

长腔被动锁模掺镜光纤激光器的方波脉冲产生

孙旭¹, 贾东方^{1*}, 李梓豪¹, 葛春风¹, 王肇颖¹, 杨天新¹, 曹晓冬², 张鹏泉²

¹天津大学精密仪器与光电子工程学院光纤光学及光通信实验室, 天津 300072;

²天津光电集团有限公司, 天津 300384

摘要 报道了一种基于非线性光纤环形镜(NOLM)、工作在耗散孤子共振(DSR)区的长腔被动锁模掺镜光纤激光器,该激光器谐振腔的总长度约为 1502 m,可以输出重复频率为 133.18 kHz 的高能量方波脉冲,且输出脉冲的宽度和单脉冲能量均随泵浦功率的增大而呈线性增大。当泵浦功率增大到 414.47 mW 时,输出的方波脉冲具有最大宽度(761.6 ns),同时单脉冲能量达到了最大值(60.2 nJ)。通过改变 NOLM 中单模光纤的长度,进一步研究了谐振腔长度对输出方波脉冲特性的影响,结果表明:谐振腔越长,所得 DSR 方波脉冲越宽,脉冲峰值功率越低。

关键词 激光器; 耗散孤子共振; 方波; 被动锁模; 光纤激光器; 非线性光纤环形镜

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0101003

Generation of Square Pulses in Passively Mode-Locked Ytterbium-Doped Fiber Laser with Long Cavity

Sun Xu¹, Jia Dongfang^{1*}, Li Zihao¹, Ge Chunfeng¹, Wang Zhaoying¹,
Yang Tianxin¹, Cao Xiaodong², Zhang Pengquan²

¹Laboratory of Fiber Optics and Optical Communication, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²Tianjin Optical Electrical Group Co., Ltd., Tianjin 300384, China

Abstract This paper reports on a passively mode-locked ytterbium-doped fiber laser with a 1502-m total cavity length operating in the dissipative soliton resonance (DSR) region using the nonlinear optical loop mirror (NOLM) technique. High-energy square pulses with an ultra-low repetition rate of 133.18 kHz are observed. Both the duration and single pulse energy of the output DSR pulse increase linearly with increasing pump power. The maximum output pulse duration reaches 761.6 ns at a pump power of 414.47 mW, while the single pulse energy at the same power level reaches 60.2 nJ. In addition, the influence of cavity length on the pulse duration and single pulse energy is investigated by changing the length of the single mode fiber in the NOLM. The results indicate that the longer the cavity length is, the larger the pulse duration is, and the lower the peak power is.

Key words lasers; dissipative soliton resonance; square pulses; passive mode-locking; fiber lasers; nonlinear optical loop mirror

OCIS codes 140.3538; 190.4370; 060.4370

1 引 言

高能量脉冲激光在传感、光通信、生物医学以及国防等领域具有广阔的应用前景,也是激光、非线性光学等领域的前沿研究课题^[1-2]。与其他激光器相比,光纤激光器结构简单且集成度高,在工程化应用中

中具有独特的优势。然而,光纤激光器虽然具有结构简单、集成度高等优势,但在脉冲能量等重要物理参数上与固体激光器相比仍有一定差距。因此,如何提高脉冲能量成为当前及将来光纤激光器研究的首要问题,也是世界范围内的研究热点之一。

目前获得高能量光纤激光脉冲的方法主要包

收稿日期: 2019-07-15; 修回日期: 2019-07-16; 录用日期: 2019-09-26

基金项目: 国家自然科学基金(61575143,61975145)

* E-mail: jiadf@tju.edu.cn

括:利用光子晶体光纤或双包层光纤增大模场面积^[3],降低光纤非线性效应的影响;利用啁啾脉冲放大技术对脉冲在腔外进行放大^[4-5]。这些方法对系统内的色散和非线性要求较高,需要复杂的系统结构,增大了使用成本^[6]。此外,通过色散控制也可实现对激光腔内非线性效应的控制^[7-8]。光纤激光器的腔体由不同的光纤组成,因此对应的色散也不尽相同。依照色散特性,锁模光纤激光器可分别产生传统负色散孤子、展宽脉冲、自相似脉冲和耗散孤子脉冲等。其中:传统负色散孤子由于受到孤子面积理论的影响,脉冲能量通常被限制在0.1 nJ左右,能量较高时则会发生脉冲分裂;展宽脉冲锁模通过增大脉冲在腔内的平均宽度来实现非线性相移的降低,能够避免脉冲分裂,可将脉冲能量提高一个数量级以上,但激光系统的结构比较复杂;自相似脉冲能够抵御光波分裂、实现高能量脉冲输出,但这种脉冲的能量也会受到增益带宽的限制,当光谱展宽超出增益范围时,自相似演化过程将遭到破坏;耗散孤子脉冲虽然突破了传统孤子光纤激光器所受到的能量限制,克服了光波分裂,输出能量可以提高一个数量级,但在高功率下也会形成多个脉冲,无法获得更高能量的输出。

