

# 全光纤偏振输出锁模光纤激光器

董自凯, 徐润亲, 田金荣, 宋晏蓉

北京工业大学应用数理学院, 北京 100124

**摘要** 提出了一种全光纤偏振输出锁模光纤激光器。在谐振腔内无滤波器件时,利用光纤偏振分束器的偏振输出和光纤的双折射偏振滤波效应在全正色散域获得稳定的锁模脉冲序列,脉冲重复频率为 2.2 MHz,单脉冲能量达 100 nJ。利用级联偏振控制器调节腔内偏振状态,获得了单波长和双波长锁模输出,在 1  $\mu\text{m}$  波段观测到了稳定的暗孤子脉冲,腔内偏振态的演变是获得不同锁模状态的关键性因素。双波长锁模输出状态下的波长可调谐宽度达 12 nm,利用系统透过率函数理论分析了利用腔内偏振调节实现波长调谐的原理。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 掺镱激光器; 锁模激光器

**中图分类号** TN248.1; O437 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.081404

## All-Fiber Based Mode-Locked Fiber Laser with Polarization Output

Dong Zikai, Xu Runqin, Tian Jinrong, Song Yanrong

College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

**Abstract** An all-fiber based polarization output mode-locked laser is proposed. Without a band-pass filter in the oscillator, stable mode-locked pulse train in the all-normal dispersion region is obtained when the polarization output of fiber polarization splitter and the birefringence filtering effect of fiber are used. The repetition rate of pulse is 2.2 MHz and the single pulse energy is 100 nJ. The single-wavelength and dual-wavelength mode-locked output are experimentally obtained when we adjust the intra-cavity polarization by an in-line polarization controller, and the stable dark soliton pulse is observed at 1  $\mu\text{m}$ . The evolution of the intra-cavity polarization is the key to obtain different mode-locked states. Under the dual-wavelength mode-locked state, the wavelength tunable width can reach 12 nm. The system transmission function is used to theoretically analysis the principle of wavelength tuning based on intra-cavity polarization controlling.

**Key words** lasers; fiber laser; Yb-doped laser; mode-locked laser

**OCIS codes** 140.3510; 140.3615; 140.4050; 140.3600

## 1 引言

被动锁模光纤激光器的锁模技术可分为非线性偏转(NPR)锁模、非线性光环形镜(NOLM)锁模以及可饱和吸收体(SA)锁模等,这些锁模技术已受到广泛的关注和研究<sup>[1-5]</sup>。被动锁模光纤激光器中激光传输介质光纤(非保偏光纤)引起的非线性偏转效应存在于各类锁模光纤激光器中,因此,对非线性偏转锁模光纤激光器的锁模特性的研究是非常有必要的<sup>[6-8]</sup>。在不同色散域,基于非线性偏转效应的锁模原理不同:在反常色散域,锁模的形成是由于色散效应和非线性效应的平衡;在全正色散域,色散效应和非线性效应都会使脉冲展宽而不能形成稳定的锁模脉冲,此时增益和损耗的平衡会形成稳定的耗散系统,此系统形成的脉冲称为耗散孤子<sup>[9-12]</sup>。2006年,Chong等<sup>[10]</sup>在腔内引入滤波装置,实现了全正色散域的耗散孤子输出,其谐振腔内

收稿日期: 2017-03-06; 收到修改稿日期: 2017-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(61575011)

作者简介: 董自凯(1990—),男,硕士研究生,主要从事超快光纤激光器方面的研究。E-mail: adongzikai7@126.com

导师简介: 宋晏蓉(1964—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事超快光纤激光器/光纤器件以及新型光泵半导体激光器方面的研究。E-mail: yrsong@bjut.edu.cn(通信联系人)

