

高功率密度光纤性能测试系统设计

田 宁 王东生 黄 磊 巩马理

(清华大学精密仪器与机械学系, 北京 100084)

摘要 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许多特殊要求, 设计了高功率密度下光纤性能的测试系统。综合比较论证了截断法、插入损耗法、后向散射法三种测试方法。基于插入损耗法设计了双光路光纤测量系统, 通过双光路同时测量被测光纤和参考光纤的插入损耗, 利用参考光纤光路监控校准输入信号光功率, 提高测量精度。对系统的测试方法和测量参量理论上进行了推导和说明, 分析了系统的传输效率, 设计测量精度可达到插入损耗不大于 0.5 dB, 回波损耗不小于 50 dB。

关键词 光纤光学; 插入损耗; 回波损耗; 高功率密度; 粗芯径光纤

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

Fiber Characteristics under High Power Density Measurement System Design

Tian Ning Wang Dongsheng Huang Lei Gong Mali

(Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Aiming at solving special requirements of fiber device suited for fiber laser under high power density operation, a new measurement system was designed to meet these special requirements. After comprehensive analysis and comparison with truncation method, backward scattering method and insertion loss method, a new dual optical path measurement system of fiber was proposed. The system can measure the insertion loss of tested fiber and reference fiber at the same time to monitor and calibrate the input optical signal power, so it can achieve higher accuracy. Theoretical consequence and explanation for the measuring method and parameters in this new system are discussed in this paper. The transmission efficiency and measuring accuracy of the system is analyzed, which meet the need of design (Insertion loss ≤ 0.5 dB, return loss ≥ 50 dB).

Key words fiber optics; insertion loss; return loss; high power density; large diameter fiber

1 引 言

相对于光纤通信使用的通用光纤器件, 在高功率密度下运转的光纤激光器对其适用的光纤器件有许多特殊的要求: 光纤器件的传输特性对插入损耗、回波损耗通常有更高的要求, 所以采用的测量方法和测试仪器要能达到更高的精度。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^[1~3], 纤芯直径一般不小于 20 μm 。目前绝大部分现有测试仪器和现在广泛应用的测试方法都不能直接应用于高功率密度下运转的光纤激光元器件的测试。

为了满足高功率密度下特殊要求的测试方法的设计, 必须首先满足国家标准。本实验设计中运用器件的测量均需严格以国家标准为指导, 国标 GB/T 15972.4-1998 对实验中相关方法、装置、条件和器件规范等做了详细规定。

2 实验系统设计

实验系统的设计基于光纤总规范中的规定, 对单模和多模光纤的传输特性中衰减特性的实验方法提供了截断法、插入损耗法和后向散射法。对于高功率密度光纤性能测试系统设计也必须基于这三种

作者简介: 田 宁(1983—), 男, 湖北人, 硕士研究生, 主要从事光电测试技术方面的研究。

E-mail: tn02@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 巩马理(1959—), 男, 贵州人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光技术、光电子信息工程等方面的研究。

E-mail: gongml@mail.tsinghua.edu.cn

基本的实验方法进行比较。

如图 1 所示,截断法是测量光纤衰减的基准实验方法,在不改变注入条件时,测出通过光纤两横截面的光功率,计算得到衰减。该方法虽然测得的衰减精度很高,但对光纤具有结构的破坏性,且不具有重复性。

如图 2 所示,后向散射法是测量光纤衰减特性的替代实验方法,单端测量光纤中不同点后向散射至光纤始端的后向散射光功率得到损耗。该方法精度不高,对光纤非均匀性敏感,无法控制反向散射模式,且信号处理方式复杂。

