

文章编号: 0258-7025(2009)09-2272-05

基于非线性偏振旋转的可调谐多波长掺铒光纤激光器

徐慧文 杨华 文双春 雷大军 陈勇 张景贵

(湖南大学计算机与通信学院微纳光电子器件教育部重点实验室, 湖南长沙 410082)

摘要 实现了一种基于非线性偏振旋转(NPR)的可调谐多波长掺铒光纤(EDF)激光器。偏振相关隔离器和保偏光纤(PMF)是激光器的关键组件。非线性偏振旋转会引起腔体的自滤波和光强的峰值限制效应,从而能有效地减弱掺铒光纤均匀加宽所造成的强烈模式竞争,形成稳定的常温多波长振荡。腔损耗的色散特性使激光输出波长在 5 nm 内可连续调谐。由于激光腔的自滤波周期由腔内双折射强度决定,也可以通过改变保偏光纤的有效长度来实现。当用两段保偏光纤和偏振控制器组合后,实验中得到了间隔为 0.25 nm 和 0.75 nm 可调谐的稳定多波长振荡。

关键词 光纤激光器;多波长;偏振旋转;调谐

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093609.2272

Tunable Multi-Wavelength Erbium-Doped Fiber Laser Based on Nonlinear Polarization Rotation

Xu Huiwen Yang Hua Wen Shuangchun Lei Dajun Chen Yong Zhang Jinggui

(Key Laboratory of Micro/Nano Optoelectronic Devices of Ministry of Education,

School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract A tunable multi-wavelength erbium-doped fiber (EDF) laser based on nonlinear polarization rotation (NPR) is realized. A polarization-dependent isolator and a polarization-maintained fiber (PMF) are used as key elements of the laser. Both effects of self filtering and peak clamping generated from NPR, effectively alleviating the mode competition resulted from the homogeneous broaden of the EDF, ensure stable multi-wavelength operation at room temperature. The dispersive property of the cavity loss allows the lasing wavelength to be tuned within a range of 5 nm. Wavelength spacing can also be tuned by changing the effective length of PMFs, the period of the self filtering is determined by the birefringence of the cavity. Stable multi-wavelength operation with wavelength spacing of 0.25 nm and 0.75 nm is obtained as two pieces of PMFs and a polarization controller are combined into the cavity.

Key words fiber laser; multi-wavelength; polarization rotation; tuning

1 引言

光纤通信技术的高速发展对通信光源的要求日益提高。由于光纤激光器表现出了低阈值、高效率、窄线宽、可调谐性和高性价比等优点,近年来取得了突飞猛进的发展,成为激光器领域发展最快的技术。波分复用(WDM)技术是目前大容量光纤通信网普

遍采用的技术,为了进一步提高通信容量,波分复用通信系统正朝着信道间隔越来越窄、信道数越来越多的方向发展。目前,波分复用系统采用的最常见的光源是多个单波长激光器的组合,但是只通过增加激光器数量的办法来满足信道数增加的要求,必然使激光器复杂性、系统成本和维护代价大大增加。

收稿日期: 2008-10-01; 收到修改稿日期: 2008-11-29

基金项目: 国家自然科学基金(60538010)资助项目。

作者简介: 徐慧文(1982—),男,博士研究生,主要从事超短脉冲和多波长光纤激光器等方面的研究。

E-mail: xhwth@hotmail.com

导师简介: 文双春(1966—),男,博士,教授,主要从事非线性光学和强激光技术等方面的研究。

E-mail: scwen@vip.sina.com(通信联系人)

因此,大量的注意力被投注到多波长激光器上,且性能稳定性、可调谐性、结构复杂度和成本是衡量多波长光纤激光器的主要标准。

多种不同的增益介质都可以用于制作多波长光纤激光器,包括半导体放大器、拉曼放大器和掺铒光纤放大器。与其他的增益介质相比,掺铒光纤(EDF)具有很多优点,如较高的饱和功率和较平坦的增益谱。然而,掺铒光纤是一种均匀加宽介质,当多波长激光器的输出波长间隔小于增益光纤的均匀加宽线宽时,将导致严重的模式竞争和跳变。因此,要获得稳定的多波长掺铒光纤激光器,关键要抑制或减弱激光器中的增益竞争。Yamashita 等^[1,2]发现可以用液氮冷却的办法来降低掺铒光纤的均匀加宽线宽,同时得到稳定的多波长输出。然而,这种方法的低温要求会限制很多应用。近年来,人们发现基于掺铒光纤与拉曼(或半导体)的混合增益,可以实现激光器在常温下的多波长输出^[3~5]。这是因为掺铒光纤的均匀加宽在增益混合中得到了抑制。光子晶体等高非线性光纤也被用于多波长光纤激光器,因为在该类光纤中产生的四波混频效应可以有效地减弱激光器中的模式竞争^[6~8]。此外,频移器^[9]、非均匀损耗器件^[10]等也可以被用来实现多波长激光器。

