



偏振动态可调耗散孤子光纤激光器实验研究

赵畅 黄千千 黄梓楠 戴礼龙 Sergeyev Sergey Rozhin Aleksey 牟成博

Experimental study on dissipative soliton fiber laser with dynamically tunable polarization trajectory

Zhao Chang Huang Qian-Qian Huang Zi-Nan Dai Li-Long Sergeyev Sergey Rozhin Aleksey Mou Cheng-Bo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 184218 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20201305

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201305>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于偏振依赖多模-单模-多模光纤滤波器的波长间隔可调谐双波长掺铒光纤激光器

Continuously spacing-tunable dual-wavelength erbium-doped fiber laser based on polarization-dependent in-line multimode-single-mode-multimode fiber filter

物理学报. 2019, 68(15): 154202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190297>

1064 nm 固体激光器和光纤激光器在制备压缩真空态光场实验中的对比研究

Comparative study of squeezed vacuum states prepared by using 1064-nm solid-state and fiber-laser as pump source

物理学报. 2019, 68(12): 124201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182304>

光纤激光器中包层功率剥离器散热性能的优化

Optimization of thermal performance of cladding power stripper in fiber laser

物理学报. 2020, 69(1): 014204 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191093>

530 W 全光纤结构连续掺铥光纤激光器

530 W all-fiber continuous-wave Tm-doped fiber laser

物理学报. 2020, 69(18): 184209 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200466>

基于1556 nm 光纤激光器频率分裂效应的应力测量

Stress measurement based on 1556 nm fiber laser frequency splitting effect

物理学报. 2019, 68(10): 104201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182171>

基于噪声免疫腔增强光外差分子光谱技术实现光纤激光器到1530.58 nm NH₃亚多普勒饱和光谱的频率锁定

Frequency locking of fiber laser to 1530.58 nm NH₃ sub-Doppler saturation spectrum based on noise-immune cavity-enhanced optical heterodyne molecular spectroscopy technique

物理学报. 2018, 67(10): 104207 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172541>

专题: 低维材料非线性光学与器件

偏振动态可调耗散孤子光纤激光器实验研究*

赵畅¹⁾ 黄千千¹⁾ 黄梓楠¹⁾ 戴礼龙¹⁾ Sergeyev Sergey²⁾Rozhin Aleksey²⁾ 牟成博^{1)†}

1) (上海大学, 特种光纤与光接入网重点实验室, 上海先进通信与数据科学研究院,

特种光纤与先进通信国际合作联合实验室, 上海 200444)

2) (阿斯顿大学, 阿斯顿光子技术研究所, 伯明翰 B47ET)

(2020年8月10日收到; 2020年8月27日收到修改稿)

实验搭建了一台基于碳纳米管的耗散孤子光纤激光器, 研究了耗散孤子的动态偏振特性. 在 160 mW 的抽运功率下, 得到了稳定的单脉冲耗散孤子. 通过调整腔内的偏振控制器, 得到了庞加莱球上为固定点形式吸引子的偏振锁定矢量耗散孤子. 单向机械调节腔内偏振控制器可以调控偏振锁定吸引子向极限环吸引子的演化, 且实现极限环区域可控. 对比不同偏振吸引子下的偏振度发现, 偏振度的高低和偏振吸引子覆盖区域面积成反比. 因此, 可以通过偏振度的大小定量地判断吸引子是否为偏振锁定. 该工作对于研究新型偏振可调激光器、探索激光器的物理机制具有指导意义.

关键词: 光纤激光器, 耗散孤子, 偏振吸引子

PACS: 42.65.Re, 42.81.Gs, 42.65.-k

DOI: 10.7498/aps.69.20201305

1 引言

近年来超短脉冲激光器由于其具有皮秒、飞秒甚至阿秒量级的脉宽, 极高峰值功率而被研究者广泛关注. 在开展超短脉冲研究时, 多数研究集中在脉冲周期、重复频率、峰值功率等性能指标的提升. 然而偏振作为光脉冲的一个重要特性, 研究相对较少. 1987年双折射光纤中的光脉冲传播理论建立后, 超短脉冲矢量特性开始进入人们的视野^[1]. 众所周知, 由于光纤拉制过程及外界应力作用导致单模光纤并不是各向同性而是具有轻微双折射. 矢量孤子是一种具有正交偏振分量的孤立波在双折射光纤中传输时保持波形不变的稳态波. 在单模光纤中, 由于超短脉冲光场能够引起非线性双折射, 光孤子的正交偏振分量之间会产生非线性耦合. 依

据这种耦合可以把矢量孤子划分为偏振锁定矢量孤子^[2-5]、偏振旋转锁定矢量孤子^[6-8]及群速度锁定矢量孤子^[9-10]等.