NPR 锁模部分为空间结构,利用波片调节腔内偏振状态,利用滤波片调制输出光谱和窄化脉冲,空间偏振分束器(PBS)作为起偏和输出器件,可使不同偏振调制转换为强度调制而形成稳定的耗散系统。2010年,Zhao等<sup>[13]</sup>在全正色散域腔内无滤波器件条件下,利用光纤的双折射效应和起偏器实现了耗散孤子输出。2012年,Zhang等<sup>[14-15]</sup>在掺镱(Yb)被动锁模光纤激光器上实现了单波长和双波长锁模脉冲输出。2013年,Xiao等<sup>[16]</sup>利用掺Yb非线性偏转锁模光纤激光器在不同腔长条件下获得了不同调谐范围的锁模脉冲输出,并分析总结了掺Yb光纤激光器的调谐规律,但实验中仍采用了空间结构的锁模器件。对掺Yb被动锁模光纤激光器而言,Yb离子的宽增益谱使其在波长调谐方面具有一定的优势<sup>[17-20]</sup>。2014年,Luo等<sup>[17]</sup>从理论上解释了耗散孤子光谱输出特性与腔内偏振态的关系,光纤偏振滤波效应是调制激光净增益光谱形状和透过率的主要原因。暗孤子脉冲与亮孤子脉冲不同,暗孤子脉冲在通信波段有着比亮孤子更高的稳定性,因而被广泛关注。2015年,Li等<sup>[21]</sup>在 $1\mu\text{m}$ 波段获得了暗孤子脉冲输出,利用光纤PBS对暗孤子脉冲进行偏振分束,分析了亮、暗孤子脉冲的输出特性。2016年,Liu等<sup>[22]</sup>利用二硫化钨( $\text{WS}_2$ )二维材料,并基于NPR锁模技术,在 $1.5\mu\text{m}$ 波段获得了暗孤子锁模脉冲。2016年,Guo等<sup>[23]</sup>利用全光纤NPR锁模结构进行了仿真,结果表明当单腔内饱和吸收体切换为反饱和吸收体时,激光器输出将由亮孤子切换为暗孤子,实验中可通过控制NPR锁模结构的线性相移量对该现象进行验证。

利用光纤PBS替换空间PBS,在实际无滤波器件的条件下,利用长腔在全正色散域获得了稳定的锁模脉冲输出。通过调节腔内偏振状态,分别实现了单波长、双波长以及暗孤子脉冲的锁模输出。在双波长锁模条件下,获得了波长可调谐的锁模脉冲输出,波长调谐宽度为 $12\text{ nm}$ ,双波长锁模脉冲宽度为 $15\text{ ns}$ ,单脉冲能量达 $100\text{ nJ}$ ,信噪比为 $73\text{ dB}$ 。通过大幅度调节腔内偏振态,获得了中心波长为 $1080\text{ nm}$ 的单波长输出光谱。理论分析了通过调节腔内偏振实现锁模的机理以及波长调谐的原理。

## 2 实验研究

### 2.1 实验装置

图1为全光纤NPR锁模激光器实验装置图。半导体抽运源的最大输出功率为 $600\text{ mW}$ ,中心波长为 $976\text{ nm}$ ,经波分复用器(FWDM)为激光器提供抽运光。增益光纤为掺Yb光纤(YDF-LEIKKI),长度约为 $23\text{ cm}$ ,系统中除光纤PBS的输出尾纤为保偏光纤(PM980)外,腔内其余光纤均为单模光纤(HI1060),光纤总腔长约为 $92\text{ m}$ 。腔内无反常色散元件,因此激光器工作在全正色散域。偏振无关隔离器(PI-ISO)可确保激光单向传输,挤压式偏振控制器(PC1)和三环式偏振控制器(PC2)用以调节腔内偏振状态,光纤PBS作为起偏和激光输出器件。单模光纤(SMF)的长度约为 $90\text{ m}$ 。

