

980/1550 保偏光纤波分复用器

胡正良*, 胡永明, 罗洪, 王文旺

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要:从耦合模理论出发,分析了980/1550熔融拉锥(FBT)型保偏光纤(PMF)波分复用器(WDM)的工作原理,设计了WDM的制作方法。在FBT台上,通过控制火焰的温度和宽度以及拉伸速度,有效控制WDM的拉伸长度和耦合区结构,用1550 nm的PMF和H11060单模光纤(SMF)成功研制了高性能的980/1550 PMF WDM。测试结果表明:在1550 nm波长上,该WDM具有0.2 dB的插入损耗、32 dB的隔离度和22.8 dB的消光比偏振特性;在980 nm波长上,具有0.2 dB的插入损耗、14.8 dB的隔离度。该器件除了具有SMF WDM的特性外,1550 nm端口还具有偏振保持特性,它将促进PMF激光器和放大器快速发展。

关键词:光纤光学;波分复用器(WDM);保偏光纤(PMF);熔融拉锥(FBT);光纤激光器和放大器

中图分类号:TN929.11 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0086(2005)12-1437-04

980/1550 Polarization Maintain Fiber Wavelength Division Multiplexer

HU Zheng-liang*, HU Yong-ming, LUO Hong, WANG Wen-wang

(College of Optoelectronics Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The principle of 980/1550 fused biconical taper (FBT) polarization maintain fiber (PMF) wavelength division multiplexer (WDM) is analyzed with coupling mode theory; and the method the device is presented. The length and structure of coupling region are effectively controlled by controlling the temperature and size of flame and stretching speed, so the high performance 980/1550 PMF WDM is successfully manufactured with a 1550 nm PMF and a H11060 single mode fiber (SMF). The measurement results show that the WDM has insert loss of less than 0.2 dB, isolation of 32 dB and polarization maintain characteristic of 22.8 dB at 1550 nm; and it has insert loss of 0.2 dB and isolation of 14.8 dB at 980 nm. The PMF WDM has the characteristic of polarization maintain at 1550 nm compared with SMF WDM, and it will accelerate the development of the PMF laser and amplifier.

Key words: optical fiber; wavelength division multiplexer (WDM); polarization maintaining fiber (PMF); fused biconical taper (FBT); fiber laser and amplifier

1 引言

980/1550 nm波分复用器(WDM)是掺铒光纤激光器和放大器中的关键器件。目前,980/1550 nm WDM大都采用单模光纤(SMF)并用缠绕式熔锥拉锥(FBT)方法制成的^[1,2]。随着光纤通讯和传感技术

的发展以及保偏光纤(PMF)、PMF环形器和隔离器的成功研制,越来越多的系统利用PMF和保偏器件来保证系统中光传输的偏振特性^[3]。为了实现光纤激光器和放大器的偏振稳定输出,WDM作为系统中的传输器件,必须在1550 nm端口具有高性能的偏振保持特性^[4];又由于FBT型的耦合器具有低损耗、

收稿日期:2005-04-13

* E-mail: zheng-liang-hu@163.com

温度稳定性好、结构坚固和制作工艺简单等特点^[5],因此 FBT 型 980/1550 PMF WDM 成为 PMF 激光器和放大器的发展所需。

本文在 SMF WDM 的基础上,成功研制了由 HI1060 SMT 和 1550 nm 匹配型 PMF 平行 FBT 而成的 980/1550 PMF WDM。该 PMF WDM 基本满足 PMF 激光器和放大器系统中 1550 nm 波长端口低插入损耗、高隔离度和高消光比的性能要求,同时 980 nm 波长的 HI1060 SMF 与泵浦光源输出光纤相匹配。

2 原理

由于 980 nm 泵浦光源大都是非偏振光,为了匹配光源的输出光纤,980 nm 端口采用 HI1060 SMF,而在 1550 nm 端口采用横向容易耦合匹配型 PMF。为了防止 PMF 的应力区对光纤间的能量耦合产生影响,在 2 根光纤 FBT 前调整 PMF 的快轴与两光纤的纤芯连线一致,它的截面和剖面结构如图 1 所示。激光束在直径由大至小的光纤锥体传播,纤芯导模的模场半径由小变大。当纤芯归一化频率降至一定程度时,纤芯对导模传输的约束作用大大下降,此时开始,光场的能量有很大的一部分在包层中传输,它与空气或者其它折射率较原光纤包层折射率低的介质形成不规则波导。波导直径变化时,各模式间发生耦合。并在第 2 个锥体处根据耦合系数和耦合长度分配光功率并耦合到输出端的 2 根纤芯中,同时高阶模的光辐射出去成为器件的附加损耗。