本文提出一种基于非线性偏振旋转(NPR)技术的多波长掺铒光纤激光器,结构简单,其中作为关键组件的是一个偏振相关隔离器和几段保偏光纤(PMF)。非线性旋转引起的峰值限制效应^[11]可以有效地抑制激光器的模式竞争,它和激光腔的自滤波^[12,13]共同作用实现了常温下稳定的多波长振荡。利用激光腔损耗的色散特性,通过调节腔内的偏振控制器,激光器的输出波长能在 5 nm 的范围内连续可调。此外,激光器的波长间隔也可以通过改变保偏光纤与偏振控制器的组合方式,改变激光腔中的有效双折射来改变。

2 实验模型和原理

图 1 为基于非线性偏振旋转技术的多波长掺铒光纤激光器的结构示意图,激光器采用环形腔设计。激光器的增益介质是一段 3 m 长的掺铒光纤,一段长 12 m,拍长 3 mm 的保偏光纤用来改变激光腔中

的双折射强度,腔内的其他光纤都采用普通单模光纤,其中一段 10 km 的单模光纤用来增加光纤的非线性偏振旋转。掺铒、保偏和单模光纤在 1550 nm 波长处的色散值分别为 $-10 \text{ ps}^2/\text{km}$, $-18 \text{ ps}^2/\text{km}$ 和 $-18 \text{ ps}^2/\text{km}$ 。激光腔中的偏振态由两个偏振控制器和一个置于其中的偏振相关隔离器一起控制。左侧的偏振控制器由两个 $\lambda/4$ 波片和一个 $\lambda/2$ 波片组成,而右侧的由两个 $\lambda/4$ 波片组成。偏振控制器和偏振相关隔离器都被安装在一个 10 cm 长的光纤台上。激光器由一个输出波长为 980 nm 的半导体激光器通过一个 980 nm/1550 nm 波分复用器进行抽运。此外,一个 10% 的耦合器用来输出激光。

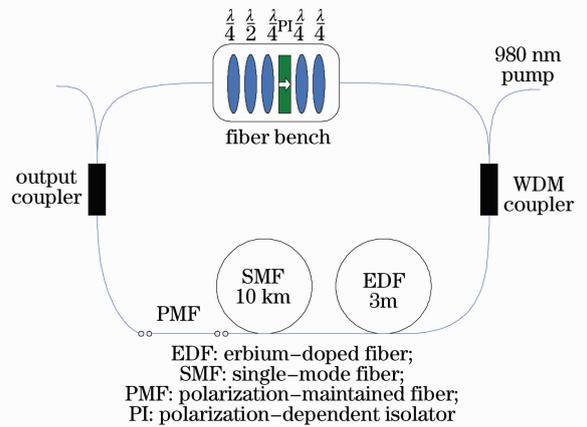


图 1 多波长激光器示意图

Fig. 1 Schematic of the multi-wavelength fiber lasers

非线性偏振旋转是多波长激光器实现的核心技术。简单地说,光在离开隔离器时是线偏振的,而它在激光腔中传输的过程中,受光纤线性、非线性双折射的共同作用而发生偏振旋转,当其再次经过隔离器时,其偏振角度决定了损耗的大小。为了更好地理解此激光器的传输特性,首先对激光在腔中传输一周后的透射系数进行分析。为了便于分析,将图 1 简化为图 2 所示的等效结构。图 2 表示激光从起偏器(偏振相关隔离器)开始,经过偏振控制器和各种双折射光纤后最终到达分析器(偏振相关隔离器)的传输过程。图中 θ 表示起偏器与光纤快轴的夹角,而 φ 则表示分析器与光纤快轴的夹角。在传输过程中,光的偏振态受偏振控制器及双折射光纤的影响而发生旋转,最终的透射率由进入分析器的偏振角度决定。忽略增益的影响,激光器的透射率为^[13]

$$|T|^2 = \sin^2 \theta \sin^2 \phi + \cos^2 \theta \cos^2 \phi + \frac{1}{2} \sin(2\theta) \sin(2\phi) \cos(\Delta\varphi),$$