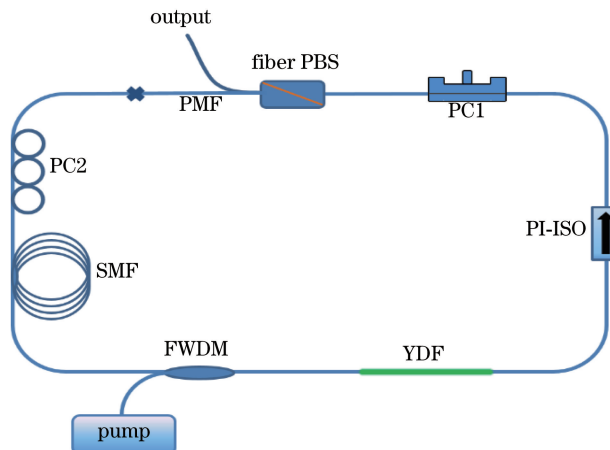


图1 全光纤NPR锁模激光器实验装置

Fig. 1 Experimental setup of all-fiber based NPR mode-locked laser

### 2.2 实验结果及分析

通过调节偏振控制器可获得稳定的锁模脉冲序列,抽运阈值为 $80\text{ mW}$ 。图2为抽运功率为 $300\text{ mW}$ 时

双波长锁模输出的脉冲和射频频谱。通过调节偏振控制器,可形成稳定锁模状态的双波长光谱,该光谱在时域上为单脉冲结构,重复频率为 2.2 MHz,信噪比为 73 dB,在中心频率两侧未观测到其他频率成分,如图 2 (a)所示。图 2(b)所示的射频频谱为双光谱结构,为同一时域的脉冲包络。从另一角度考虑,在全正色散域激光器腔长达 92 m,腔内净色散量约为  $2.05 \text{ ps}^2$ ,脉冲宽度为 15 ns,脉冲含有很大的正啁啾,光谱中不同波长的走离程度远小于脉冲的持续时间,因此可认为双波长的锁模为同一时域脉冲结构<sup>[24]</sup>。

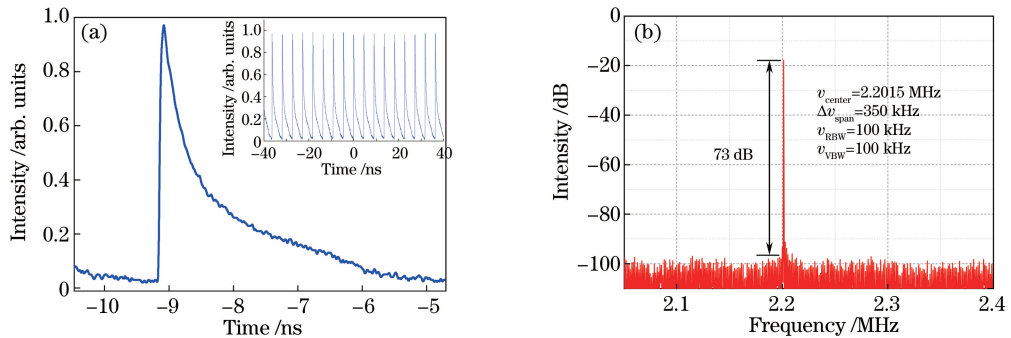


图 2 抽运功率为 300 mW 时,双波长锁模输出的(a)脉冲和(b)射频频谱

Fig. 2 (a) Pulse and (b) radio frequency spectrum of dual-wavelength mode-locked output with pump power of 300 mW

在形成稳定双波长锁模脉冲的条件下,继续调节偏振控制器 PC2,可获得波长可调的锁模光谱。图 3 为抽运功率为 300 mW 时获得的双波长可调谐锁模光谱,长波长波段的中心波长调谐范围为  $1083.6 \sim 1095.6 \text{ nm}$ ,调谐带宽为 12 nm,并且调谐过程可重复。继续调节 PC2,当中心波长大于 1095.6 nm 时,系统失锁,无法获得稳定的锁模脉冲。由图 3 可知,在失锁临界状态下,两个中心波长间的光谱出现明显的调制现象,如图 3 插图 I 所示。将光谱分辨率从 2 nm 提高到 0.1 nm,在其他调谐波长处未发现调制现象。出现该现象的原因可能是:随着可调谐光谱整体向长波方向漂移,短波长波段的光谱部分能量提高,当短波长波段峰值功率达到拉曼阈值时,产生 1080 nm 的拉曼光,此部分拉曼光与激光脉冲中的固有长波长部分相干叠加,因此出现了图 3 插图 II 中的调制现象。

