

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0077-04

基于马赫-曾德尔干涉仪的可调谐多波长锁模 光纤环形激光器

蒲利春¹ 王 飞^{1,2}

(¹ 重庆理工大学光电信息学院, 重庆 400054
² 华中科技大学武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 提出了一种包含两个半导体光放大器(SOA)和一个光纤马赫-曾德尔干涉仪(MZI)的 L 波段可调谐多波长锁模光纤环形激光器。其中一个 SOA 的增益被外部信号光调制充当激光器的主动损耗调制器, 另外一个 SOA 未被外部信号光调制提供腔增益, 光纤 MZI 作为可调谐梳状滤波器使用。利用该激光器可同时产生 12 个信道且每个信道重复频率为 10 Gb/s 的锁模脉冲, 脉冲宽度大约为 30 ps。通过调节光纤 MZI 的温度可以连续地调谐激光器的输出波长, 并且通过调节 SOA 的电流, 还可以实现在较大波长范围内的激射波长自由调谐。输出功率相当稳定, 归功于对 MZI 的温度精密控制和紧凑的环腔结构。

关键词 光通信; 多波长; 锁模光纤激光器; 半导体光放大器; 马赫-曾德尔干涉仪

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201037s1.0077

Tunable Multiwavelength Mode-Locked Fiber Ring Laser Incorporating Mach-Zehnder Interferometer

Pu Lichun¹ Wang Fei^{1,2}

(¹ College of Optoelectronic Information, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China
² Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hebei 430074, China)

Abstract We present a multiwavelength mode-locked fiber ring laser incorporating two semiconductor optical amplifiers (SOAs) and a fiber Mach-Zehnder interferometer (MZI). One SOA is modulated by an injected external optical signal act as loss modulator, another SOA is not modulated by injected signal but services as cavity gain medium, and a fiber MZI functions as a tunable comb filter. Twelve synchronized wavelength channels with each channel of mode-locked at 10 Gb/s and pulse width of about 30 ps are achieved from the presented multiwavelength laser source. Oscillation wavelengths can be smoothly tuned by adjusting temperature of fiber MZI. Also, by adjusting the current of the SOA, oscillation wavelengths can be freely tuned in a large wavelength range. The output power is rather stable. This fiber laser has potential applications in longer waveband (L-band) within the low-attenuation window.

Key words optical communications; multiwavelength; mode-locked fiber laser; semiconductor optical amplifier; Mach-Zehnder interferometer

1 引 言

光通信系统快速增长的带宽需求迫使高速率多波长激光源被越来越多地研究^[1]。密集波分复用(DWDM)系统拓展带宽的需求导致了新传输窗

口的研究,例如,具有低传输损耗的长波段(L-band, 1570~1610 nm)窗口有效地使潜在的通信带宽增加一倍。主动锁模光纤激光器能够产生高重复频率多波长短脉冲,是一种极具潜力的高速率多波长光

收稿日期: 2010-03-16; 收到修改稿日期: 2010-05-18

作者简介: 蒲利春(1959—),男,教授,硕士生导师,主要从事非线性光学和原子与分子物理学等方面的研究。

E-mail: cqplc@cqut.edu.cn

源。许多研究小组已经提出并报道了许多措施来提高光纤激光器输出的单个信道重复频率和信道数之积^[2~7]。一方面,为了取得高重复频率,可使用高速调制器。然而,随着调制速率的提高,调制器的成本也迅速增加,并且要制备超过 40 Gb/s 的高速调制器已变得非常困难。利用有理数谐波锁模技术可以实现重复频率的大幅提高^[3],然而,随着有理数谐波锁模失谐阶数的增加,输出脉冲的振幅变得非常地不平,需要额外地增加脉冲振幅均衡机制。另一方面,为了实现多波长操作,可将各种梳状滤波器方便地接入光纤环形腔中,例如法布里-珀罗(F-P)标准具^[2,3],立奥(Lyot)滤光器^[4]或色散补偿光纤^[5,6]等。

