

利用非线性偏振旋转效应的可调谐多波长光纤激光器

杨秀峰,董凤娟,童峥嵘,曹 晔

(天津理工大学 智能计算及软件新技术重点实验室 薄膜电子与通信器件重点实验室,天津 300384)

摘 要:提出了一种基于非线性偏振旋转(NPR)效应的可调谐多波长掺铒光纤(EDF)激光器,非线性偏振旋转诱导的强度相关非均匀损耗有效地抑制了均匀加宽增益介质掺铒光纤中的模式竞争,使光纤激光器在室温下产生稳定的多波长输出。其中利用保偏光纤和偏振相关隔离器组成的等效 Lyot 双折射光纤滤波器作为波长选择器件,该滤波器可以通过选择合适的双折射光纤长度改变波长间隔,调节偏振控制器改变偏振态实现对波长的精密调谐。实验采用 10 m 长的保偏光纤(PMF),得到了波长间隔为 0.35 nm、最多 17 个波长的稳定激光输出,并且实现了输出波长在 4 nm 范围内的连续可调谐。分别采用 10:90、30:70 和 50:50 的输出耦合器,激光信号分别从 10%、30%和 50%的端口输出,得到了最多 17、14 和 13 个波长的输出,其波长功率浮动分别为 13 dB、10 dB 和 7 dB,另外,其最大输出功率分别为-7 dBm、-3 dBm 和 0 dBm。实验结果表明,输出耦合器输出端比例越大,输出波长就越少,各波长激光输出功率越平坦,且输出功率越高。

关键词:多波长光纤激光器; 非线性偏振旋转; 双折射光纤滤波器

中图分类号: TN 248.1 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2012)01-0053-05

Tunable multi-wavelength fiber laser based on nonlinear polarization rotation

Yang Xiufeng, Dong Fengjuan, Tong Zhengrong, Cao Ye

(Key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices, Key Laboratory of Intelligent Computing and Novel Software Technology, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: A tunable multi-wavelength erbium-doped fiber laser with up to 17 wavelengths was proposed. The intensity-dependent inhomogeneous loss induced by nonlinear polarization rotation (NPR) was applied to mitigate the mode competition caused by the homogeneous gain medium of erbium-doped fiber. Therefore, stable multi-wavelength output was generated at room temperature. In this experiment, a polarization-maintaining fiber(PMF) with a polarization-dependent isolator was used to form an equivalent Lyot birefringent fiber filter. The wavelength spacing could be altered by selecting proper length of the birefringent fiber. In the meantime, the fine tuning of wavelength could be achieved through adjusting polarization controllers (PC). A 10 m length of PMF was inserted into the laser cavity, which resulted in 17 wavelengths output with 0.35 nm wavelength spacing. In addition, a 4 nm tuning range was realized through PCs' fine tuning. Three different coupling ratio couplers were used. And the laser was output from the small ratio port. The maximum numbers of the output wavelengths were 13, 14 and 17 with 7 dB,

收稿日期:2011-05-22; 修订日期:2011-06-29

基金项目:天津市自然科学基金(08JCYBJC14400)

作者简介:杨秀峰(1964-),女,教授,博士,主要从事慢光、光纤激光器和光传感技术等方面的研究。Email:yangxfbee@163.com

10 dB and 13 dB fluctuation for 50:50, 30:70 and 10:90 couplers, respectively. Besides, the corresponding maximum output power were 0 dBm, -3 dBm and -7 dBm. The results indicate that the output wavelength number is reduced, wavelength spectrum becomes smoother and output power is higher while the output rate of the output coupler is increasing.

Key words: multi-wavelength fiber laser; nonlinear polarization rotation; birefringent fiber filter

0 引言

多波长光纤激光器可同时为光通信系统提供多个信道光源,使发射端的结构简单、紧凑,并且具有线宽窄、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。多波长光纤激光器因在光通信、光传感、光器件的性能测试以及材料的色散测试等领域广泛应用而备受关注^[1-5]。掺铒光纤在 1 550 nm 波段具有很高的增益,对应的低损耗在第三通信窗口,由于其潜在的应用价值,掺铒光纤激光器的发展十分迅速。然而,掺铒光纤的均匀加宽机制可能会导致模式竞争和跳变。为获得稳定的多波长输出,关键是抑制模式竞争。将掺铒光纤浸泡在液氮中虽然能得到多波长输出^[4],但是不能工作在室温下。近年来,已经有多种方法如:引入频移反馈机制^[6]、偏振烧孔^[2]、四波混频效应^[3]等得到多波长输出,但这些方法结构较复杂并且有一定的条件限制。