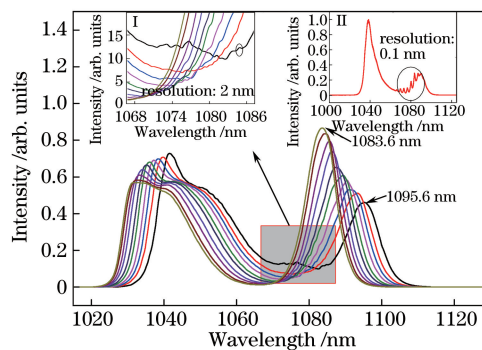


图 3 抽运为 300 mW 时双波长可调谐锁模光谱(插图 I 为局部放大图,插图 II 为 0.1 nm 分辨率条件下的光谱调制现象)

Fig. 3 Dual-wavelength tunable mode-locked spectra when pump power is 300 mW

(Insert I is partial enlarged detail, and insert II is spectral modulation under 0.1 nm resolution)

通过调节偏振控制器 PC1 和 PC2,获得了 1080 nm 单波长锁模状态,单波长锁模脉冲和光谱如图 4 所示。利用级联偏振控制器对偏振滤波效应进行调制,通过调节偏振,对透过率和中心透过率波长进行选择,利用两个偏振控制器的共同作用抑制 Yb 离子在 1030 nm 的增益光谱,输出 1080 nm 波段的锁模光谱。图 5 为单波长和双波长锁模的输出功率,可以看出 1080 nm 单波长锁模输出功率低于双波长锁模输出功率。在稳定双波长锁模状态下,在最大抽运功率时可获得 226 mW 的平均功率输出;在最大抽运功率时,单波长锁模平均输出功率为 100 mW,单脉冲能量最大为 44.2 nJ,偏振选择输出使大部分功率留在腔内运转。

图 6(a)为实验测得的暗孤子脉冲序列,图 6(b)为相应的射频频谱,实验测得输出信噪比为 50 dB。由图 6(b)可以看出射频频谱中明显存在频率噪声,这是由于暗孤子脉冲的能量占比很低,大部分为连续光,而这些连续光成分影响射频频谱的测量。

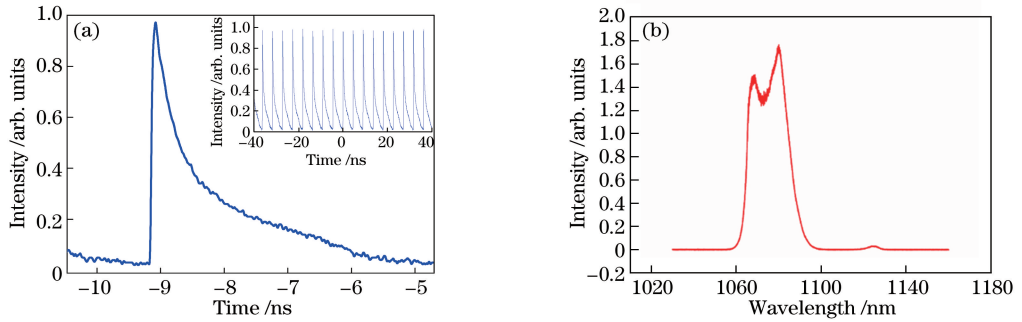


图 4 抽运功率为 300 mW 时,单波长锁模输出的(a)脉冲和(b)光谱

Fig. 4 (a) Pulse and (b) spectrum of single-wavelength mode-locked output when pump power is 300 mW

