

# 基于对称非线性光纤环境的多波长光纤激光器

张祖兴<sup>1</sup> 叶志清<sup>1</sup> 伍 剑<sup>2</sup> 徐 坤<sup>2</sup> 聂义友<sup>1</sup> 林金桐<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>江西师范大学物理与通信电子学院江西省光电子与通信重点实验室, 江西 南昌 330022)  
<sup>2</sup>北京邮电大学光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876)

**摘要** 提出和展示了一个基于对称非线性光纤环境的多波长光纤激光器。非线性光纤环境的强度相关传输能有效地抑制均匀加宽增益介质掺铒光纤中的模式竞争,从而使光纤激光器在室温下产生稳定的多波长输出,实验实现了 8 个波长的多波长激光输出。另一方面,实验中利用了在线型的双折射光纤滤波器,它是一种新型的周期性梳状滤波器。实验研究了多波长输出光谱随抽运功率的演化,结果表明,抽运功率对多波长光谱的均匀性有较大影响。

**关键词** 导波与光纤光学;多波长光纤激光器;非线性光纤环境;掺铒光纤激光器

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200929s1.0408

## Multiwavelength Fiber Laser with Symmetrical Nonlinear Optical Loop Mirror

Zhang Zuxing<sup>1</sup> Ye Zhiqing<sup>1</sup> Wu Jian<sup>2</sup> Xu Kun<sup>2</sup> Nie Yiyu<sup>1</sup> Lin Jintong<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Key Lab of Photoelectron and Communications of Jiangxi Province, Jiangxi Normal University, College of Physics and Communication Electronics, Nanchang, Jiangxi 330022, China)  
<sup>2</sup>Key Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract** A multiwavelength fiber laser with symmetrical nonlinear optical loop mirror, from which up to 8 wavelengths can be generated, has been proposed and demonstrated. The intensity-dependent transmission of nonlinear optical loop mirror due to nonlinear polarization rotation effect is used to alleviate the mode competition in the homogeneous broadening gain medium of erbium-doped fiber. Besides, a novel comb-like filter i. e. birefringence fiber filter is proposed and utilized, which has in-line configuration. At the same time, the effect of the 980 nm pump power on the multiwavelength generation has been investigated. It is shown that the pump power contribute a lot to the evenness of the multiwavelength spectra.

**Key word** guided wave and fiber optics; multiwavelength fiber laser; nonlinear optical loop mirror; erbium-doped fiber laser

## 1 引 言

多波长激光器可以同时为现代光波分复用(WDM)通信系统提供多个信道光源,使光发射端的设计更为紧凑、经济,因而在密集波分复用(DWDM)系统中有着很重要的应用价值。而多波长光纤激光器具有线宽窄,输出功率高,稳定性好,易于与光纤通信系统兼容等优点,非常适合于密集波分复用通信系统。多波长光纤激光器不仅广泛地应用到光通讯光源,而且在光传感,光器件的性能测试和材料的色散测试等很多领域都具有广泛的应用

前景,因而受到广泛关注<sup>[1]</sup>。室温稳定的多波长光纤激光器中最关键的技术是如何有效抑制掺杂光纤的均匀增益展宽效应。常温下铝硅玻璃掺铒光纤(EDF)的均匀展宽线宽约为 11 nm,锗硅玻璃 EDF 的均匀线宽约为 3~4 nm。研究表明,当多波长激光器的输出波长间隔小于增益光纤的均匀展宽线宽时,不可避免地存在严重的模式竞争和模式跳变。要提高多波长光纤激光器的工作性能,获得稳定的多波长激光振荡,关键在于设法削弱增益光纤的均匀展宽效应,以及由此引起的交叉增益饱和效应<sup>[2]</sup>。