多波长光纤激光器的增益一般由掺铒光纤放大器(EDFA)^[6,7]、半导体光放大器(SOA)^[2,3,5,8]或拉曼光纤放大器(FRA)^[9]提供。EDFA 可以提供宽带(约 40 nm)高增益,并且增益平坦的 EDFA 已经商用,这对于实现信道功率均衡的多波长操作非常重要。然而,由于 EDFA 的增益具有均匀展宽特性,必须采取有效措施来避免多波长模式竞争引起激光器运行的不稳定。FRA 能够提供带宽比 EDFA 大得多的增益(大于 100 nm),然而,FRA 一般是由几千米或更长距离的光纤构成,激光器稳定性较差,并且在某些波段中为 FRA 提供抽运的高功率激光二极管还有待于发展。SOA 具有内在的非均匀展宽特性,基于 SOA 的多波长光纤激光器能够在没有任何辅助措施的情况下非常稳定地工作。另外,为了获得高重复频率脉冲输出,在多波长锁模光纤激光器中经常使用铌酸锂(LiNbO₃)调制器。然而,铌酸锂调制器需要由射频信号来驱动。一般来说,产生高频射频驱动信号也非常困难。铌酸锂调制器具有强烈的偏振相关性且插入损耗大,多波长操作的稳定性面临严峻考验,并且使用铌酸锂调制器的锁模光纤激光器产生的锁模脉冲也相对较宽。因此,SOA 的增益被外部注入光调制可用作主动调制器,SOA 光纤环形激光器中能够直接获得潜在的高重复频率超短脉冲^[8]。另外,在波分复用(WDM)系统应用中,要求激光器输出波长能够精准地对准 WDM 信道,并且,根据需要能够自由地调谐激光波长。

本文提出了一种包含两个 SOA 和一个马赫-曾德尔干涉仪(MZI)的 L 波段可调谐多波长锁模光纤环形激光器。由于外部注入光在其中一个 SOA 中引起交叉增益调制(XGM)效应,可调制环形腔中的自发辐射场,SOA 充当环形激光器的主动损耗调制

器。另外一个 SOA 未被外部光调制,提供腔增益以克服腔损耗,维持多个模式在腔内振荡。一个具有温度控制的光纤 MZI 充当可调谐梳状滤波器。一方面,温度控制可以保证环形腔光纤激光器稳定输出;另一方面,通过调节温度使光纤 MZI 两臂折射率发生微小变化,可实现振荡波长的连续调谐。并且通过调节 SOA 的电流,还可以实现在较大波长范围内的激光波长自由调谐。

2 实验装置

实验装置示意图如图 1 所示。激光器环形腔由两个 SOA,两个偏振控制器(PCs),一个光环行器(CIR),一个光纤 MZI,一个分光比为 10:90 的光耦合器(OC),一个可调光延时线(ODL)和一个光隔离器(ISO)构成。一个波长为 1549 nm 重复频率为 10 GHz 的外部光信号经可调衰减器(VOA)和 CIR 注入环形腔。外部光信号在 SOA1 中引起 XGM 效应并调制环形腔中的自发辐射场,SOA1 在光纤环形激光器中充当主动损耗调制器^[10]。CIR 和 ISO 确保环形腔中光场单向传输,并只有 SOA1 被调制,SOA2 仅充当增益介质。当 SOA1 被 250 mA 电流驱动时,在 1596 nm 波长处能够提供大约 24 dB 的小信号增益;SOA2 偏置在 250 mA 时,在 1596 nm 波长处能够提供大约 25 dB 的小信号增益。SOA1 和 SOA2 的增益相关度大约为 0.5 dB,因此,两个 PCs 接入环形腔中优化操作。光纤 MZI 充当可调谐梳状滤波器,它的透射率曲线如图 2 所示。梳状谱的自由谱宽度(FSR)为 1.6 nm(约 200 GHz),消光比为 19.6 dB。具有最大延迟时间为 300 ps 的可调 ODL 用来调整腔长以获得最多的波长振荡。一小部分光从 OC 10% 端口输出,并由光谱分析仪(OSA, Anritsu MS9710C)和通信信号分析仪(CSA, Tektronix 8000B)监测。