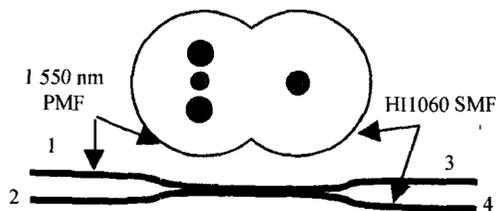


图 1 PMF WDM 的结构图

Fig. 1 Schematics of PMF WDM

考虑只有 1 个端口有输入光 P_1 的情况下,根据耦合模理论^[6,7]可得出输出端 3 和 4 的输出光强为

$$\begin{cases} P_3 = P_1 \sin^2(C(l)L(l)) \\ P_4 = P_1 \cos^2(C(l)L(l)) \end{cases} \quad (1)$$

式中: l 是拉伸长度; $C(l)$ 为耦合系数; $L(l)$ 是耦合长度。 $C(l)$ 、 $L(l)$ 是 l 的函数,随着 l 的增加, $L(l)$ 增加, $C(l)$ 增大。对耦合区作纵向平行、横向矩形的近似后, $C(l)$ 为

$$C(l) = \frac{3\pi\lambda}{32n_2a^2} \frac{1}{1+1/V} \quad (2)$$

式中: V 为光纤的归一化截至频率,有

$$V = 2\pi/\lambda a(l)(n_2^2 - n_0^2)^{1/2} \quad (3)$$

它是波长的函数; λ 是传输光的波长; n_2 是光纤包层的折射率; n_0 是光纤周围介质(空气)的折射率; $a(l)$ 是光纤的半径,有

$$a(l) = a_0 \exp(-l/2b) \quad (4)$$

$$L(l) = \begin{cases} 0 & l + 2b \ln(0.41) < 0 \\ b + l + 2b \ln(0.41) & l + 2b \ln(0.41) > 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, a_0 是光纤的初始半径; b 是火焰宽度。耦合区的耦合结构和 $L(l)$ 由拉锥光焰的温度 t 和宽度 b 确定。从式(2)可以看出, $C(l)$ 是 λ 和 l 的函数,不同 λ 的激光在耦合器中传输时,耦合器将表现出不同的输出特性。因此,通过调整火焰的 t 和 b ,改变耦合区的结构,使得耦合器的波长相关性具有:在端口 1 注入 λ_1 的激光时,耦合器的分束比为 0%,能量全部从端口 3 输出;而注入 λ_2 的激光时,耦合器的分束比为 100%,能量全部从端口 4 输出。这就是器件的波分解复用特性。根据耦合器的互易特性,如果 λ_1 和 λ_2 的光分别从端口 1 和 2 注入时,2 种波长的光将都从端口 3 输出,从而实现了器件的波分复用功能^[8]。图 2 是取 $b=12$ mm 得出的 980 nm 和 1550 nm 波长注入时耦合器 3 端口输出光随拉伸长度的曲线。

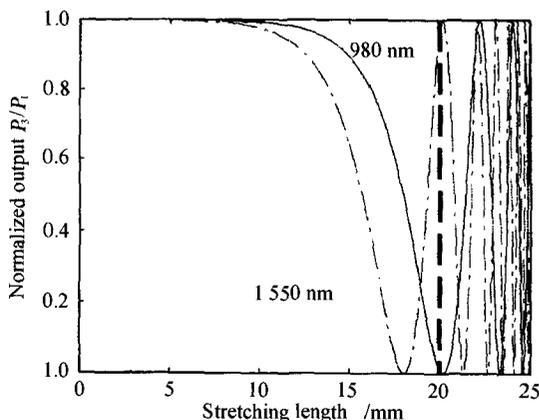


图 2 耦合输出跟波长的关系

Fig. 2 The relation between coupling output and laser wavelength

由于 980 nm 和 1550 nm 的间隔较大,它们的耦合系数差别也较大,因此更容易实现耦合器的波分复用。适当选取火焰的 t 和 b 以及拉伸速度,FBT 获得一定的耦合结构和 l ,随着 l 的增加,器件在不同 λ 的耦合过程表现不同的特性。从图可以看出,随着 l 的增加,1550 nm 的光在光纤之间发生能量的耦合,当光能量经过交换重新耦合回 PMF 时,980 nm 的光几

