

基于非线性偏振旋转的全正色散锁模光纤 激光器偏振特性的研究

张丽强¹ 卓 壮^{1,2} 王云征¹

(¹ 山东大学信息科学与工程学院, 山东 济南 250100)
(² 济南山信光电科技有限公司, 山东 济南 250100)

摘要 基于耦合的 Ginzburg-Landau 方程和各器件的琼斯矩阵,建立了全正色散锁模光纤激光器的数值模型,计算了腔内各点脉冲不同部分的偏振态。计算结果表明,当线性双折射较强时,光纤中脉冲的偏振态近似以拍长为周期变化,一个拍长内的演化过程为右旋椭圆偏振光-线偏振光-左旋椭圆偏振光-线偏振光-右旋椭圆偏振光。与一般的饱和吸收体不同,非线性偏振旋转等效饱和吸收体的调制深度随波片角度变化。计算了波片方位角改变时,调制深度的变化情况。相比于偏振分束器之前的 1/2 波片及 1/4 波片,偏振分束器之后的波片对调制深度的影响更大。

关键词 激光器; 光纤激光器; 锁模; 非线性偏振旋转; 全正色散

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0314003

Study on Polarization Characteristics of All-Normal-Dispersion Fiber Laser Mode-Locked by Nonlinear Polarization Rotation

Zhang Liqiang¹ Zhuo Zhuang^{1,2} Wang Yunzheng¹

(¹ College of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China)
(² Shanxin Photoelectric Science and Technology Co., LTD., Jinan, Shandong 250100, China)

Abstract Based on the coupled Ginzburg-Landau equations and Jones matrix of all devices, a numerical model of an all-normal-dispersion mode-locked fiber laser by nonlinear polarization rotation is proposed. The polarization states of different points across the pulse are calculated along the cavity. It is found that when the linear birefringence of the fibers is strong, the evolution of polarization state in the fiber rounds a period of one beat length. Over one beat length, the state of polarization changes from right-handed elliptic to linear, left-handed elliptic, linear, and then back to right-handed elliptic. Different from a common saturable absorber, the modulation depth of the equivalent saturable absorber of the nonlinear polarization rotation varies with the wave plates angles. The dependence of modulation depth on wave plates angles is calculated. The results show that compared with the half wave plate and quarter wave plate before polarization beam splitter, the one after polarization beam splitter has a more obvious effect on modulation depth.

Key words lasers; fiber laser; mode locking; nonlinear polarization rotation; all normal dispersion

OCIS codes 140.3510; 140.4050; 260.5430

1 引 言

与固体激光器相比,超短脉冲光纤激光器具有结构紧凑、散热效果好、易于维护等优点。随着超短脉冲激光技术应用领域的扩展,对脉冲能量的要求

也越来越高。为获得高能量超短脉冲,很多研究机构致力于全正色散锁模光纤激光器的研究^[1-5]。

半导体饱和吸收体 (SESAM)^[6]、碳纳米管^[7]、石墨烯^[8]等锁模器件及非线性偏振旋转^[9-14]等技术,均

收稿日期: 2013-07-31; 收到修改稿日期: 2013-10-30

基金项目: 山东大学自主创新基金(2010JC025)

作者简介: 张丽强(1982—),女,博士研究生,主要从事锁模光纤激光器方面的研究。E-mail: zhangliqiang05@126.com

导师简介: 卓 壮(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事全固态激光器、光纤激光器和超快激光技术等方面的研究。

E-mail: zhuozhuang@sdu.edu.cn(通信联系人)

