

激光与光电子学进展

锁模光纤激光器的偏振同步与去同步动力学

黄志玮¹, 黄千千¹, 黄梓楠¹, 李卫浙¹, 戴礼龙¹, 王明娇¹, 代雨泽², 王青³, 闫志君²,
Sergeyev Sergey³, 牟成博^{1*}

¹上海大学特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444;

²华中科技大学下一代互联网接入系统国家工程实验室, 湖北 武汉 430074;

³阿斯顿大学阿斯顿光子技术研究所, 伯明翰 B47ET

摘要 基于正色散的非线性偏振旋转(NPR)锁模光纤激光器,在稳定的连续波(CW)锁模状态和复合锁模状态下分析脉冲的偏振特性。通过单一调节泵浦功率,实现稳定的CW锁模状态下耗散孤子(DS)与类噪声(NLP)两种脉冲的切换。另外,固定泵浦功率,仅调节偏振控制器(PCs)可得到由脉冲状态自发切换引起的复合锁模状态。对比分析两种锁模状态下的脉冲偏振特性,发现纵模相位锁定的同步对应于脉冲正交偏振分量的完全同步,纵模相位在同步与去同步切换状态下的复合锁模对应于脉冲正交偏振分量的部分同步。实验结果表明,纵模相位间的同步状态受脉冲正交偏振分量影响。该工作对理解锁模激光器中复杂动力学、发展稳定的激光动力学技术具有指导意义。

关键词 锁模光纤激光器; 非线性光学; 非线性吸引子; 光孤子; 偏振

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231226

Polarization Synchronization and Desynchronization Dynamics of Mode-locked Fiber Lasers

Huang Zhiwei¹, Huang Qianqian¹, Huang Zinan¹, Li Weixi¹, Dai Lilong¹, Wang Mingjiao¹,
Dai Yuze², Wang Qing³, Yan Zhijun², Sergeyev Sergey³, Mou Chengbo^{1*}

¹Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University,
Shanghai 200444, China;

²National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System, Huazhong University of Science
and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China;

³Aston Institute of Photonic Technologies (AIPT), Aston University, Aston Triangle, Birmingham B47ET, UK

Abstract In this study, using a nonlinear-polarization-rotation (NPR) mode-locked fiber laser with positive dispersion as a testbed, the polarization characteristics of the pulse are analyzed in both complete mode-locked and composite mode-locked states. The switching from dissipative soliton (DS) and noise like pulse (NLP) can be achieved by making simple modifications to the polarization controllers (PCs). Under a fixed pump power, only adjusting the PCs can obtain a composite mode-locked state caused by the spontaneous switching of pulse states. By comparing and analyzing the polarization characteristics of the pulses in the two mode-locked states, it is observed that the synchronization of the longitudinal modes corresponds to the complete synchronization of the orthogonal polarization components. Whereas, the composite mode-locked of the longitudinal modes in partial synchronization corresponds to the partial synchronization of the orthogonal polarization components. It is proved experimentally that the orthogonal polarization component controls the synchronization between the longitudinal modes. This work is of significant importance to understanding the emergence of complex dynamics in mode-locked lasers and developing stable laser dynamics technology.

Key words mode-locked fiber laser; nonlinear optics; nonlinear attractors; optical soliton; polarization

收稿日期: 2023-05-04; 修回日期: 2023-06-03; 录用日期: 2023-06-08; 网络首发日期: 2023-07-12

通信作者: *moucl@shu.edu.cn

1 引言

锁模光纤激光器由于可以产生高能量或高峰值功率的脉冲序列广泛应用于精细加工、光谱学、频率梳和其他重要领域^[1]。偏振作为脉冲的一个重要特性,不仅可以影响激光器工作的稳定性还与锁模光纤激光器中诸多非线性现象的形成有关。当光脉冲在非线性双折射光纤中传输时,其正交偏振分量会产生非线性耦合,因此会产生多样的锁模脉冲偏振演化动力学。目前,理论和实验研究表明锁模光纤激光器的正交偏振态(SOP)可以视为耦合谐振子,控制各种时空结构的形式同步场景,如怪波、孤子雨、矢量脉动等^[2-5]。

现阶段对于脉冲偏振特性演化的研究大多集中在稳定的连续波(CW)锁模状态即脉冲时空结构稳定的状态下。在此状态下的矢量孤子具有多种 SOP 演化,依据正交偏振分量之间的耦合形式,可以分为群速度锁定矢量孤子、偏振态锁定矢量孤子以及相位锁定矢量孤子等^[6-9]。为加深对更为复杂的超短脉冲物理机制的了解,对锁模光纤激光器中各种非稳定锁模状态的探究至关重要。近年来,对于非稳定状态的复杂非线性动力学的研究引起了关注,诸如使用瞬时光谱分析技术揭示脉动孤子、呼吸耗散孤子以及振动态的形成机理,但是缺少了对脉冲偏振态演化的探究^[10-12]。最近,理论和实验证明非线性偏振旋转(NPR)锁模光纤激光器中的正交偏振态可被视为耦合谐振子,并理论验证了耦合谐振子的同步状态能够调控脉冲的锁模状态^[13-14]。同时,在 NPR 锁模光纤激光器中脉冲的非线性演化会给系统带来内在的固有扰动,从而干扰纵模相位,使得锁模脉冲在不同的锁模机制以及 CW 之间持续切换^[15]。锁模光纤激光器作为研究复杂孤子非线性动力学的理想平台,纵模相位的去同步与同步

