

光纤包层中的弱光探测技术

慕 伟,徐呈霖,司 旭,马云亮,林亚俊,肖 春

(中国电子科技集团公司第二十三研究所,上海 201900)

摘 要:设计了一种用于探测光纤激光器系统中有源光纤中残余的弱泵浦光的方法。采用两种光纤探针对剥离涂覆层的有源光纤以及保留涂覆层的光纤进行了包层泄漏光的测试,优选出锥形探针作为弱光探测的光纤探针,并用该探针测得泄漏光与包层残余泵浦光的功率关系,发现二者呈线性关系并有对应的比例系数。通过该光纤探针的方法可实现快速确定有源光纤在激光器中的使用最佳长度,避免传统方法中对有源光纤进行多次切割、熔接再测试等操作,极大地提高了测试效率并降低了测试成本。试验同时发现,光纤探针在剥离涂覆层光纤上的探测效果优于未剥离涂覆层的光纤探测效果。

关键词:弱光探测; 光纤激光器; 有源光纤; 包层泵浦光

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0422002

Low light detection technique in cladding of optic fiber

Mu Wei, Xu Chenglin, Si Xu, Ma Yunliang, Lin Yajun, Xiao Chun

(No.23 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shanghai 201900, China)

Abstract: Technique of residual cladding pump light detection in active fiber was researched, which was used in assembling the fiber laser system. With this technology, a fiber probe was used to detect the pump light leaking from the cladding with fiber's coating on and stripping. It's found that there was a linear relationship between leaking light power and pump light power, and the proportionality factor was measured. Therefore, it does not need to cut and fuse the active fiber for many times to get the best length of active fiber, and it can save the measuring period and experiment expense a lot. Two types of fiber probes were used, one was taper fiber probe and the other was ramp plane fiber probe. The testing results of low light using these two fiber probes were given, and it's found that taper fiber probe is better than ramp plane fiber probe. In order to check the accuracy of fiber probe, a laser test has been done. By testing the power change before and after cutting off optic fiber, and by testing the power via fiber probe at the same position as the cut off point, it proves that fiber probe can well predict the residual pump light.

Key words: low light detection; fiber laser; active fiber; cladding pump

收稿日期:2015-08-11; 修订日期:2015-09-13

基金项目:国家重大仪器专项资助项目(2012YQ150213-5)

作者简介:慕伟(1970-),女,研究员,主要从事高功率光纤器件与光传输方面的研究。Email:2854913272@qq.com

0 引言

光纤激光器具有转换率高、光束质量好等优点。近年来,随着单纤输出功率从百瓦级向万瓦级的不断提高,高功率光纤激光器的应用前景愈发广泛,在光通信、军工、制造业、材料加工及航天等领域得到迅速的发展,有逐步替代现有传统高功率激光器的趋势^[1-4]。

双包层有源光纤是光纤激光器的增益介质,包层中的高能泵浦光在穿过纤芯时被稀土离子吸收形成粒子数反转,随后发生的受激辐射产生激光^[5-6]。此时产生的激光绝大多数比例在纤芯内,由于纤芯的数值孔径较低,通常为 0.06~0.07,因此纤芯输出的激光具有极好的方向性,光束质量也比较高,可以实现高质量的激光焊接、切割、打孔、雕刻甚至是目标打击。相对而言,包层中的泵浦光由于包层数值孔径大而变得发散角大、光束质量差,如果从光纤输出后并不能达到有效利用的作用,因此应尽量将泵浦光在包层中耗尽,即最大程度地转换为纤芯中的激光。一般来说,对于特定的有源光纤而言泵浦光在包层中随着传输距离的增加而逐渐耗尽。但泵浦光的消耗量并非与传输长度成正比,这就意味着无法简单依靠泵浦光吸收系数与光纤长度的乘积来推算泵浦光的残留量。因此在构建光纤激光器时,重要的一个环节就是确定双包层有源光纤的最佳使用长度^[7]。如果光纤的长度过短,将导致大量泵浦光未被吸收,不仅降低了泵浦光的使用率,还易造成因泵浦发生意外泄露而导致光纤烧毁。如果光纤长度过长,那么一方面易造成非线性效应变得明显,同时过长的光纤由于其自身的纤芯本底损耗使得纤芯的激光输出功率被再吸收从而降低激光器的出光功率与效率。为筛选合适的光纤长度,通常是开始使用较长的有源光纤,通过测试光纤输出光谱来判断是否有残留的泵浦光,如果基本探测不到残余泵浦光就减短光纤的使用长度后再次测量是否有泵浦光残余,直到残余泵浦光超出容忍值。这种方法耗时长、成本高,如果有源光纤两侧含有其他器件,则每测量一次几乎都需要重新搭建光路,严重影响了光纤长度选择的效率。