已应用于全正色散光纤激光器并实现锁模运转。相比于其他锁模器件,非线性偏振旋转器件具有成本低、高抗光伤等优点。非线性偏振旋转锁模的原理为:当椭圆偏振光入射到光纤中时,脉冲的不同部分由于强度不同而累积不同的非线性相移,脉冲各部分偏振态不再一致。调节腔内偏振控制器的作用,使脉冲不同部分产生不同的损耗,从而起到饱和吸收体的作用。在这种锁模机制中,腔内脉冲不同部分偏振态的演化对脉冲的形成起很大作用。2003年,Wu等^[15]研究了传统孤子锁模光纤激光器中偏振态的演化。2008年,Lei等^[16]计算了自相似锁模光纤激光器中不同位置脉冲各部分的偏振态。与本文内容最接近的是2010年Kong^[17]的研究。通过求解耦合的Ginzburg-Landau方程,计算了耗散孤子锁模激光器中脉冲的各点偏振态,但没有给出光纤中偏振态的演化过程。非线性偏振旋转是在光纤中产生的,有必要对光纤中偏振态的演化进行深入研究。

另一方面,普通饱和吸收体的调制深度等特性是固定的,而在非线性偏振旋转锁模激光器中,偏振控制器与起偏器组成的等效饱和吸收体的振幅调制深度是随波片角度变化的^[18-19]。依赖于波片或偏振控制器的角度,基于非线性偏振旋转的锁模激光器可工作在连续、调Q、连续锁模^[20]、耗散孤子谐振腔及 noise-like 脉冲^[21]等不同的状态。有必要研究等效饱和吸收体的参数随波片的变化情况,以简化激光器的调节并优化激光器的设计。

本文基于耦合的Ginzburg-Landau方程和各器件的琼斯矩阵,建立了全正色散锁模光纤激光器的数值模型,计算了腔内各点脉冲不同部分的偏振态,分析了不同位置的波片角度变化时对非线性偏振旋转等效饱和吸收体调制深度的影响。

2 数值模型

模拟用到的光纤激光器的结构如图1所示。激光器包括一段掺Yb光纤和两段无源光纤(SMF1, SMF2)。两个1/4波片(QWP1, QWP2)、一个半波片(HWP)和一个偏振分束器(PBS)用来实现非线性偏振旋转。其他器件包括一个带通滤光片,一个自由空间隔离器(ISO)和一个抽运信号合束器。

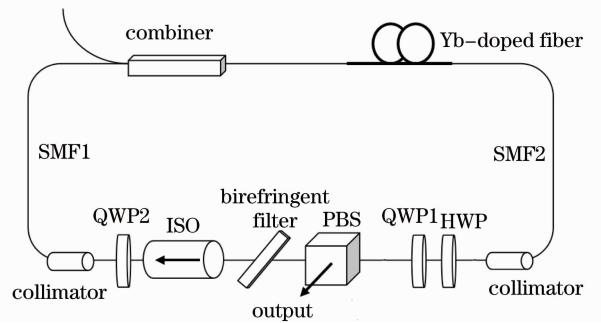


图1 全正色散锁模光纤激光器结构图
Fig. 1 Schematic diagram of all-normal-dispersion fiber laser

脉冲在光纤中的传输由耦合的Ginzburg-Landau方程来描述:

$$\frac{\partial A_x}{\partial Z} - i \frac{\Delta\beta}{2} A_x + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_x}{\partial T^2} = i\gamma \left(|A_x|^2 + \frac{2}{3} |A_y|^2 \right) A_x + \frac{i\gamma}{3} A_x^* A_y^2 + \frac{g}{2} A_x + \frac{g}{2\Omega_g} \frac{\partial^2 A_x}{\partial T^2}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_y}{\partial Z} + i \frac{\Delta\beta}{2} A_y + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_y}{\partial T^2} = i\gamma \left(|A_y|^2 + \frac{2}{3} |A_x|^2 \right) A_y + \frac{i\gamma}{3} A_y^* A_x^2 + \frac{g}{2} A_y + \frac{g}{2\Omega_g} \frac{\partial^2 A_y}{\partial T^2}, \quad (2)$$

