

# 基于双芯光纤滤波器和非线性偏振旋转效应的 多波长光纤激光器

冯素春 任文华 陈曼雅 彭万敬

(北京交通大学光波技术研究所 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

**摘要** 提出一种基于双芯光纤滤波器和非线性偏振旋转效应(NPR)的多波长掺铒光纤激光器。使用双芯光纤构成紧凑型全光纤马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉仪型滤波器作为波长选择滤波器件,利用激光谐振腔中的非线性偏振旋转效应,通过调整光纤偏振控制器(PC),在室温下得到稳定的多波长激光输出。输出激光的工作波长左右漂移小于 0.02 nm,输出峰值功率波动小于 0.4 dB,具有良好的功率和波长稳定性。

**关键词** 激光技术;掺铒光纤激光器;多波长;双芯光纤;非线性偏振旋转效应

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0605006

## Multi-Wavelength Fiber Laser Employing Twin-Core Fiber Filter and Nonlinear Polarization Rotation

Feng Suchun Ren Wenhua Chen Manya Peng Wanjing

(Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract** Multi-wavelength erbium-doped fiber laser based on twin-core fiber filter and nonlinear polarization rotation at room temperature is proposed. The compact in-fiber Mach-Zehnder comb-filter is formed by splicing a section of twin-core fiber (TCF) with two single mode fibers (SMFs). Due to the nonlinear polarization rotation (NPR) effect in the laser cavity, the laser can be made to operate in stable multi-wavelength lasing states by adjusting the states of the polarization controller (PC) appropriately. The wavelength shift is less than 0.02 nm, and the power amplitude variation is less than 0.4 dB, which shows the fiber laser has a good stability.

**Key words** laser technique; erbium-doped fiber laser; multi-wavelength; twin-core fiber; nonlinear polarization rotation

**OCIS codes** 060.3510; 060.2410; 060.2340; 060.4370

## 1 引 言

多波长光纤激光器在波分复用(WDM)光纤通信系统、光纤传感、光学仪器及系统检测等领域有着广泛的应用,近年来引起了人们极大的研究兴趣。光纤激光器较其他激光器具有独特的优势:结构简单、插入损耗低、体积小;同时它阈值低、谐振波长范围宽、波长可调谐性好。由于掺铒光纤的增益均匀展宽特性带来的模式竞争,稳定的多波长激光在常

温下很难产生。研究者们已提出多种方法来实现稳定的多波长激光输出<sup>[1-9]</sup>,并且已有多种不同类型光器件插入激光腔内执行滤波功能,如光纤光栅基器件,全光纤马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉仪滤波器,高双折射光纤 Lyot 滤波器,法布里-珀罗(Fabry-Pérot)标准具滤波器等。基于非线性偏振旋转效应(NPR)的多波长激光器的研究近年来备受关注<sup>[7-9]</sup>。非线性偏振旋转效应具有强度相关且

收稿日期: 2013-09-30; 收到修改稿日期: 2013-11-02

基金项目: 国家自然科学基金(61107094)、中央高校基本科研业务费(2013JBM017)

作者简介: 冯素春(1982—),男,副教授,主要从事光纤通信,光纤器件,光纤激光器等方面的研究。

E-mail: fengsuchun@gmail.com

非均匀损耗的特性,即当光波强度大于某一个临界值时,激光腔的传输率将不会随着光波强度的增大而变大,而是随着光波的增大而变小,利用这种光强的相关关系可以用来实现多波长激光的稳定输出。张祖兴等<sup>[7-8]</sup>采用非线性偏振旋转效应和高双折射光纤 Lyot 滤波器实现了稳定的多波长激光输出,但该类光纤滤波器所用光纤长度较长,即使在实验室环境下,外部的温度变化或其它微小扰动都极有可能导致干涉峰峰值波长的漂移,最终导致激光器工作波长的飘移,难以达到实用化要求。基于双芯光纤的紧凑型全光纤马赫-曾德尔干涉仪由于其结构紧凑,因而可以从一定程度上减小这方面的影响。这是由于双芯光纤的两个纤芯集成在一根光纤中,当外界环境变化时,双芯光纤中两个纤芯发生相同的变化。

