

正色散掺铒光纤激光器耗散孤子共振脉冲特性研究^①

张丽强 高丛丛 王贝贝 张丙元

(聊城大学 物理科学与信息工程学院、山东省光通信科学与技术重点实验室, 山东 聊城 252059)

摘 要 报道了一种工作在正色散区的耗散孤子共振脉冲锁模光纤激光器. 详细研究了泵浦功率及偏振控制器状态对输出脉冲特性的影响. 耗散孤子共振脉冲中心波长 1 575 nm, 光谱宽度约 6.66 nm. 当泵浦功率从 220 mW 升高到 554 mW 时, 脉冲宽度从 0.78 ns 增加到 3.16 ns, 脉冲能量变化范围为 3.5 nJ 至 16.9 nJ. 泵浦功率 409 mW 时, 改变偏振控制器状态, 脉冲宽度在 1.6 ns 至 3.2 ns 范围之间变化. 实验中还研究了获得的耗散孤子共振纳秒矩形脉冲的啁啾特性, 脉冲经过 25 m 单模光纤传输, 脉冲宽度无明显变化, 脉冲为非线性啁啾.

关键词 耗散孤子共振, 锁模, 正色散, 光纤激光器

中图分类号 TN248

文献标识码 A

0 引言

锁模脉冲激光器峰值功率高, 脉冲宽度窄, 在材料科学、生物医学、高速光通信等领域有重要应用^[1-4]. 与固体激光器相比, 光纤锁模激光器脉冲质量高, 散热效果好, 结构紧凑, 成本低廉. 但光纤非线性效应的存在, 限制了脉冲能量的提高. 为提高锁模光纤激光器的脉冲能量, 人们提出各种脉冲演化机制, 比如正色散光纤激光器中的耗散孤子和自相似脉冲. 但由于非线性相移的积累, 当单脉冲能量较高时, 耗散孤子及自相似脉冲锁模激光器中仍存在脉冲分裂现象.

2008 年, Chang 等^[5]在用金兹堡-朗道方程研究耗散孤子系统脉冲特性时发现, 在特定方程参数下, 单脉冲能量可无限增大而不会出现脉冲分裂, 这种脉冲行为称之为耗散孤子共振(dissipative soliton resonance, 简称 DSR). DSR 脉冲为矩形脉冲, 随泵浦功率的提高, 脉冲宽度增大, 单脉冲峰值功率保持不变^[6-8]. 2009 年, Xu 等^[9]在掺铒光纤激光器中观察到 DSR 脉冲, 证实这种脉冲的存在. 随后, DSR 引起人们广泛关注^[10-13]. 非线性偏振旋转锁模的 DSR 光纤激光器^[14-18], 8 字形光纤激光^[19-22]以及使用碳纳米管^[16]或石墨烯^[10]作为锁模器件的 DSR 激光器相继被报道. 激光器波长也覆盖了 1 060 nm 波段^[10, 14, 23]、1 550 nm 波段以及掺铋光纤激光器的 1 170 nm^[19]波段.

在 1 550 nm 波段, 掺铒光纤 DSR 锁模激光器的研究, 大多集中在负色散区域^[15-18]. 2011 年, Duan 等^[15]首次报道了负色散掺铒光纤激光器中的矩形脉冲, 并对输出脉冲的啁啾特性进行了研究. 随后, Luo 等^[12]实验研究了工作在耗散孤子共振状态的负色散掺铒光纤激光器中的脉冲的动力学特性, 随着泵浦功率的提高, 脉冲形状从类双曲正割型演化为矩形, 脉冲宽度的调制范围也覆盖到了脉冲在腔内循环一周的时间. 2015 年, Liu 等^[24]在 8 字形光纤激光器内加入 5.5 km 普通单模光纤, 获得了 135 ns 至 2 272 ns 宽度可调的 DSR 脉冲. 2017 年, Lyu 等^[17]研究了负色散掺铒光纤激光器中的多脉冲现象. Krzempek^[20]及 Semaan^[11, 13, 21]则对 Er:Yb 共掺负色散光纤激光器中 DSR 脉冲的光谱特性、多脉冲特性及其他特性进行了研究.