文中介绍了一种无损的弱光探测技术,可以在不截断光纤的情况下判断出光纤不同长度位置处对应的包层中残留的泵浦光的大小,从而选择合适的

光纤使用长度,达到高效、低成本的研制目的。

1 试验方案

自行设计并制作了两种不同的光纤探针,一种为锥形光纤探针,另一种为斜面光纤探针。拟通过试验测试两种光纤探针在双包层有源光纤表面收集残余泵浦光的能力。为了确定测试收集到的泵浦光功率所对应的光纤同一位置的包层中泵浦光功率,拟通过调节注入光功率,测试光纤探针收集光功率及对应的泵浦光输出功率,从而确定二者的线性度以及比例系数。最后通过试验该方法选择的光纤使用长度的合理性。

1.1 光纤探针的制作

为达到从双包层光纤内包层收集泵浦光的目的,光纤探针必须具有比光纤内包层相同或更高的折射率,破坏光的全反射条件,使泵浦光穿过光纤内包层,进入光纤探针,如图 1 所示。图中 n_1 为光纤的纤芯折射率, n_2 为石英包层和石英光纤探针的折射率。基于倏逝波原理^[8],当石英包层与石英光纤探针的间距足够小的情况下,包层中的泵浦光可以穿过这一微小间隙进入光纤探针中。

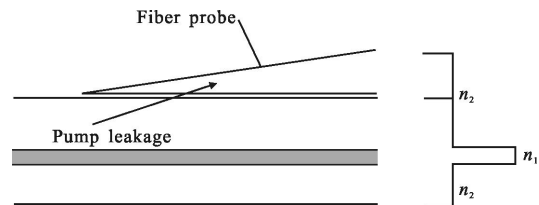


图 1 弱光探示意图

Fig.1 Sketch of weak light detection

试验使用了大芯径光纤(纤芯直径 200 μm 、包层直径 220 μm 、NA=0.22)作为光纤探针原材料,使用氢氧火焰拉锥、侧面研磨两种方法制作了不同形状的光纤探针,表 1 介绍了两种光纤探针的具体参数。

表 1 探针的制作参数

Tab.1 Parameters of fabrication of probes

Taper method	Grinding method
Cone tip angle: 1°, 2°	Grinding angles: 10°, 20°
Length of taper: 2 cm	Lapping quality: 0.5 μm abrasive particles polishing

1.2 弱光定点探测装置

试验光路基本沿用了常用的有源光纤吸收系数测试方案(如图 2 所示),将几个多模泵浦激光器用合束器注入至双包层有源光纤内,有源光纤做一定的绕模处理,在有源光纤输出端,使用功率计采集光纤的输出光功率 P_{out} ,并使用包层模式滤除器,测量光纤的纤芯输出功率 P_{core} 。通过公式(1)测量内包层中传输的泵浦功率。

$$P_{clad}=(P_{out}-P_{core}) \quad (1)$$

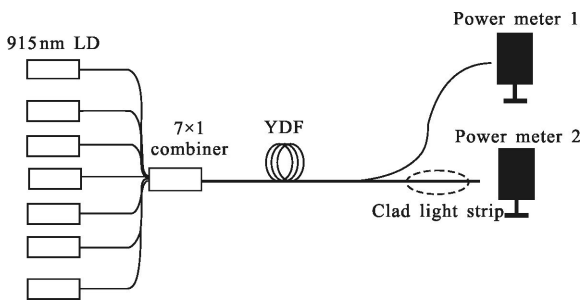


图 2 弱光定点探测试验装置图

Fig.2 Sketch of weak light detection at fixed position

另一方面,将双包层光纤的涂覆层剥除一段长度,并通过将光纤探针贴附在双包层光纤上的八面体内包层表面的方法,使部分泵浦光进入光纤探针并输出至激光功率计,得到光纤探针收集到的包层光功率 P_{prob} ,由于该功率较小,可以通过公式(2)得到光纤探针收集泵浦光的比例系数 K 。