采用实验室自制的双芯光纤构成紧凑型全光纤马赫-曾德尔干涉仪滤波器作为波长选择滤波器件,利用激光谐振腔中的非线性偏振旋转效应,通过调整光纤偏振控制器,在室温下得到了稳定的多波长激光输出。

## 2 实验装置及工作原理

图 1 所示为基于双芯光纤的全光纤马赫-曾德尔干涉仪滤波器和非线性偏振旋转效应的多波长光纤激光器的结构示意图。激光器谐振腔由掺铒光纤放大器(EDFA)、两个光纤偏振控制器(PC1 和 PC2),偏振相关光隔离器(PDI),一段 3 km 康宁公司标准普通单模光纤(SMF),由普通单模光纤和双芯光纤(TCF)构成的紧凑型全光纤马赫-曾德尔干涉仪滤波器,功率分配比为 95:5(5%端为激光输出端)的光纤输出耦合器(Coupler)组成。掺铒光纤放大器部分中,包括一段 10 m 长,在 1530 nm 处吸收系数为 16 dB/m 的自制掺铒光纤(EDF),980 nm/1550 nm 波分复用器(WDM),这段掺铒光纤由最大抽运功率约为 250 mW 的 980 nm 激光二极管(LD)通过一个 980 nm/1550 nm 波分复用器(WDM)进行抽运,实现光放大的功能。

一般情况对于单模光纤、偏振控制器、偏振相关光隔离器和偏振控制器构成的联合体,它的光强和传输的关系具有两个不相同的工作区间。其中一个区间是传输随光波强度的增大而增大,被动锁模式光纤激光器工作于这一区间。另外一个区间是传输随着光强的增大而减小,也就是说高强度的光波会经历更大的损耗,此时联合体就相当于功率均衡器。

这类强度相关且非均匀损耗的特性可以用于克服均匀展宽增益介质中的模式竞争。故由单模光纤、偏振控制器、偏振相关光隔离器和偏振控制器构成的联合体能起到一个强度相关器件的作用。所以,掺铒光纤激光器在室温下由于掺铒光纤模式竞争的平衡和非线性偏振旋转效应诱导的非均匀损耗可以产生稳定的多波长输出<sup>[7-9]</sup>。实验中在激光谐振腔内插入了一段 3 km 长的标准普通单模光纤,用来增强激光谐振腔内的非线性偏振旋转效应。

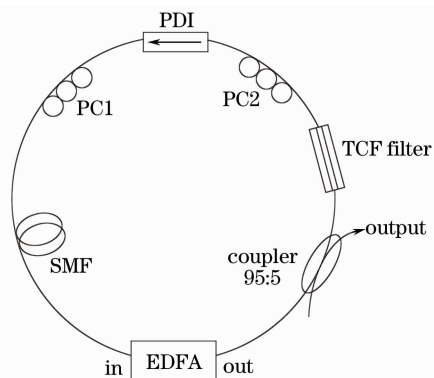


图 1 基于双芯光纤滤波器和非线性偏振旋转效应的多波长光纤激光器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the proposed laser based on nonlinear polarization rotation and twin-core fiber filter

图 2 所示为基于双芯光纤的紧凑型全光纤马赫-曾德尔干涉仪滤波器的结构示意图以及双芯光纤的横截面图。本文利用实验室自行研制的轴对称双芯光纤制作了全光纤马赫-曾德尔干涉仪滤波器,将轴对称双芯光纤分别与两根单模光纤熔接,并在两个熔接点处实施熔融拉锥进行模场匹配以减小光纤滤波器的插入损耗。实验中所采用的双芯光纤长度约为 60 cm,是失配耦合双芯光纤(即双芯光纤的两个芯子的折射率  $n_1, n_2$  相差较大),其中一个纤芯为普通掺铒纤芯,另一个纤芯为掺铒纤芯。两个芯子的直径均约为  $6 \mu\text{m}$ ,双芯光纤包层直径约为  $130 \mu\text{m}$ 。由于双芯光纤的两个纤芯之间的距离约为  $20 \mu\text{m}$ ,并且两个纤芯之间有一定的折射率差,因此两个纤芯之间在传输过程中几乎没有能量耦合,所以这里双芯光纤两个纤芯之间的能量耦合可以忽略不计,即这里仅将双芯光纤的两个纤芯作为全光纤马赫-曾德尔干涉仪的两条干涉臂看待。