普通通信光纤在 1 550 nm 波段为负色散, 因此, 相比于负色散 DSR 激光器, 正色散区掺铒光纤 DSR

① 收稿日期: 2018-03-16

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0402105); 博士科研启动基金(318051412); 泰山学者特别建设项目基金资助
通讯作者: 张丙元, 男, 汉族, 博士, 教授, 研究方向: 激光技术与应用, E-mail: byzhang@lcu.edu.cn.

激光器的报道非常少. Wu 等^[9]报道了使用非线性偏振旋转锁模的掺铒光纤全正色散激光器中的 DSR 现象, Yang 等^[26]则研究了 8 字形锁模激光器的 DSR 特性. 正色散掺铒光纤激光器中 DSR 现象的脉冲演化特性、脉冲随偏振控制器状态的变化特性及输出脉冲在负色散单模光纤中的传输特性均未见报道. 正色散锁模激光器中, 脉冲在腔内展宽, 峰值功率降低, 从而降低了光纤非线性效应的影响, 有望输出更高的脉冲能量, 有必要对正色散掺铒光纤 DSR 激光器进行深入研究, 以便更好地理解耗散孤子共振脉冲激光器以及正色散锁模光纤激光器的工作特性.

本文报道了一种正色散区掺铒光纤 DSR 激光器. 调节偏振控制器, 激光器可分别工作在耗散孤子及耗散孤子共振状态. 耗散孤子共振脉冲重复频率 922 kHz, 激光器中心波长 1 575 nm, 光谱宽度约 6.66 nm. 研究发现, 泵浦功率升高时, 脉冲宽度增加但峰值功率不变, 但当泵浦功率不变, 改变偏振控制器状态时, 脉冲宽度增加, 峰值功率降低. 同时, 对输出脉冲在普通单模光纤中的传输特性进行了研究.

1 实验装置

实验中搭建的 DSR 锁模光纤激光器的结构如图 1 所示, 锁模方式为非线性偏振旋转. 增益介质为一段 0.8 m 掺铒光纤, 976 nm 泵浦光通过波分复用器(WDM)耦合至增益光纤. 两个偏振控制器(PC1 及 PC2)及其中间的偏振相关隔离器(ISO)用来实现非线性偏振旋转锁模, 偏振相关隔离器同时用来保证光单向传输. 激光器的输出由 10/90 的耦合器(10/90 OC)提供, 10% 的光输出至腔外. 为使

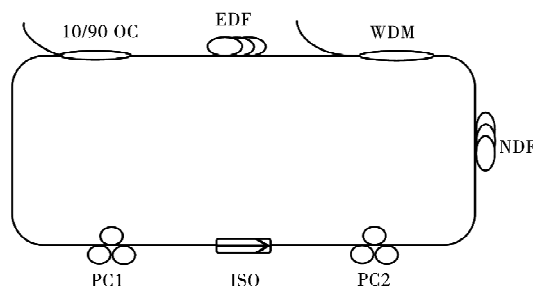


图 1 实验装置图

激光器工作在正色散区, 加入 190 m 正色散光纤(NDF). WDM、输出耦合器 OC 及偏振相关隔离器的尾纤为普通单模光纤 SMF-28e, 总长度约 5.5 m, 在 1 550 nm 附近的色散值为 $-23 \text{ ps}^2/\text{km}$, 偏振控制器及色散位移光纤的总长度约 200 m, 在 1 550 nm 附近的色散为 $1.2 \text{ ps}^2/\text{km}$, 掺铒光纤在 1 550 nm 附近的色散为 $13.5 \text{ ps}^2/\text{km}$, 腔内总色散约 0.124 ps^2 , 激光器工作在正色散区. 实验中使用光谱仪 AQ6370D 记录光谱形状, 使用探测器(ET-3000)及示波器 DSO54832b 记录脉冲形状.

2 实验结果及讨论

实验过程中通过调节泵浦功率及偏振控制器状态可分别获得耗散孤子脉冲及 DSR 脉冲. 图 2 给出了泵浦功率 267.3 mW 时, 激光器输出的耗散孤子的特性. 图 2(a)为示波器显示的单脉冲形状. 图 2(b)为对应的光谱, 光谱边缘陡峭, 为耗散孤子的典型特征. 中心波长 1 561.4 nm, 3 dB 带宽 17.4 nm. 实验中重点关注 DSR 现象, 详细讨论 DSR 脉冲的特性.