式中 A_x 和 A_y 为沿光纤两个主轴方向偏振的电场的慢变振幅包络。 $\Delta\beta = \beta_{0x} - \beta_{0y} = 2\pi/L_B$ 与光纤的模式双折射有关, β_{0x} 和 β_{0y} 分别为两个偏振模式的波数, L_B 为偏振拍长, β_2 为群速度色散参量, γ 为光纤的非线性系数。 $g = \frac{g_0}{1 + \int (|A_x|^2 + |A_y|^2) dt/E_s}$ 为增益光纤的增益系数, Ω_g 、 E_s 和 g_0 分别为增益带宽、饱和能量和小信号增益系数, T 和 Z 分别为时空坐标。

波片及偏振分束器等分离器件的作用由它们的琼斯矩阵来描述。光纤的 x 轴与HWP, QWP1及

QWP2的光轴之间的夹角分别为 θ_{HWP} , θ_{QWP1} 和 θ_{QWP2} 。

模拟中用到的参数如下: $\beta_2 = 0.0404 \text{ ps}^2/\text{m}$, $\gamma = 3 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 拍长 $L_B = 0.5 \text{ m}$ 。SMF1, SMF2及增益光纤的长度均为1 m。增益光纤的增益带宽及滤光片的带宽分别为45 nm^[16]和15 nm,饱和能量 E_s 为1 nJ。

3 模拟结果及讨论

3.1 腔内偏振态的演化

模拟的初始信号为白噪声,在很大的波片角度

范围内均可得到稳定的锁模脉冲。脉冲某一点的偏振态可由该点相互垂直的两个偏振分量的振幅比和相位差来确定。图 2 给出了 θ_{HWP} , θ_{QWP1} 及 θ_{QWP2} 分别为 75° 、 44° 及 70° 时从 SMF2 出射的脉冲各点两个偏

振分量的振幅比和相位差。从图 2 可以看出, 脉冲各个部分均为振幅比为 0.58 左右的右旋椭圆偏振光, 振幅比和相位差关于脉冲中心对称, 因此各点偏振态也关于脉冲中心对称。

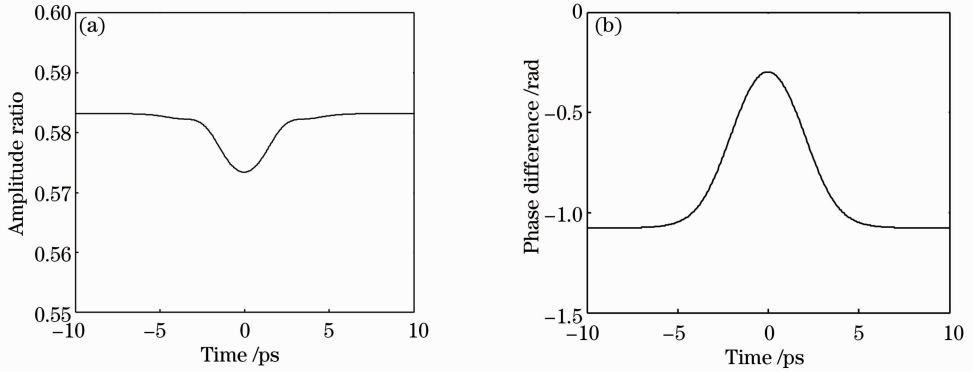


图 2 SMF2 出射的脉冲各点两个偏振分量的(a)振幅比和(b)相位差

Fig. 2 (a) Amplitude ratio and (b) phase difference of two polarization components of different parts of pulse after SMF2

以脉冲中心点和 1/8 峰值强度处代表脉冲中心及边缘部分, 分析脉冲不同部分的偏振态随腔内位置的变化。图 3 为经过各分离器件之后脉冲两点的偏振态。脉冲经过 PBS 之后为线偏振光, ISO 将偏振方向旋转 45° ^[22], QWP2 将线偏振光转换为椭圆

偏振光, 椭圆偏振光在光纤中传输时, 脉冲各部分偏振态不再一致, HWP 及 QWP1 调节从光纤出射的脉冲的偏振态, 使得脉冲再次经过 PBS 时, 脉冲强度较大的中心部分经历较小的损耗, 边缘部分损耗大, 从而起到饱和和吸收体的作用。