基于双芯光纤的全光纤马赫-曾德尔干涉仪滤波器的干涉峰的频率间隔为

$$\Delta f = \frac{c}{n_1 l_1 - n_2 l_2}, \quad (1)$$

式中  $l_1 = l_2$  为双芯光纤的长度,  $n_1, n_2$  为双芯光纤

两个芯子的折射率,  $c$  为光速。

干涉峰的波长间隔约为

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{n_1 l_1 - n_2 l_2}, \quad (2)$$

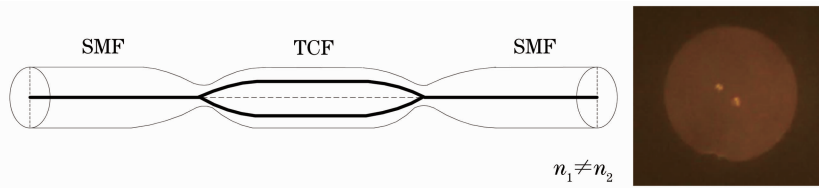


图 2 实验制作的紧凑型双芯光纤滤波器结构示意图

Fig. 2 Schematic of the experimental compact dual-core fiber filter

由于双芯光纤中的两个纤芯的物理长度是一致的,所以基于双芯光纤的全光纤马赫-曾德尔干涉仪的相位差主要是由双芯光纤两个纤芯的折射率差所产生的。对于制作完成的双芯光纤两个纤芯的折射率差已经固定,所以当选择不同长度的双芯光纤制作紧凑型全光纤马赫-曾德尔干涉仪时,将可以得到具有不同干涉峰波长间隔的梳状滤波器<sup>[10]</sup>。

实验制作双芯光纤马赫-曾德尔干涉仪型滤波器的过程主要包括:

1) 通过商用光纤熔接机(ERICSSON, FSU 975)将双芯光纤熔接在两个普通单模光纤之间。图 3 是双芯光纤和普通单模直接熔接的热成像图,从图中可以看到双芯光纤两个芯子与单模光纤芯子的相对位置。由于所用的双芯光纤为轴对称双芯光纤,两个芯子的模场与单模光纤芯子的模场重叠区域不大,从而导致滤波器的插入损耗较大(约 20 dB)。因此,实验中对双芯光纤与单模光纤的熔接点实施熔融拉锥进行模场匹配,以减小双芯光纤滤波器的插入损耗。

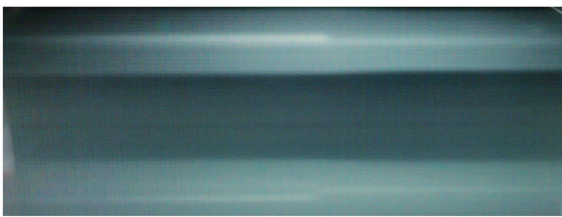


图 3 双芯光纤和普通单模直接熔接的热成像图

Fig. 3 Fusion thermal image of dual-core fiber and single-mode fiber

2) 通过光纤熔接机内嵌的熔融拉锥程序,适当调整熔融拉锥放电参数,通过放电对普通单模光纤与双芯光纤的两个光纤熔接点处分别进行熔融拉锥操作,此时加热区光纤逐渐形成双锥结构。该过程中光源输出的光从单芯单模光纤经过光纤双锥区逐渐分别传输到双芯光纤的纤芯中,双芯光纤输出光

功率逐渐增强。图 4 是双芯光纤和单模光纤熔融拉锥开始时的拉锥形状图。

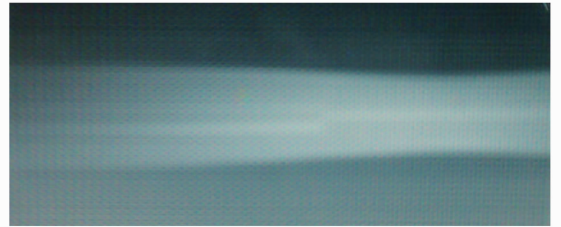


图 4 双芯光纤和单模光纤熔融拉锥开始时的拉锥形状图

Fig. 4 Initial image of the fusion and tapering between dual-core fiber and single mode fiber