实验提出了一种非线性偏振旋转效应的多波长掺铒光纤激光器,非线性偏振旋转诱导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,从而使光纤激光器在室温下产生稳定的多波长输出,它的滤波器结构简单,仅由一段保偏光纤和偏振相关隔离器组成,其波长间隔可以通过改变保偏光纤的长度来控制,波长可通过调节偏振控制器来控制。

1 实验结构及原理

图 1 是基于非线性偏振旋转效应的多波长光纤激光器的实验结构。该激光器主要包括掺铒光纤、保偏光纤、偏振控制器和偏振相关隔离器等部分。其中,长度为 11 m、掺杂浓度为 400×10^{-6} 的掺铒光纤(EDF)作为增益介质,长度为 10 m、双折射系数为 5.1×10^{-4} 的保偏光纤(PMF)用来改变腔内的双折射

强度,长度为 3.1 km 的单模光纤则用来增加光纤的非线性偏振旋转效应,两个偏振控制器(PC1 和 PC2)和一个偏振相关隔离器(PDI)用来改变激光腔内的偏振态并且保证激光单向运转。波长为 980 nm 的激光经过 980/1 550 波分复用器(WDM)进入掺铒光纤,激光在环形腔内顺时针单向运转,最后由一个 10:90 的耦合器的 10% 端口输出。

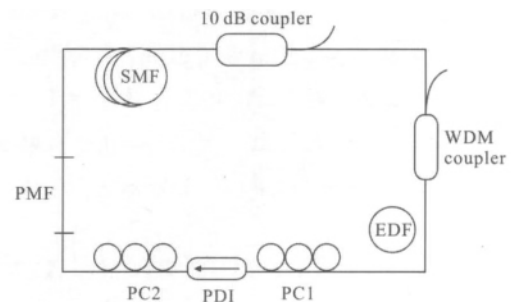


图 1 基于非线性偏振旋转效应的多波长掺铒光纤激光器示意图
Fig.1 Schematic of multi-wavelength erbium-doped fiber laser based on nonlinear polarization rotation

非线性偏振旋转效应是多波长输出的关键。具体地说,从偏振相关隔离器 PDI 输出的光是线偏振光,通过偏振控制器 PC2 的调节成为椭圆偏振光,椭圆偏振光可看作是左、右光强不等圆偏振光的叠加,单模光纤的光克尔效应使得强度不等的左、右圆偏振光经历不等的非线性相移,因此,在单模光纤中,左、右圆偏振光合成的偏振态随着光的传播而发生旋转,并且旋转的角度与光强度有关。当其再次经过隔离器时,通过改变另一个偏振控制器 PC1 可以改变偏振相关隔离器的光强。故由偏振控制器、单模光纤、偏振控制器和起偏器构成的联合体能起到一个强度相关器件的作用^[1,5,7-8]。通常情况下,该联合体的传输和光强关系存在两个不同的区域:(1)传输随光强的增加而增加,被动锁模光纤激光器就是工作在这一区域;(2)传输随光强的增加而减小,即高强度光将经历更大损耗,这时联合体相当于一个功率均衡器,这种强度相关非均匀损耗用来克服均匀加宽

介质中的模式竞争。所以,非线性偏振旋转效应诱导的非均匀损耗和掺铒光纤模式竞争的平衡使得掺铒光纤激光器在室温下产生稳定的多波长输出。

图 2 为双折射滤波器的原理示意图,其传输函

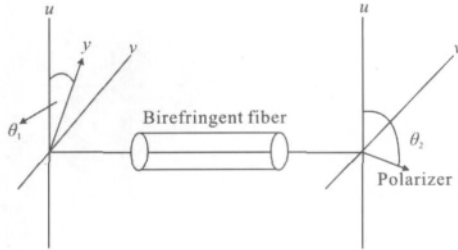


图 2 双折射滤波器示意图

Fig.2 Diagram of the birefringent fiber laser

数为^[8]:

$$|T|^2 = \cos^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2 + \sin^2 \theta_2 \sin^2 \theta_1 + \frac{1}{2} \sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2 \cos(\Delta\phi + \Delta\phi') \quad (1)$$