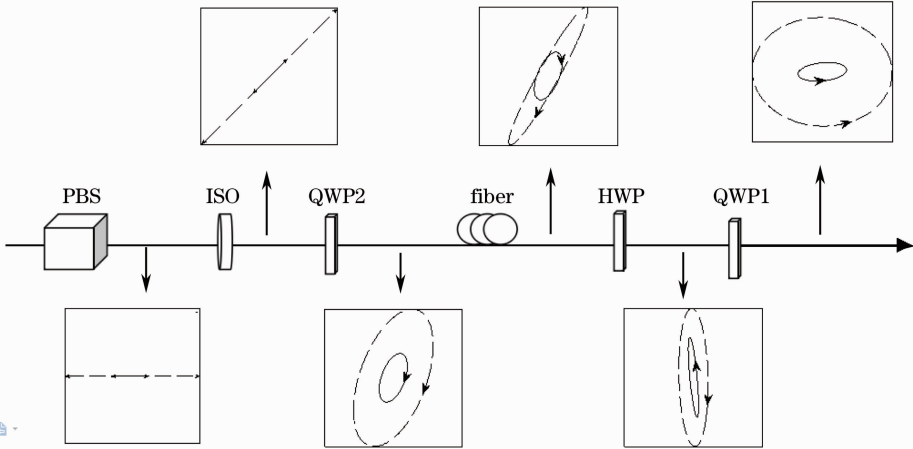


图 3 腔内不同位置脉冲各点的偏振态(---: 脉冲中心部分; -.-: 1/8 脉冲中心强度处)

Fig. 3 Polarization states of pulse at different locations in cavity (---: peak of the pulse; -.-: wing at 1/8 intensity of peak)

非线性偏振旋转主要是在光纤中产生的, 有必要对光纤中偏振态的演化进行深入分析。光纤中偏振态的演化近似以拍长为周期变化, 图 4 为 SMF2 中一个偏振拍长内偏振态的演化。脉冲在一个拍长的周期内, 近似完成右旋椭圆偏振光-线偏振光-左旋椭圆偏振光-线偏振光-右旋椭圆偏振光的演化。脉冲中心部分及边缘部分演化过程一致。由于非线性效应的影响, 一个拍长前后偏振态略有差别。偏振态的演化过程与 Wu 等^[15]报道的孤子锁模光纤激光器中偏振态的演化过程类似, 但在孤子锁模光

纤激光器中, 脉冲不同部分具有相同的偏振态, 而正色散锁模光纤激光器中, 脉冲不同部分的偏振态不再一致。

图 4 是当偏振拍长 $L_B = 0.5 \text{ m}$ 时得到的结果, 当拍长取其他值时, 偏振态同样以拍长为周期变化, 演化过程类似。偏振态的演化是线性双折射与非线性效应共同作用的结果, 为分析两者在偏振态演化过程中的相对强弱, 计算了偏振拍长取不同值时脉冲不同部分两个偏振分量在光纤内累积的相位差, 结果如表 1 所示。线性双折射使脉冲不同部分累积

相同的相位差,非线性双折射使脉冲不同部分的相位差不再一致。与孤子锁模光纤激光器^[15]的结果类似,线性双折射对非线性效应性引起的相位差的改变影响不大。文献[17]指出,全正色散锁模光纤激光器中需尽量减小光纤的线性双折射,当脉冲的中心部分与边缘部分具有不同的偏振态时,非线性偏振旋转才能在脉冲的整形中起作用,脉冲不同部分的偏振态的差别是由非线性双折射引起的。由上所述,线性双折射对非线性双折射引起的相位差的改变影响不大,因此,全正色散锁模光纤激光器中,光纤的线性双折射会影响脉冲偏振态的演化,但对锁模影响不大。以上模拟结果未考虑两个偏振分量群速度的失配,当光纤的线性双折射非常强时,这一项需要考虑。特别是在保偏光纤中,由于两个偏振分量传输速度的差别,很难实现非线性偏振旋转锁模^[23]。