耗散孤子脉冲的产生得益于内部与外界能量的连续交换, 在这个过程中伴随着孤子不同部分能量的 redistribution^[11]. 通过优化腔内光谱滤波效应、非线性及色散, 可以得到帽型光谱形状的典型耗散孤子. 耗散孤子同时具有高能量、宽光谱等特点, 研究耗散孤子的偏振演化可对未来研究新型高能激光器提供实验依据, 具有重要意义. 目前有很多研究者致力于耗散孤子矢量特性的研究^[8,12-15]. 但是这些研究成果是基于偏振分束器来实现, 无法获得偏振态的相位信息, 也无法准确描述动态偏振变化过程及矢量脉冲的偏振度 (degree of polarization, DOP) 等信息, 尤其无法将动态偏振与吸引子联系起来.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61975107, 61605107) 和教育部“111 引智基地” (批准号: D20031) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: moucl@shu.edu.cn

最近,超短脉冲偏振吸引子的研究逐渐受到关注.偏振吸引子是指在有限时间尺度上偏振态演化的一种趋势.使用偏振分析仪可以记录正交偏振分量相关的斯托克斯参数 S_1, S_2, S_3 .由这些斯托克斯参数决定的脉冲偏振态会在庞加莱球上呈现出偏振态的演化轨迹,这就形成了所谓的偏振吸引子.通过分析偏振吸引子、DOP 及对应的相位信息能够更好地理解超短脉冲偏振维度的物理机制.目前,已经在经典孤子脉冲激光器中实验观测到偏振锁定吸引子、偏振进动吸引子、极限环吸引子及双螺旋奇异吸引子^[5,16–20].还有研究者提出了新型理论模型研究了怪波的起源^[21,22].这些偏振行为和腔内各向异性、增益与双折射密切相关.

本文搭建了基于碳纳米管锁模的掺铒光纤激光器.在正色散耗散孤子域,实验观测到偏振锁定吸引子.固定抽运功率并且单向调节偏振控制器(polarization controller, PC)可以让偏振锁定吸引子逐渐变为极限环吸引子的形式.反方向调节可以重复这个过程.实验表明 DOP 的大小和极限环覆盖区域成反比.该研究表明可以仅通过调节腔内双折射来控制耗散孤子的偏振态动态演变,对于未来研究新型高能量偏振动态可调激光振荡器具有指导意义.

2 实验装置

激光器的实验装置如图 1 所示,总腔长约为 14.5 m.我们使用长约 96 cm 的掺铒光纤(erbium doped fiber, EDF)作为激光器的增益介质,二阶色散为 $+66.1 \text{ ps}^2/\text{km}$.使用 2 m 的色散补偿光纤(dispersion compensate fiber, DCF)使激光器工作在净正色散域,二阶色散为 $+163.96 \text{ ps}^2/\text{km}$.其余腔内光纤为普通单模光纤,色散为 $-22 \text{ ps}^2/\text{km}$.腔内的净腔色散为 0.138 ps^2 ,因此能够产生耗散孤子.使用 980 nm 的半导体光源(OV LINK)作为抽运光,通过波分复用器(wavelength division multiplexing, WDM)与 EDF 相连.再使用 50:50 的耦合器(optical coupler, OC)分出一半能量用于腔外脉冲监测.腔内的 PC1 用于调节腔内双折射来优化腔内各向异性,抽运端的 PC2 用于调节抽运光的偏振态.偏振无关隔离器(polarization independent isolator, PI-ISO)用于保证光在激光器中的单向传输.使用碳纳米管作为可饱和吸收

体(carbon nanotube saturable absorber, CNT-SA)来产生锁模脉冲.