式中: θ_1 为从偏振相关隔离器输出的光的偏振方向 y 与光纤快轴 u 的夹角; θ_2 为偏振相关隔离器偏振方向与光纤快轴 u 的夹角; $\Delta\phi = \frac{2\gamma L}{3} P \cos(2\theta_1)$, $\Delta\phi' = 2\pi \frac{LB_m}{\lambda}$ 分别表示由光纤非线性和线性双折射引入的相位延时^[9], λ 为光波长, B_m 为双折射系数, P 为光强, L 为光纤长度。结合公式(1)可知,双折射光纤滤波器传输函数是波长和功率的周期函数。

图 3 为根据已知条件得到的传输函数 T 与泵浦功率 P 之间的变化关系曲线。由图 3 可知,传输函数随着抽运功率的变化出现两个不同的变化区域:

区,传输函数随着功率的增加而增加,该区域中,低强度的光被吸收,高强度的光可通过,则输出的多

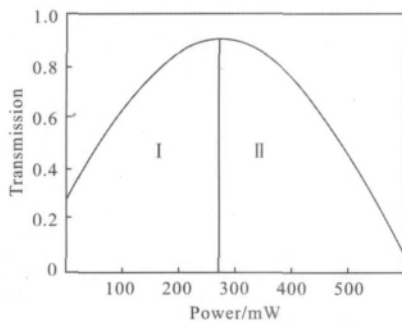


图 3 传输函数与功率的变化关系

Fig.3 Transmission effect as a function of power

波长相对不稳定;区,传输函数随着功率的增加而减少,其原因是非线性偏振旋转效应本身是会饱和的,即当光强大于某一临界值时,激光腔的传输率会随着光强的增大而减小,则该区域的高强度光会经历更大的损耗,因此利用这种非均匀损耗来克服掺铒光纤的均匀加宽,实现稳定的多波长输出^[1,10]。图 4 为传输函数 T 与波长 λ 和抽运功率 P 变化关系的三维图像(其中 $\theta_1 = \pi/8$, $\theta_2 = \theta_1 + \pi/2$)。可以看出实际情况下传输函数与波长 λ 和泵浦功率 P 的变化关系:传输函数在波长变化的情况下随着泵浦功率的增加而增加,并且传输函数达不到 1。

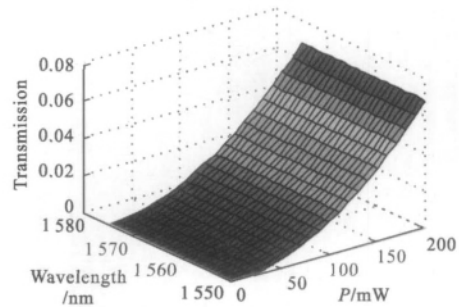


图 4 传输函数与波长和功率的变化关系

Fig.4 Transmission effects as a function of power and wavelength

2 实验结果

实验中将两个偏振控制器固定,以减少外界环境对它的影响。采用最小分辨率为 0.07 nm 的光谱仪测量激光器输出。当输出耦合器的耦合比为 10:90 时,慢慢增大抽运功率,当抽运功率为 10 mW 时已经有多波长出现,如图 5(a)中 4 个波长的输出,多波长的产生是非线性偏振旋转效应诱导的强度相关损耗抑制腔内模式竞争的结果。按照激光振荡理论,一个带有多波长滤波器的环形激光器可以同时有多个波长满足振荡条件而起振,但由于增益介质掺铒光纤的均匀展宽性质,如果没有引入其他非均匀损耗效应来抑制多波长激光间的强烈竞争,就不会得到稳定的多波长输出。而此激光器内有非线性偏振旋转效应导致的强度相关损耗,即如果自由振荡波长的激光功率大于非线性偏振旋转饱和功率,它在激光腔内的损耗将随着功率的增大而加大,这可以抑制腔内的自由模式竞争,从而产生稳定的多波长输出。将抽运功率固定在 10 mW,仔细调节两个偏振控

制器,能得到不同位置 3 个波长的输出,如图 5(b)所示,但其多波长光谱极不均匀且输出功率很低,在 -14 dBm 左右;继续增加抽运功率,输出波长数逐渐增加且输出功率也逐渐增大,与此同时,波长平坦性有一定的提高,为当抽运功率为 180 mW 时,在输出端可以得到 17 个稳定波长,输出功率达到了 -7 dBm,并且波长浮动为 -13 dB,如图 6(a)所示;此时将功率固定在 180 mW,调节偏振控制器可实现中心波长 $1567\sim 1571$ nm 的调谐范围,如图 6(b)所示。

