可以很好地滤除包层模。

(3) 该测试系统采用透镜耦合,可以测试大部分光纤激光元器件的插入损耗和反向损耗。通过对透镜

组的合理设计,配合 5 维调节架的精密调节,可以使调节失准对耦合效率的影响降到最低。

1.2 光功率同步测量以及数据采集

该测量系统是测试高功率密度下的光纤特性,所以注入光采用高重频窄脉宽激光。并且为了消除光源波动带来的测量误差,必须同步测量两光路的光功率。针对这些要求,设计了双通道高重频窄脉冲激光功率比自动测量系统。系统原理图见图 3。在激光注入光

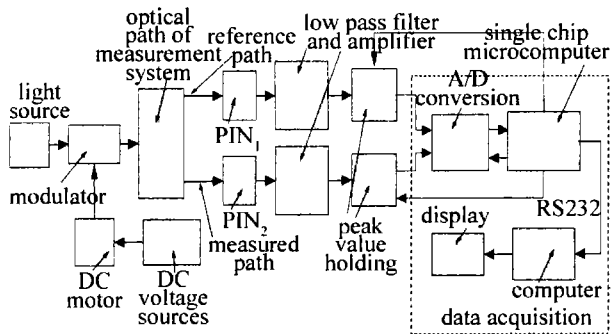


Fig. 3 Dual path optical power meter for transmission characteristics measurement system

纤前加入了正弦调制。两路光纤输出的激光经过 PIN 管转换成电信号后^[10],对电信号进行放大滤波得到正弦信号,然后再经过峰值检波、单片机数据采集和数据传输。最后经计算机计算得到,到达光电探测器的光功率比值 P_1/P_2 ,定标后通过采用软件的方法乘上两光路的光分比,就得到光纤的插入损耗。

该系统的数据采集采用单片机控制 A/D 转换的方法实现。单片机控制其采集时序,并将采集的数据进行处理,数码管显示,以 RS232 接口发送给计算机。

计算机作为数据采集系统的数据显示记录模块,所要完成的工作是编制下位机界面,对单片机系统采集的数据进行相应处理。该系统采用 VC++ 6.0 编写的下位机软件界面^[11]。软件主要功能是采集处理数据,并显示数据随时间的变化曲线。运行软件,若单片机有数据发送,则接收数据并显示在对应的数据框中。可实时计算两路的功率比值,并绘制光功率随时间波动曲线。

2 实验

由于采用了双光路结构,可以降低光源辐射稳定性要求。系统采用实验室自行研制的微晶片固体激光器光源,输出波长 1064nm,平均功率 30mW,重复频率 10kHz,脉冲宽度 1ns。

在完成硬件和软件调试后,对系统进行定标。采用 AV2498A 光功率计定标得到 $k = 1.08$ 。然后,对待测光纤为长度 30m、芯径 28.6 μm 、包层 400 μm 、数值孔

径 0.1/0.46 的多模掺 Yb 光纤进行测量。参考光纤为同样的光纤,长度为 20cm。测得光功率相对值和插入损耗的 100 组数据绘制曲线见图 4,其中纵坐标为单片机直接采集得到的数值,为相对功率,单位为 1,横坐标表时间。

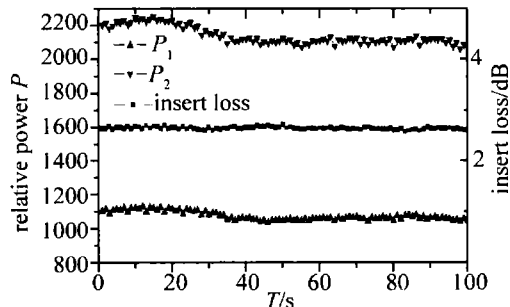


Fig. 4 Relative optical power of dual optical path and insert loss

测得长为 35m 掺 Yb 光纤的插入损耗为 2.645dB,标准偏差为 0.026dB。插入损耗也可以表示为 0.0756dB/m,对应标准偏差为 0.00074dB/m。从图 4 可以看出,光源输出光功率的波动比较严重,但是通过双光路的方法,可以使两条光路测量严格同步。从插入损耗曲线可以看出插入损耗值基本保持在 2.645dB。所以,光源波动的影响可以被很好地消除,从而获得较高的测量精度。