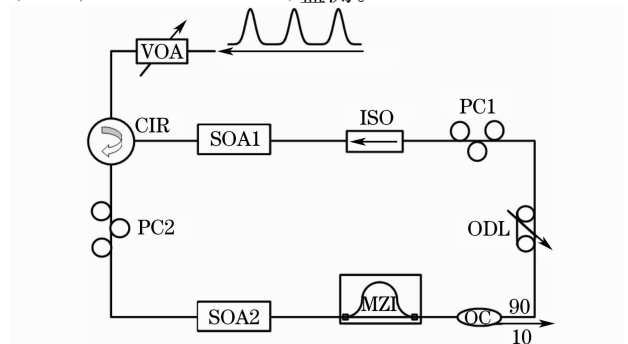


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

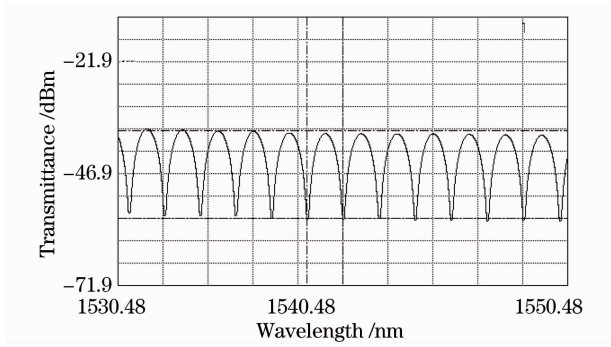


图 2 MZI 的透射率曲线

Fig. 2 Transmittance curve of the MZI

3 结果和讨论

两个 SOA 的驱动电流被偏置在 250 mA, 外部注入光的重复频率为 10 GHz, 脉冲宽度为 55 ps。

一般来说, 一个脉冲宽度较宽的脉冲序列注入环形腔, 通过 SOA 的 XGM 效应对腔内的自发辐射场进行调制, 可产生较窄的脉冲序列。当外部注入光功率较小时, 激光器输出多波长连续光^[11]。随着注入光功率增加, 多波长连续光被逐渐抑制, 腔内振荡模式被逐渐锁定, 实现多波长锁模输出。当注入光平均功率增加到 1.5 dBm 时, 12 个波长被同步锁定, 振荡波长覆盖 1586.48~1605.38 nm, 波长间隔大约是 1.6 nm, 对应于光纤 MZI 的 FSR。12 个振荡波长的光谱功率差大约是 4 dB, OSA 的分辨带宽 (RBW) 为 0.05 nm [如图 3(a) 所示]。输出脉冲的时域波形如图 3(b) 所示。输出的 10 Gb/s 锁模脉冲的半峰全宽 (FMHW) 为 30 ps。随着输入外部光功率进一步增加, SOA1 增益发生饱和, 输出锁模脉冲不再发生明显的时域变化。

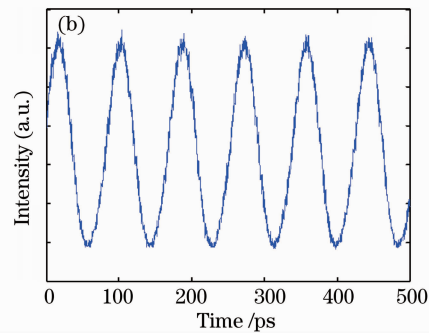
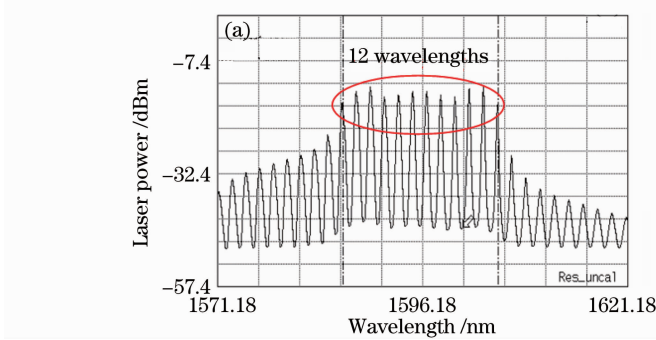