Chang等^[9-10]的研究表明,当描述耗散孤子脉冲的复立方-五次方金兹伯格-朗道方程的参数为某些特定值时,会出现所谓的耗散孤子共振(DSR)现象,其典型特征是:输出脉冲呈前后沿陡峭的平顶方形,其宽度随泵浦功率的增大而线性增大,且不会发生脉冲分裂,这使得DSR方波的单脉冲能量可以无限增大。这种时域宽度可达纳秒级的平顶方波脉冲,可以有效抑制受激布里渊散射,获得高能量输出,在信号处理系统、机械加工、光纤传感等领域都具有极大的应用前景。近几年来,工作在被动锁模光纤激光器DSR区的高能量方波脉冲的产生引起研究人员的极大关注。

2010年,Li等^[11]在长腔非线性偏振旋转(NPR)激光系统中得到了重复频率低至278 kHz、单脉冲能量为715 nJ的方波脉冲。2012年,Zhang等^[12]通过在腔内加入超过1 km的高非线性光纤得到了重复频率为173.05 kHz、可调谐范围高达1700 ns的DSR方波脉冲。2014年,Li等^[13]通过实验研究了掺镱光纤激光器中的DSR现象,并在299 mW的较低泵浦功率下成功获得了最大宽度为91 ns、单脉冲能量为54.6 nJ的DSR方波脉冲。2015年,本课题组^[14]基于色散不平衡非线性放大环

形镜(DI-NALM)的被动锁模掺铒光纤激光器,在508 mW的泵浦功率下得到了宽度可达2272 ns的无波分裂DSR方波脉冲。2016年,Semaan等^[15]利用铒、镱共掺双包层光纤激光器实现了稳定的DSR方波输出,脉冲重复频率为373 kHz,单脉冲能量为2.27 μ J。2017年,本课题组^[16]基于NPR被动锁模掺镱光纤激光器获得了脉宽最宽为372.4 ns的DSR方波脉冲。2018年,Shang等^[17]在掺镱光纤激光器中获得了谐波锁模的DSR方波脉冲,并通过调节偏振控制器和增大泵浦功率,实现了基频到谐波锁模的转换。2019年,Ahmad等^[18]首次基于掺杂光纤激光器获得了DSR方波脉冲,其中心波长为1303 nm,脉冲时域调节宽度为83~239 ns。

本文利用非线性光纤环形镜(NOLM)被动锁模技术在长腔掺镱光纤激光器中实现了稳定的DSR方波脉冲输出,脉冲的宽度和单脉冲能量可随泵浦功率的增大分别线性增大到761.6 ns和60.2 nJ,且无脉冲分裂现象。该激光器的总腔长约为1502 m,对应133.18 kHz的低重复频率。通过总腔长分别约为502 m和1002 m的对比实验和数值模拟,进一步研究了腔长对输出DSR方波特性的影响,得到了具有规律性的结果。

2 实验装置

长腔被动锁模掺镱光纤激光器的实验装置如图1所示:“8”字腔结构由图中左侧的单向环及右侧的NOLM组成,它们通过一个80:20光耦合器(OC)相连。单向环中的Yb³⁺掺杂光纤(YDF)长为55 cm,在975 nm波长处的光吸收率为250 dB/m,二阶色散系数为24.10 ps²/km;激光二极管发射的980 nm光作为泵浦光,并由一个980 nm/1060 nm波分复用器(WDM)耦合到YDF中,为整个激光系统提供增益;位于YDF右侧的偏振无关隔离器(PI-ISO)控制环中光的单向传输。实验中的偏振相关器件主要是两个挤压式偏振控制器(PC1和PC2),分别置于左侧的单向环中和右侧的NOLM中,用于增加腔内光波偏振态的调节自由度。光输出是通过左侧环中WDM和PC1之间的90:10光耦合器实现的,其10%的输出端口通过50:50光耦合器连接到观测仪器中,可同时观察输出结果的时域波形和光谱。实验中,使用3 GHz的光电探测器及示波器(TDS500MHz 3052C)对单个脉冲波形及脉冲序列进行观测,使用光谱仪(Ando AQ-6315A)和电谱仪(Agilent Technologies N9010A)分别对输出脉冲