3) 当熔融拉锥长度达到某一长度时,光功率达到最大值,泄露光功率最小。随着熔融拉锥长度的增加,熔融拉锥区域的光纤越来越细,锥腰处光转变为辐射泄露掉的越来越多,双芯光纤耦合光功率逐渐减小,此时停止拉锥。实验中锥区长度约为 500~600  $\mu\text{m}$ 。图 5 是双芯光纤和单模光纤熔融拉锥的最终拉锥形状图。对于双芯光纤与单模光纤的另一端熔接点也通过相同的步骤进行熔融拉锥。

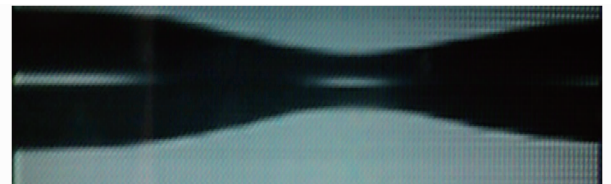


图 5 双芯光纤和单模光纤熔融拉锥的最终拉锥形状图

Fig. 5 Final image of the fusion and tapering between dual-core fiber and single mode fiber

通过掺铒光纤放大器自发辐射光源(ASE)以及光谱仪(ANDO AQ6317,分辨率为 0.01 nm)测量得到实验制作的基于双芯光纤的全光纤马赫-曾德尔滤波器的传输谱如图 6 所示,滤波器的干涉峰消光比约为 10 dB,滤波器的干涉峰波长间隔约为 0.55 nm,滤波器的插入损耗约为 10 dB。