为了研究系统测量的稳定性和重复性,对于同一种给定测量光纤,在不同的测量时间,不同的环境温度和注入条件下进行了多次测量。为了检验此双光路测量结构的对称性和对光源波动影响的消除情况,还将参考光路和待测光路的实际位置进行了对调。同时,在每次的实验过程中均对光纤耦合重新进行了装调,光纤端面重新进行切割处理,保证测量结构的可靠性。多次测量得到的测量结果经过数据处理后,总结于表 1 中。

Table 1 Result of experiment in different conditions

number	average power	average power	$\frac{P_{out}}{P_{in}}$	insert loss α/dB	insert loss $\alpha'/(\text{dB} \cdot \text{m}^{-1})$
	of path 1 $\bar{P}_1/\mu\text{W}$	of path 2 $\bar{P}_2/\mu\text{W}$			
1	35.4	51.4	0.547	2.62	0.0749
2	48.1	79.9	0.540	2.67	0.0763
3	68.4	42.5	0.544	2.64	0.0754
4	56.8	36.9	0.549	2.60	0.0743

其中,1,2 两组数据是在第 1 路接待测光纤、第 2 路接参考光纤下得到的;3,4 两组数据是在第 1 路接参考光纤、第 2 路接待测光纤下得到的。通过以上 4 次在不同时间、不同环境温度和湿度条件下的实验测量得到的数据可以看出,重复测量误差不超过 0.07dB,可见本实验装置有较高的重复测量精度。

(下转第 465 页)

展开相位所需时间共为 5.33s,快了 3 倍。

4 结 论

提出了基于调制度轮廓线进行极点连接的方法,克服了 Goldstein 算法中截断线不符合物体轮廓的缺点。由于截断线是在调制度轮廓的基础上提取的,所以,能覆盖因物体的凹陷或陡变而形成的不可靠相位区域,避免了积分路径穿越这些区域时而产生错误。实验表明,新算法与目前较为可靠的相位展开方法——基于调制度的可靠度排序算法展开效果相似,甚至更好一些,并且运算速度远快于后者。显示了该方法的优越性。

参 考 文 献

- [1] JARLE S, TORFINN T. Performance evaluation of two-dimensional phase unwrapping algorithms [J]. *Appl Opt*, 1999, 38 (20) : 4333-4344.
- [2] CUSACK R, HUNTLEY J M, GOLDREIN H T. Improved noise immune phase unwrapping algorithm [J]. *Appl Opt*, 1995, 34 (5) : 781-789.
- [3] GHIGLIA D C, ROMERO L A. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods [J]. *J O S A*, 1994, A11 (1) : 107-117.
- [4] YANG F T, LUO J L, LIU Zh Q, *et al.* Comparison of six phase unwrapping algorithms [J]. *Laser Technology*, 2008, 32 (3) : 323-326 (in Chinese).

(上接第 461 页)

3 结 论

针对高功率密度运转下的光纤激光对其适用的光纤器件的特殊的要求,设计了双光路系统,对光纤的插入损耗进行了实验研究。实验系统中通过各项定标和折射率匹配滤波,双光路同时测量等,系统的精度和可靠性有大幅提高。通过实验测量发现,插入损耗测量精度控制优于 0.07dB。