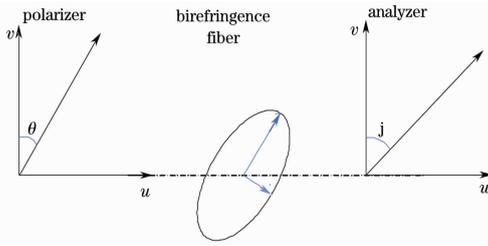


图2 简化的激光腔结构图

Fig. 2 Simplified diagram of the cavity structure

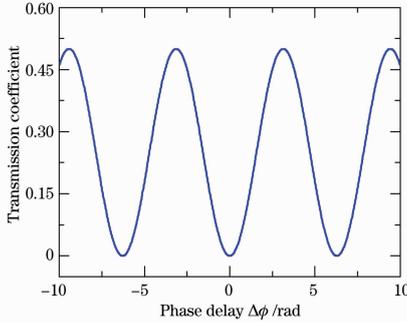


图3 传输系数与总相移延时的对应关系

Fig. 3 Relationship of transmission coefficient and the net phase delay

其中 $\Delta\phi = \Delta\phi_{PC} + \Delta\phi_{LB} + \Delta\phi_{NL}$ 为光在激光腔中传输一周后快轴和慢轴的总相位延时。 $\Delta\phi_{LB} = 2\pi LB_m/\lambda$ ^[14] 和 $\Delta\phi_{NL} = -2\gamma LP \cos(2\theta)/3$ ^[15] 分别表示由光纤线性和非线性双折射引入的相位延时 (L 为光纤长度, B_m 为双折射系数, P 为光强, γ 为非线性系数, λ 为波长), $\Delta\phi_{PC}$ 表示偏振控制器引入的相位延时(可以通过调节偏振控制器改变此延时)。当取典型值 $\theta = \pi/8$ 和 $\phi = \theta + \pi/2$ 时,激光器透射率与总相位延时的对应关系如图3所示。由图3可见,此激光器的透射率是随总相移改变的一条正弦曲线。

事实上,当 θ 和 ϕ 取不同值时,这种正弦关系始终存在,只是透射率的峰值会随之变化而已。

为了更详细地分析此激光腔的传输特性,图4给出了透射率随光功率和波长变化的示意图。可见,透射率随光功率和波长均作正弦型变化。如图4(a)所示,随着光功率的改变,激光腔的透射率变化分为两种情况。当光功率处于范围 I 时,透射率随光功率的增长而增长;相反,当光功率处于 II 时,透射率随光功率的增长而减弱。由此, I, II 分别被称为正、负反馈区域^[11]。假定激光器中有一束光在起振时处于 I 区域,那么由于正反馈区域的特性,这束光将被不断放大。然而,当它的功率被放大到负反馈区域后,持续减弱的透射率(增大的损耗)将减缓激光的放大。当这种放大与损耗最终取得平衡时,这束光的功率将被限定。此时,改变激光器的抽运功率不再对这束光的强度产生很大影响,这就是峰值限制效应^[11]。在多波长激光器中,峰值限制效应限定了单个波长能被放大的功率水平,从而大大减弱了相邻波长之间的强烈模式竞争,使常温下稳定的多波长掺铒光纤激光器的实现成为了可能。要实现多波长激光器,除了增益竞争,另一个需要解决的问题就是如何让激光腔具有梳状滤波的功能。如图4(b)所示,激光腔中透射率正弦型的色散特性正为这种梳状滤波提供了可能。图4(b)中的透射峰之间的波长间隔为 $\Delta\lambda = \lambda^2/(B_m L)$ 。由于单模光纤中的双折射很弱,如果不使用额外的光纤增加双折射强度,波长间隔将宽至几十纳米。因此,我们在激光腔中加入了一段保偏光纤来提供较小的波长间隔。由于保偏光纤的双折射较单模光纤大好几个数量级,在计算波长间隔时,单模光纤的影响常常被忽略。

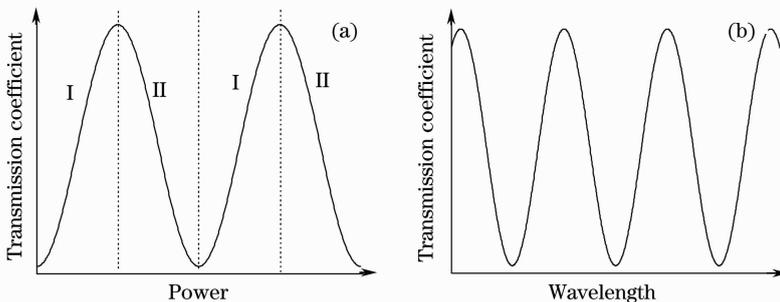


图4 透射率随(a)光功率和(b)波长的变化关系

Fig. 4 Transmissivity as a function of power (a) and wavelength (b)