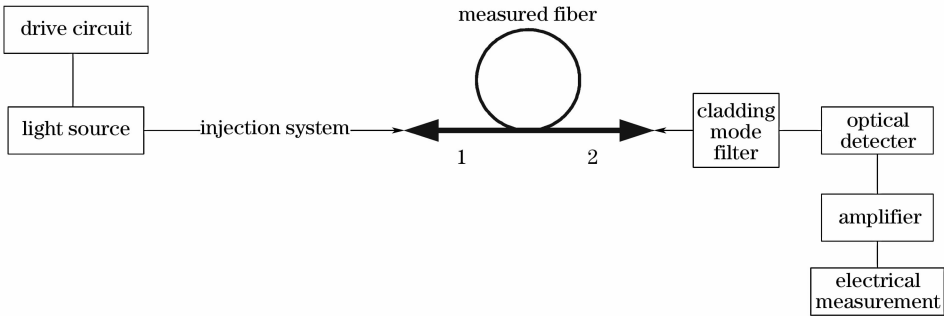


图 1 截断法测光纤衰减

Fig. 1 Measuring fiber attenuation by truncation method

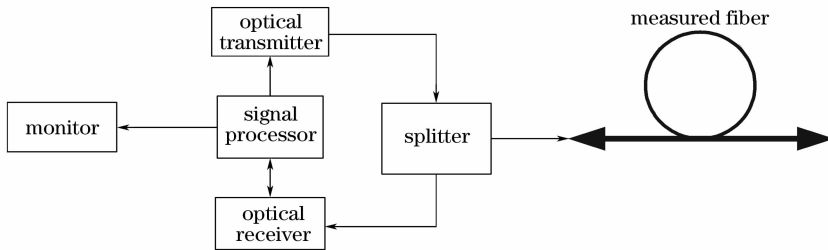


图 2 后向散射法测光纤衰减

Fig. 2 Measuring fiber attenuation by backward scattering method

如图 3 所示,插入损耗法是测量光纤衰减特性的替代实验方法,通过测量校准的输入和输出光功

率计算得到损耗。此方法操作简单,具有非破坏性,但测量精度和重复性受到耦合接头等附加连接器的

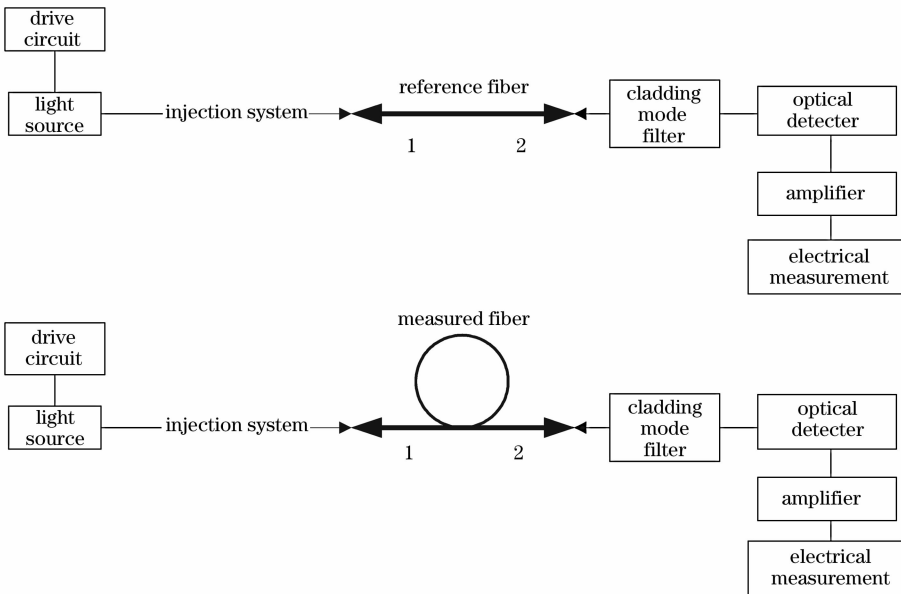


图 3 插入损耗法测光纤衰减

Fig. 3 Measuring fiber attenuation by insertion loss method

影响。

综合测量方法的精度、通用性、易操作性,选用插入损耗法作为基础设计测试方法,具有较高的精度,同时重复性好。

选择测量对象为芯径 $20\ \mu\text{m}$,包层直径 $400\ \mu\text{m}$,数值孔径 $0.06/0.46$ 的多模掺杂光纤的插入损耗和回波损耗,对系统参量研究。测试系统首先应满足纤

芯的传输特性的要求,即插入损耗不大于 $0.5\ \text{dB}$,回波损耗不小于 $50\ \text{dB}$,这是系统设计的依据。提出如图 4 所示的测量系统^[4~9]。该系统为双光路测试系统,每条光路均符合国家标准。通过测量参考光纤光功率,可实时检测信号光输入功率变化,提高精度。该系统同时利用耦合器,可测得回波损耗。