参 考 文 献

- [1] ZENG H F, XIAO F H. The development of Yb-doped double-clad fiber laser and its application [J]. *Laser Technology*, 2006, 30 (4) : 438-444 (in Chinese).
- [2] LOU Q H, ZHOU J, WANG Zh J. Analysis of high-power fiber laser weapons [J]. *Laser Technology*, 2003, 27 (3) : 161-165 (in Chinese).
- [3] LI Ch, YAN P, CHEN G, GONG M L. Using China-made Yb-doped double-clad fiber for fiber laser output power breakthrough 700W [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33 (6) : 738 (in Chinese).
- [4] WANG R X. Number study on the coupling loss of the photonic crystal

- [5] BONE D J. Fourier fringe analysis: the two-dimensional phase-unwrapping problem [J]. *Appl Opt*, 1991, 30 (25) : 3627-3632.
 - [6] SU X Y, CHEN W J. Reliability-guided phase unwrapping algorithm: a review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, 42 (3) : 245-261.
 - [7] SU X Y, XUE L. Phase unwrapping algorithm based on fringe frequency analysis in Fourier-transform profilometry [J]. *Opt Engng*, 2001, 40 (4) : 637-643.
 - [8] SU X Y, ZARUBIN A M, von BALLY G. Modulation analysis of phase-shifted holographic interferograms [J]. *Opt Commun*, 1994, 105 (5/6) : 379-387.
 - [9] GOLDSTEIN R M, ZEBKER H A, WERNER C L. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping [J]. *Radio Science*, 1988, 23 (4) : 713-720.
 - [10] SALFITY M F, RUIZ P D, HUNTLEY J M, *et al.* Branch cut surface placement for unwrapping of undersampled three-dimensional phase data: application to magnetic resonance imaging arterial flow mapping [J]. *Appl Opt*, 2006, 45 (12) : 2711-2722.
 - [11] CHAVEZ S, XIANG Q S, AN L. Understanding phase maps in MRI: a new outline phase unwrapping method [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2002, 21 (8) : 966-977.
 - [12] XU L H, SU X Y. Analysis on the processing on three classes of residuals for phase unwrapping [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2001, 12 (12) : 1267-1270 (in Chinese).
 - [13] LEI L Zh. On the edge detecting method of digital image [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2006 (3) : 40-42 (in Chinese).
 - [14] WU Q Y, SU X Y, SONG F. A pruning algorithm for the skeleton of line-structure-light pattern [J]. *Journal of Sichuan University*, 2006, 28 (5) : 148-151 (in Chinese).
- fiber [J]. *Laser Technology*, 2007, 31 (5) : 494-495 (in Chinese).
- [5] GUO Y, CAO M C, LUO Zh X, *et al.* Design of multifunctional instrument of insert loss and return loss measurement [J]. *Laser Technology*, 2007, 31 (5) : 548-550 (in Chinese).
 - [6] Wuhan Post and Telecommunications Science and Technology Institute. GB/T 15972. 4-1998 Generic specification for optical fibres part 4: measuring methods for transmission and optical characteristics [S]. Beijing: Chinese Standards Press, 1998: 1-33 (in Chinese).
 - [7] RABAH A, JACQUES M. Mode scrambler for polymer optical fibers [J]. *Opt Engng*, 2000, 39 (1) : 299-303.
 - [8] Wuhan Post and Telecommunications Science and Technology Institute. YD/T 893-1997 Technical conditions for fiber coupler [S]. Beijing: Chinese Standards Press, 1997: 1-47 (in Chinese).
 - [9] HUANG B C, NING D, HAN J, *et al.* Study of ytterbium-doped double-clad fiber absorption characteristics [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32 (11) : 1472-1477 (in Chinese).
 - [10] VAYSHENKER I, LEHMAN J H, LIVIGNI D J, *et al.* Trilateral optical powermeter comparison between NIST, NMIJ/AIST and METAS [J]. *Appl Opt*, 2007, 46 (5) : 643-647.
 - [11] ZENG Z Q. Three methods of realization serial communication between single chip and PC based on visual C++ platform [J]. *Automation and Instrumentation*, 2005, 9 (3) : 60-65 (in Chinese)