如前文所述,总相位延时由波长、功率和偏振控制器的角度共同决定。当多波长振荡形成后,调节偏振控制器会使图4(b)中的滤波曲线发生平移,因

此调节偏振控制器能使激光器的输出波长在一定的范围内可调。

3 实验结果

实验中将抽运功率固定在 400 mW, 通过调谐偏振控制器, 很容易得到激光器的多波长输出。典型的激光器输出结果如图 5 中的实线所示。图中 16 个波长以 0.38 nm 为间隔同时振荡。各个波长的功率分布较为平坦, 16 个波长的功率差在 5 dB 以内。激光输出也具有大于 30 dB 的信噪比。

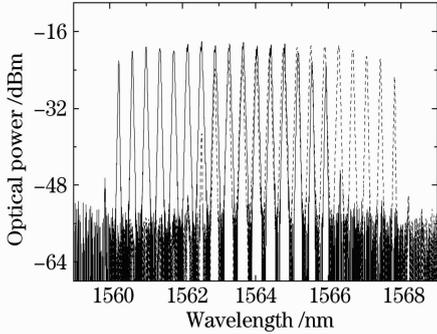


图 5 典型的多波长振荡光谱图

Fig. 5 Typical spectrum of the multi-wavelength lasing

当在激光器工作时调节腔内的偏振控制器, 光谱长波长(短波长)最外侧的波峰逐渐地降低直至消失, 而在短波长(长波长)段出现新的波峰。波长调谐后的典型光谱图见图 5 中的虚线。光谱的中心位置从 1553 nm 被连续调至 1555 nm。实验中, 得到了中心波长从 1550 nm 到 1555 nm 约 5 个 nm 的调谐范围。

使用其他不同长度的保偏光纤进行实验, 发现波长间隔会随保偏光纤的长度不同而发生改变(光纤越长, 波长间隔越小), 这与理论预测一致。然而,

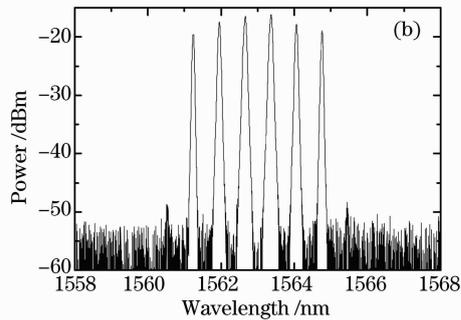
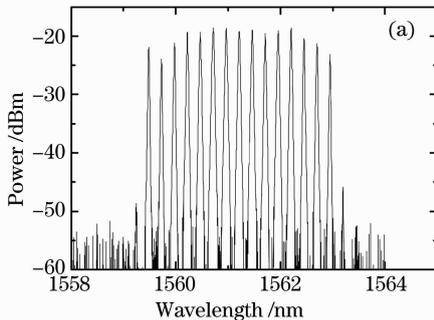


图 7 激光器分别以波长间隔(a)0.25nm 和(b)0.75nm 振荡

Fig. 7 Laser operates with the wavelength spacing of (a) 0.25nm and (b) 0.75nm, respectively

4 结 论

研究了一种基于非线性偏振旋转的常温多波长光纤激光器。激光器具有十分小巧的结构和很好的

如果每次只在激光腔中单独加入一根保偏光纤, 激光器只能以固定的波长间隔振荡。使用如图 6 所示的结构替代单根保偏光纤能使激光器具有波长间隔调谐的能力。此结构由两段保偏光纤和一个偏振控制器组成。通过调节置于两段保偏光纤间的偏振控制器可以改变两段保偏光纤有效长度。具体地说, 偏振控制器可以改变 L_1 和 L_2 光纤主轴间的对应关系。当调节偏振控制器让 L_1 和 L_2 的快轴、快轴都相互对应时, 有效长度为 $L_1 + L_2$; 当 L_1 快轴和 L_2 的慢轴相对应, L_1 的慢轴和 L_2 的快轴相对应时, 有效长度则变为 $L_1 - L_2$ 。由此可见, 调节偏振控制器可以实现保偏光纤有效长度的变化, 从而改变激光器的输出波长间隔。图 7 为当 $L_1 = 12$ m, $L_2 = 6$ m 时实验测得激光器输出光谱图。由图可见, 通过调节偏振控制器, 激光器可以分别以 0.25 nm 和 0.75 nm 的波长间隔稳定运行(与理论预测一致), 其对应的输出功率分别为 -9.4 dBm 和 -9.2 dBm。可见, 通过改变双折射光纤的有效长度可以有效地调节该激光器的波长间隔。因此, 一个可能的改进方法是采用多段保偏光纤和偏振控制器来得到更多的有效光纤长度, 这样激光器的波长间隔就可以在更大的范围内调谐。