**基金项目:** 国家自然科学基金(60807014)、江西省自然科学基金(2008GQS0050)、江西省教育厅科技项目(GJJ09152)和江西师范大学博士启动基金资助课题。

**作者简介:** 张祖兴(1975—),男,博士,副教授,主要研究工作是光纤激光器和全光波长转换等方面的研究。

E-mail: stellarz@hotmial.com

国际上从 1988 年开始对多波长光纤激光器进行研究,并于 1992 年由美国的 N. Park 等<sup>[3]</sup>首次实现了基于单一增益介质的 6 个波长输出的 EDF 激光,波长间隔为 4.8 nm。之后,在此领域涌现了大量的研究工作,不断地促进对多波长光纤激光器机理的理解和性能的改善。目前实现多波长光纤激光器有多种方法,主要的方法是将 EDF 浸泡在液氮中冷却来抑制其均匀加宽机制<sup>[4]</sup>,这种方法不能工作在室温下,因此其应用受到极大限制。为了使光纤激光器在室温下也能产生多波长输出,可以采取的方法有:超连续谱的纵模切割<sup>[5]</sup>;通过频移反馈来阻止激光器的单模振荡<sup>[6]</sup>;利用非线性光纤中的四波混频效应来产生自稳定的多波长<sup>[7]</sup>;将具有非均匀增益特性的半导体光放大器或拉曼放大器插入到光纤激光器中<sup>[8,9]</sup>;和采用级联的受激布里渊散射实现布里渊多波长 EDF 激光器<sup>[10,11]</sup>。

另一方面,为了实现多波长输出通常需要在激光腔内插入周期性的多波长滤波器,比如波长固定的珀布里-珀罗(Fabry-Pérot, F-P)滤波器、波长可调谐的啁啾光纤光栅或取样光栅和双折射光纤环形镜等。相比这些滤波器还有另外一种相对简单的滤波器,即 Lyot 双折射光纤滤波器,它结构简单,只由一个起偏器和一段高双折射光纤即可组成。而且它的波长间隔可以通过选择合适的双折射光纤长度来改变,它的波长可以通过改变偏振来精密调谐。本文提出和展示了一种实现室温下多波长光纤激光器的新方法,利用对称非线性光纤环境的强度相关非均匀传输抑制均匀加宽增益介质 EDF 中的模式竞争,实验中采用了在线型的双折射光纤滤波器,它是一种新型的周期性梳状滤波器。

## 2 实验结构及原理

图 1 是基于对称非线性光纤环境多波长 EDF 激光器的实验结构示意图。一个分光比为 50:50 的 3 dB 耦合器把一个非线性光纤环境和一个单向环形激光腔连接起来。在左边的单向激光振荡腔中,有一段长 12 m、铒离子浓度为  $4.0 \times 10^{-4}$  ions/cm<sup>3</sup> 的 EDF 作为增益介质,一个波分复用器(WDM)把 980nm 的抽运激光耦合进掺铒光纤,一个偏振相关隔离器(PDI)保证了激光腔的单向工作,并有起偏器的作用,还有一个偏振控制器(PC1),一个分光比为 10/90 的耦合器,它的 10% 端口用于输出光信号,90% 光信号继续在腔内循环。这里提出的激光器与其他类似激光器的不同是在左边单向环形激光

腔内有一段保偏光纤(PMF),保偏光纤和偏振相关隔离器一起就组成了一个等效的双折射光纤梳状滤波器,它是一种新型的在线性周期梳状滤波器。在对称非线性光纤环境中,有长为 16.5 km 的单模光纤(SMF),还有两个偏振控制器(PC2, PC3)分别用来调节反向传输的两光束进入单模光纤时的初始偏振态。

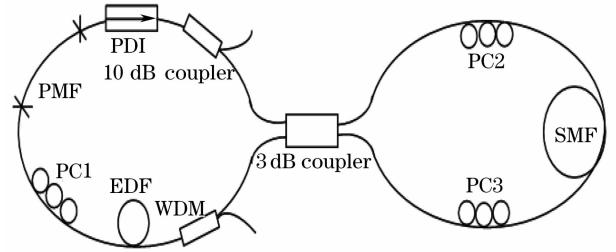


图 1 基于对称非线性光纤环境多波长掺铒光纤激光器实验示意图

Fig. 1 Schematic of the proposed multiwavelength erbium-doped fiber laser with nonlinear optical loop mirror