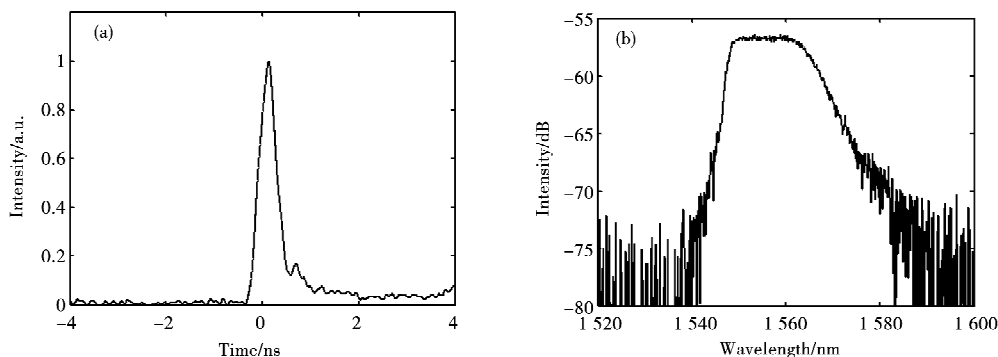


图 2 激光器输出的耗散孤子特性 (a) 示波器记录的单脉冲形状; (b) 光谱

图 3 为泵浦功率 491 mW 时激光器输出的 DSR 脉冲特性. 图 3(a)为单脉冲形状, 脉冲宽度为 2.8 ns. 图 3(b)为脉冲序列, 脉冲重复频率 922 kHz, 与脉冲在腔内循环一周的时间一致. 图 3(c)为对应的光谱图, 中心波长 1 575 nm, 3 dB 带宽 6.66 nm. 文献^[12]与^[17]报道的工作在负色散区的 DSR 脉冲的光谱形状与传统孤子类似, 光谱具有明显的边带. 本文获得的 DSR 脉冲的光谱则与文献^[9]报道的一致, 光谱没

有调制边带,而类似于掺铒光纤激光器的放大的自发辐射光.与图2相比,脉冲形状及光谱均明显不同.图3(d)为扫描范围50 MHz时脉冲的频谱图,信噪比约30 dB.