的光谱及射频(RF)谱进行观测;同时,用光功率计测量输出脉冲的平均功率。

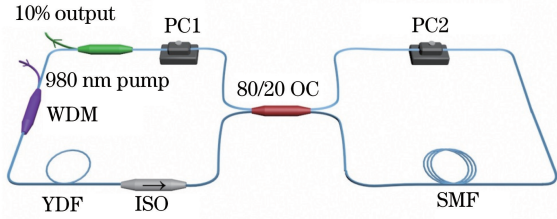


图 1 长腔被动锁模掺镱光纤激光器的实验装置示意图
Fig. 1 Schematic of experimental setup of passively mode-locked Yb-doped fiber laser with long cavity

右侧的 NOLM 结构包含 PC2 和一段长度为 1500 m、二阶色散系数为 $22.19 \text{ ps}^2/\text{km}$ 的单模光纤(SMF 1060-XP)。单模光纤通过增加腔长来降低脉冲的重复频率,同时改变腔内的损耗、色散和非线性效应,以使该激光器工作在 DSR 模式下;实验中通过改变单模光纤的长度、泵浦功率和偏振,得到了不同特性的 DSR 方波脉冲。此处的 NOLM 可以起到类可饱和吸收体的作用:光束通过 80:20 的耦合器被分成幅值不等、方向相反的两部分,基于光纤中的非线性克尔效应、自相位调制和交叉相位调制作用等,反向传输的两部分光在腔中往返一周后获得不同的非线性相移。因此,通过调节偏振控制器使脉冲中央较强部分的相位差接近 π 。脉冲通过耦合器时脉冲中央较强的部分可以透射,而脉冲两侧低功率的边翼部分则被反射,多次往返后即可实现脉冲窄化。

3 分析与讨论

初次实验时,选取长度为 1500 m 的单模光纤,此时谐振腔总长度约为 1502 m,腔内总色散约为 33.32 ps^2 ,激光器工作在正常色散模式下。当激光二极管提供的泵浦光功率达到 114.08 mW 时,通过精细调节两个偏振控制器首次观察到稳定的 DSR 方波脉冲。保持两个偏振控制器的方位不变,逐渐提高泵浦功率至 414.47 mW,发现所得方波脉冲的宽度随着泵浦功率的增大而逐渐增大,同时脉冲峰值高度保持稳定。选取 5 个不同泵浦功率下输出的 DSR 方波的单脉冲波形,并将其绘制在图 2 中,可清晰地观察到 DSR 方波脉冲的波形随泵浦功率的动态演化过程。5 个波形对应的脉冲宽度及单脉冲能量记录在表 1 中,并以散点图的形式绘制在图 3 中。从图 3 中用实线给出的线性拟合结果可以看出,脉宽及单脉冲能量均随着泵浦功率的增大而线

性增大,证实了该激光系统工作在 DSR 模式下^[10]。

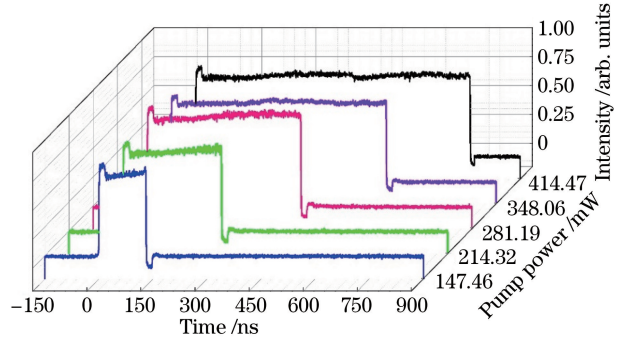


图 2 不同泵浦功率下方波脉冲波形的演化
Fig. 2 Dynamic evolution of square pulses under different pump powers