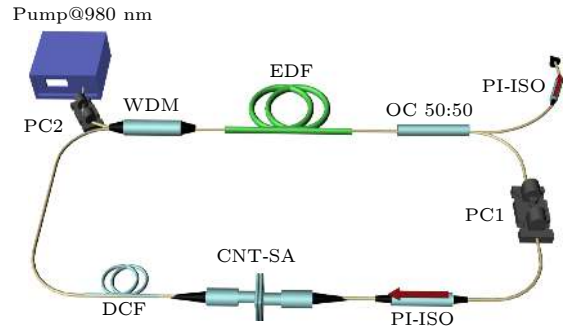


图 1 基于碳纳米管聚合物薄膜的锁模光纤激光器实验装置

Fig. 1. Schematic configuration of mode-locked all-fiber laser based on CNT-PVA film.

本文使用的探测仪器包括 12.5 GHz 带宽的光电探头(Newport 818-BB-51F)、8 GHz 的示波器(KEYSIGHT DSO90804A)、3.2 GHz 的信号分析仪(SSA, 3032X)、商业自相关仪(FEMTOCHROME, FR-103WS)、最大分辨率为 0.02 nm 的光谱仪(OSA, Yokogawa AQ6370C)、最大分辨率为 $1 \mu\text{s}$ 商业偏振分析仪(THORLABS, IPM5300).其中,偏振分析仪最大采样点数为 1024,因此最高能够探测 1 ms 时间尺度上的偏振态的演化.又因为脉冲的周期远小于 $1 \mu\text{s}$,因此庞加莱球上的偏振进化轨迹是一个平均的结果.但是这种平均结果不会影响偏振态演化的总体趋势.这种测量类似于光谱仪的测量,光谱仪也是平均的结果,但是可以表征脉冲的光谱特性.

3 实验结果和讨论

调节抽运功率至 160 mW,可以得到如图 2 所示的矢量耗散孤子(vector dissipative soliton, VDS).图 2(a)是典型的耗散孤子光谱.图 2(b)给出了示波器测得的脉冲序列,脉冲序列间隔为 70.5 ns ,对应 14.18 MHz 的基频.从图 2(c)可以看出,在基频处的信噪比为 57.7 dB ,内插图是带宽为 3 GHz 的射频谱.由脉冲序列和射频谱可知脉冲比较稳定,因此图 2(a)所示的光谱上的毛刺是与偏振相关.图 2(d)给出了使用偏振分析仪测量得到的偏振态演化轨迹.虽然从其他测量仪器上得到的数据显示该脉冲是一个稳态脉冲序列,但实际上脉冲偏振态在发生快速跳变.这也说明偏振态

在锁模光纤激光器中可以作为一个独立的维度存在. 仅通过光谱仪、示波器、频谱仪、自相关等传统观测手段不能完全确定脉冲的稳定性. 由于偏振烧孔效应, 所以锁模过程会改变增益介质的各向异性. 进一步通过腔内 PC 可以补偿腔内的线性或者圆形双折射. 在各向异性腔的拍长等于脉冲周期距离 (腔长), 且脉冲功率为恒定值情况下, 会形成偏振锁定矢量孤子 (polarization locked vector soliton, PLVS). 由于烧孔的深度和激光功率成正比, 因此周期性的功率振荡会引起增益介质各向异性的周期性调制 [17]. 如果脉冲周期距离等于拍长

的有理部分, 在多个脉冲周期后, 会在庞加莱球上形成第 1 个绕圆轨迹. 接着偏振态的轨迹就会以固定周期的方式进行相同轨迹的演化, 该固定周期为功率振荡的周期. 从图 2(e) 可以看出, 该图中周期大约为 300 μs , 约为 4255 个脉冲周期, 即每隔 300 μs 偏振态的演化就会在庞加莱球上形成一个绕圆的轨迹并且不断地进行叠加. 从图 2(f) 可以看出, 快速跳变的偏振态会导致较低的 DOP, 而 DOP、相位差的变化周期与功率变化周期相同, 约为 300 μs .