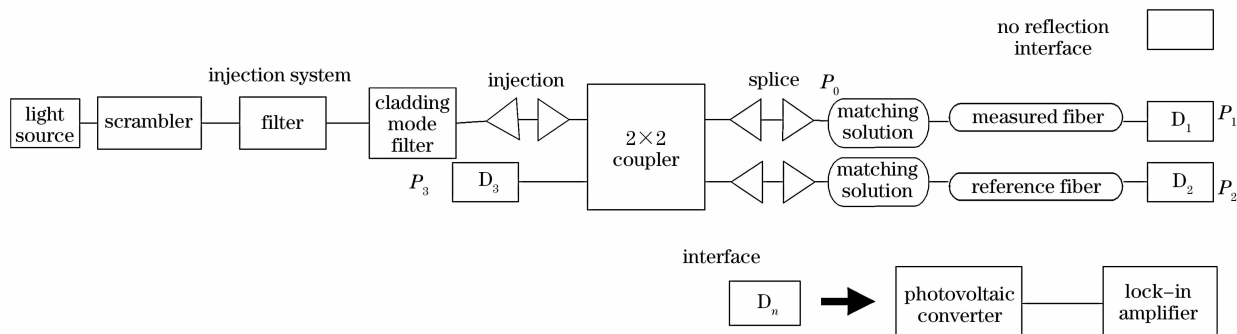


图 4 双光路光纤性能测试系统

Fig. 4 Dual optical path measurement system for fiber characteristics

如图 4,在参考光纤出端 D_2 处,测量信号光功率 P_2 ,忽略参考光纤损耗(若不能忽略,计附加损耗 k_1)并通过耦合比计算得到被测光纤输入信号光功率

$$P_0 = \frac{a_{31}}{a_{41}} P_2 (1 - k_1), \quad (1)$$

式中 a_{31}, a_{41} 均为耦合器传输矩阵元素。

在被测光纤出端 D_1 处,测量信号光功率 P_1 ,则插入损耗为

$$A(\lambda) = 10 \lg \frac{P_0(\lambda)}{P_1(\lambda)} = 10 \lg \frac{P_2(\lambda)}{P_1(\lambda)} \frac{a_{31}}{a_{41}} (1 - k_1), \quad (2)$$

首先在参考光纤支路加入隔离器,确保此光路的回波损耗不影响被测光路的测量。在耦合器 D_3 端测量回波光功率 P_3 ,通过耦合比和耦合器附加损耗以及光路反向耦合的损耗计算被测光路上回波功率

$$P_{\text{back}} = P_3 \frac{a_{23} + a_{13}}{a_{23} k_2 k_3}, \quad (3)$$

式中 k_2 为耦合器附加损耗, k_3 为光路反向耦合损耗, a_{23}, a_{13} 均为耦合器传输矩阵元素。所以通过此系统可测得回波损耗为

$$R_L(\lambda) = 10 \lg \frac{P_0(\lambda)}{P_{\text{back}}(\lambda)} \frac{a_{23} k_2 k_3}{a_{23} + a_{13}}. \quad (4)$$

3 系统分析

系统要求光纤插入损耗不大于 $0.5\ \text{dB}$,各元件之间采用连接器连接,而连接器的重复性误差为

$0.1\ \text{dB}$ 。如果按照国标要求,测试系统分别测试被测光纤和参考光纤的插入损耗,则不能满足插入损耗不大于 $0.5\ \text{dB}$ 。采用图 4 的双光路测试系统,可同时测量被测光纤和参考光纤的插入损耗,通过参考光纤光路可监控校准输入信号光功率,通过计算得到被测光纤的插入损耗,可提高测量精度。

由于系统要求回波损耗不小于 $50\ \text{dB}$,因此要求系统的光功率最大变化不大于 10^{-5} 。目前能达到的光源功率稳定度不大于 $0.05\ \text{dB/h}$,显然不能满足系统精度要求。采用图 4 的双光路测试系统,解决了光源功率稳定度与要求的回波损耗的矛盾。

为实现测量精度要求,从光源到探测器的测试光学系统设计,必须遵循光学系统设计的两个重要原则,即光瞳转接原则和物像空间不变式(拉格朗日-亥姆霍兹不变式)。如果系统中元器件的参量不能满足要求,可在元器件间增加光束变换部件以满足系统性能的要求。