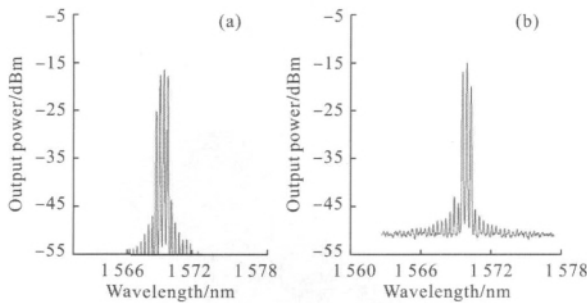


图 5 输出耦合器为 10:90、 $P=10$ mW 时,不同波长的输出
Fig.5 Multi-wavelength output with output coupler of 10:90 and pump power of 10 mW

由图 5 和图 6 可知,采用 10:90 的耦合器在较高的抽运功率下能得到超过 15 个的输出波长,但其光谱均匀性仍然不高,并且随着抽运功率的不断增大,输出功率只有一定程度的提高,其原因是大部分功率都在环形腔里以增大非线性偏振旋转效应,得到更多的输出波长,因此损耗了大部分功率,使得输出波长的功率和均匀性都得不到提高。为了得到更符合要求的输出波长,采用 50:50 和 30:70 (其中 30%作为输出端)的耦合器取代图 1 的 10:90 的耦合器。图 7 为接入 50:50 耦合器,在抽运功率为 180 mW 时输出波长为 13 的输出波形。可以看出,其输出功率已接近 0 dBm 并且光谱非常均匀(其波长浮动为 7 dB)。图 8 为采用 30%作为输出端的 30:70 的输出耦合器,抽运功率同样为 180 mW 时输出波长为 14 的输出波形,其输出功率约为 -3 dBm,光谱比较均匀(其波长浮动为 10 dB)。可以看出,其输出功率和输出光谱均匀性介于 10%和 50%输出耦合器的输出波形图之间,达到预期的结果。由此可知,用 50%的耦合器进行波长输出时的输出功率最大、稳定性最好(图 6~图 8 显示 10:90 耦合器输出 17 个波长的

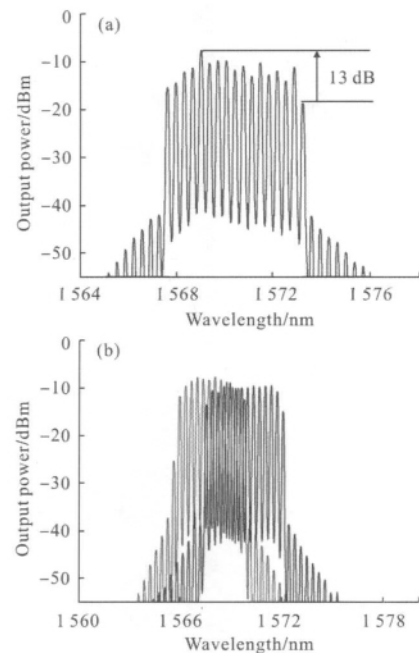


图 6 输出耦合器为 10:90、 $P=180$ mW 时 17 个波长的输出及中心波长的漂移

Fig.6 Seventeen-line multi-wavelength output and drift of center wavelength when the 10:90 coupler was put in and pump power equaled to 180 mW

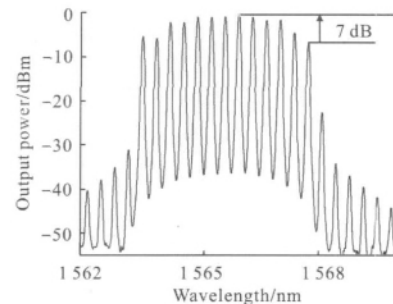


图 7 输出耦合器为 50:50、 $P=180$ mW 时 13 波长输出
Fig.7 13-wavelength operation with a 50% output coupler when pump power is 180 mW

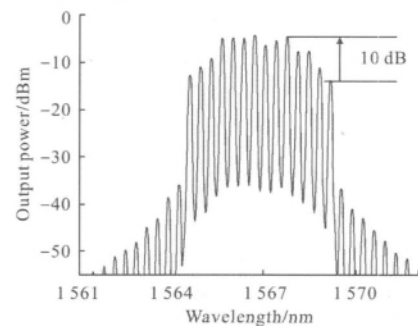


图 8 14 波长输出(输出耦合器为 3:7, 30%为输出端, $P=180$ mW)
Fig.8 14-wavelength operation with a 30% output coupler when pump power is 180 mW