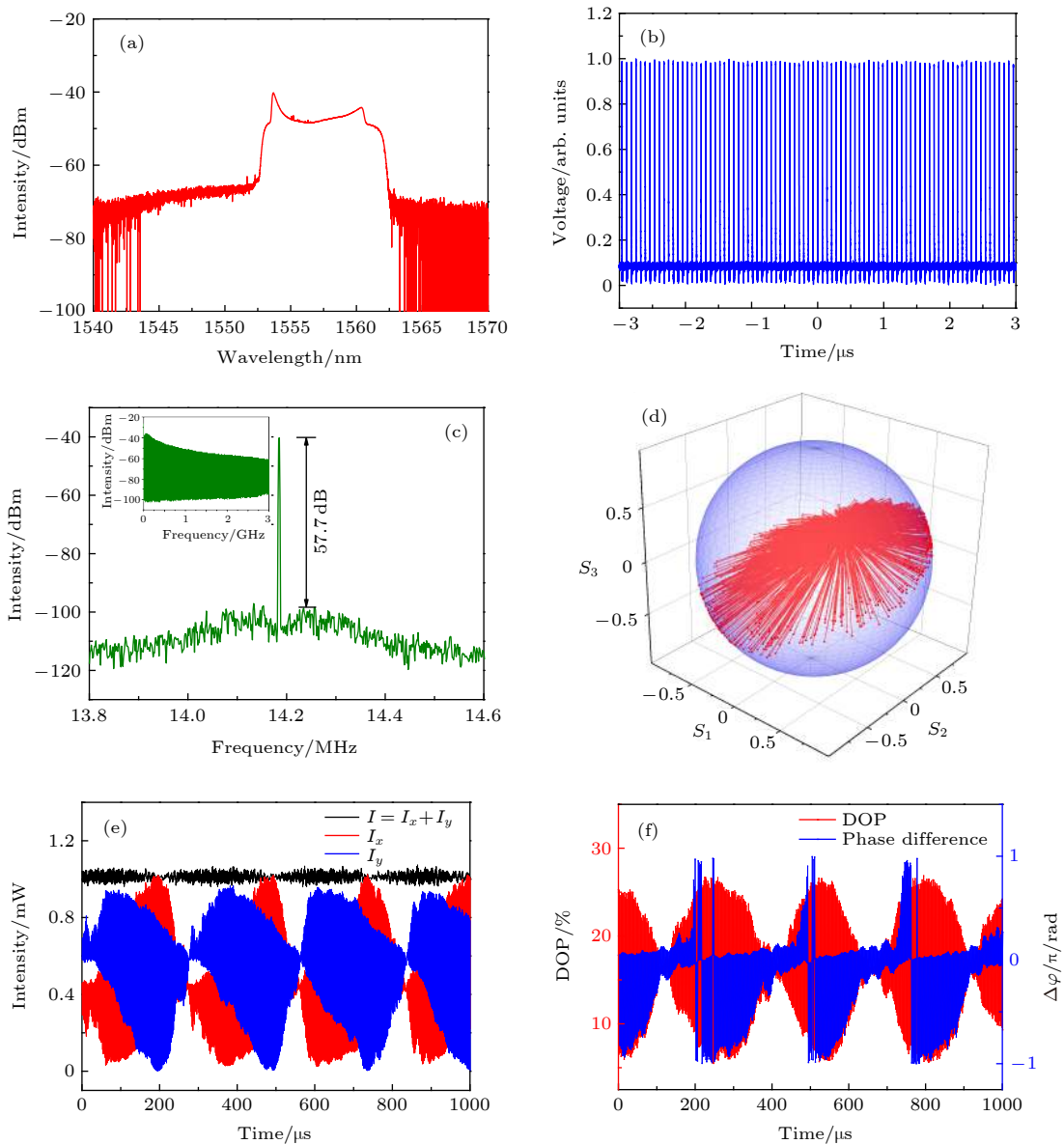


图 2 偏振进动 VDS (a) 典型耗散孤子光谱; (b) 示波器脉冲序列; (c) 基频处的信噪比, 插图为 3 GHz 带宽的射频谱; (d) 庞加莱球上偏振态演化轨迹; (e) 正交偏振分量的功率; (f) DOP 和相位差

Fig. 2. Polarization precession VDS: (a) Typical dissipative optical spectrum; (b) pulse trains measured by oscilloscope; (c) signal noise ratio at fundamental frequency where the inset shows radio-frequency spectrum over 3 GHz; (d) polarization evolution trace shown on Poincaré sphere; (e) power of two orthogonal polarization states; (f) DOP and phase difference.