由于测量系统动态范围大($-50 \sim 0.5\ \text{dB}$)、精度高,采用锁相放大器(灵敏度 $3\ \mu\text{V} \sim 1\ \text{V}$,动态储备值 $60 \sim 100\ \text{dB}$)对探测器的信号进行处理,因此输入探测的光应为调制光。采用脉冲光源,重复频率 $10\ \text{kHz}$,波长 $1064\ \text{nm}$,平均功率 $2.5\ \text{W}$,脉冲宽度 $5\ \text{ns}$,功率稳定性为 $0.05\ \text{dB/h}$,光纤输出为 $600\ \mu\text{m}/0.22$ 。

图 4 中 D_3 进行回波损耗测量。为消除被测双包层光纤内包层中的传输模,采用折射率匹配液法

光纤包层模滤除器,在系统中的相应位置安置。

对于此光路中光传播的效率,考虑芯径的匹配,通过拉赫不变量进行估算,同时考虑掩模器和滤波器的损耗以及各种光学器件的损耗。对于 2.5 W 光功率输入,雪崩二极管探测,一个灵敏度为一 30 dBm 的探测器,由传输效率分析的计算,可得最后可分辨的回波损耗至少可达 35 dBm。

改变被测光纤类型,需要改变的是耦合器后光学注入系统的设计,而原理性设计一致。对于其他工作波长光(如 975 nm 抽运光)传播的插入损耗和回波损耗,由于在系统所用光纤的截至波长内可以重复测量,但需对光源进行改变,同时系统重新校准。

4 结 论

比较三种标准测量方法,设计采用了双光路系统。在提高了精度和重复性的同时,在同一个系统中得到插入损耗和回波损耗在高功率密度下运转光纤性能的测量方法和测量公式。实验系统通过各项定标和折射率匹配滤波提高系统光路的信号光稳定性,对系统的精度和可靠性有大幅提高,使得插入损耗测量精度控制于 0.5 dB,回波损耗测量精度控制于一 35 dBm。

参 考 文 献

1 Li Chen, Yan Ping, Chen Gang *et al.*. Using China-made Yb-

doped double-clad fiber for fiber laser output power breakthrough 700 W[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 738

- 李 晨,闫 平,陈 刚 等. 采用国产掺镱双包层光纤的光纤激光器连续输出功率突破 700 W[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 738
- 2 Lou Qihong, Zhou Jun, Zhu Jianqiang *et al.*. Recent progress of high-power fiber lasers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(2): 135~138
- 楼祺洪,周 军,朱健强 等. 高功率光纤激光器研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(2): 135~138
- 3 Y. Jeong, J. K. Sabu, D. N. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25): 6088~6092
- 4 Yang Chun, Wang Yong, Xu Changqing. Separate detection of degenerated mode group of multimode fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1459~1463
- 杨 春,王 勇,徐长青. 多模光纤中简并模式群的分别探测[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10): 1459~1463
- 5 Zhang Na, Feng Xia. Using of fiber optical sensor to measure liquid parameters[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 67~71
- 张 娜,冯 霞. 光纤传感器在液体参量测量中的应用[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 67~71
- 6 Liu Yexin, Yang Xiaoyun, Chen Xueqin *et al.*. Multimode fiber bending loss analysis [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2002, **41**(5): 25~27
- 刘叶新,杨晓云,陈学琴 等. 多模光纤弯曲损耗的分析[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2002, **41**(5): 25~27
- 7 Rabah Attia, Jacques Marcou. Mode scrambler for polymer optical fibers[J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(1): 299~303
- 8 Liu Qiang, Duan Jinghan, Mao Yong. A new method of precise measurement of optical fiber attenuation[J]. *Study on Optical Communications*, 2000, (5): 59~62
- 刘 强,段景汉,冒 勇. 一种新的精确测试光纤衰减方法的探讨[J]. *光通信研究*, 2000, (5): 59~62
- 9 Peng Shiyu, Yuan Xiuhua, Liu Jing. Design of highly precise measurement system of optical fiber attenuation coefficient[J]. *Physics Experimentation*, 2002, **22**(6): 13~15
- 彭仕玉,元秀华,刘 靖. 高精度的光纤衰减系数测试系统的设计[J]. *物理实验*, 2002, **22**(6): 13~15