对应于 CW 和稳定的 CW 锁模两种状态。但是在 NPR 锁模光纤激光器中,孤子的矢量性质经常被忽视^[12, 16]。

本实验搭建一台 NPR 锁模光纤激光器,在正色散区域,分别实现了耗散孤子(DS)与类噪声(NLP)的稳定 CW 锁模状态和脉冲状态自发切换时的复合锁模状态。实验中通过单一调节泵浦功率,在稳定的锁模状态下实现了 DS 到 NLP 的转换。通过调节泵浦功率和偏振控制器,获得了 CW 和锁模自发切换的复合锁模状态。进一步,利用耦合谐振子同步理论,研究两种状态下的脉冲偏振态演化。实验结果表明,稳定的 CW 锁模状态对应于耦合谐振子相位差的锁定,而复合锁模的不稳定状态对应耦合谐振子相位差的跳变。另外,可以通过调节激光器中的参数改变脉冲正交偏振分量的耦合强度来获得更为复杂的非线性动力学现象。通过对 NPR 锁模光纤激光器脉冲自发切换的不稳定状态进行偏振动力学分析,弥补了非稳态脉冲动力学研究中对于偏振演化分析的缺失,首次从实验的角度观察了正交偏振分量与纵模相位之间同步状态的对应关系,验证了耦合谐振子同步理论在 NPR 锁模光纤激光器中的适用性,对理解非线性系统中复杂的动力学以及超快激光器不稳定性背后的物理机制提供了参考^[13]。

2 实验装置

图 1 是基于 NPR 锁模光纤激光器的实验装置图,总的腔长为 4.72 m,对应于 44.18 MHz 的基频。以 1.48 m 长的掺铒光纤(EDF)作为增益介质,其二阶色散为 $+66.1 \text{ ps}^2/\text{km}$ 。此外,腔内还包含长度为 0.9 m、二阶色散为 $+4.5 \text{ ps}^2/\text{km}$ 的 OFS980,其为波分复用器(WDM)两端的尾纤。其余腔内光纤为 2.34 m 的普通

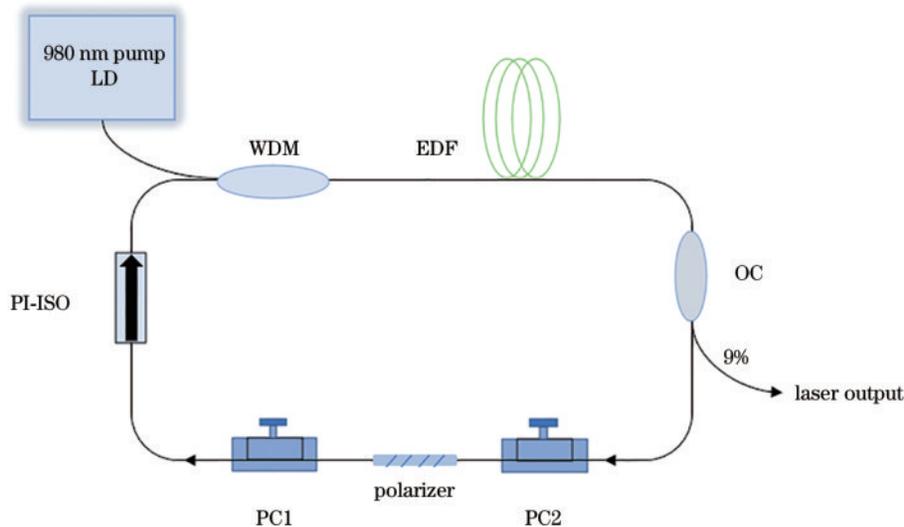


图 1 基于 NPR 的锁模光纤激光器实验装置

Fig. 1 Experimental setup for mode-locked fiber laser based on NPR

单模光纤,二阶色散为 $-21.67\text{ ps}^2/\text{km}$ 。激光器净色散为 $+0.046\text{ ps}^2$,在此正色散下,激光器可以产生耗散孤子以及类噪声脉冲。使用980/1550的WDM,其一端连接980 nm的泵源,另一端连接高掺杂的EDF,使得泵浦光经过WDM之后作用到EDF中,实现光放大。91:9的耦合器将腔内9%的光输出用于腔外脉冲的检测,91%的光继续在腔内循环。偏振无关的隔离器(PI-ISO)在不影响腔内脉冲偏振状态的前提下可以实现激光器的单向传输。 45° 倾斜光纤光栅(45° TFG)作为起偏器与左右两端的两个光纤挤压式偏振控制器(PC1和PC2)用于共同实现NPR锁模机制。实验结果使用最大分辨率为 0.02 nm 的光谱仪(OSA, Yokogawa AQ6370B)进行光谱相关特征分析,如谱宽、中心波长等参数。同时,采用带宽为