图 3 锁模输出的光谱(a)和时域波形(b)

Fig. 3 Optical spectral (a) and temporal waveform (b) of mode-locked output

实验中使用的光纤 MZI 是由两个 3 dB 耦合器级联熔接而成的。为了符合标准的 200 GHz WDM 系统信道间隔要求, MZI 的两臂应有一个固定的时延。臂长差 ΔL 和信号速率 R 满足关系式 $\Delta L = c / (n_{\text{eff}} \cdot R)$, 式中有有效折射率 $n_{\text{eff}} = 1.45$, $R = 200 \text{ Gb/s}$, 则 $\Delta L = 1.03 \text{ mm}$ 。因为光纤是电光介质, 环境温度的变化会引起其折射率的变化, 而折射率的变化又引起光信号相位的改变, 会使得 MZI 的输出不稳定^[11]。因此, 实验中使用了自制温度控制器对 MZI 的温度进行控制。激光器输出的重复扫描光谱如图 4 所示。MZI 的温度维持在 21 °C, 执行了时间间隔为 5 min 共计 10 次的重复扫描。实验结果显示输出光谱功率的时域抖动小于 0.4 dB, 表明激光器输出非常稳定, 这归功于对 MZI 的温度精密控制和紧凑的环腔结构。

在多波长锁模激光器的实际应用中常常需要调谐输出波长。在利用对 MZI 的温度控制实现其稳定工作的同时, 也可以实现对 MZI 相移的精确控

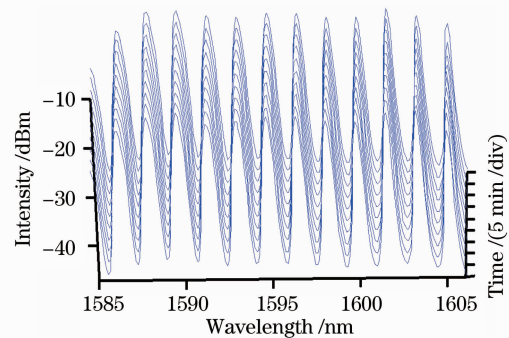


图 4 稳定性测试

Fig. 4 Measurement of stability

制, 其原理是, 光纤具有热胀冷缩的特性, MZI 的相位变化 $\delta\phi$ 是两臂的光纤折射率变化 δn 和长度变化 δL 叠加的结果, 并且满足关系式^[12]

$$\delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\delta n \Delta L + n \delta L), \quad (1)$$

相位变化随温度的变化率则可表示为

$$\frac{\delta\phi}{\delta t} = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{dn}{dt} \Delta L + n \frac{d(\Delta L)}{dt} \right], \quad (2)$$

对于石英光纤, $\frac{dn}{dt} \approx 1 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\frac{d(\Delta L)}{\Delta L dt} \approx 5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 当波长 $\lambda = 1.596 \text{ } \mu\text{m}$ 时, 代入(2)式可得

$$\frac{\delta\phi}{\delta t} = 0.14\pi \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}. \quad (3)$$

也即, 光纤 MZI 的温度变化 $7.19 \text{ } ^\circ\text{C}$ 可引起 MZI 发生 π 相移。因此通过调节 MZI 的温度, 可以实现多波长激光器输出波长的连续调谐。图 5 描述了不同温度下的多波长锁模光纤激光器的输出光谱。随着 MZI 温度的升高, 激光器的输出波长向长波长方向移动。既然温度在一个相当大的范围变化时, 才引起输出波长 π 的相移, 因此, 通过调节 MZI 温度可以实现激光器输出波长的精确调谐。另外, 通过调节 SOA 的电流, 还可以实现在较大波长范围内的激射波长自由调谐^[13]。