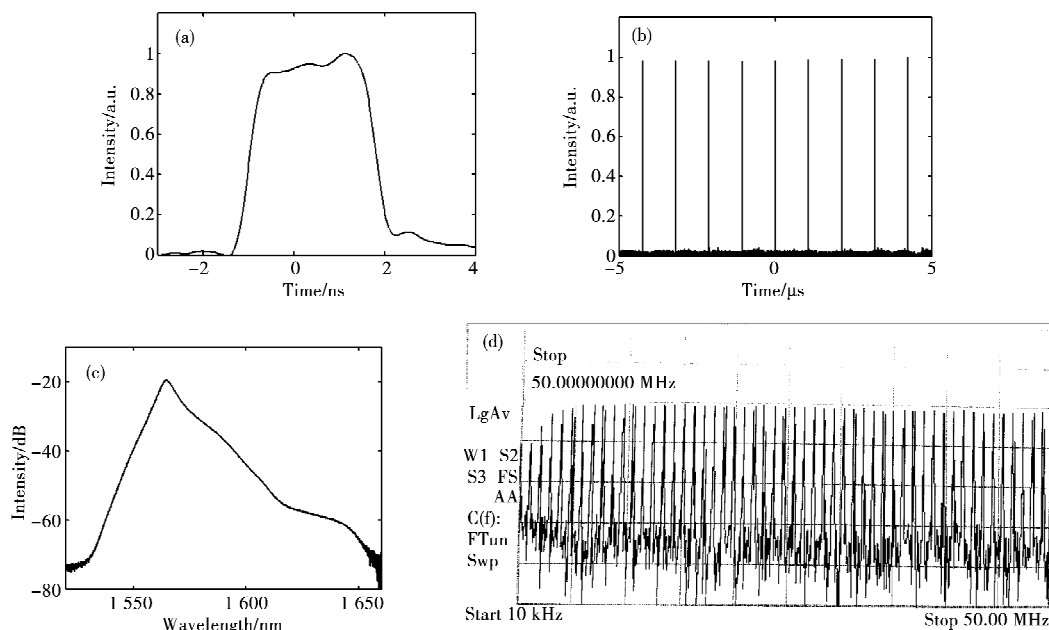


图3 输出的耗散孤子共振脉冲特性 (a)单脉冲形状, (b)脉冲序列, (c)光谱, (d)频谱

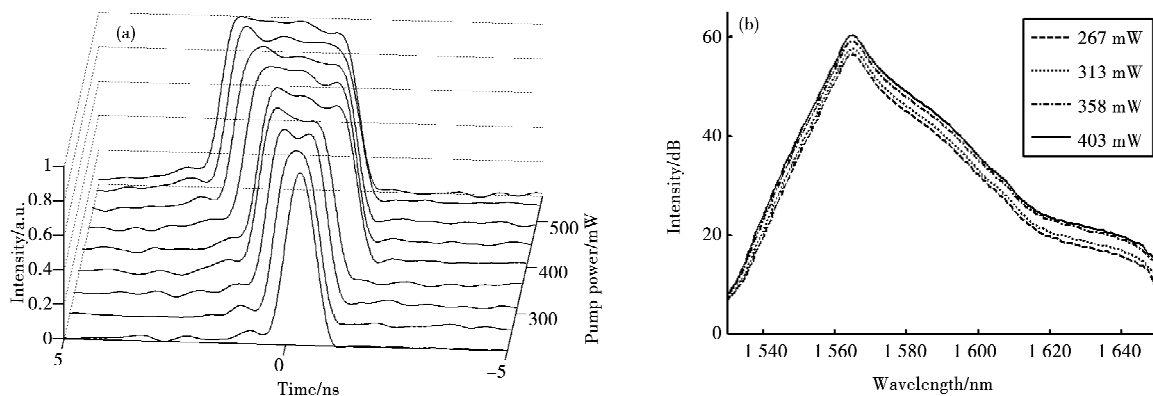


图4 脉冲及光谱形状随泵浦功率的变化 (a) 脉冲形状, (b) 光谱形状

DSR 脉冲的典型特征为当泵浦功率增大时,脉冲宽度增加,但峰值功率不变.为证实激光器工作在 DSR 状态,研究了脉冲形状随泵浦功率的演化情况.图4给出了当泵浦功率从220 mW增加到554 mW时,脉冲及光谱的变化情况.从图4(a)可以看出,泵浦功率较低时,脉冲并非矩形,随着泵浦功率的增大,脉冲逐渐演化为矩形.当泵浦功率继续增大时,矩形脉冲的峰值功率不变,脉冲宽度增加. Duan 等^[15]及 Lyu^[17]搭建的 DSR 激光器,泵浦功率增大时,脉冲从类双曲正割型演化为矩形,而 Zhao 等^[19]报道的掺铒光纤 DSR 激光器,脉冲形状则从高斯型演化为矩形.为分析实验获得的低功率时 DSR 脉冲的形状,对220 mW时脉冲进行曲线拟合.图5为分别用高斯曲线和双曲正割曲线拟合的结果,从图中可以看出,泵浦功率较低时,输出脉冲的形状更接近高斯型.图4(b)为泵浦功率变化时,光谱的变化情况,光谱宽度及形状没有明显的变化.光谱的这种特性使其能够克服增益带宽的限制,有望获得超高能量的脉冲^[15].脉冲及光谱形状的演化结果证实获得的是耗散孤子共振脉冲.