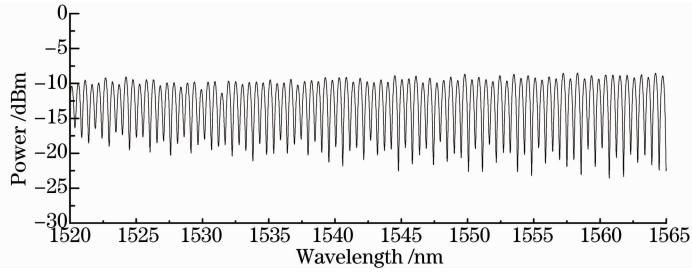


图 6 双芯光纤滤波器的传输谱

Fig. 6 Transmission spectrum of dual-core fiber filter

### 3 实验结果及讨论

光纤激光器激光输出的抽运功率阈值约为 100 mW, 利用偏振控制器对激光腔内偏振状态进

行合理的调节, 即调节 PC1 和 PC2 来平衡激光腔内不同波长处的损耗与增益, 得到了室温下稳定的多波长激光输出。图 7 为抽运功率 200 mW 的激励下

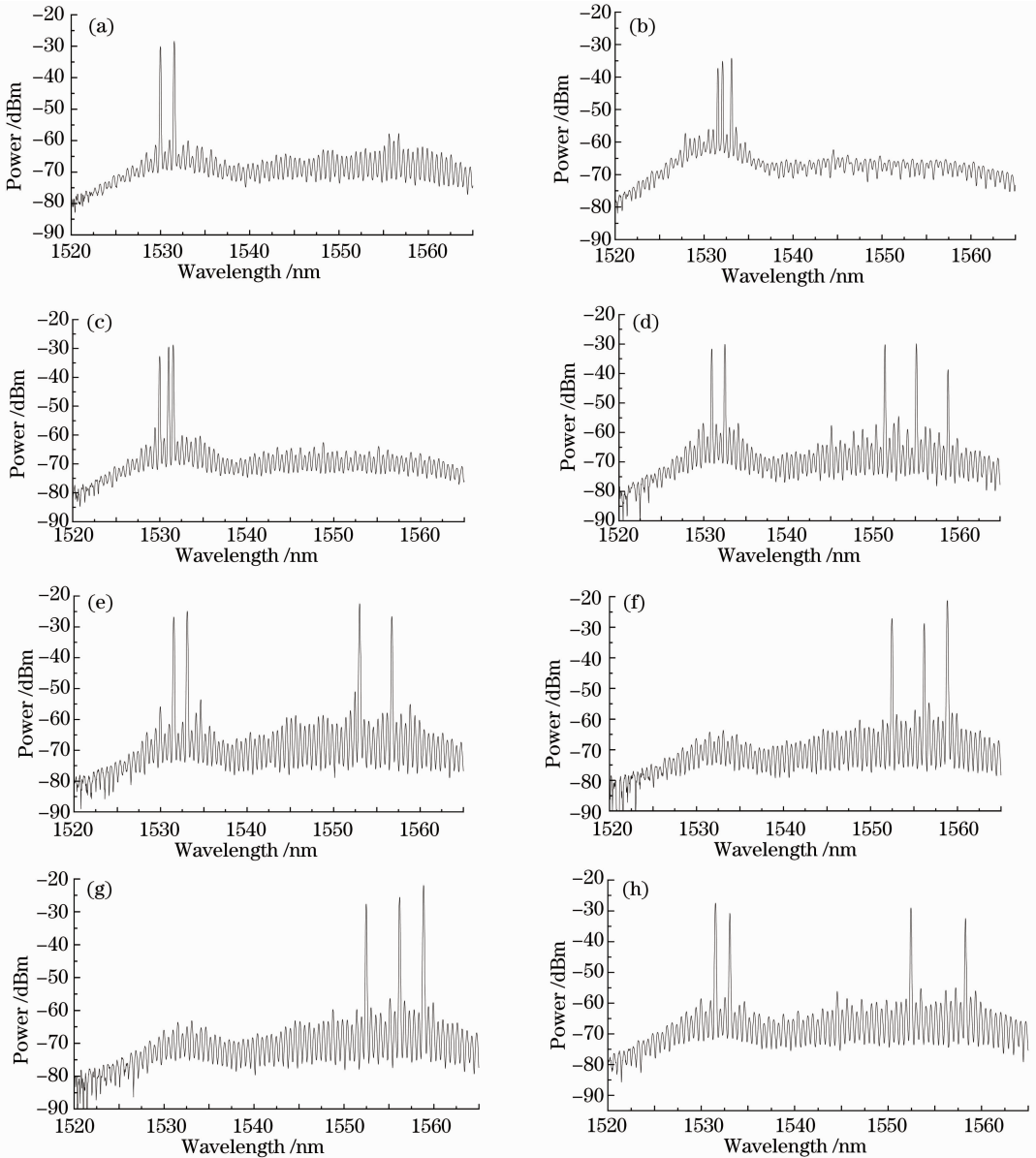


图 7 不同偏振控制器状态下的激光器输出光谱

Fig. 7 Output spectrum of the laser with different polarization states of PCs

通过适当调整光纤偏振控制器,光谱仪测试得到的输出稳定的多波长激光光谱,发生激射的激光波长均与双芯光纤马赫-曾德尔干涉仪滤波器的干涉峰的峰值波长相关,各个工作波长所输出激光的峰值功率稳定性很好,输出激光的光信噪比达到约为40 dB。图7中各个工作状态下输出激光的激射波长分别为:(a) 1530 nm 和 1531.54 nm;(b) 1531.56,1532.08 和 1533.08 nm;(c) 1529.98, 1531.02 和 1531.54 nm;(d) 1530.94,1532.50, 1551.40,1555.12 和 1558.86 nm;(e) 1531.52, 1533.08,1553.00 和 1556.74 nm;(f) 1552.48, 1556.18 和 1558.84 nm;(g) 1552.48,1556.20 和 1558.84 nm;(h) 1531.52,1533.08,1552.44 和 1558.28 nm。每个激射波长处的激光功率谱的3 dB带宽小于0.1 nm。由图中的实验结果可以看出,此光纤激光器最多只能形成五个波长的激光稳定输出,不能够实现与双芯光纤滤波器干涉峰波长

间隔一致连续等间隔波长的多波长光纤激光器,原因主要与双芯光纤滤波器的插入损耗较大相关。还有一部分原因是与光纤偏振控制器的特性相关,由于这里所使用的光纤偏振控制器非工业制作的,而是个人缠绕制作的,并不能很精细地对激光腔内各激射波长处的偏振状态进行调整,所以不能很精细地调节激光腔内各激射波长处的增益和损耗。