乎全部耦合进 SMF 中,具有该种特性的器件就可作为 980/1550 WDM。

3 WDM 的制造

如图 3 示,采用截止波长为 1455.1 nm 的匹配型 PMF 和截止波长为 980 nm 的 HI1060 SMF,把 2 根光纤分别剥去 25 mm 的一次涂覆层并作清洁处理,平行置于 FBT 台^[9]的真空吸附槽中,调整 PMF 的快轴与两纤芯的连线垂直,并用精密夹具把 2 根光纤靠拢接触。在 PMF 和 SMF 输入端分别注入 1550 nm 的线偏振光和 980 nm 激光,对耦合器的 FBT PMF 过程进行监控。为了实现对拉制过程的双波长监控,用计算机对 2 个激光器进行间隔开关调制,并用探测器间隔测量 2 个不同波长下耦合器的输出光强。光纤的拉伸和火焰的移动通过步进电机由计算机控制。随着耦合区的加热、熔融及拉伸,输入激光将在两光纤间来回耦合,输出光也随拉伸长度 l 发生变化,达到指定的分光比后计算机控制步进电机停止拉锥,同时退出火焰头。火焰的温度 t 和宽度 b 通过调整 H_2 和 O_2 的流量、火焰头的位置来控制。

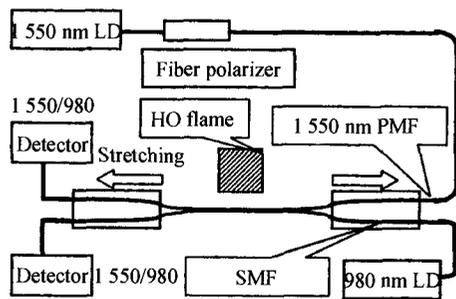


图 3 WDM 拉锥示意图
Fig. 3 Schematic of tapering WDM

图 4 为耦合器 3 端口的输出光功率随拉伸长度变化的曲线。从图可以看出,1550 nm 的激光在完成能量的 1 次交换后重新耦合回 PMF 中时,980 nm 的激光恰好完成能量的第 1 次完全交换,几乎全部耦合进 PMF 中。在此时停止拉锥,器件的特性正好满足波分复用的 1550 nm 的分束比为 100% 以及 980 nm 的分束比为 0% 的特性。如果该器件不能达到很好的波分复用性能,还可以强紫外光照射,改变光纤的折射率,适当调整器件的波分复用特性^[10]。

WDM FBT 完成后,用玻璃槽对耦合区进行封装,然后用不锈钢管外封装成 980/1550 PMF WDM,并放入高低温箱中进行老化。

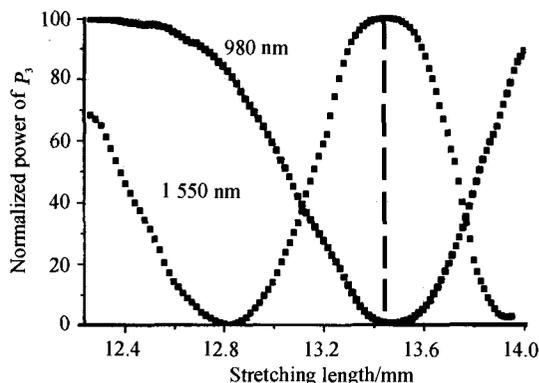


图 4 当波长为 980 nm 和 1550 nm 时, P_3 的归一化输出功率和拉伸长度的关系

Fig. 4 Normalized power of P_3 vs. stretching length when $\lambda=980$ nm and 1550 nm

4 性能检测

由于 WDM 涉及到 2 个波长,因此需对 980 nm 和 1550 nm 分别进行性能测试,其性能参数主要有插入损耗 IL 隔离度 $Isolation$ 以及回波损耗 RL 等。以 1550 nm 波长为例,各参数分别为

$$IL = 10 \log \frac{P_3}{P_{in}}, Isolation = 10 \log \frac{P_3}{P_4}, RL = 10 \log \frac{P_2}{P_{in}} \quad (6)$$

式中: P_{in} 是注入光的光强; P_2 、 P_3 和 P_4 分别为各端口的输出光强值。

WDM 的测试框图如图 5 所示。LD 输出 1550 nm 的激光,经光纤起偏器起偏后变为线偏振光,然后沿 PMF 快轴注入 WDM 的 1550 nm 端口的 PMF 中,测量 1550 nm 输入光的光功率 P_{in} ,同时用光功率计对两输出端口的光功率 P_3 和 P_4 进行测量,并对 2 端口的返回光进行测量。根据式(6)可得出器件在 1550 nm 波长下的传输特性。