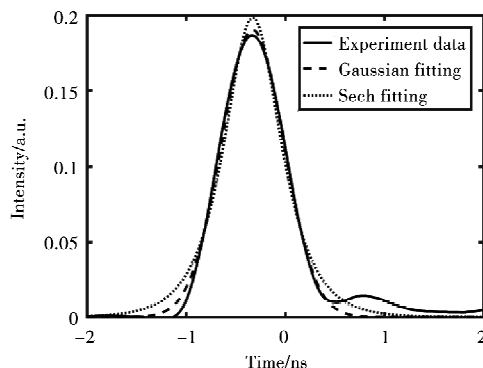


图5 220 mW 时脉冲形状及曲线拟合结果

图 6 为激光器的输出功率、峰值功率、脉冲宽度以及单脉冲能量随泵浦功率的变化情况. 当泵浦功率从 220 mW 升高到 554 mW 时,输出功率从 3.2 mW 增大到 15.6 mW,而峰值功率保持在 5 W 左右. 当泵浦功率 554 mW 时,激光器输出功率 15.6 mW,此时脉冲峰值功率 5.35 W,考虑到输出耦合比为 10%,此时激光腔内脉冲的峰值功率约 50 W. 随着泵浦功率的增加,输出脉冲宽度和单脉冲能量线性增大. 当泵浦功率从 220 mW 升高到 554 mW 时,脉冲宽度从 0.78 ns 增加到 3.16 ns,脉冲能量变化范围为 3.5 nJ 至 16.9 nJ. 受限于泵浦源的最大输出功率,泵浦功率没有继续增大.

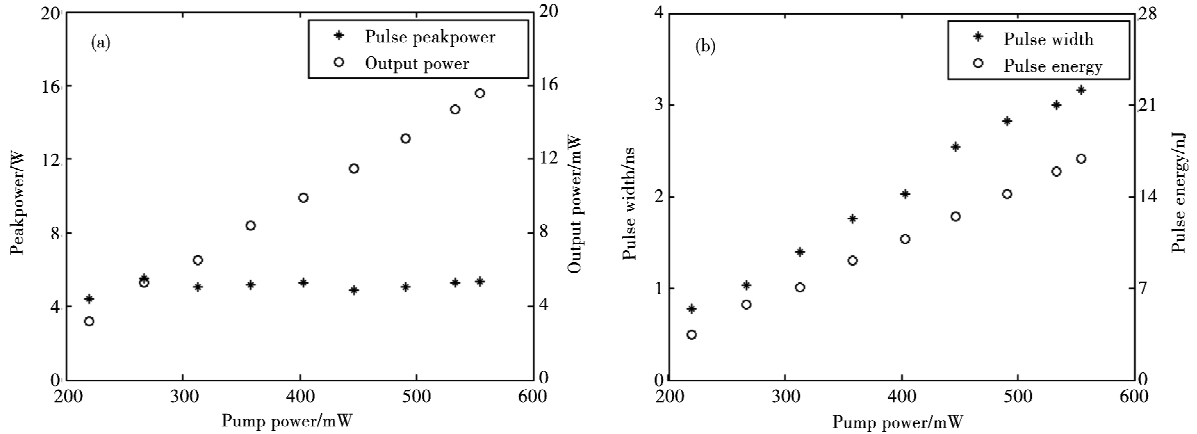


图 6 输出特性随泵浦功率的变化(a)输出功率及峰值功率,(b)及脉冲宽度和单脉冲能量

实验过程中发现,矩形脉冲的宽度除了与泵浦功率有关外,还与偏振控制器状态有关. 当泵浦功率一定时,小范围内连续改变偏振控制器状态,激光器能持续保持在稳定的 DSR 状态,脉冲峰值功率降低,宽度增大. 图 7(a)为泵浦功率 409 mW 时,激光器输出脉冲随偏振控制器状态的变化. 脉冲宽度的变化范围为 1.6 ns 至 3.2 ns. 继续改变偏振控制器状态,激光器输出脉冲不稳定,脉冲分裂为 2-3 个小脉冲,小脉冲的宽度及形状随机变化,图 7(b)随机记录了 3 个分裂后的脉冲.