12.5 GHz 的光电探头(Newport 818-BB51F)将光信号转化为电信号,连接 8 GHz 示波器(Keysight DSO90804A)、 3.2 GHz 的射频分析仪(SSA, 3032X)分别监测脉冲特性和脉冲质量。并使用商业自相关仪(Femtochrome, FR-103WS)对超短脉冲脉宽进行测量。本次实验中使用的偏振分析仪(Thorlabs, IPM5300)的最大分辨率为 $1\text{ }\mu\text{s}$,采样的点数为1024,可根据归一化斯托克斯参数 S_1 、 S_2 和 S_3 、正交 x 和 y 偏振分量的功率(I_x 、 I_y)和总功率 S_0 、相位差和偏振度(DOP),观察庞加莱球上SOP的演变。

3 实验结果与讨论

泵浦功率为 260 mW 时,通过调节偏振控制器可以获得稳定的耗散孤子。图2(a)中的光谱边缘陡峭

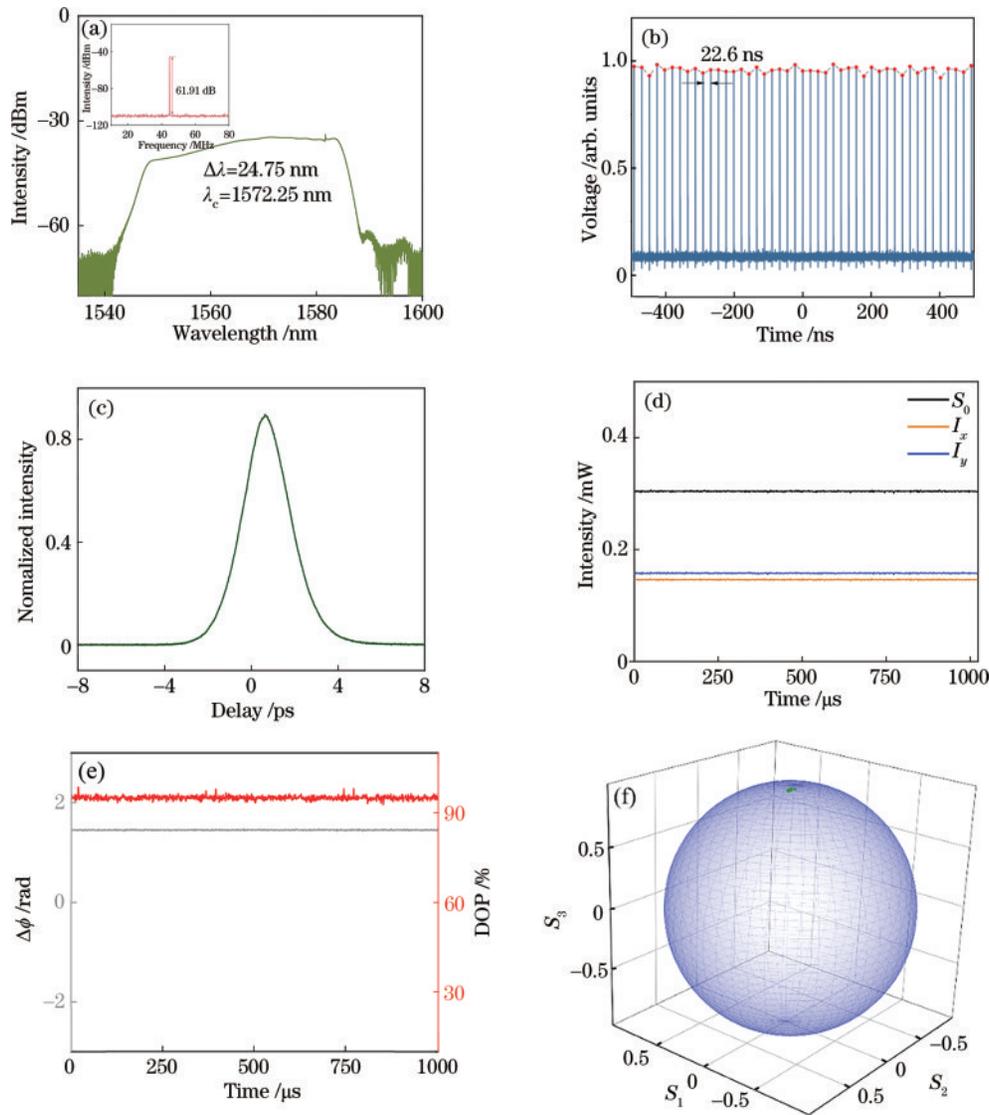


图2 偏振锁定矢量孤子(耗散孤子)。(a)典型耗散孤子光谱;(b)示波器脉冲序列;(c)自相关轨迹;(d)正交偏振分量的功率;(e)DOP和相位差;(f)庞加莱球上偏振态演化轨迹