由于反向传输的两束光初始偏振态不同,受非线性偏振旋转作用它们非线性光纤环境中运行一圈积累的非线性相移量不同。对称非线性光纤环境的传输函数可以表示为

$$T = 1 - \frac{1}{2}[1 + \cos(\varphi_{cw} + \varphi_{ccw})], \quad (1)$$

式中  $\varphi_{cw}$  和  $\varphi_{ccw}$  分别是 3 dB 耦合器出来沿顺时针和逆时针方向的传输光经过非线性环境后累积的非线性相移,它们都是初始偏振态和光强的函数。假如非线性环境中光强足够大,虽然顺时针和逆时针方向传输光强一样大,但由于光纤中的非线性偏振旋转效应,初始偏振态不同的两相反方向传输光也会产生相位差。当它们再次在耦合器汇合时会发生相干或相消叠加,导致光强度相关传输,这可以用来抑制 EDF 激光器中的模式竞争效应,从而使得 EDF 激光器在室温下能够实现稳定多波长输出。

## 3 实验结果与分析

在此实验中使用的保偏光纤长 11 m,一卷单模光纤长 16.5 km,抽运功率先固定在 168 mW。仔细调节激光腔内的两个偏振控制器,可以观察到两类不同性质的输出光谱:被动锁模和连续波多波长。基于非线性光纤环境的被动锁模光纤激光器已经有很多研究,由于非线性偏振旋转效应的作用,当非线性光纤环境的传输随光强增大而增加时,非线性光纤环境的作用相当于一个等效饱和吸收体,此

时光纤激光器工作在被动锁模状态<sup>[12]</sup>。虽然此时的输出光谱也呈现出梳状光谱的特性,但这种多波长与连续波多波长产生的原理不同,它是由于双折射光纤滤波器对锁模脉冲光谱的滤波而产生的<sup>[13]</sup>。相反地,当非线性光纤环境的传输随光强增大而减小时,光纤激光器工作在连续多波长状态,如图2所示是产生7个波长时的多波长输出光谱。多波长光谱波长间隔都是0.45 nm,这与根据公式 $\Delta\lambda = \lambda^2 / (\Delta n l)$ 计算的值一致(取 $l = 11$  m,  $\Delta n = 4.8 \times 10^{-4}$ )。多波长的产生是非线性光纤环境的强度相关传输对腔内模式竞争平衡的结果。按照激光振荡理论,一个带有多个波长满足振荡条件而起振,但由于增益介质EDF的均匀加宽性质,假如没有引入其他效应这多个波长激光间存在强烈的竞争,因而很不稳定。此激光器内有非线性光纤环境的强度相关损耗,即如果某波长上的自由振荡激光功率大于某一特定值,它通过非线性光纤环境的损耗将随着功率的增大而加大,这种效应可以抑制腔内的自由模式竞争,从而产生稳定多波长输出。

另外,随着偏振控制器的不断调节产生的波长数不是固定的,而是不断变化的。图3是产生8个波长时的多波长输出光谱,两个相邻波长间的间隔也是0.45 nm。8个波长是本实验所能得到的最大波长数,需要指出的是这里非线性光纤环境中使用