由于光纤弯曲、光纤拉制等过程会产生随机双折射, 腔内的双折射对于整个腔的各向异性产生较大的影响. 但是在保证其他条件不变的情况下, 通过挤压式 PC 定向扭转光纤可以在一定程度上实现腔内双折射补偿从而开展偏振吸引子规律性地动态调控, 如图 3 所示. 仍然保持抽运功率为 160 mW, 从图 3(a) 的曲线 1—6 可以看出, 首先实现了偏振锁定耗散矢量孤子 (polarization locked vector dissipative soliton, PLVDS), 此时的偏振吸引子是固定点的形式 (图中曲线 1 和 2). PLVDS 是自然形成的, 仅需要增加抽运即可实现. 通过轻微调整 PC 可以得到明显的极限环吸引子 (图中曲线 3—6). 这种极限环吸引子的形成和腔内双折射有关, 即使改变腔长也可以通过调节 PC 补偿腔内双折射从而形成极限环吸引子. 朝一个方向缓慢旋转 PC, 可以发现极限环吸引子的覆盖区域不断发生变化. 这是由于随着 PC 的调节, 腔长和双折射长度的关系发生变化, 偏振态轨迹在圆上漂移的幅度不同导致绕圆轨迹不同. 此外, 反向调节 PC 可以重复实现曲线 6—1 的过程. 由此可见, 超短脉冲动态偏振态的可控已经在一定程度上得到实现. 图 3(b) 对应耗散孤子光谱的变化. 可以看出随着 PC 的调节, 光谱的谱宽不断减小, 这是由于弯曲光纤产生的双折射引起的滤波效应^[23,24]. 图 3(c) 是相对应的 DOP, 当为输出脉冲为 PLVDS 时 (对应偏振态轨迹 1), 偏振度最高, 超过了 90%. 随着腔内各向异性的调节, 偏振态跳变加快, 因此 DOP 随之降低. 通过对比图 3(a) 和图 3(c) 也可以看出, DOP 的大小和极限环覆盖的面积成反比. 因此可以得出经验方法, 通过 DOP 值判断偏振态变化的快慢, 以及是否是 PLVDS.

腔长与线性双折射长度的关系可以解释这种极限环吸引子的形成. 当腔长 L_{cav} 等于线性双折射长度 L_{bir} 或者圆形双折射长度 L_{cir} 时, 偏振态可以每个周期重复出现, 即出现偏振锁定的状态, 此时具有很高的 DOP, 如图 3(b) 和图 3(c) 中的曲线 1 和 2 所示. 当 $L_{cav} = L_{bir}/2$, 归一化斯托克斯参数 S_1, S_2, S_3 关于 S_1 对称, 当 $L_{cav} = L_{cir}/2$ 时归一化斯托克斯参数关于 S_3 对称. 此时, 输出脉冲偏振态会以对称形式出现. 当腔长 L_{cav} 相对于 $L_{bir}/2$ 或 $L_{cir}/2$ 出现轻微偏离时, 庞加莱球上关于 S_1 或 S_2 对称的偏振轨迹会出现轻微漂移. 这种漂

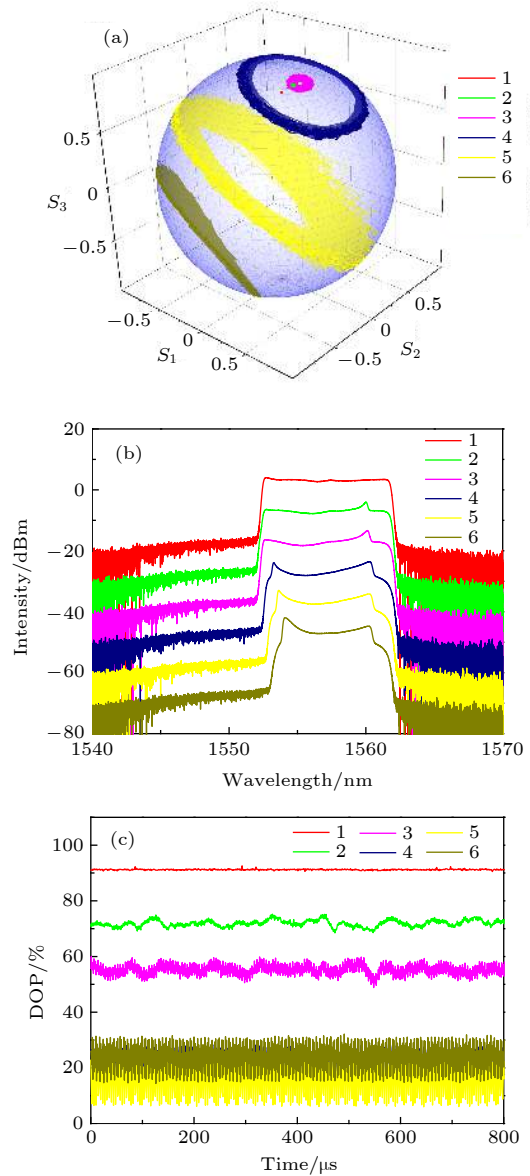


图 3 160 mW 抽运功率下偏振吸引子的动态调控 (a) 单向调节 PC 对应偏振吸引子的变化; (b) 对应光谱变化; (c) 对应 DOP 的变化

Fig. 3. Dynamic adjustment of polarization attractor under the pump power of 160 mW: (a) Change of polarization by adjusting PC in one direction; (b) change of optical spectrum; (c) change of DOP.