Fig. 2 Polarization locked vector soliton (dissipative soliton). (a) Typical dissipative soliton spectrum; (b) oscilloscope pulse sequence; (c) autocorrelation trajectory; (d) the power of the orthogonal polarization component; (e) DOP and phase difference; (f) evolution trajectory of polarization state on Poincaré sphere

顶部平坦,是正色散激光器中输出耗散孤子的典型光谱特征^[17]。此外,在图 2(a)光谱波长约 1582 nm 处有微弱的尖峰,这主要是由 45° TFG 的二阶布拉格反射造成的,对激光器的输出没有明显的影响^[18]。由于是器件本身的特性,因此很难通过降低泵浦功率或者调整腔内 PCs 抑制。通过图 2(a)中的插图可知,脉冲信噪比为 61.91 dB,因此激光器工作在一个较稳定的状态。图 2(b)为示波器测量的脉冲序列图,通过计算图中所有脉冲的峰峰值,使用最大值与最小值的差值与平均值的比值量化波动的大小。经过计算,图 2(b)中脉冲峰峰值的波动为 6.6%,锁模脉冲较为稳定,对应着激光器中纵模相位的完全同步,也叫作 CW 锁模。脉冲序列间隔为 22.6 ns,对应 44.18 MHz 基频,该重复频率比偏振分析仪最大的采样率 1 MHz 高,因此实验中无法测得单个脉冲的偏振态演化,测得的均为多个脉冲平均之后的结果。图 2(c)是脉冲的自相关轨迹,其显示脉宽为 ps 量级。图 2(d)~(f)是对脉冲偏振态的表征,包含正交偏振分量、相位差和偏振度等重要信息。在 NPR 锁模光纤激光器中,具有相位关系的正交偏振分量可以视为相位耦合的谐振子,而耦合谐振子的慢时间尺度演化取决于存在相位变化的正交偏振分量的同步与去同步状态^[19-20]。当相位差保持不变或者是微弱振荡时,耦合振子为同步状态;当相位差发生跳变时,耦合振子为去同步状态。同时,耦合谐振子强耦合会产生偏振态更加稳定的脉冲,比如常见的偏振锁定矢量孤子对应耦合振子的同步;在脉冲正交偏振态的弱耦合情况下,相位差变化多样可以产生更复杂的脉冲偏振态演化,这对应耦合振子的去同步^[21]。图 2(d)表明,在 1 ms 的时间范围内,脉冲的两个偏振分量 I_x 、 I_y 的输出功率基本保持不变,总输出功率十分稳定。由于图 2(e)中的相位差在很小范围内保持不变(1.5 rad),因此该状态是偏振锁定的矢量孤子,主要由两个正交偏振分量之间的强耦合导致。图 2(e)中超过 90% 的 DOP 表示此时脉冲的偏振状态在 1 ms 的时间尺度内是基本稳定的,DOP 小于 100% 是由于激光器腔内的一个往返周期中存在 CW 的成分。从图 2(f)可以直观看到,脉冲偏振态的演化在庞加莱球上为一个小区域的定点,为固定点的吸引子,由庞加莱球的性质可知,脉冲的状态全为左旋的椭圆偏振。

在 NPR 锁模光纤激光器中,可以通过改变激光器的参数使得脉冲状态发生切换,在保持腔内的 PCs 状态不变的情况下,仅升高泵浦功率到 450 mW,谐振腔内的 NPR 透射谱发生改变,由于峰值功率钳制效应,DS 可以切换到稳定的 NLP^[22]。尽管脉冲类型发生改变,但其仍然是偏振锁定的矢量脉冲,对应于脉冲正交偏振分量的同步状态,如图 3(d)~(f)中所示。图 3(a)的光谱变得较宽而且平坦,呈现出陡峭边缘的形状,3 dB