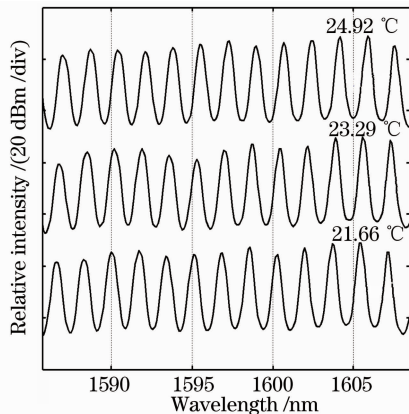


图 5 不同温度下多波长锁模光纤激光器的输出光谱
Fig. 5 Output spectral of multiwavelength mode-locked fiber laser on the different temperatures

4 结 论

提出并实验展示了一个可同时产生 12 个信道且每个信道重复频率为 10 Gb/s 的多波长锁模光纤环形激光器, 输出的脉冲宽度大约是 30 ps 。通过调节光纤 MZI 的温度可以连续调谐激光器的输出波长, 并且输出功率相当稳定。由于 SOA 的增益被外部光调制充当主动损耗调制器, 能够方便地取得具有更高重复频率的超短脉冲序列。另外, 提出的

方案具有实现单片集成的潜力, 并且可实际应用于光通信、光传感和光学仪器等领域。

参 考 文 献

- 1 L. Boivin, M. Wegmueller, M. C. Nuss *et al.*. 110 channels \times 2.35 Gb/s from a single femtosecond laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(4): 446~448
- 2 T. Papakyriakopoulos, A. Stavdas, E. N. Protonotarios *et al.*. $10 \times 10 \text{ GHz}$ simultaneously modelocked multiwavelength fibre ring laser [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(9): 717~718
- 3 K. Vlachos, K. Zoiros, T. Houbaylis *et al.*. $10 \times 30 \text{ GHz}$ pulse train generation from semiconductor amplifier fiber ring laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(1): 25~27
- 4 C. O'Riordan, M. J. Connelly, I. Evans *et al.*. Actively mode-locked multiwavelength fibre ring laser incorporating a lyot filter, hybrid gain medium and birefringence compensated LiNbO_3 modulator [C]. ICTON, 9th International Conference on Transparent Optical Networks, 2007, We.P.10: 248~251
- 5 W. W. Zhang, J. Q. Sun, J. Wang *et al.*. Multiwavelength mode-locked fiber-ring laser based on reflective semiconductor optical amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(19): 1418~1420
- 6 S. L. Pan, C. Y. Lou. Multiwavelength pulse generation using an actively mode-locked erbium-doped fiber ring laser based on distributed dispersion cavity [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(4): 604~606
- 7 J. N. Maran, S. LaRochelle, P. Besnard. Erbium-doped fiber laser simultaneously mode locked on more than 24 wavelengths at room temperature [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(21): 2082~2084
- 8 F. Wang, X. L. Zhang, J. J. Dong *et al.*. Eleven-wavelength switchable fiber ring laser with a dispersion compensation fiber and a delayed interferometer [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(23): 5842~5845
- 9 S. Qin, D. Chen, Y. B. Tang *et al.*. Stable and uniform multi-wavelength fiber laser based on hybrid Raman and erbium-doped fiber gains [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(22): 10522~10527
- 10 Wang Fei, Jia Xinhong, Wu Jiagui *et al.*. Numerical study of a mode-locked fiber ring laser consisting of two SOAs [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(4): 585~590
- 11 王 飞, 贾新鸿, 吴加贵 等. 包含两个半导体光放大器的锁模光纤环形激光器数值研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(4): 585~590
- 12 H. Dong, G. Zhu, Q. Wang *et al.*. Multiwavelength fiber ring laser source based on a delayed interferometer [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(2): 303~305
- 13 Qi Ming, Zhang Xinliang, Huang Dexiu. Tunable differential phase-shift keying demodulator using the Mach-Zehnder interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(12): 1643~1647
- 14 齐 鸣, 张新亮, 黄德修. 可调马赫-曾德尔干涉仪型差分相移键控解调[J]. *中国激光*, 2006, **33**(12): 1643~1647
- 15 F. Wang, X. L. Zhang, E. M. Xu *et al.*. Tunable $19 \times 10 \text{ GHz}$ L-band FP-SOA based multi-wavelength mode-locked fiber laser [J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(7): 1434~1437