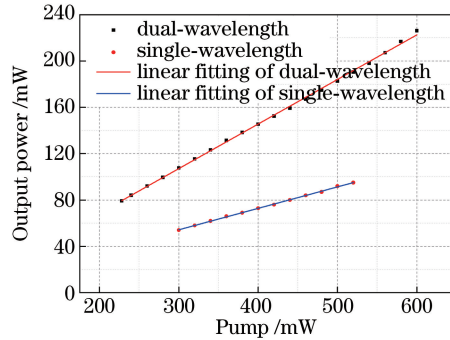


图 5 单波长和双波长锁模的输出功率

Fig. 5 Single-wavelength and dual-wavelength mode-locked output power

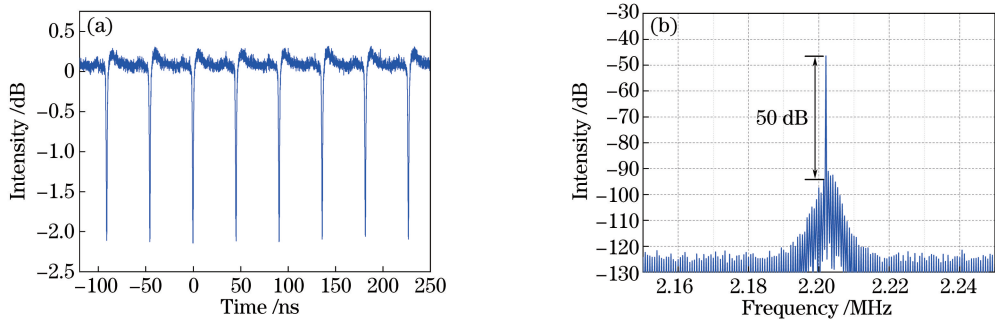


图 6 (a)暗孤子脉冲序列;(b)射频频谱

Fig. 6 (a) Dark soliton pulse train; (b) radio frequency spectrum

### 2.3 波长调谐理论分析

综合考虑腔内偏振滤波效应和 Yb 的增益谱,这里采用简化的模型解释光谱的可调谐过程<sup>[25-26]</sup>。

对于 NPR 锁模光纤激光器,NPR 等效于腔内的一个可饱和吸收体(即人造可饱和吸收体 ASA)。与新型可饱和吸收体(如碳纳米管、石墨烯和 WS<sub>2</sub> 等)不同,ASA 的调制深度可通过调节腔内偏振状态来改变。基于简化的 NPR 锁模腔,通过透过率方程讨论腔内偏振器的偏振参数对 ASA 的调制深度以及腔内滤波的影响<sup>[20,24]</sup>。在实际调节偏振控制器的过程中,激光的透过率和不同波长的透过率都会随偏振态的变化而变化,模拟结果可以很好地与实验结果相对应。

NPR 锁模激光器的简化模型如图 7 所示,其中包含一段双折射光纤,双折射光纤的正交轴如图 7 中  $x$ 、 $y$  轴所示,在双折射光纤前放置等效偏振控制器件(PC),在双折射光纤后放置检偏器件。假设 PC 的快轴与  $x$  轴的夹角为  $\theta$ ,检偏器件的快轴与  $x$  轴的夹角为  $\varphi$ ,则简化腔的透过率方程为

$$T = \sin^2 \theta \sin^2 \varphi + \cos^2 \theta \cos^2 \varphi + \frac{1}{2} \sin 2\theta \sin 2\varphi \cos(\phi_l + \phi_{nl}), \quad (1)$$

式中  $T$  为系统透过率, $\phi_l$  为系统总的线性相移量, $\phi_{nl}$  为系统的非线性相移量。影响线性相移量  $\phi_l$  的参数主

要包括:1) 腔内不同元器件本身固有的线性相移量(CLPDB),如隔离器的线性相移量等,特定激光器中腔固有的线性相移量的值是固定的;2) 腔内偏振器件对相移量的调制作用,实验中 PC 主要用于调制此部分变量;3) 双折射光纤对线性相移量的调制作用。实验参数为:中心波长  $\lambda_c = 1040$  nm,透过率的波长调节范围  $\Delta\lambda$  为1010~1110 nm,激光器腔长  $L = 92$  m,  $L_b$  为光纤的拍长,实验中光纤激光器所用光纤为商用单模光纤(HI1060),其折射率差为  $10^{-7}$ ,拍长  $L_b = 3.9$  m。模拟时假设不同光纤部分的轴均沿图 7 所示的正交偏振轴,则线性相移量  $\phi_1$  为

$$\phi_1 = \phi_{\text{CLPDB}} + \phi_{\text{PC}} + 2\pi\left(1 - \frac{\Delta\lambda}{\lambda_c}\right)\frac{L}{L_b}, \quad (2)$$