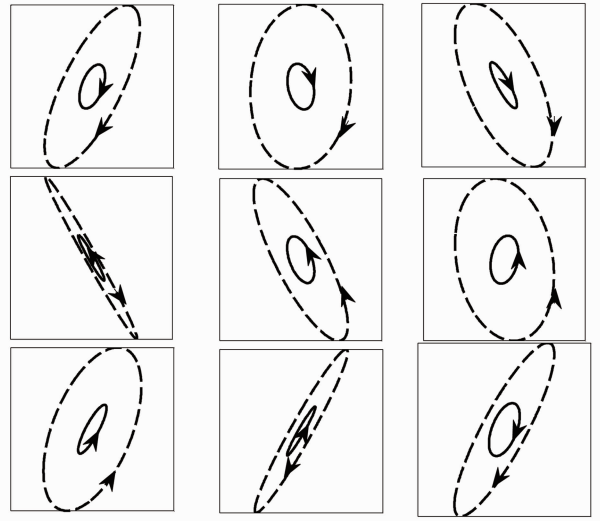


图 4 SMF2 中一个偏振拍长内偏振态的演化 (---: 脉冲中心部分; —: 1/8 脉冲中心强度处)

Fig. 4 Polarization states evolution over one beat length in SMF2 (---: peak of the pulse; —: wing at 1/8 intensity of peak)

表 1 光纤中累积的两个偏振分量之间的相位差

Table 1 Phase difference between two polarization components accumulated in fiber

	$L = 6L_B$		$L = 3L_B$		$L = 2L_B$		$L \gg L_B$	
	Peak	1/8 intensity of peak	Peak	1/8 intensity of peak	Peak	1/8 intensity of peak	Peak	1/8 intensity of peak
Total difference	-37.464	-37.670	-18.659	-18.825	-12.460	-12.553	0.124	0.019
Linear	-12π	-12π	-6π	-6π	-4π	-4π	0	0
Nonlinear	0.236	0.029	0.191	0.024	0.107	0.014	0.124	0.019

3.2 波片角度对等效饱和吸收体调制深度的影响

图 1 所示的锁模光纤激光器中,从 PBS 输出的脉冲为非线性偏振旋转等效饱和吸收体非线性吸收的部分^[24],因此等效饱和吸收体的透射率可由 PBS 的透射率来表示。图 5 为 θ_{HWP} 、 θ_{QWP1} 及 θ_{QWP2} 分别为 75° 、 44° 及 70° 时 PBS 的透射率曲线。脉冲中心部分透射率较高,而能量较低的边缘部分透射率较低。饱和吸收体的调制深度为脉冲注入可饱和吸收体时透射率的最大变化量,因此,非线性偏振旋转等效饱和吸收体的调制深度可近似由脉冲中心部分及边缘部分的透射率之差 R 来表示。

与普通饱和吸收体不同,非线性偏振旋转的调制深度是随波片角度变化的。图 6 给出了 θ_{HWP} 、 θ_{QWP1} 及 θ_{QWP2} 分别在 $70^\circ \sim 79^\circ$ 、 $37^\circ \sim 45^\circ$ 及 $77^\circ \sim 88^\circ$ 范围内变化时调制深度 R 的变化。从图 6 可以看出,相比于 θ_{HWP} 、 θ_{QWP1} 及 θ_{QWP2} 对调制深度的影响更明显。图 6 是当拍长 $L_B = 0.5$ m 时得到的结果,当不考虑光纤的线性双折射时,可以得到类似的结果。