功率差为 13 dB 左右,而 3 dB 耦合输出的 12 波长功率差为 7 dB 左右,30:70 耦合器输出 14 波长的功率浮动为 10 dB 左右),但输出波长数相对较少,原因是激光腔内功率相对减少,因此,使得非线性偏转效应相对减弱,输出波长变少。

3 结 论

提出并分析了一种基于非线性偏振旋转效应多波长光纤激光器的结构和实验结果。这种激光器结构简单,仅采用一段保偏光纤和偏振相关隔离器就能组成光纤滤波器,其波长间隔可通过改变保偏光纤的长度而改变,波长可通过调节偏振控制器来调谐。采用 10% 端口作为输出端的 10:90 耦合器,抽运功率为 170 mW 时,在室温下实现了最多 17 个波长的输出并且波长在 4 nm 范围内可调,其最大输出功率和波长功率差分别为 -7 dBm 和 13 dB。另外,用 50:50 和 30:70 (30% 作为输出端) 取代系统中的 10:90 的耦合器分别得到了最多 13 和 14 个波长的输出,其波长功率变化分别为 7 dB 和 10 dB,且最大输出功率为 0 dBm 和 -3 dBm。结果表明:用于输出端的比例越小,得到的波长越多,但波长浮动太大、稳定性不高,且输出功率也不高。

多波长光纤激光器在光通信及传感等重要领域有非常广泛的应用,并且随着现代通信的发展,人们对通信的要求也越来越高;因此,研究多波长光纤激光器为光通信系统提供多个信道光源以减少系统成本和复杂程度有非常重要的意义。

参考文献:

- [1] Zhang Zuxing, Sang Minghuang, Ye Zhiqing, et al. Multi-wavelength fiber laser based on nonlinear polarization rotation.[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(4): 648-652. (in Chinese)
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*, 2008, 28(4): 648-652.
- [2] Sun J, Qiu J, Huang D. Multi-wavelength erbium-doped fiber lasers exploiting polarization hole burning [J]. *Opt Commun*, 2000, 182(123): 193-197.
- [3] Han Y G, Tran T V A, Lee S B. Wavelength spacing tunable multi-wavelength erbium-doped fiber laser based on four-wave mixing of dispersion-shift fiber[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(6): 697-699.
- [4] Gao Xuesong, Gao Chunqing, Song Xueyong, et al. Theoretical analysis and experimental study of output characteristics of Er³⁺ doped ring cavity fiber laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(5): 573-578. (in Chinese)
高雪松, 高春清, 宋学勇, 等. 环形掺 Er³⁺ 光纤激光器输出特性分析与实验研究 [J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(5): 573-578.
- [5] Lou Qihong, He Bing, Zhou Jun. Fiber lasers and it's coherent beam combination[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(2): 155-159. (in Chinese)
楼祺洪, 何兵, 周军. 光纤激光器及其相干光束 [J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(2): 155-159.
- [6] Zhou K, Zhou D, Dong F, et al. Room-temperature multi-wavelength erbium-doped fiber ring laser employing sinusoidal phase-modulation feedback [J]. *Opt Lett*, 2003, 28(11): 893-895
- [7] Matsas V J, Newson T P, Richardson D J, et al. Self starting passively mode-locked fiber ring soliton laser exploiting nonlinear polarization rotation [J]. *Electron Lett*, 1992, 28(15): 1391-1393.
- [8] Zhang Z X, Ye Z Q, Xu Kun, et al. Tunable nonlinear-polarization-rotation based on multi-wavelength fiber laser with in-line fiber filter [C]// *Optical Fiber Communication & Optoelectronic Exposition & Conference*, 2008.
- [9] Man W S, Tam H Y, Demokan M S, 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.
- [10] Xu Huiwen, Yang Hua, Wen Shuangchun, et al. Tunable multi-wavelength erbium-doped fiber laser based on nonlinear polarization rotation [J]. *Chin J Lasers*, 2009, 36(9): 2272-2276. (in Chinese)
徐慧文, 杨华, 文双春, 等. 基于非线性偏振旋转的可调谐多波长掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, 36(9): 2272-2276.