式中  $\phi_{\text{CLPDB}}$  为腔固有的线性相移量,  $\phi_{\text{PC}}$  为腔内可调的线性相移量。非线性相移量  $\phi_{\text{nl}}$  为

$$\phi_{\text{nl}} = \frac{2\gamma L}{3}P \cos 2\theta, \quad (3)$$

式中  $\gamma$  为光纤非线性系数,  $P$  为腔内功率。这里通过模拟和实验分析相同功率下不同偏振状态对系统透过率以及波长调谐的影响,因此模拟和实验的前提是功率一定,设定  $\phi_{\text{nl}}$  为定值。

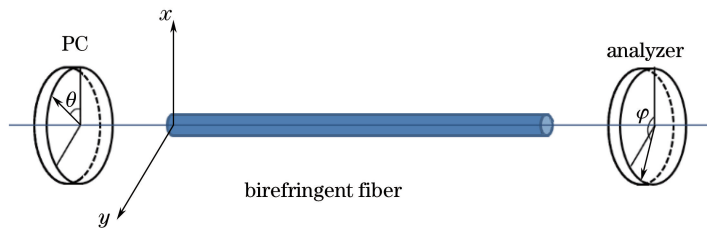


图 7 NPR 锁模激光器的简化模型

Fig. 7 Simplified model of NPR mode-locked laser

图 8 为双波长连续激光的光谱,可以看出在连续运转时通过调节偏振控制器可得到双波长输出,这是偏振滤波作用的结果。实验中调节偏振控制器时,两波长的相对强度以及滤波波长都会变化。在 NPR 锁模激光器简化模型中,系统的透过率取决于起偏器和检偏器的夹角  $\Delta\theta$  ( $\Delta\theta = \theta - \varphi$ ),图 9 为  $\Delta\theta$  取不同值时的透过率。可以看出系统的透过率是周期性变化的,透过率会随偏振态的夹角  $\Delta\theta$  的变化而变化;当  $\Delta\theta = \pi/2$  时出现消光现象,继续增加  $\Delta\theta$ ,系统的透过率会随之增加。实验中,在调节偏振器时,可观察到相对光强的变化。调节中心波长和系统透过率,当腔内偏振状态满足系统自洽时,在 Yb 增益谱的中心波长处具有持续的增益,从而建立锁模状态。

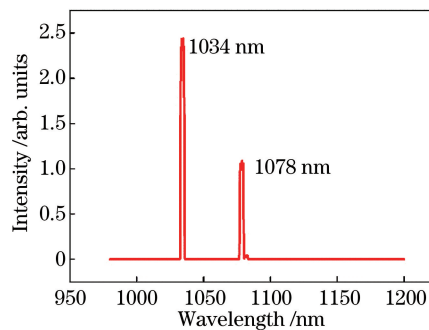


图 8 双波长连续激光的光谱

Fig. 8 Spectrum of dual-wavelength continuous wave laser

在锁模状态建立后,通过继续调节偏振控制器 PC2,可得到波长可调谐的锁模状态。在 NPR 锁模激光器简化模型中,通过改变 PC 的角度  $\theta$ ,周期性滤波的中心波长会随  $\theta$  的变化而变化,  $\theta$  值可在  $1.1\pi \sim 1.9\pi$  范围内变化,中心透过率波长在 1030~1045 nm 范围内变化,模拟的波长透过率如图 10 所示。图 10 中 Yb 增益曲线为激光器中增益光纤的实际增益谱,由于 Yb 在 1090 nm 仍有增益,周期性透过率曲线在 1090 nm 处也会出现对应的增益峰,该增益峰是光纤偏振滤波效应和 Yb 增益谱共同作用的结果。图 10 所示的实际增益谱与图 3 的测量结果相符,可以解释实验中出现双波长锁模的原因。

