

可调谐多波长自激布里渊掺铒光纤激光器

邹辉, 熊慧, 郑亚如

南京邮电大学光电工程学院, 江苏 南京 210046

摘要 利用光纤扩径腰锥熔接技术, 分别对长为 4.5 cm 单模光纤的两端进行扩径, 形成了球形-单模-球形结构的新型马赫-曾德尔干涉仪(MZI)。基于 MZI 构造了一种可调谐多波长自激布里渊掺铒光纤激光器。将其置于丙三醇溶液中, 在波长为 980 nm、抽运功率为 200 mW 的情况下, 改变丙三醇质量分数会引起光纤包层外界环境的有效折射率的变化, 从而导致干涉光谱的改变, 实现在 1558.6~1562.8 nm 范围内输出激光波长可调谐, 其调谐范围为 4.2 nm, 得到了波长间隔为 0.088 nm、平均光信噪比大于 15 dB 的 6 个布里渊激光输出。该激光器结构简单、波长间隔稳定, 在密集波分复用、光纤传感等领域的应用前景十分广阔。

关键词 激光器; 多波长; 光纤扩径腰锥; 马赫-曾德尔干涉仪; 自激发

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1001001

Tunable Self-Seeded Multiwavelength Brillouin Erbium-Doped Fiber Laser

Zou Hui, Xiong Hui, Zheng Yaru

*School of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications,
Nanjing, Jiangsu 210046, China*

Abstract Two up-tapers are produced on a single mode fiber with the distance of 4.5 cm by the technology of fiber waist-enlarged fusion, so as to form a new single mode structure fiber with two spherical shapes based on Mach-Zehnder interferometer (MZI). A tunable self-seeded multiwavelength Brillouin erbium-doped fiber laser is designed based on MZI and put in the glycerol solution of different mass fractions. At the wavelength of 980 nm and the pumping power of 200 mW, the multiwavelength of the output laser is tuned from 1558.6 nm to 1562.8 nm, correspondingly to the changes of the effective refractive index of the optical fiber cladding, and the tunable range is about 4.2 nm. The six Brillouin laser wavelengths with the wavelength interval of 0.088 nm and the mean optical signal to noise ratio of more than 15 dB is obtained. The proposed laser has the advantages of simple structure, stable wavelength interval, and has great application prospect in dense wavelength division multiplexing and optical fiber sensing.

Key words lasers; multiwavelength; fiber waist-enlarged; Mach-Zehnder interferometer; self-seeded

OCIS codes 060.4370; 140.3600; 290.5900

1 引言

多波长布里渊激光器因其抽运功率低、效率高与传输光纤兼容性好等优点, 被广泛应用于光通信系统中的微波光子学、精密光谱学、密集波分复用等领域^[1-5]。Cowle 等^[6]早在 1996 年就提出利用布里渊效应来进行多波长光纤激光器的研究。多波长布里渊掺铒激光器(MW-BEFL)结合了掺铒光纤(EDF)的线性增益和受激布里渊散射的非线性增益, 是在室温下产生稳定、间隔固定的多波长输出的有效方法^[7]。可调谐范围和输出波长个数是 MW-BEFL 的两个重要参数^[8]。黄昌清等^[9]提出半开放腔结构的 MW-BEFL, 通过改变布里渊抽运(BP)激光波长实现了 4 个波长激光输出。传统的 MW-BEFL 需要一个窄线宽激光器进行 BP, 但是主要缺点是 EDF 的均匀展宽效应带来的模式竞争限制了其多波长的可调谐范围^[10-12]。近来提出的自激

收稿日期: 2017-04-25; 收到修改稿日期: 2017-05-24

基金项目: 国家自然科学基金(61405096, 61504058)、人才引进研究和南京邮电大学研究基金(NY214158)