带宽为 8.536 nm,光谱上与图 2(a)相同波长处的微弱尖峰,同样是由 45° TFG 的二阶布拉格反射造成的^[18]。图 3(a)中的插图表明脉冲的信噪比为 50 dB,表明锁模光纤激光器具有较好的稳定性。图 3(b)为示波器测量得到的时域波形,相邻脉冲之间的时间间隔为 22.6 ns,表示类噪声脉冲最终形成了以激光腔的基本重复频率传输的准稳态脉冲波包序列。经过计算,此时图中脉冲峰峰值的波动为 4.5%,锁模脉冲较为稳定。图 3(c)展示的自相关轨迹有一个很大的底座和一个很窄的尖峰,与类噪声脉冲典型的自相关特点吻合。图 3(d)~(f)为脉冲偏振态的演化测量图,正交偏振分量相位差保持不变,DOP 的值大于 90%,脉冲总的输出功率保持不变,以上结果均表明此时脉冲序列是一个偏振锁定的状态。庞加莱球上的轨迹范围的大小与 DOP 成反比,故可以通过观察 DOP 是否快速跳变来判断脉冲是否为一个稳定的偏振状态,DOP 越高,则脉冲序列输出的偏振态越稳定。

由于存在内部固有扰动,NPR 锁模光纤激光器中纵模的相位可以在同步和去同步之间连续交替,达到耗散孤子、类噪声以及 CW 等 3 种状态自发切换的复合锁模状态^[23]。同时,可以调节脉冲正交偏振分量之间的同步状态,控制激光器中纵模相位之间的同步,使得输出的孤子类型以及脉冲的偏振态演化都变得更加复杂多样^[2, 24-25]。当泵浦功率为 420 mW 时,激光器可以工作在稳定的类噪声锁模状态,单一调节偏振控制器使得激光器变为一个部分锁模的状态。图 4(a)是输出的光谱,与类噪声脉冲光谱相似,可以注意到光谱平缓而延长的光谱尾沿具有类噪声脉冲的特性,光谱上下下降的竖线代表光谱仪在测量的过程中存在着脉冲锁模状态的转换^[22]。其中,光谱上的尖峰是 CW,CW 和锁模被视为锁模脉冲光纤激光器中两个相互对立的状态,分别对应激光器纵模相位差的同步与去同步。图 4(b)为示波器测量到的脉冲序列图,脉冲峰峰值的波动为 35.8%,远大于图 2(b)与图 3(b)中稳定的 CW 锁模状态下的峰峰值,此时脉冲的稳定性较低。图 4(c)表明,相较于稳定锁模的状态,此时激光器输出信噪比较低。在这种复合锁模下,脉冲偏振态的演化如图 4(d)~(f)所示。相位差跳变的同时伴随着输出能量以及 DOP 的波动,此时庞加莱球上的轨迹范围变大,输出脉冲序列的偏振态不稳定。并且相位差在保持常数(正交偏振分量同步)与跳变(正交偏振分量去同步)之间切换,与此时复合光谱纵模在同步与去同步之间切换的状态一致。

由实验结果可知,脉冲正交偏振分量的相位差的变化与耦合强度有关,进而决定正交偏振分量的同步状态。具体的相位差与耦合强度的关系可以使用同步系统中的 Adler 方程描述:

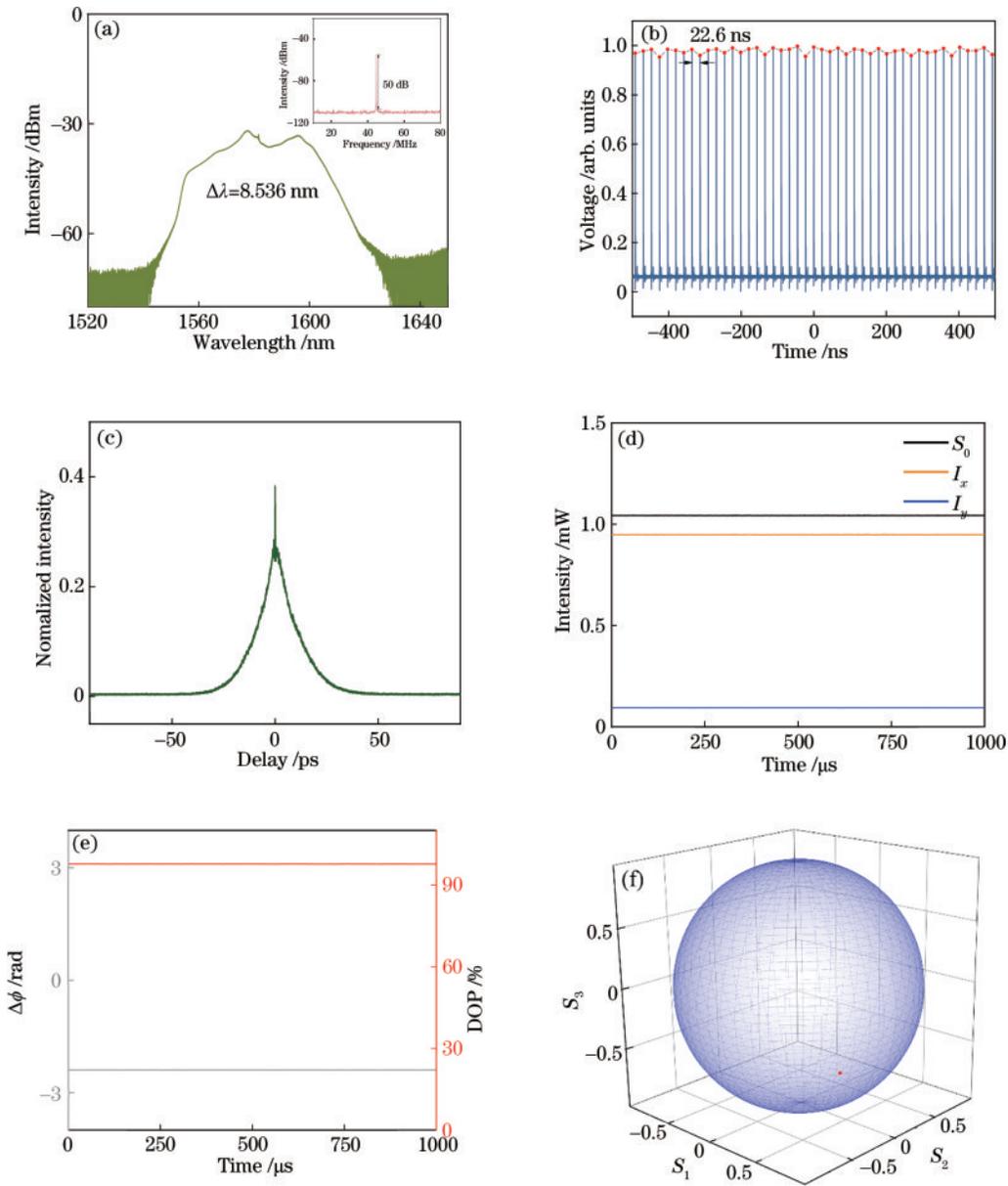


图3 偏振锁定矢量孤子(类噪声脉冲)。(a)典型类噪声光谱;(b)示波器脉冲序列;(c)自相关轨迹;(d)正交偏振分量的功率;(e)DOP 和相位差;(f)庞加莱球上偏振态演化轨迹

Fig. 3 Polarization locked vector soliton (noise like pulse). (a) Typical noise like spectrum; (b) oscilloscope pulse sequence; (c) autocorrelation trajectory; (d) the power of the orthogonal polarization component; (e) DOP and phase difference; (f) evolution trajectory of polarization state on Poincaré sphere

$$\frac{d\Delta\phi}{dt} = \Delta\Omega - \kappa \sin(\Delta\phi), \quad (1)$$

式中： $\Delta\Omega$ 是频率差； κ 是耦合系数。两个频率不同的谐振子是否可以完全同步主要取决于两个主要的因素：耦合强度以及频率差。在同步系统中谐振子的相位决定了周期谐振子的状态，两个谐振子通过耦合调整自己相位的变化，然后以相同的频率开始振荡，则意味着相位之间存在的一定的关系。在正色散 NPR 锁模光纤激光器中，频率差取决于线性和圆形双折射，并且耦合系数是正交 SOP 的输出功率的函数，该输出功率取决于泵浦光的功率和椭圆率^[2, 19, 26]。所以通过调节腔内的偏振控制器以及泵浦的功率可以调节正交偏

振分量之间的耦合强度以及频率差。考虑到脉冲在锁模光纤激光器中演化的偏振不稳定性，SOP 的输出功率可以变化，这与具有动态耦合机制的耦合谐振子也是一致的。根据 Adler 方程可知，当 $|\Delta\Omega| < |\kappa|$ 时，表示强耦合状态，同步 ($\frac{d\Delta\phi}{dt} = 0$) 存在，出现 CW 模式锁定。另一方面，当 $|\Delta\Omega| > |\kappa|$ 时，表示减弱或弱耦合状态。由 Adler 方程可知，脉冲正交偏振分量发生弱耦合，在同步与去同步之间切换，而在强耦合的状态下，脉冲正交偏振分量完全同步，即正交偏振分量之间的同步状态与纵模相位差的同步状态一致。