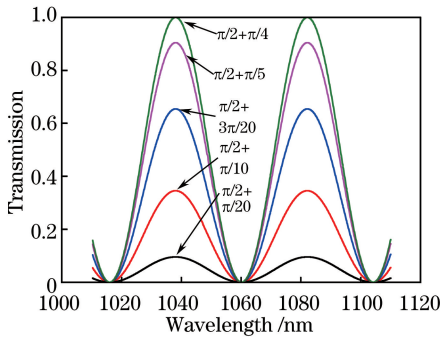
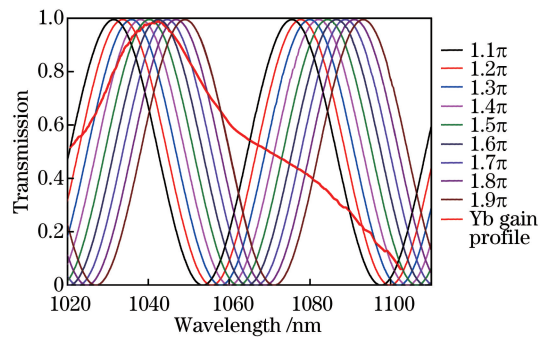
图9  $\Delta\theta$  取不同值时的透射率Fig. 9 Transmission under different  $\Delta\theta$ 

图10 模拟的波长透射率曲线

Fig. 10 Simulated wavelength transmission curves

### 3 结 论

搭建了一台全光纤偏振输出锁模光纤激光器。利用光纤偏振分束器作为起偏和输出器件,谐振腔内无滤波器件,利用起偏器的偏振输出损耗和双折射光纤的偏振滤波效应在全正色散域实现了稳定的锁模脉冲输出,重复频率为 2.2 MHz,单脉冲能量达 100 nJ。实验上分别实现了单波长和双波长锁模输出,在双波长输出状态下波长可调谐范围达到 12 nm。理论分析了通过调节腔内偏振实现锁模的机理以及波长可调谐的原理。通过调节腔内偏振状态,在 1  $\mu\text{m}$  波段获得了稳定的暗孤子脉冲。腔内偏振态的演变是获得不同锁模脉冲状态的关键因素。

### 参 考 文 献

- [1] Luo A P, Luo Z C, Liu H, *et al.* Noise-like pulse trapping in a figure-eight fiber laser[J]. *Optics Express*, 2015, 23(8): 10421-10427.
- [2] Jeong Y, Vazquez-Zuniga L A, Lee S, *et al.* On the formation of noise-like pulses in fiber ring cavity configurations [J]. *Optical Fiber Technology*, 2014, 20(6): 575-592.
- [3] Kharenko D S, Shtyrina O V, Yarutkina I A, *et al.* Generation and scaling of highly-chirped dissipative solitons in an Yb-doped fiber laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2012, 9(9): 662-668.
- [4] Kong L J, Xiao X S, Yang C X, *et al.* All-normal-dispersion Yb-doped mode-locked fibre laser and its stability analysis [J]. *Chinese Physics B* 2010, 19(7): 074212.
- [5] Zhao Hui, Chai Lu, Ouyang Chunmei, *et al.* A long-cavity all-normal-dispersion mode-locked Yb-doped fiber laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(12): 2958-2963.  
赵 慧, 柴 路, 欧阳春梅, 等. 长腔全正色散锁模掺镱光纤激光器[J]. *中国激光*, 2010, 37(12): 2958-2963.
- [6] Xu Runqin, Li Kexuan, Fang Xiaohui, *et al.* All normal-dispersion Yb-doped mode-locked fiber laser and amplifier[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(9): 091401.  
徐润亲, 李克轩, 方晓慧, 等. 全正色散掺镱锁模光纤激光器及放大器[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(9): 091401.
- [7] Jia Haotian, Wang Junli, Teng Hao, *et al.* Sub-picosecond L-band erbium-doped all fiber mode-locked laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(11): 1101008.  
贾浩天, 王军利, 滕 浩, 等. 亚皮秒 L 波段掺铒全光纤锁模激光器[J]. *中国激光*, 2016, 43(11): 1101008.
- [8] Li Yao, Ji Rongyi, Shi Junkai, *et al.* Bidirectional hybrid mode-locking erbium-doped fiber laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(12): 1201002.  
黎 尧, 纪荣祎, 石俊凯, 等. 双向运转混合锁模掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1201002.
- [9] Grellu P, Akhmediev N. Dissipative solitons for mode-locked lasers[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(2): 84-92.
- [10] Chong A, Buckley J, Renninger W, *et al.* All-normal-dispersion femtosecond fiber laser[J]. *Optics Express*, 2006, 14(21): 10095-10100.
- [11] Zhao L M, Tang D Y, Wu J. Gain-guided soliton in a positive group-dispersion fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2006, 31