为了考察不同偏振控制器状态下激光输出时的长期稳定性,选取图7中两种状态下的激光输出,分别进行了连续扫描16次,时间间隔为2 min,总扫描时间约为30 min的激光谱线扫描,如图8所示。这两种工作状态输出激光的激射波长分别为:(a1) (a2) 1530.00,1531.02,1531.56 nm;(b1) (b2) 1552.48,1556.20,1558.86 nm。激光工作波长左右漂移小于0.02 nm,输出峰值功率波动小于0.4 dB,说明在室温下该多波长光纤激光器具有良好的功率和波长稳定性。

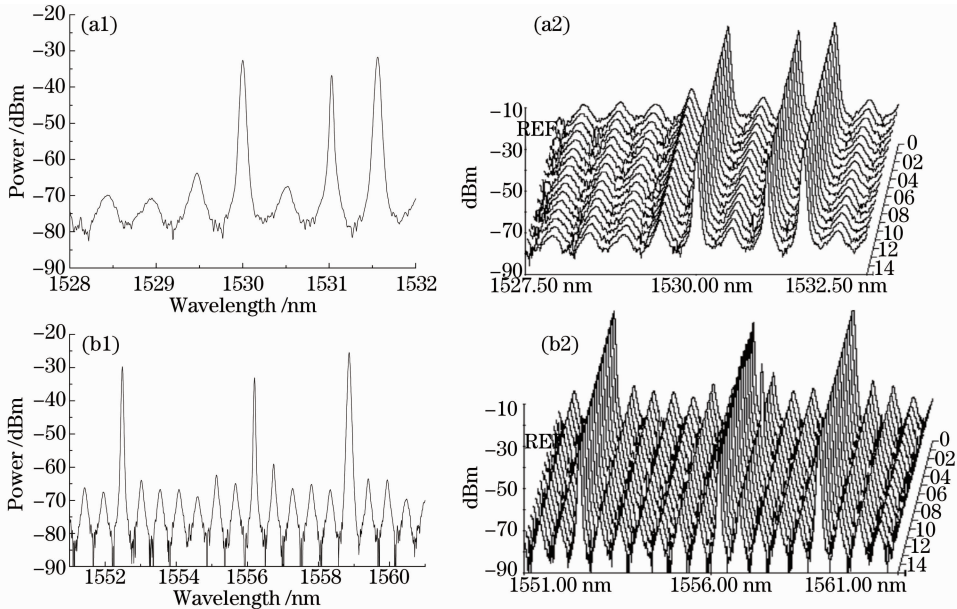


图8 激光器输出光谱的扫描图

Fig. 8 Scanned Output Spectrum of the laser

为了验证3 km普通单模光纤对非线性偏振旋转效应的作用,实验中移去激光谐振腔中的3 km普通单模光纤,观察光纤激光器的激光输出结果,并与前面没有移除普通单模光纤的光纤激光器的输出结果进行比较。图9是去掉普通单模光纤后,调整光纤偏振控制器,其中典型两种工作状态下的激光输出光谱,其激光激射波长分别在1560.31 nm和

1557.17 nm,都仅产生了一个激射波长。从实验结果来看,当去掉该激光器中的普通单模光纤后,虽然通过调整偏振控制器,可以得到不同激射波长处的激光输出,但均为单波长激光输出,从而验证了3 km普通单模光纤在激光谐振腔内起到了一定的非线性作用,也从侧面说明非线性偏振旋转效应对实现稳定的多波长激光输出有一定的效果。