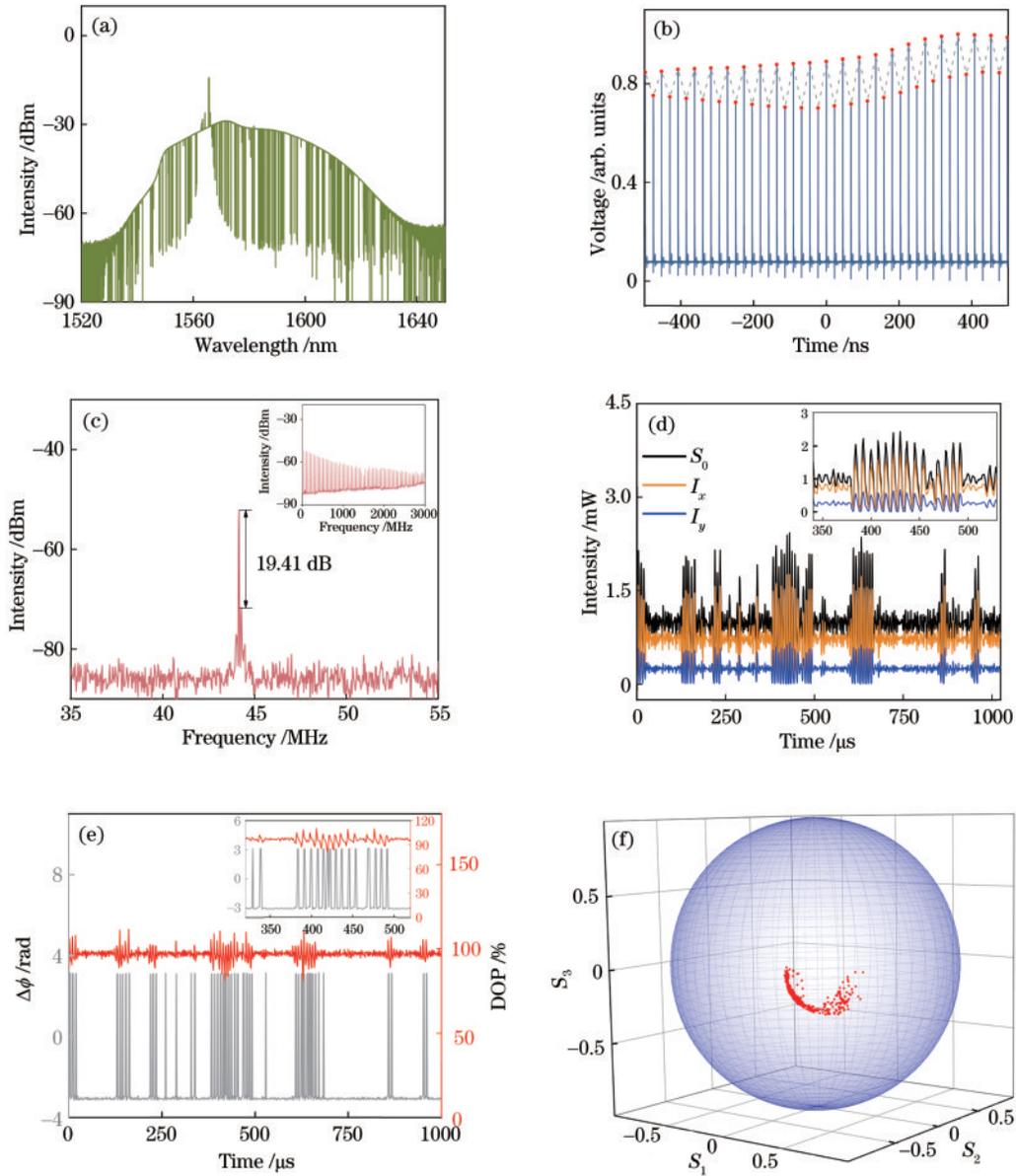


图4 复合锁模状态。(a)复合锁模光谱;(b)示波器脉冲序列;(c)基频处信噪比;(d)正交偏振分量的功率,插图是时间范围为340–530 μs 时的正交偏振分量功率;(e)DOP和相位差,插图是时间范围为320–520 μs 时的DOP和相位差;(f)庞加莱球上偏振态演化轨迹

Fig. 4 Composite mode-locked state. (a) Composite mode-locked spectroscopy; (b) oscilloscope pulse sequence; (c) signal to noise ratio at fundamental frequency; (d) the power of the orthogonal polarization component, as shown in the illustration, is the power of the orthogonal polarization component in the time range of 340–530 μs ; (e) DOP and phase difference, illustrated as DOP and phase difference in the time range of 320–520 μs ; (f) evolution trajectory of polarization state on Poincaré sphere

4 结 论

面向脉冲状态可切换的NPR锁模光纤激光器对纵模相位完全同步和部分同步状态下脉冲的偏振动力学开展实验研究。根据相位差、功率变化、DOP以及庞加莱球上偏振轨迹的演化分析正交偏振分量间的同步状态。在本实验中,稳定的CW锁模状态的耗散孤子和类噪声脉冲均为相位差恒定的矢量孤子。单向调节PC调节腔内的双折射获得了正交偏振分量相位差跳变的复合锁模状态。根据NPR锁模光纤激光器中的耦合振子同步理论,当耦合振子相位差为常数的时

候处于同步状态,当二者相位差跳变的时候处于去同步状态。首次从实验角度验证了耦合振子控制锁模光纤激光器中纵模的同步状态,在后续的工作中将进行数值模拟研究,从理论方面去探索脉冲偏振态演化与激光器纵模相位之间的关系。对于锁模光纤激光器偏振动力学的研究不但有助于理解耗散系统中复杂的非线性动力学现象,进而优化锁模激光器脉冲输出,而且能够加深对激光器不稳定性物理机制的理解。