- (12): 1788-1790.
- [12] Zhao L M, Lu C, Tam H Y, *et al.* Gain dispersion for dissipative soliton generation in all-normal-dispersion fiber lasers [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(27): 5131-5137.
- [13] Zhao L M, Tang D Y, Wu X, *et al.* Dissipative soliton generation in Yb-fiber laser with an invisible intracavity bandpass filter[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(16): 2756-2758.
- [14] Zhang Z X, Xu Z W, Zhang L. Tunable and switchable dual-wavelength dissipative soliton generation in an all-normal-dispersion Yb-doped fiber laser with birefringence fiber filter[J]. *Optics Express*, 2012, 20(24): 26736-26742.
- [15] Lin H Q, Guo C Y, Ruan S C, *et al.* Tunable and switchable dual-wavelength dissipative soliton operation of a weak-birefringence all-normal-dispersion Yb-doped fiber laser[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(5): 1501807.
- [16] Xiao X S, Hua Y, Fu B, *et al.* Experimental investigation of the wavelength tunability in all-normal-dispersion ytterbium-doped mode-locked fiber lasers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(6): 1502807.
- [17] Luo J L, Ge Y Q, Tang D Y, *et al.* Mechanism of spectrum moving, narrowing, broadening, and wavelength switching of dissipative solitons in all-normal-dispersion Yb-fiber lasers [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(1): 14016252.
- [18] Okhotnikov O G, Gomes L, Xiang N, *et al.* Mode-locked ytterbium fiber laser tunable in the 980-1070-nm spectral range[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(17): 1522-1524.
- [19] Schultz M, Karow H, Wandt D, *et al.* Ytterbium femtosecond fiber laser without dispersion compensation tunable from 1015 nm to 1050 nm[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(13): 2567-2570.
- [20] Xu H W, Yang H, Chen Y, *et al.* Intrinsic dual-wavelength operation of a passively mode-locked fiber ring laser[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(14): 2934-2938.
- [21] Li X L, Zhang S M, Han H Y, *et al.* Different polarization dynamic states in a vector Yb-doped fiber laser[J]. *Optics Express*, 2015, 23(8): 10747-10755.
- [22] Liu W J, Pang L H, Han H N, *et al.* Dark solitons in WS<sub>2</sub> erbium-doped fiber lasers[J]. *Photonics Research*, 2016, 4(3): 111-114.
- [23] Guo J, Song Y F, Xiang Y Q, *et al.* Controlled generation of bright or dark solitons in a fiber laser by intracavity nonlinear absorber[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(3): 16076941.
- [24] Stolen R, Johnson A. The effect of pulse walkoff on stimulated Raman scattering in fibers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1986, 22(11): 2154-2160.
- [25] Bednyakova A E, Babin S A, Kharenko D S, *et al.* Evolution of dissipative solitons in a fiber laser oscillator in the presence of strong Raman scattering[J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 20556-20564.
- [26] Aguergaray C, Runge A, Erkintalo M, *et al.* Raman-driven destabilization of mode-locked long cavity fiber lasers: Fundamental limitations to energy scalability[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(15): 2644-2646.