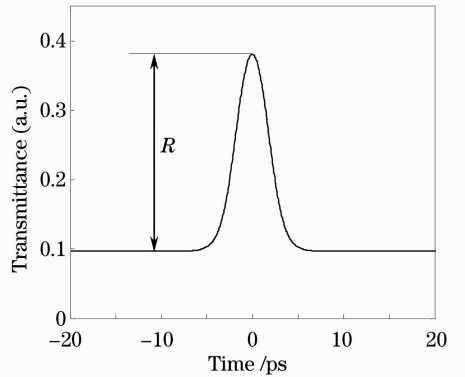


图 5 PBS 透射率曲线

Fig. 5 Transmission curve of PBS

这是由不同位置波片的作用决定的。QWP2 的作用是使 ISO 输出的线偏振光转换为椭圆偏振光,以使脉冲在光纤中传输时,不同部分的两个偏振分量累积不同的相位差。HWP 和 QWP1 的作用是调整从光纤出射的脉冲不同部分的偏振态,使得脉冲中心部分的透射率较高。实验中,可通过主要调节

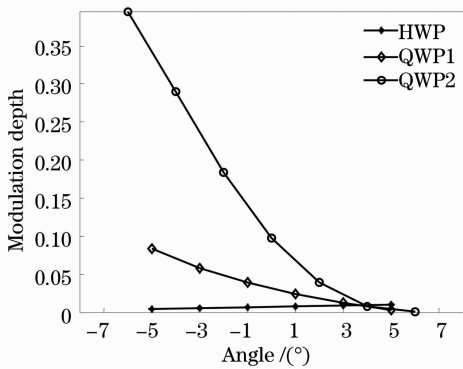


图6 等效饱和吸收体调制深度随波片角度的变化

Fig. 6 Modulation depth of equivalent saturable absorber versus wave plate angle

QWP2 的角度增强或减弱非线性偏振旋转的作用。

4 结 论

基于耦合的 Ginzburg-Landau 方程和各器件的琼斯矩阵,建立了全正色散锁模光纤激光器的数值模型,分析了脉冲各点的偏振态随腔内位置的变化情况,计算了波片方位角改变时,调制深度的变化情况。计算结果表明,光纤中偏振态的演化是由线性和非线性双折射共同引起的,当线性双折射效应较强时,线性双折射起主要作用。不同位置的波片对非线性偏振旋转效应的影响不同,在激光器调节时,可主要通过调节偏振分束器之后的波片的角度增强或减弱非线性偏振旋转的作用。研究结果对设计和调节全正色散锁模光纤激光器具有指导意义。

参 考 文 献

- 1 A Chong, J Buckley, W Renninger, *et al.*. All-normal-dispersion femtosecond fiber laser [J]. *Opt Express*, 2006, 14(21): 10095–10100.
- 2 Jie Zhou, Ping Yan, Dongsheng Wang, *et al.*. Experimental and theoretical study of the weak-modulation all-normal-dispersion mode-locked fiber lasers [J]. *J Opt Soc Am B*, 2010, 27(8): 1589–1593.
- 3 Xu Zhongwei, Zhang Zuxing. Study of the filter effect in all-normal-dispersion mode-locked fiber lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(2): 021405.
徐中巍, 张祖兴. 全正色散被动锁模光纤激光器中滤波器效应的研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(2): 021405.
- 4 Chunmei Ouyang, Lu Cai, Hui Zhao, *et al.*. Position effect of spectral filter on properties of highly chirped pulses in an all-normal-dispersion fiber laser [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2009, 45(10): 1284–1288.
- 5 Tan Fangzhou, Liu Jiang, Sun Ruoyu, *et al.*. All-normal-dispersion passively mode-locked Yb-doped fiber laser with multimode interference effect [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(4): 0402010.
谭方舟, 刘江, 孙若愚, 等. 基于多模干涉效应的全正色散被动锁模掺镱光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0402010.
- 6 J B Lecourt, C Duterte, F Narbonneau, *et al.*. All-normal dispersion, all-fibered PM laser mode-locked by SESAM [J]. *Opt*