移会随着时间不断叠加最终形成极限环. 因此, 当线性双折射和圆形双折射都存在的情况下, 会形成相对于庞加莱球赤道倾斜的极限环. 本文中脉冲基频约为 14 MHz, 考虑到偏振分析仪的最大分辨率为 1 MHz, 所以平均 14 个脉冲周期后, 腔长和双折射长度的关系可以写为 $L_{cav} \sim L_b + L_b/(14N)$ 或 $L_{cav} \sim L_{cir} + L_{cir}/(14N)$, 这种关系可以通过调节腔内的偏振控制器来控制, 其中 N 为有理整数.

当 N 越大时, 庞加莱球表面的下一个点相对于当前位置的漂移就越小. 所以当 N 比较小时就会出现图 2(d) 的偏振吸引子, 当 N 较大时会出现图 3(b) 和图 3(c) 中的曲线 3—6.

4 结 论

本文针对基于碳纳米管的耗散孤子激光器进行了偏振动力学的研究. 在 160 mW 的抽运功率下, 通过相位、功率变化、DOP 及偏振态吸引子的观测分析出偏振态的变化和演化周期. 调节 PC 能够改变腔内双折射, 引起腔内各向异性的不同程度的调制. 通过单向调节 PC 来调节腔长和双折射长度的关系, 从而可以得到偏振吸引子从偏振锁定吸引子到极限环规律性的演化过程, 实验展示了超短脉冲偏振吸引子的动态调控. 在本实验中, 吸引子覆盖区域越大, 偏振态跳变越快, 从而对应的 DOP 越低. 因此能够定量地从 DOP 判断是否为偏振锁定吸引子. 这是矢量耗散孤子的动态偏振可控的首次实验展示. 我们期待本研究可以对探索新型高能偏振可控激光器奠定实验基础, 同时在光谱学^[25]、纳米粒子操纵^[26]、安全通信^[27]等领域具有应用价值.