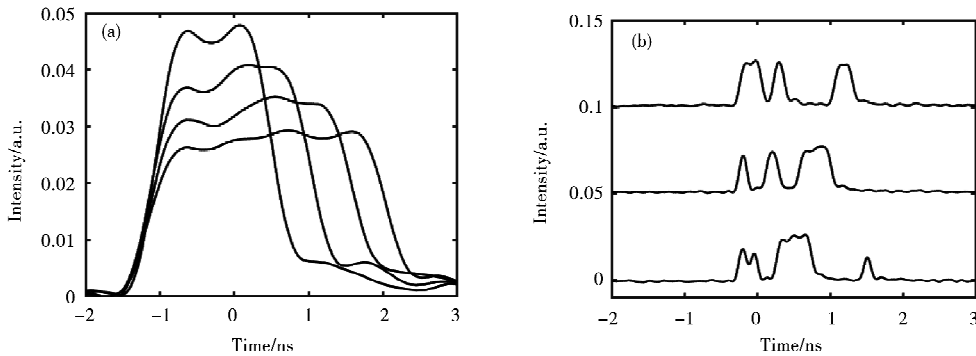


图 7 脉冲形状随偏振控制器状态的变化

具有线性啁啾的脉冲在负色散光纤中传输时,脉冲会被压缩. DSR 脉冲边缘陡峭,中间平坦,有必要确定这种脉冲中心部分是否为线性啁啾. Duan 等^[15]使负色散掺铒光纤激光器输出的 DSR 脉冲经过 10 m 及 20 m 色散补偿光纤,脉冲宽度几乎不变,脉冲无法被压缩. 为确定实验过程中获得的 DSR 脉冲能否被压缩,研究了输出脉冲在普通负色散光纤中的传输特性. 使输出脉冲分别经过 2 m, 6 m 以及 25 m 单模光纤,其提供的色散值分别为 -0.046 ps^2 , -0.138 ps^2 及 -0.575 ps^2 . 图 8 给出了光纤经过 2 m 及 25 m 负色散光纤后的结果,脉冲宽度基本保持不变. 说明实验中获得 DSR 脉冲具有非线性啁啾,脉冲无法被压缩.

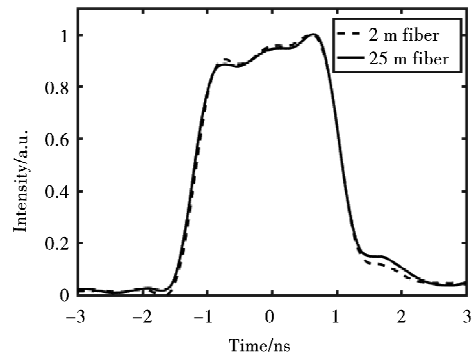


图 8 经 2 m 及 25 m 单模光纤传输后的脉冲

3 结论

详细研究了工作在正色散区耗散孤子共振脉冲的输出特性. 获得的脉冲重复频率 922 kHz, 中心波长 1 575 nm, 光谱宽度约 6.66 nm. 泵浦功率 554 mW 时, 输出的平均功率 15.6 mW, 脉冲宽度 3.16 ns, 单脉冲能量 16.9 nJ. 实验中探索了泵浦功率和偏振状态对 DSR 脉冲的影响. 当泵浦功率从 220 mW 升高到 554 mW 时, 脉冲宽度从 0.78 ns 增加到 3.16 ns. 泵浦功率 409 mW 时, 改变偏振控制器状态, 脉冲宽度在 1.6 ns 至 3.2 ns 范围之间变化. 研究结果对于更好地理解耗散孤子共振激光器及正色散锁模光纤激光器的工作特性有重要意义.