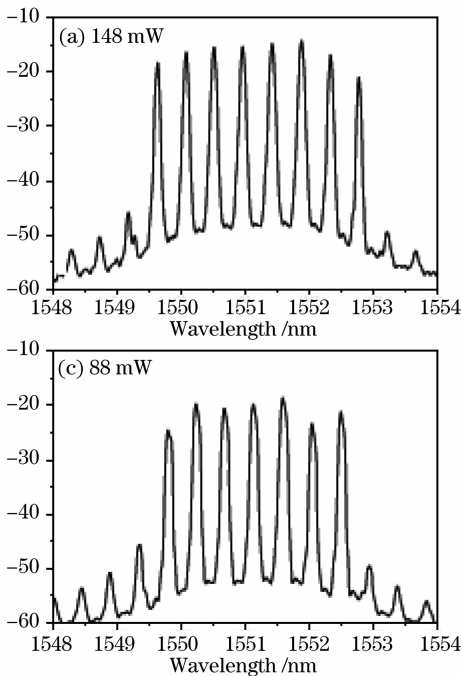


图4 多波长输出光谱随抽运功率的变化

Fig. 4 Multiwavelength spectra with different pump power

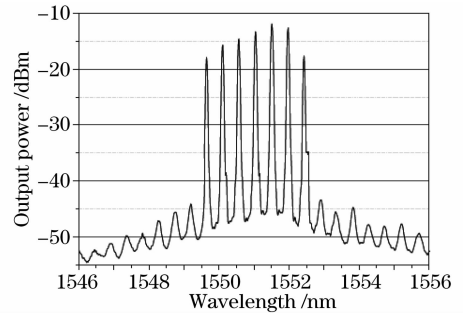


图2 7个波长输出

Fig. 2 7-line multiwavelength output spectrum

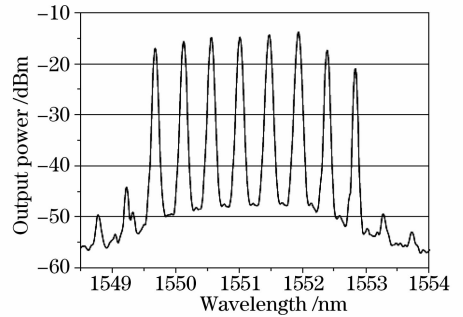


图3 8个波长输出

Fig. 3 8-line multiwavelength output spectrum

的光纤长度是任意的,换用不同长度的光纤多波长输出总是可以产生的,若优化光纤长度可以产生更多波长数的多波长激光输出。

为了检验非线性光纤环境传输的光强度相关性和分析抽运光功率对多波长输出光谱平坦性的影

响,在抽运功率为 168 mW 产生了 8 个波长后,使偏振控制器保持固定不动,逐步减小 980 nm 抽运功率并记录各抽运功率下相应输出光谱,结果如图 4 所示。图 4(a)是抽运功率为 148 mW 时的多波长光谱图,和图 3 抽运功率是 168 mW 时的光谱比较,光谱的平坦性变得更差。图 4(b)~图 4(d)分别是抽运功率为 108 mW,68 mW,28 mW 时的多波长光谱图,由此可见,随着抽运功率的减小,多波长光谱的平坦性变得越来越差,各激光波长间的功率差越来越大。抽运功率越大,激光腔内激光振荡功率就越大,非线性偏振旋转效应诱导的非线性光纤环境对它们的损耗也就越大,更能有效地平衡腔内自

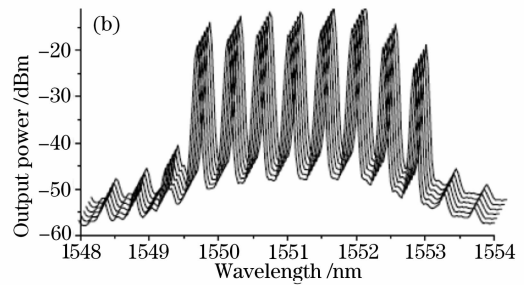
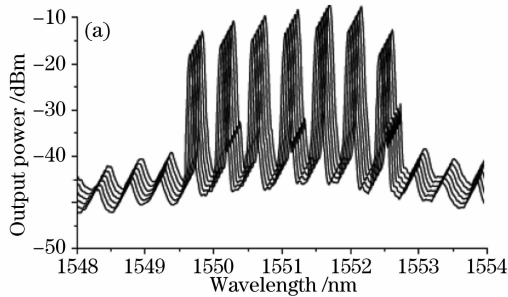


图 5 多波长光谱图随时间的演化。输出波长个数为 7(a)和 8(b)

Fig. 5 Evolution of the spectra when the output includes (a) 7 wavelength and (b) 8 wavelength