作者简介: 邹辉(1983—), 男, 博士, 讲师, 主要从事特种光纤设计与应用方面的研究。E-mail: huizou@njupt.edu.cn

发 MW-BEFL^[13]在不使用外部 BP 源的情况下,以自激发的方式提供更加有效的增益使高阶斯托克斯信号产生更多的布里渊激光输出^[14-15]。Song 等^[16]利用 Sagnac 反射镜的滤波作用和单模光纤(SMF)的动态分布反馈效应,在没有外部 BP 源的情况下,实现了调谐范围为 30 nm 的自激发波长输出。Abd-Rahman 等^[17]提出双凹腔结构的自激发 MW-BEFL,实现了波长间隔为 0.088 nm 的 6 个布里渊输出。但是,上述各种类型的自激发 MW-BEFL 的平均光信噪比(OSNR)均小于 10 dB。

本文利用光纤扩径腰椎马赫-曾德尔干涉仪(MZI)的滤波作用,设计了一种新型自激发可调谐 MW-BEFL。研究了新型 MZI 在不同质量分数的丙三醇溶液环境下,其包层模对外界环境折射率变化的不同敏感度,形成了特征波长的干涉峰漂移,从而实现了输出多波长激光的可调谐。在波长为 980 nm、抽运功率为 200 mW 的情况下,在 1558.6~1562.8 nm 范围内,获得了 6 条波长间隔为 0.088 nm、平均 OSNR 大于 15 dB 的布里渊多波长光谱,可调谐范围为 4.2 nm。

2 基本原理

2.1 扩径腰椎 MZI 原理与结构

在实验中,通过使用熔接机(S178A ,FITEL,日本),利用光纤扩径腰椎熔接技术,分别对长为 4.5 cm 的 SMF 两端进行扩径而形成了球形-单模-球形结构^[18],从而有效地实现纤芯模与包层模的能量转换。图 1 所示为扩径腰椎的结构。

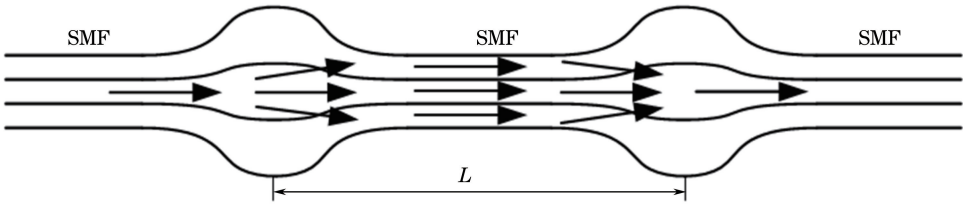


图 1 基于扩径腰椎熔接的 MZI

Fig. 1 MZI based on waist-enlarged fusion

扩径腰椎 MZI 的工作原理是基于模式的激发与耦合,参与干涉的两路光分别是纤芯基模和扩径腰椎激发出来的高阶包层模,干涉信号的光强为^[19]

$$I(\lambda) = I_{co}(\lambda) + I_{cl}(\lambda) + 2\sqrt{I_{co}(\lambda)I_{cl}(\lambda)}\cos(\Delta\phi), \quad (1)$$

式中 λ 为入射光波在真空中的波长, $I_{co}(\lambda)$ 和 $I_{cl}(\lambda)$ 分别表示纤芯模和包层模的光强, $\Delta\phi$ 为两路光信号的相位差,可以进一步表示为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi L}{\lambda}\Delta n_{eff}, \quad (2)$$

式中 L 是如图 1 所示的两扩径腰椎熔接点之间的 SMF 距离,即干涉长度, Δn_{eff} 表示为光纤纤芯模与包层模的有效折射率之差,即 $\Delta n_{eff} = n_{eff}^{co} - n_{eff}^{cl}$, n_{eff}^{co} 和 n_{eff}^{cl} 分别为纤芯模和包层模的有效折射率,产生的干涉谱的强度随着相位差 $\Delta\phi$ 的改变而周期性改变。当相位差满足 $\Delta\phi = (2m + 1)\pi$ 且 m 为整数时,干涉光强最小,透射光谱中干涉谷对应的波长 λ_v 与光程差的关系式为

$$\Delta n_{eff}L = (2m + 1)\lambda_v. \quad (3)$$

当外界环境折射率变化时,因纤芯位于光纤中间,其有效折射率不受影响,而剥掉涂覆层的光纤其包层裸露在外界环境中,因此包层模的有效折射率将会改变,假设改变量为 $\delta(\Delta n_{eff})$ 。因此,纤芯模与包层模的有效折射率差 Δn_{eff} 将改变 $\delta(\Delta n_{eff})$,从而导致干涉谱的漂移。由此得到外界环境折射率改变后的透射光谱中干涉谷波长关系式为

$$[\Delta n_{eff} + \delta(\Delta n_{eff})]L = (2m + 1)(\lambda_v + \Delta\lambda). \quad (4)$$