参 考 文 献

- [1] Keller U. Recent developments in compact ultrafast lasers[J]. *Nature*, 2003, 424: 831-838.
- [2] 宋琦, 王国菊, 张丙元, 等. Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 晶体的被动调 Q 运转特性研究[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2014, 27(4): 90-94.
- [3] 刘朋, 田振, 张丙元, 等. 基于氧化石墨烯掺铈光纤锁模激光器的研究[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2014, 27(1): 43-45.
- [4] 王贝贝, 高雅静, 高丛丛, 等. 基于 MoS₂ 可饱和吸收体的 Nd:GYSGG 激光器双波长调 Q 及锁模的研究[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2017, 30(2): 30-34.
- [5] Chang W, Ankiewica A, Soto-Crespo J M, et al. Dissipative soliton resonance[J]. *Phys Rev A*, 2008, 78: 023830.
- [6] Chang W, Ankiewicz A, Soto-Crespo J M, et al. Dissipative soliton resonances in laser models with parameter management[J]. *J Opt Soc Am B*, 2008, 25(12): 1972-1977.
- [7] Chang W, Soto-Crespo J M, Ankiewica A, et al. Dissipative soliton resonances in the anomalous dispersion regime[J]. *Phys Rev A*, 2009, 79: 033840.
- [8] Ding E, Grellu P, Kutz N. Dissipative soliton resonance in a passively mode-locked fiber laser[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(7): 1146-1148.
- [9] Xu W, Tang D Y, Zhang H, et al. Dissipative soliton resonance in an all-normal-dispersion erbium-doped fiber laser[J]. *Opt Express*, 2009, 17(7): 5580-5584.
- [10] Zhao N, Liu M, Liu H, et al. Dual-wavelength rectangular pulse Yb-doped fiber laser using a microfiber-based graphene saturable absorber[J]. *Opt Express*, 2014, 22(9): 10906-10913.
- [11] Semaan G, Niang A, Salhi M, et al. Harmonic dissipative soliton resonance square pulses in an anomalous dispersion passively mode-locked fiber ring laser[J]. *Laser Phys Lett*, 2017, 14: 055401.
- [12] Luo Z C, Cao W J, Lin Z B, et al. Pulse dynamics of dissipative soliton resonance with large duration-tuning range in a fiber ring laser[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(22): 4777-4779.
- [13] Semaan G, Komarov A, Niang A, et al. Spectral dynamics of square pulses in passively mode-locked fiber lasers[J]. *Phys Rev A*, 2018, 97(2): 023812.
- [14] Liu L, Liao J H, Ning Q Y, et al. Wave-breaking-free pulse in an all-fiber normal-dispersion Yb-doped fiber laser under dissipative soliton resonance condition[J]. *Opt Express*, 2013, 21(22): 27087-27092.
- [15] Duan L, Liu X M, Mao D, et al. Experimental observation of dissipative soliton resonance in an anomalous-dispersion fiber laser[J]. *Opt Express*, 2012, 20(1): 265-270.
- [16] Deng Z S, Zhao G K, Yuan J Q, et al. Switchable generation of rectangular noise-like pulse and dissipative soliton resonance in a fiber laser[J]. *Opt Lett*, 2017, 42(21): 4517-4520.
- [17] Lyu Y J, Zou X H, Shi H X, et al. Multipulse dynamics under dissipative soliton resonance condition[J]. *Opt Express*, 2017, 25(12): 13286-13295.
- [18] Semaan G, Komarov A, Niang A, et al. Spectral dynamics of square pulses in passively mode-locked fiber lasers[J]. *Phys Rev A*, 2018, 97: 023812.
- [19] Zhao G K, Lin W, Chen H J, et al. Dissipative soliton resonance in Bismuth-doped fiber laser[J]. *Opt Express*, 2017, 25(17): 20923-20931.
- [20] Krzempek K. Dissipative soliton resonances in all-fiber Er-Yb double clad figure-8 laser[J]. *Opt Express*, 2015, 23(24): 30651-30656.
- [21] Semaan G, Braham F B, Salhi M, et al. Generation of high energy square-wave pulses in all anomalous dispersion Er: Yb passive mode locked fiber ring laser[J]. *Opt Express*, 2016, 24(8): 8399-8404.
- [22] Semaan G, Braham F B, Fourmont J, et al. 10 μ J dissipative soliton resonance square pulse in a dual amplifier figure-of-eight double-clad Er: Yb mode-locked fiber laser[J]. *Opt Lett*, 2016, 41(20): 4767-4770.
- [23] Cao Y F, Jia D F, Liu T H, et al. Generation of a square pulse with ultra-wide tuning range in a passively mode-locked Yb-doped fiber laser[J]. *Appl Optics*, 2017, 56(24): 6742-6747.
- [24] Liu T H, Jia D F, Liu Y, et al. Generation of microseconds-duration square pulses in a passively mode-locked fiber laser[J]. *Opt Com-*

mun, 2015, 356: 416-420.