- Express, 2012, 20(11): 11918–11923.
- 7 K Kieu, F W Wise. All-fiber normal-dispersion femtosecond laser [J]. *Opt Express*, 2008, 16(15): 11453–11458.
- 8 H Zhang, D Y Tang, L M Zhao, *et al.*. Compact grapheme mode-locked wavelength-tunable erbium-doped fiber lasers: from all normal anomalous dispersion to all normal dispersion [J]. *Laser Phys Lett*, 2010, 7(8): 591–596.
- 9 H G Liu, J H Huang, J H Li, *et al.*. Above 100 nJ all-normal-dispersion femtosecond pulse generation from a large-core multimode fiber laser [J]. *Laser Phys Lett*, 2013, 10(5): 055101.
- 10 Chi Junjie, Li Pingxue, Yang Chun, *et al.*. A theoretical and experimental study on all-normal-dispersion Yb-doped mode-locked fiber lasers [J]. *Chin Phys B*, 2013, 22(4): 044204.
- 11 Xiaojun Zhu, Chinhua Wang, Shixin Liu, *et al.*. Switchable dual-wavelength and passively mode-locked all-normal-dispersion Yb-doped fiber lasers [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2011, 23(14): 956–958.
- 12 Kong Lingjie, Xiao Xiaosheng, Yang Changxi. All-normal-dispersion Yb-doped mode-locked fibre laser and its stability analysis [J]. *Chin Phys B*, 19(7): 074212.
- 13 Zhang Zuxing, Dai Guoxing. All-normal-dispersion dissipative soliton ytterbium-doped fiber laser without additional filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0214005.
张祖兴, 戴国星. 全正色散耗散孤子掺镱光纤激光器 [J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0214005.
- 14 Panzheng Zhang, Wei Fan, Xiaochao Wang, *et al.*. Generation of 8.5-nJ pulse from all-fiber dispersion compensation-free Yb-doped laser [J]. *Chin Opt Lett*, 2010, 8(8): 768–770.
- 15 J Wu, D Y Tang, L M Zhao, *et al.*. Soliton polarization dynamics in fiber lasers passively mode-locked by the nonlinear polarization rotation technique [J]. *Phys Rev E*, 2006, 74(4): 046605.
- 16 Ting Lei, Chenghou Tu, Fuyun Lu, *et al.*. Numerical study on self-similar pulses in mode-locking fiber laser by coupled Ginzburg-Landau equation model [J]. *Opt Express*, 2009, 17(2): 585–591.
- 17 Lingjie Kong, Xiaosheng Xiao, Changxi Yang. Polarization dynamics in dissipative soliton fiber lasers mode-locked by nonlinear polarization rotation [J]. *Opt Express*, 2011, 19(19): 18339–18344.
- 18 Chenghou Tu, Wengang Guo, Yongnan Li, *et al.*. Stable multiwavelength and passively mode-locked Yb-doped fiber laser based on nonlinear polarization rotation [J]. *Opt Commun*, 2007, 280(2): 448–452.
- 19 Lei Zhang, A R El-Damak, Yan Feng, *et al.*. Experimental and numerical studies of mode-locked fiber laser with large normal and anomalous dispersion [J]. *Opt Express*, 2013, 21(10): 12014–12021.
- 20 A Hideur, T Chartier, M Brunel, *et al.*. Mode-lock, Q-switch and CW operation of an Yb-doped double-clad fiber ring laser [J]. *Opt Commun*, 2001, 198(1): 141–146.
- 21 Z W Xu, Z X Zhang. Diverse output states from an all-normal-dispersion ytterbium-doped fiber laser: Q-switch, dissipative soliton resonance, and noise-like pulse [J]. *Opt Laser Technol*, 2013, 48: 67–71.
- 22 Cai Lüzhong. *Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2010. 342.
蔡履中. *光学* [M]. 北京: 科学出版社, 2010. 342.
- 23 C K Nielsen, B Ortaç, T Schreiber, *et al.*. Self-starting self-similar all-polarization maintaining Yb-doped fiber laser [J]. *Opt Express*, 2005, 13(23): 9346–9351.
- 24 Joel Buckley, Andy Chong, Shian Zhou, *et al.*. Stabilization of high-energy femtosecond ytterbium fiber lasers by use of a frequency filter [J]. *J Opt Soc Am B*, 2007, 24(8): 1803–1806.