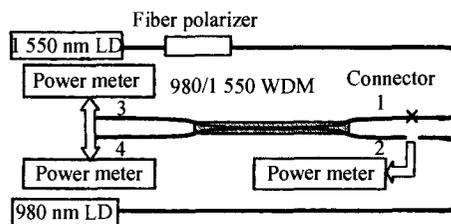


图 5 WDM 测试系统图
Fig. 5 Measurement system of WDM

对于 PMF WDM,最重要的一个特性是偏振特性,该特性用消光比(ER)来衡量。ER 是线偏振光通

过器件输出的退偏程度,有

$$ER = 10 \log \frac{P_{\min}}{P_{\max}} \quad (7)$$

式中, P_{\min} 、 P_{\max} 有偏振棱镜检偏后的输出光最小值和最大值。实验用 ER 为 30 dB 光纤起偏器对激光起偏成近似线偏振光, 在输出端用消光比偏振测试仪测得器件消光比值。

同样, 在 HI1060 SMF 输入端口注入 980 nm 的激光, 测量各端口的光强就可获得 WDM 在 980 nm 的波长上的特性。用偏振控制器调整 980 nm 注入光的偏振态, 测量不同偏振态下的损耗, 可得器件的偏振相关损耗(PDL)。WDM 指标特性见表 1。

表 1 WDM 指标特性
Tab. 1 Characteristic of WDM Unit: dB

Wavelength/nm	Isolation	IL	RL	ER	PDL
980	14.8	0.2	42		0.02
1550	32	0.2	54	22.8	

采用 FBT 法制作的 PMF WDM 的性能与 FBT 的 SMF WDM^[1] 相差不多, 980 nm 波长上有较大的插入损耗和较小的隔离度, 但它仅会降低泵浦功率, 不会影响系统输出特性。1550 nm 端口的保偏光纤使得 WDM 具有偏振保持特性, 它与其它 PMF 器件一起组成全保偏的光纤激光器和放大器, 有效地保证系统的偏振稳定性。

5 结 论

用 HI1060 的 SMF 和 1550 nm 的匹配 PMF 平行 FBT, 成功地研制出 PMF WDM, 在 1550 nm 波长上具有 0.2 dB 插入损耗、32 dB 的隔离度、22.8 dB 的消光比, 它保证了全保偏光纤系统的偏振特性和低损耗; 在 980 nm 波长上具有 0.2 dB 的插入损耗, 14.8 dB 的隔离度。PMF WDM 的研制成功解决了 PMF 激光器和放大器的偏振稳定问题, 对光纤激光器和放大器的发展起着至关重要的作用。

参考文献:

- [1] CAO Jie-yuan, YANG Kai-yu. Investigation of multiplexer for pumping and signal in optical fiber amplifier[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University* (上海交通大学学报), 1995, **29**(6): 121-126. (in Chinese)
- [2] Lawson C M, Kopera P M, Hsu T Y, et al. In-line single-mode wavelength division multiplexer/demultiplexer [J]. *Electronics Letters*, 1984, **20**: 963-964.
- [3] LUO Hong, CHEN Ru-hui, XIONG Shui-dong, et al. Research on mandrel interferometric polarization maintaining fiber optic accelerometer [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser* (光电子·激光), 2004, **15**(6): 675-678. (in Chinese)
- [4] Raymond M Sova, Chang-Seok Kim, Jin U Kang. Tunable dual-wavelength All-PM fiber ring laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, **14**(3): 287-289.
- [5] WEI Dao-ping, ZHAO Yu-cheng, PEI Li, et al. Fabrication of fused narrow channel wavelength division multiplexing fiber couplers [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser* (光电子·激光), 1999, **10**(6): 528-530. (in Chinese)
- [6] LIAO Yan-biao. *Fibre Optics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. (in Chinese)
- [7] Snyder A W. Coupled mode theory for optical fibers [J]. *J Opt Soc Am*, 1972, **62**(11): 1267-1277.
- [8] Sudeora S, Kopera P M. Design criteria for 1310/1480/1550 WDM for hybrid optical-electrical amplification system [A]. *SPIE* [C]. 1991, **1580**: 216-223.
- [9] CAI Jie-yuan, SHAO Qiang, XU Ying. An equipment for manufacturing optical fiber couplers [J]. *Study of Optical Communication*. (光通讯研究), 1994, **72**: 50-54. (in Chinese)
- [10] Ashby S J, Charters R B, Love J D, et al. Large wavelength shifts in UV-exposed 3 dB and WDM fused taper fibre coupler [J]. *Electronics Letters*, 1997, **33**(20): 1696-1670.

作者简介:

胡正良 (1976—), 男, 湖南长沙人, 博士研究生, 主要从事光纤元器件、光纤传感技术的研究。