参考文献

- [1] Menyuk C R 1987 *Opt. Lett.* **12** 614
- [2] Cundiff S T, Collings B C, Akhmediev N N, Soto-Crespo J M, Bergman K, Knox W H 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 3988
- [3] Collings B C, Cundiff S T, Akhmediev N N, Soto-Crespo J M, Bergman K, Knox W H 2000 *J. Opt. Soc. Am. B* **17** 354
- [4] Zhang H, Tang D, Zhao L, Bao Q, Loh K P 2010 *Opt. Commun.* **283** 3334
- [5] Mou C, Sergeyev S, Rozhin A, Turistyn S 2011 *Opt. Lett.* **36** 3831
- [6] Zhao L M, Tang D Y, Zhang H, Wu X 2008 *Opt. Express* **16** 10053
- [7] Song Y F, Zhang H, Tang D Y, Shen D Y 2012 *Opt. Express* **20** 27283
- [8] Han M, Zhang S, Li X, Zhang H, Yang H, Yuan T 2015 *Opt. Express* **23** 2424
- [9] Tang D Y, Zhang H, Zhao L M, Xiang N, Wu X 2008 *Opt. Express* **16** 9528
- [10] Luo Y, Cheng J, Liu B, Sun Q, Li L, Fu S, Tang D, Zhao L, Liu D 2017 *Sci. Rep.* **7** 2369
- [11] Grelu P, Akhmediev N 2012 *Nat. Photonics* **6** 84
- [12] Wong J H, Wu K, Liu H H, Ouyang C, Wang H, Aditya S, Shum P, Fu S, Kelleher E J R, Chernov A, Obraztsova E D 2011 *Opt. Commun.* **284** 2007
- [13] Ning Q Y, Liu H, Zheng X W, Yu W, Luo A P, Huang X G, Luo Z C, Xu W C, Xu S H, Yang Z M 2014 *Opt. Express* **22** 11900
- [14] Wang Z, Wang B, Wang K, Long H, Lu P 2016 *Opt. Lett.* **41** 3619
- [15] Song Y, Shi X, Wu C, Tang D, Zhang H 2019 *Appl. Phys. Rev.* **6** 021313
- [16] Sergeyev S V, Mou C, Rozhin A, Turitsyn S K 2012 *Opt. Express* **20** 27434
- [17] Mou C, Sergeyev S V, Rozhin A G, Turitsyn S K 2013 *Opt. Express* **21** 26868
- [18] Tsaturian V, Sergeyev S V, Mou C, Rozhin A, Mikhailov V, Rabin B, Westbrook P S, Turitsyn S K 2013 *Sci. Rep.* **3** 3154
- [19] Habruseva T, Sergeyev S, Turitsyn S 2014 *Conference on Lasers and Electro-Optics San Jose, USA, June 8–13, 2014 paper JTh2A.26*
- [20] Sergeyev S V, Mou C, Turitsyna E G, Rozhin A, Turitsyn S K, Blow K 2014 *Light Sci. Appl.* **3** e131
- [21] Khashi H, Sergeyev S V, Mou C, Garcia A M, Araimi M A, Rozhin A, Kolpakov S, Kalashnikov V 2018 *Annalen der Physik* **530** 1700362
- [22] Khashi H J, Sergeyev S V, Araimi M A, Tarasov N, Rozhin A 2019 *Laser Phys. Lett.* **16** 035103
- [23] Zhang H, Tang D, Knize R J, Zhao L, Bao Q, Loh K P 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 111112
- [24] Li X H, Wang Y G, Wang Y S, Hu X H, Zhao W, Liu X L, Jia Y, Gao C X, Zhang W, Yang Z, Li C, Shen D Y 2012 *IEEE Photonics J.* **4** 234
- [25] Zhdanovich S, Milner A A, Bloomquist C, Floss J, Averbukh I, Hepburn J W, Milner V 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 243004
- [26] Jiang Y, Narushima T, Okamoto H 2010 *Nat. Phys.* **6** 1005
- [27] VanWiggeren G D, Roy R 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 097903

SPECIAL TOPIC—Nonlinear optics and devices of low-dimensional materials

Experimental study on dissipative soliton fiber laser with dynamically tunable polarization trajectory^{*}

Zhao Chang¹⁾ Huang Qian-Qian¹⁾ Huang Zi-Nan¹⁾ Dai Li-Long¹⁾
Sergeyev Sergey²⁾ Rozhin Aleksey²⁾ Mou Cheng-Bo^{1)†}

1) (*Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai Institute for Advanced Communication and Data Science, Joint International Research Laboratory of Specialty Fiber Optics and Advanced Communication, Shanghai University, Shanghai 200444, China*)

2) (*Aston Institute of Photonic Technologies (AIPT), Aston University, Birmingham B47ET, UK*)

(Received 10 August 2020; revised manuscript received 27 August 2020)

Abstract

In this paper, a dissipative soliton mode-locked fiber laser is established based on carbon nanotube in order to study the polarization dynamics of dissipative soliton by using a commercial polarimeter. Under the pump power of 160 mW, stable dissipative soliton are observed to have a limited cycle polarization trajectory shown on Poincare sphere, indicating the periodic modulation of anisotropy in cavity. The stable dissipative soliton possesses a high signal noise ratio of 57.7 dB at fundamental frequency. Moreover, the fast oscillation of state of polarization leads to a lower degree of polarization (DOP). In addition, the polarization controllers are employed to compensate for the birefringence in the cavity to adjust the ratio between cavity length and birefringence length. As a result, we can observe the polarization evolving from the polarization locked attractor to the limited cycle attractor by adjusting polarization controllers. It is noted that this dynamic polarization trajectory can be manually controlled. By comparing polarization attractor with DOP, it is clear that the size of trajectory shown on Poincare sphere is inversely proportional to DOP. We expect our work to be conducive to studying the physics in lasers and creating a new type of polarization tunable laser.

Keywords: fiber laser, dissipative soliton, polarization attractor

PACS: 42.65.Re, 42.81.Gs, 42.65.-k

DOI: [10.7498/aps.69.20201305](https://doi.org/10.7498/aps.69.20201305)

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61975107, 61605107) and the “111” project Ministry of Education of China (Grant No. D20031).

[†] Corresponding author. E-mail: moucl@shu.edu.cn