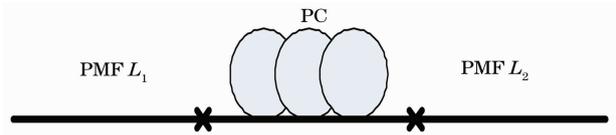


图 6 有效长度可调谐的优化结构

Fig. 6 Improved scheme for tuning the effective length of the fibers

调谐性。由于自滤波效应提供了多波长振荡所必需的梳状滤波作用, 且掺铒光纤中的增益竞争能被峰值限制效应有效抑制, 该激光器在常温下可实现稳

定的多波长振荡。调节腔内的偏振控制器可以使腔体的自滤波范围产生移动,从而实现了激光器的输出波长 5 nm 范围内的连续调谐。此外,通过保偏光纤与偏振控制器的优化组合,可以调谐激光腔中的有效双折射强度,实验中分别得到了波长间隔为 0.25 nm 和 0.75 nm 的多波长稳定输出。

参 考 文 献

- 1 S. Yamashita, K. Hotate. Multiwavelength erbium-doped fibre laser using intracavity etalon and cooled by liquid nitrogen [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(14): 1298~1299
- 2 S. Yamashita, T. Baba. Spasing-tunable multiwavelength fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(16): 1015~1017
- 3 D. Chen, S. Qin, S. He. Channel-spacing-tunable multiwavelength fiber ring laser with hybrid Raman and erbium-doped fiber gains [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(3): 930~935
- 4 Y. G. Han, G. Kim, J. H. Lee *et al.*. Lasing wavelength and spacing switchable multiwavelength fiber laser from 1510 to 1620 nm [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(5): 989~991
- 5 S. Qin, D. Chen, Y. Tang *et al.*. Stable and uniform multiwavelength fiber laser based on hybrid Raman and erbium-doped fiber gains [J]. *Opt. Express*, 2007, **14**(22): 10522~10527
- 6 X. Feng, H. Y. Tam, P. K. A. Wai. Switchable multiwavelength erbium-doped fiber laser with a multimode fiber Bragg grating and photonic crystal fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(9): 1088~1090
- 7 A. Zhang, H. Liu, M. S. Demokan *et al.*. Stable and broad bandwidth multiwavelength fiber ring laser incorporating a highly nonlinear photonic crystal fiber [J]. *IEEE. Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(12): 2535~2537
- 8 X. Liu, X. Yang, F. Lu *et al.*. Stable and uniform dual-wavelength erbium-doped fiber laser based on fiber Bragg gratings and photonic crystal fiber [J]. *Opt. Express*, **13**(1): 142~147
- 9 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
- 10 S. Pan, C. Lou, Y. Gao. Multiwavelength erbium-doped fiber laser based on inhomogeneous loss mechanism by use of a highly nonlinear fiber and a Fabry-Perot filter [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(3): 1113~1118
- 11 D. Y. Tang, L. M. Zhao, B. Zhao *et al.*. Mechanism of multisoliton formation and soliton energy quantization in passively mode-locked fiber lasers [J]. *Phys. Rev. A*, 2005, **72**: 043816
- 12 Y. D. Gong, X. L. Tian, M. Tang *et al.*. Generation of dual wavelength ultrashort pulse outputs from a passive mode locked fiber ring laser [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **265**(2): 628~631
- 13 H. Xu, D. Lei, S. Wen *et al.*. Observation of central wavelength dynamics in erbium-doped fiber ring laser [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(10): 7169~7174
- 14 W. S. Man, H. Y. Tam, M. S. Demokan *et al.*. Mechanism of intrinsic wavelength tuning and sideband asymmetry in a passively mode-locked soliton fiber ring laser [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2000, **17**(1): 28~33
- 15 C. J. Chen, P. K. A. Wai, C. R. Menyuk. Soliton fiber ring laser [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(6): 417~419