- [25] Yang J H, Guo C Y, Ruan S C, et al. Observation of dissipative soliton resonance in a Net-normal dispersion figure-of-eight fiber laser [J]. IEEE Photonics J, 2013, 5(3): 1500806.
- [26] Zhao L M, Tang D Y, Cheng T H, et al. Nanosecond square pulse generation in fiber lasers with normal dispersion [J]. Opt Commun, 2007, 272: 431-434.

Dissipative Soliton Resonance Pulses in a Net-normal Dispersion Er-doped Fiber Laser

ZHANG Li-qiang GAO Cong-cong WANG Bei-bei ZHANG Bing-yuan

(School of Physics Science and Information Technology, Shandong Key Laboratory of Optical Communication Science and Technology, Liaocheng University, Licao Cheng 252059, China)

Abstract The generation of dissipative soliton resonance pulses in a passively mode-locked net-normal dispersion Er-doped fiber laser is demonstrated. The dependence of pulse characteristics on pump power and the state of polarization controllers is investigated detailed. The central wavelength is 1 557 nm, with the 3 dB bandwidth of 6.66 nm. By purely increasing the pump power from 220 mW to 554 mW, the pulse duration extends from 0.78 ns to 3.16 ns, while the pulse energy ranges from 3.5 nJ to 16.9 nJ. At the pump power of 409 mW, by carefully adjusting of the polarization controller's orientation, pulse duration varies from 1.6 ns to 3.2 ns. Moreover, the chirp properties of the pulses is checked. No obvious change on the pulse profile was observed after propagation in a 25 m standard single mode communication fiber.

Key words dissipative soliton resonance; mode lock; normal dispersion; fiber laser

(上接第 30 页)

- [4] 李立卫, 王加贤, 王娟娟. SESAM 实现 Nd:YAG 激光器被动锁模研究及皮秒脉冲测量[J]. 量子光学学报, 2008, 14(2): 213-217.
- [5] Eshghi M J, Majdabadi A, Koochian A. Low threshold diode-pumped picosecond mode-locked Nd:YAG laser with a semiconductor saturable absorber mirror [J]. Laser Physics, 2017, 27: 015002.
- [6] Spühler G J, Paschotta R, Keller U, et al. Diode-pumped passively mode-locked Nd:YAG laser with 10 W average power in a diffraction-limited beam [J]. Optics Letters, 1999, 24(8): 528.
- [7] 李霄, 王勇刚, 张世强, 等. 半导体可饱和吸收镜被动锁模侧面抽运 Nd:YAG 激光器研究[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3103-3107.
- [8] 蔡志强, 王鹏, 温午麒, 等. 端面抽运全固态皮秒被动锁模激光器[J]. 中国激光, 2007, 34(7): 901-907.
- [9] 黄玉涛, 王璐璐, 石朝辉, 等. SESAM 无损伤运转的大功率高重复频率皮秒激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 08020101-08020107.
- [10] 侯佳. 几种新型全固态锁模激光器件的研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [11] 张志刚. 飞秒激光技术[M]. 北京: 科学出版社, 2011.

9 Watt Level High-Power Mode-Locked Nd:YVO₄ Laser with SESAM

YANG Xi-guang WANG Yong-gang WANG Jiang WANG Tai-jin CHEN Zhen-dong

(School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract High-Power and high efficiency diode end-pumped passively solid-state mode locked Nd:YVO₄ laser with excellent thermal stability and super huge stable region has been demonstrated by using a semiconductor saturable absorber mirror (SESAM). The X-type laser resonator is designed by using the ABCD transmission matrix theory and is simulated by MATLAB software. A 9.1 W stable mode-locked laser output with repetition rate of 108.28 MHz and pulse duration of 9.53 ps are obtained when the pump power reached 30 W. The corresponding single pulse energy is 84.04 nJ, The optical conversion efficiency and slope efficiency of the laser maser is 30.3% and 31.7%, respectively. and it could be used as a seed laser for a larger oscillator to acquire energy of the order of hundreds watt laser output.

Key words LD Pump; Nd:YVO₄ laser; SESAM; passive mode locked; picosecond pulses