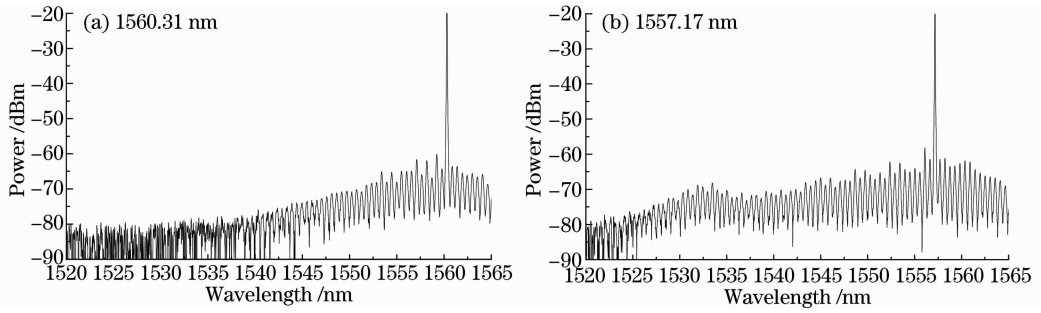


图 9 去掉 SMF 后的激光器的激光输出光谱

Fig. 9 Output Spectrum of the laser after removing SMF

## 4 结 论

提出了一种基于双芯光纤滤波器和非线性偏振旋转效应的多波长掺铒光纤激光器。使用实验室自制的双芯光纤构成紧凑型全光纤马赫-曾德尔干涉仪型滤波器作为波长选择滤波器件,利用激光谐振腔中的非线性偏振旋转效应,通过调整光纤偏振控制器,在室温下得到稳定的多波长激光输出。输出激光的工作波长左右漂移小于 0.02 nm,输出峰值功率波动小于 0.4 dB,具有良好的功率和波长稳定性。由于双芯光纤滤波器的插入损耗较大以及光纤偏振控制器的精细程度所限,不能产生与双芯光纤滤波器干涉峰波长间隔一致的连续等间隔波长的激光输出。后续工作将继续对双芯光纤滤波器进行优化设计,减小其插入损耗,以期获得等波长间隔输出的多波长光纤激光器。

## 参 考 文 献

- 1 Chen X, Yao J, Deng Z. Ultranarrow dual-transmission-band fiber Bragg grating filter and its application in a dual-wavelength single-longitudinal-mode fiber ring laser[J]. Opt Lett, 2005, 30(16): 2068—2070.
- 2 Guoyong Sun, Ronghui Qu, Jing Yang, *et al.*. Study on stable multi-wavelength erbium-doped fiber laser at room temperature [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(6): 821—824.  
孙国勇, 瞿荣辉, 杨 敬, 等. 室温下稳定的多波长掺铒光纤激光器的研究[J]. 光学学报, 2005, 25(6): 821—824.

- 3 Han Y G, Lee J H, Lee S B, *et al.*. Novel multiwavelength erbium-doped fiber and raman fiber ring lasers with continuous wavelength spacing tunability at room temperature [J]. Lightwave Technology Journal of, 2007, 25(8): 2219—2225.
- 4 Liu Y, Dong X, Shum P, *et al.*. Stable room-temperature multi-wavelength lasing realization in ordinary erbium-doped fiber loop lasers[J]. Opt. Express, 2006, 14(20): 9293—9298.
- 5 Liu X, Lu C. Self-stabilizing effect of four-wave mixing and its applications on multiwavelength erbium-doped fiber lasers[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2005, 17(12): 2541—2543.
- 6 Chunlin Z, Xiufeng Y, Chao J L, *et al.*. Switchable multi-wavelength erbium-doped fiber lasers by using cascaded fiber Bragg gratings written in high birefringence fiber [J]. Opt Commun, 2004, 230(4): 313—317.
- 7 Zhang Zuxing, Sang Minghuang, Ye Zhiqing, *et al.*. Multiwavelength fiber laser based on nonlinear polarization rotation[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 28(4): 648—652.  
张祖兴, 桑明煌, 叶志清, 等. 基于非线性偏振旋转效应的多波长光纤激光器[J]. 光学学报, 2009, 28(4): 648—652.
- 8 Zhang Zuxing, Ye Zhiqing, Wu Jian, *et al.*. Multiwavelength fiber laser with symmetrical nonlinear optical loop mirror [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 28(4): 648—652.  
张祖兴, 叶志清, 伍 剑, 等. 基于对称非线性光纤环镜的多波长光纤激光器[J]. 光学学报, 2009, 28(4): 648—652.
- 9 Tian J, Yao Y, Sun Y, *et al.*. Multiwavelength erbium-doped fiber laser employing nonlinear polarization rotation in a symmetric nonlinear optical loop mirror[J]. Opt Express, 2009, 17(7): 15160—15166.
- 10 Suchun Feng, Honglei Li, Xu Ou, *et al.*. Compact in-fiber Mach-Zehnder interferometer using a twin-core fiber[C]. APOC, 2009. 1—5.

栏目编辑:殷建芳