联立(3)式和(4)式,得到

$$\frac{\Delta\lambda}{\delta(\Delta n_{eff})} = \frac{\lambda_v}{\Delta n_{eff}}, \quad (5)$$

式中 $\Delta\lambda$ 为透射光谱中干涉谷的波长漂移量,外界环境变化导致纤芯模和包层模有效折射率差的变化量为 $\delta(\Delta n_{\text{eff}}) = n_{\text{eff}}^{\text{co}} - (n_{\text{eff}}^{\text{cl}} + \delta n_{\text{eff}}^{\text{cl}}) - (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}}) = -\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl}}$,则扩径腰椎 MZI 的折射率灵敏度表达式为

$$\Delta\lambda = -\frac{\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl}} L}{2m + 1} < 0. \quad (6)$$

根据(6)式,当外界环境折射率增大时,包层模有效折射率的改变量 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl}}$ 随之增大。干涉仪的透射光谱中干涉谷的波长将会向短波长方向不断漂移。

基于此原理,将扩径腰椎 MZI 置于不同折射率(即质量分数)的溶液中,传输谱在波长方向上有一定的漂移,利用此特性可实现激光器输出波长可调谐。用丙三醇和水的不同比例混合液作为标准折射率溶液,实验中配置了 6 份质量分数分别为 5%、10%、20%、30%、40%、50% 的丙三醇溶液,对应折射率分别为 1.339、1.345、1.357、1.371、1.384、1.398。利用图 2 所示装置对制作的扩径腰椎 MZI 进行测试,将光纤传感器拉直并用调节架固定在光学平台上,其一端连接宽带光源(BBS),功率调制在 16.2 dBm,其另一端连接波长分辨率为 0.01 nm 的光谱分析仪(OSA, AQ6375, YOKOGAWA, 日本),用来准确观察并记录干涉谱的透射谱。将 MZI 部分全部浸没在上述不同折射率的丙三醇溶液中,借助 OSA 记录透射光谱的波长变化现象。输出端观测到的透射光谱变化如图 3 所示,可以看出,随着质量分数(即折射率变化)的增加,基于扩径腰椎熔接的 MZI 的透射光谱向短波长方向不断漂移,总的漂移量为 4.2 nm。对不同折射率下的丙三醇溶液中的透射光谱特征波长的实验数据进行线性拟合,如图 4 所示,其波长漂移与折射率的拟合系数为 0.99656,拟合的线性函数为 $y = 1644.497 - 56.06898x$,干涉透射光谱中波谷的特征波长变化与折射率呈较好的线性关系。