$$K=P_{prob}/P_{clad} \quad (2)$$

两种探针与有源光纤相接触的效果图如图 3 所

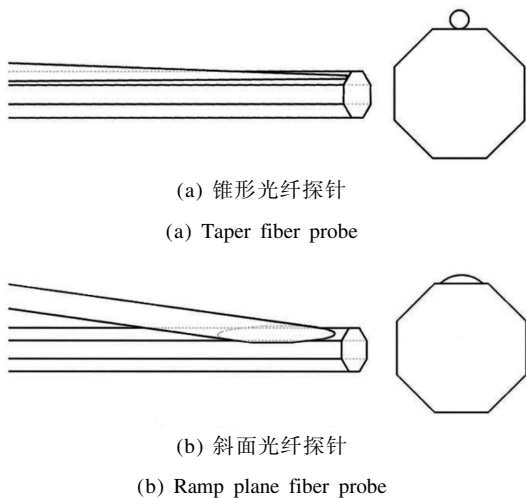


图 3 两种形状的探针

Fig.3 Two types of fiber probes

示。图中 3(a)为圆锥形的光纤探针与八面体石英内包层相接触,接触界面为线接触;图中 3(b)为斜面光纤探针与八面体石英包层的接触情况,系面接触。

2 参数测试

2.1 光纤探针的测试

将泵浦模块电流调节至 0.3 A,此时对应的总泵浦注入功率为 2 W,经过双包层有源光纤的吸收,内包层剩余泵浦光为 1.01 W。试验选取了拉锥法制作的 1° 、 2° 角光纤探针分别进行了测试,同时使用研磨法制作的 10° 、 20° 光纤探针进行测试,分别将四种光纤探针以同样方式贴合在有源光纤的侧面进行功率探测。表 2 显示了不同光纤探针所探测的光功率,数据均为 5 次测量读数的平均值。

表 2 不同探针收集功率能力比较

Tab.2 Comparison of different probes' light power collection

Type of the probe	Power/ μ W
1° tapered	89.7
2° tapered	111
10° bevel	91.8
20° bevel	63.1

通过试验发现,锥形光纤探针和斜面光纤探针均有探测包层光功率的能力, 2° 锥形探针探测到的光功率最大,对应比例系数 $K=0.000112$ 。在实际使用中,斜面光纤探针理想贴合的重复性较差,而锥形光纤探针的使用较为简便,且重复性较高。

2.2 探针输出功率与残余泵浦功率的关系

为确保光纤探针的比例系数 K 有普适性,选取了熔融拉锥制成的 2° 光纤探针进行功率探测的线性度测试。试验过程中持续改变泵浦注入功率,测试残余泵浦光的功率以及光纤探针收集的功率。图 4 为光纤探针的收集功率随残余泵浦功率的变化图,可以看出光纤探针获取的泵浦功率与泵浦残余功率呈较好的线性关系。

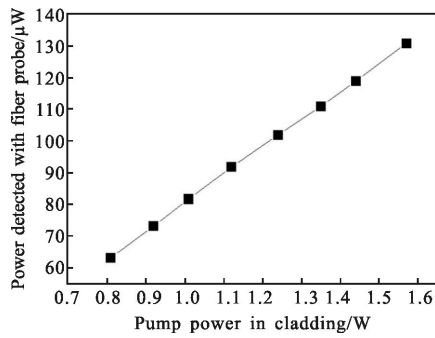


图 4 剥离涂覆层后探测光强与包层泵浦光强度的关系

Fig.4 Relationship between detected power and pump power in cladding when detected without coatings

此外，试验还测试了光纤探针紧贴在涂覆层外侧探测残余泵浦光的能力，即在不剥除涂覆层的状态下，使用光纤探针探测泵浦残余光。试验结果如图 5 所示。

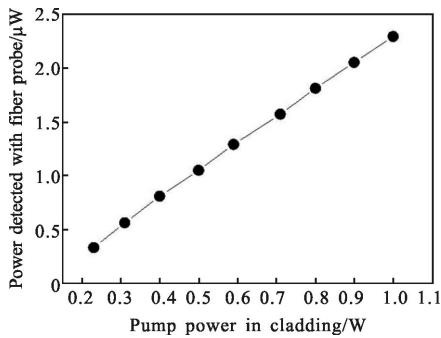


图 5 带涂覆层时探测光强与包层泵浦光强度的关系

Fig.5 Relationship between detected power and pump power in cladding when detected with coatings

数据显示，光纤探针能够收集到从涂覆层向外泄露的泵浦光功率，并呈现一定的线性度，后续的试验结果显示：由于光纤涂覆层的不均匀性等问题，不同位置泄露的泵浦光功率比例系数 K 差异较大。

3 光纤激光器长度筛选测试

为验证光纤探针的实际使用效果，对大长度的有源光纤进行长度筛选试验，使用的泵浦光源为 915 nm 波长的泵浦源，光纤为 10/130 μm 掺镱双包层有源光纤。在有源光纤的输出端使用漫反射板，将部分激光导入光谱仪测试激光光谱。试验光路如图 6 所示。在测试了 A 长度的有源光纤输出光谱及探针探测值后，将有源光纤截短 8 m，并再次测试 B 长度