参 考 文 献

- [1] Chang G Q, Wei Z Y. Ultrafast fiber lasers: an expanding

- versatile toolbox[J]. *iScience*, 2020, 23(5): 101101.
- [2] Khashi H, Sergeev S V, Mou C B, et al. Bright-dark rogue waves[J]. *Annalen Der Physik*, 2018, 530(5): 1700362.
- [3] Khashi H J, Sergeev S V, Al Aarimi M, et al. Vector soliton rain[J]. *Laser Physics Letters*, 2019, 16(3): 035103.
- [4] Sergeev S V, Eliwa M, Khashi H. Polarization attractors driven by vector soliton rain[J]. *Optics Express*, 2022, 30(20): 35663-35670.
- [5] Sergeev S V. Vector self-pulsing in erbium-doped fiber lasers[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(20): 4700-4703.
- [6] Zhao L M, Tang D Y, Zhang H, et al. Polarization rotation locking of vector solitons in a fiber ring laser[J]. *Optics Express*, 2008, 16(14): 10053-10058.
- [7] Tsaturian V, Sergeev S V, Mou C B, et al. Polarisation dynamics of vector soliton molecules in mode locked fibre laser[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 3154.
- [8] Mou C B, Sergeev S V, Rozhin A G, et al. Bound state vector solitons with locked and precessing states of polarization[J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 26868-26875.
- [9] Sergeev S V, Mou C, Rozhin A G, et al. Vector solitons with slowly evolving states of polarisation[C]// European Conference and Exhibition on Optical Communication, September 16-20, 2012, Amsterdam. Washington, D.C.: Optical Society of America, 2012: P7.02.
- [10] Du Y Q, Xu Z W, Shu X W. Spatio-spectral dynamics of the pulsating dissipative solitons in a normal-dispersion fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(15): 3602-3605.
- [11] Huang Q Q, Huang Z N, Mou C B. Transient soliton dynamics in a mode-locked fiber laser: from stationary to pulsation[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(22): 5683-5686.
- [12] Peng J S, Boscolo S, Zhao Z H, et al. Breathing dissipative solitons in mode-locked fiber lasers[J]. *Science Advances*, 2019, 5(11): eaax1110.
- [13] Sergeev S V, Khashi H, Sharma V. Polarization dynamics of mode-locked fiber laser[C]//2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), July 19-23, 2020, Bari, Italy. New York: IEEE Press, 2020.
- [14] Sergeev S V, Kolpakov S, Loika Y. Vector harmonic mode-locking by acoustic resonance[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(8): 1432-1438.
- [15] Bao C Y, Chang W, Yang C X, et al. Observation of coexisting dissipative solitons in a mode-locked fiber laser[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115(25): 253903.
- [16] Dudley J M, Dias F, Erkintalo M, et al. Instabilities, breathers and rogue waves in optics[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(10): 755-764.
- [17] Cabasse A, Ortaç B, Martel G, et al. Dissipative solitons in a passively mode-locked Er-doped fiber with strong normal dispersion[J]. *Optics Express*, 2008, 16(23): 19322-19329.
- [18] Mou C B, Suo R, Zhou K M, et al. 2nd order Bragg resonance generated in a 45° tilted fiber grating and its application in a fiber laser[C]//Advanced Photonics & Renewable Energy, June 21-24, 2010, Karlsruhe, Germany. Washington, D.C.: Optical Society of America, 2010: BTuA7.
- [19] Zhou S Y, Lin C, Yang Y T, et al. Multi-pulse sampling dual-comb ranging method[J]. *Optics Express*, 2020, 28(3): 4058-4066.
- [20] Ansmann G, Karnatak R, Lehnertz K, et al. Extreme events in excitable systems and mechanisms of their generation[J]. *Physical Review E*, 2013, 88(5): 052911.
- [21] Sergeev S V, Mou C B, Turitsyna E G, et al. Spiral attractor created by vector solitons[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(1): e131.
- [22] Zhao L M, Tang D Y, Wu J, et al. Noise-like pulse in a gain-guided soliton fiber laser[J]. *Optics Express*, 2007, 15(5): 2145-2150.
- [23] Du Y Q, Sergeev S V, Xu Z W, et al. Alternation of the mode synchronization and desynchronization in ultrafast fiber laser[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(3): 1900219.
- [24] Sergeev S V. Spontaneous light-polarization symmetry breaking for an anisotropic ring-cavity dye laser[J]. *Physical Review A*, 1999, 59(5): 3909-3917.
- [25] Sergeev S V. Vector self-pulsing in erbium-doped fiber lasers[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(20): 4700-4703.
- [26] Sergeev S V. Fast and slowly evolving vector solitons in mode-locked fibre lasers[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2014, 372(2027): 20140006.