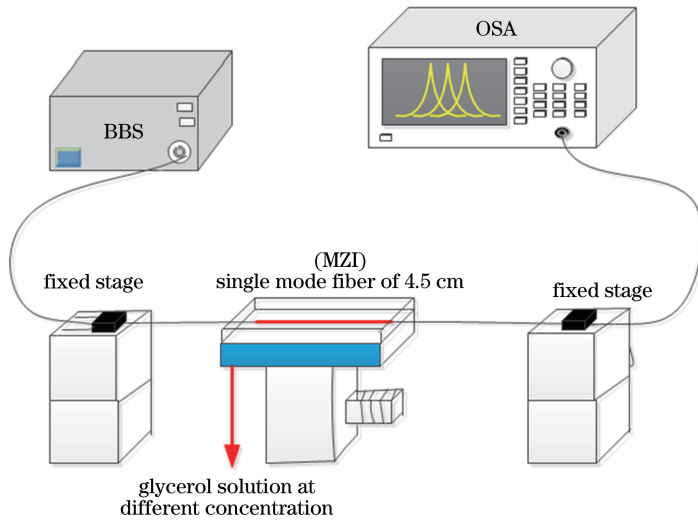


图 2 丙三醇溶液测试实验装置图

Fig. 2 Experimental setup for glycerol solution measurement

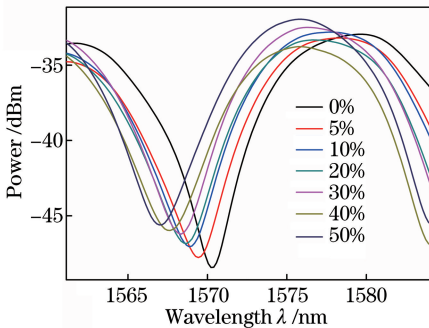


图 3 MZI 在不同质量分数丙三醇溶液中的光谱图

Fig. 3 Spectrogram of MZI under different mass fractions of glycerol solution

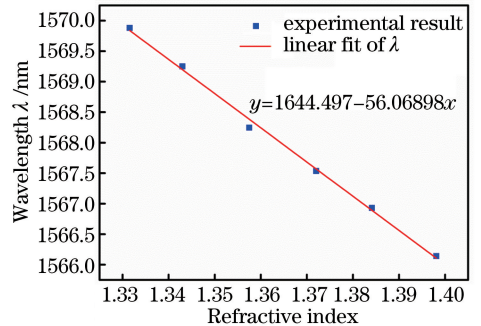


图 4 特征波长干涉谷与折射率的关系

Fig. 4 Relationship between interference dip of characteristic wavelength and refractive index

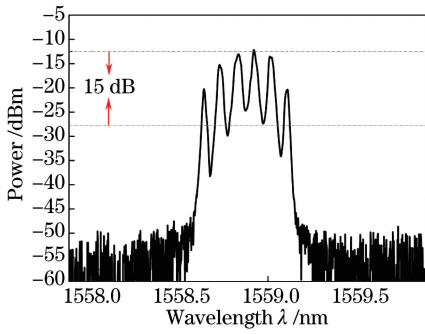


图 6 200 mW 抽运功率下无轴向应变的多波长光谱图
Fig. 6 Multiwavelength spectrogram without axial strain under the pump power of 200 mW

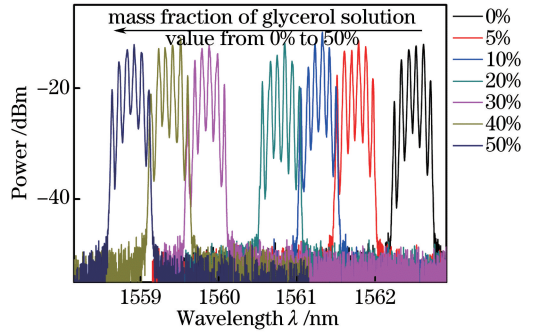


图 7 不同质量分数丙三醇溶液的可调谐范围谱
Fig. 7 Tunable range spectra of glycerol solution under different mass fractions

激光器腔内自激模的影响,增加激光器的可调谐范围及输出波长个数。实验中,将 MZI 置于不同质量分数的丙三醇溶液中,在波长为 980 nm、抽运功率为 200 mW 条件下,获得了波长间隔为 0.088 nm 的 6 个稳定的波长输出,实现可调谐范围为 4.2 nm,平均 OSNR 大于 15 dB。该激光器还可置于应力、温度等其他参数下研究 MZI 干涉谱的漂移对可调谐输出特性的影响,在光纤传感领域具有较好的应用和发展前景。