下的光谱及探针探测值。

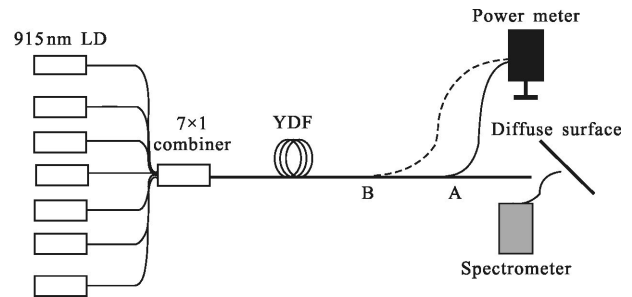


图 6 光谱测试示意图

Fig.6 Sketch of spectrum measurement

图 7 给出的是两种有源光纤长度下(长度差为 8 m)的输出光谱，分别为 A 线和 B 线，对应探针探测的功率值见表 3。

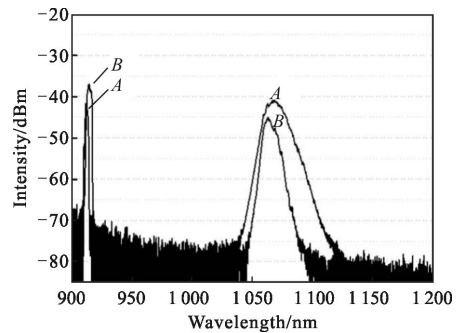


图 7 有源光纤在 A 与 B 两种长度下的输出光谱比较

Fig.7 Comparison of the spectrum of the active fiber with length of A and B

表 3 探针实际探测值

Tab.3 Test value of probe

Fiber length	Probe value/μW
A	155
B	517

光谱仪显示，两个状态下 915 nm 波长的泵浦残余光相差为 4.9 dB，用探针探测之推算残余的泵浦光功率约为 4.62 W 和 1.38 W，两者相差约 3.34 倍，合 5.2 dB，与 4.9 dB 十分接近，可见利用光纤探针辅助筛选光纤长度的方法是准确可靠的。

4 结论

设计并制作了两种光纤探针用于探测双包层有源光纤中内包层中是否存在未被吸收的残余泵浦

光。试验证明,锥形光纤探针的探测重复性较好,且探测功率与包层泵浦功率呈较好的线性关系,比例系数 $K=0.000112$ 。该方法可以用于推算有源光纤的吸收系数,并可大幅提高选择有源光纤最佳使用长度的试验效率和经济性。在后续试验中,将进一步研究光纤探针的高精度贴合方法,提高重复性,并在不破坏有源光纤涂覆层的情况下精确探测包层残余泵浦光。

参考文献:

- [1] Doruk Engin, Ibraheem Darab, John Burton, et al. Highly efficient, high energy pulse-burst Yb-doped fiber laser with transform limited linewidth [C]//SPIE-Laser Technology for Defense and Security, 2014, 9081: 908112.1-10.
- [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. (in Chinese)
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] Wu Juan, Li Tenglong, Wang Yanshan, et al. Fabrication and research of high power and less-loss fiber combiner[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 1015-1019. (in Chinese)
吴娟, 李腾龙, 王岩山, 等. 高功率、低损耗光纤合束器的制备与研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 1015-1019.
- [4] Bai Xiaolei, Sheng Quan, Zhang Haiwei, et al. High-power all-fiber single-frequency erbium-ytterbium co-doped fiber master oscillator power amplifier [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(6): 7103106.
- [5] Wang Zhen, Zhan Huan, Ni Li, et al. Research progress of chelate precursor doping method to fabricate Yb-doped large-mode-area silica fibers for kW-level laser [J]. *Laser Physics*, 2015, 25(11): 115103.1-6.
- [6] Zhao Hong, Zhou Shouhuan, Zhu Chen, et al. High power fiber laser output power more than 1.2 kW [J]. *Laser and Infrared*, 2006, 36(10): 930-930. (in Chinese)
赵鸿, 周寿桓, 朱辰, 等. 大功率光纤激光器输出功率超过 1.2 kW[J]. 激光与红外, 2006, 36(10): 930-930.
- [7] Jin Liang, Xu Li, Zhang He, et al. Fiber bending impacts on beam quality of Yb-doped fiber laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 3565-3569. (in Chinese)
金亮, 徐莉, 张贺, 等. 光纤弯曲对掺镱光纤激光器光束质量的影响[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 3565-3569.
- [8] Li Lin, Xiao Xun. Research of evanescent wave in light's total emission [J]. *Journal of Wuhan University of Science and Engineering*, 2006, 19(12): 37-39. (in Chinese)
李林, 肖循. 光的全反射中倏逝波的研究 [J]. 武汉科技学院学报, 2006, 19(12): 37-39.