## 4 结 论

本文提出和展示了一个基于对称非线性光纤环境的多波长掺铒光纤激光器,实验研究表明对称非线性光纤环境的强度相关非均匀损耗能有效地抑制均匀加宽增益介质掺铒光纤中的模式竞争,在室温下实现了 8 个波长的多波长输出。另外,本实验中使用了一种新型的在线型周期性梳状滤波器,即双折射光纤滤波器。还研究了抽运功率对多波长输出特性的影响,发现抽运功率对输出多波长光谱的均匀性有很大影响。

## 参 考 文 献

- 1 A. Bellemare, M. Karasek, M. Rochette *et al.*. Room temperature multifrequency erbium-doped fiber lasers anchored on the ITU frequency grid[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(6): 825~831
- 2 Liu Yanke, Feng Xinhuan, Dong Xiaoyi. Progress in room-temperature stable multi-wavelength fiber laser technologies[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(7): 883~894
- 3 刘艳格,冯新焕,董孝义. 室温稳定多波长光纤激光器技术的研究新进展[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 883~894
- 3 N. Park, J. W. Dawson, K. J. Vahala. Multiple wavelength operation of an erbium-doped fiber laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(6): 540~541
- 4 N. Park, P. F. Wysocki. 24-line multiwavelength generation of erbium-doped fiber-ring laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*,

由模式竞争。特别是当抽运功率小于 28 mW 时,虽然输出光谱也有多波长样子,但此时的多波长激光输出功率极不均匀,且极不稳定。原因是此时激光腔内功率太小,非线性偏振旋转效应太弱,EDF 均匀加宽导致的模式竞争仍占主导地位。

最后,对多波长输出的激光光谱进行了多次扫描从而观察其稳定性,在半小时内每隔 5 min 的扫描结果如图 5 所示,图 5(a)是产生 7 个波长时的多次扫描图,图 5(b)是产生 8 个波长时的多次扫描图。波长的最大漂移是 0.05 nm,功率的最大抖动是 0.8 dB,可见基于对称非线性光纤环境室温下产生的多波长输出具有较好的稳定性。

1996, **8**(11): 1459~1461

- 5 T. Morioka, K. Mori, S. Kawanishi *et al.*. Multi-WDM-channel, Gbit/s pulse generation from a single laser source utilizing LD-pumped supercontinuum in optical fibers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(3): 365~367
- 6 K. J. Zhou, D. Y. Zhou, F. Z. Dong *et al.*. Room-temperature multiwavelength erbium-doped fiber ring laser employing sinusoidal phase-modulation feedback [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(11): 893~895
- 7 X. M. Liu, C. Lu. Self-stabilizing effect of four-wave mixing and its applications on multiwavelength erbium-doped fiber lasers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(12): 2541~2543
- 8 Wang Zhaoyin, Hu Zhiyong, Bao Huanming *et al.*. Tunable multi-wavelength fiber laser based on semiconductor optical amplifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(3): 321~324
- 王肇颖,胡智勇,包焕民等. 基于半导体光放大器的可调谐多波长光纤激光器[J]. *光子学报*, 2006, **35**(3): 321~324
- 9 S. Qin, D. R. Chen, Y. B. Tang *et al.*. Stable and uniform multi-wavelength fiber laser based on hybrid Raman and erbium-doped fiber gains[J]. *Opt. Exp.*, 2006, **14**(22): 10522~10527
- 10 G. J. Cowle, D. Y. Stepanov. Hybrid Brillouin/erbium fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(16): 1250~1252
- 11 Wang Pinghe, Liao Xuan, Rao Yunjiang. A novel self-exciting Brillouin erbium-doped fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2200~2204
- 汪平河,廖弦,饶云江. 一种新型自激发布里渊掺铒光纤激光器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2200~2204
- 12 V. J. Matsas, T. P. Newson, D. J. Richardson *et al.*. Self starting passively mode-locked fibre ring soliton laser exploiting nonlinear polarization rotation [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(15): 1391~1393
- 13 Z. X. Zhang, L. Zhan, Y. X. Xia. Multiwavelength comb generation in self-starting passively mode-locked fiber laser[J]. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 2006, **48**(7): 1356~1358