参 考 文 献

- [1] Miao Xuefeng, Wang Tianshu, Zhou Xuefang, *et al.* A tunable multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0602010.
缪雪峰, 王天枢, 周雪芳, 等. 一种可调谐的多波长布里渊掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0602010.
- [2] Shirazi M R, Shahabuddin N S, Aziz S N, *et al.* A linear cavity Brillouin fiber laser with multiple wavelengths output [J]. Laser Physics Letters, 2008, 5(5): 361-363.
- [3] Shahi S, Harun S W, Ahmad H. Multi-wavelength Brillouin fiber laser using a holey fiber and a bismuth-oxide based erbium-doped fiber[J]. Laser Physics Letters, 2009, 6(6): 454-457.
- [4] Liu Yi, Yu Jinlong, Wang Hongjie, *et al.* Tunable multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser based on feedback fiber loop[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0202003.
刘毅, 于晋龙, 王红杰, 等. 基于反馈光纤环的可调多波长布里渊掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0202003.
- [5] Zhang Peng, Wang Tianshu, Jia Qingsong, *et al.* Tunable microwave signal generation based on a multi-wavelength Brillouin fiber laser in a figure of eight configuration[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1202006.
张鹏, 王天枢, 贾青松, 等. 基于 8 字型结构布里渊多波长光纤激光器的可调谐高频微波产生[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1202006.
- [6] Cowle G J, Stepanov D Y. Multiple wavelength generation with Brillouin/erbium fiber lasers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996, 8(11): 1465-1467.
- [7] Jiao Lei, Song Yuejiang, Zhang Xuping. Four-wave-mixing enhanced multi-wavelength Brillouin erbium-doped fiber laser[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0214007.
焦磊, 宋跃江, 张旭苹. 四波混频增强多波长布里渊掺铒光纤激光器的实验研究[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0214007.
- [8] Shee Y G, Al-Mansoori M H, Ismail A, *et al.* Multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser with double-Brillouin-frequency spacing[J]. Optics Express, 2011, 19(3): 1699-1706.
- [9] Huang Changqing, Liu Mengshi, Che Tengyun, *et al.* A tunable multi-wavelength random fiber laser based on half-open cavity[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(3): 0302001.
黄昌清, 刘梦诗, 车腾云, 等. 基于半开放腔的可调谐多波长随机光纤激光器研究[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0302001.
- [10] Parvizi R, Shahabuddin N S, Ali N M, *et al.* Generation of efficient 20 GHz optical combs in a Brillouin-erbium fiber laser[J]. Laser Physics, 2013, 23(1): 015103.
- [11] Al-Mansoori M H, Abd-Rahman M K, Mahamd Adikan F R, *et al.* Widely tunable linear cavity multiwavelength Brillouin-erbium fiber lasers[J]. Optics Express, 2005, 13(9): 3471-3476.

- [12] Harun S W, Emami S D, Rahman F A, *et al.* Multiwavelength Brillouin/erbium-ytterbium fiber laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2007, 4(8): 601-603.
- [13] Parvizi R, Arof H, Ali N M, *et al.* 0.16 nm spaced multi-wavelength Brillouin fiber laser in a figure-of-eight configuration[J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, 43(4): 866-869.
- [14] Cao Ye, Ji Zhihua, Zhao Junfa, *et al.* Widely tunable multi-wavelength Brillouin fiber laser with double Brillouin frequency spacings[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2013, 24(10): 1868-1872.
曹晔, 冀志华, 赵军发, 等. 宽带可调谐双频移多波长布里渊光纤激光器[J]. *光电子 • 激光*, 2013, 24(10): 1868-1872.
- [15] Yeh C H, Lee C C, Chi S. A tunable S-band erbium-doped fiber ring laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(8): 1053-1054.
- [16] Song Y J, Zhan L, Ji J H, *et al.* Self-seeded multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(5): 486-488.
- [17] Abd-Rahman M K, Nurdik M R, Rahim N S A. Self-seeded multiwavelength dual-cavity Brillouin-erbium fiber laser[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 290-293.
- [18] Tian Z B, Yam S H, Barnes J, *et al.* Refractive index sensing with Mach-Zehnder interferometer based on concatenating two single-mode fiber tapers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(8): 626-628.
- [19] Ji Yushen, Fu Guangwei, Fu Xinghu, *et al.* Sensing characteristics of Mach-Zehnder interferometer based on the fused tapered photonic crystal fiber sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1006005.
纪玉申, 付广伟, 付兴虎, 等. 熔融拉锥型光子晶体光纤马赫-曾德尔干涉仪传感特性[J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1006005.