表 1 脉冲宽度及单脉冲能量随泵浦功率的变化
Table 1 Measured pulse duration and output single pulse energy versus pump power

Pump power P / mW	Pulse duration τ / ns	Single pulse energy E / nJ
147.46	130.8	11.6
214.32	272.8	24.8
281.19	424.8	37.2
348.06	596.6	49.9
414.47	761.6	60.2

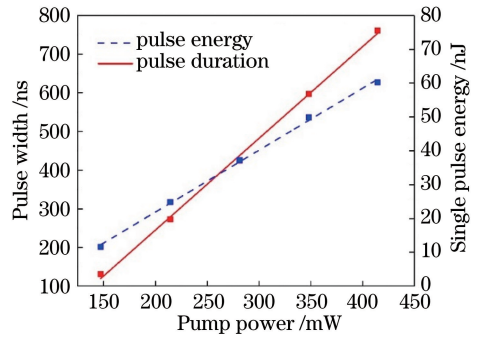


图 3 脉冲宽度及单脉冲能量随泵浦功率的变化
Fig. 3 Measured pulse duration and output single pulse energy versus pump power

当泵浦功率增大至 414.47 mW(最大值)时,对应输出 DSR 方波脉冲的宽度及单脉冲能量均达到最大值,分别为 761.6 ns 和 60.2 nJ,此时的单脉冲时域波形如图 4(a)所示,对应的光谱如图 4(b)所示,中心波长约为 1038 nm,3 dB 带宽约为 0.5 nm。图 4(c)是测量的 RF 谱,由图可知所得 DSR 方波脉冲的重复频率 f 约为 133.18 kHz,信噪比(SNR)大于 55 dB,说明输出的 DSR 方波脉冲非常稳定。对应的 DSR 方波脉冲序列如图 4(d)所示,脉冲间隔约为 $7.5 \mu\text{s}$,与脉冲在 1502 m 腔中往返一次需要的时间一致。

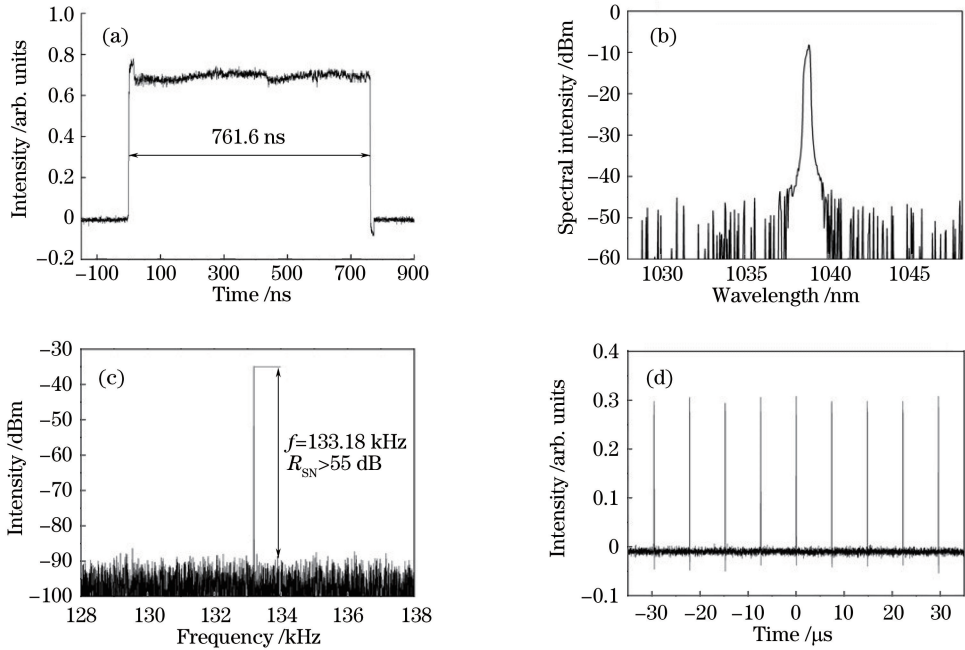


图 4 泵浦功率为 414.47 mW 时的输出方波脉冲。(a)单脉冲波形;(b)光谱;(c) RF 谱;(d)脉冲序列

Fig. 4 Output square pulse under pump power of 414.47 mW. (a) Single pulse profile;

(b) optical spectrum; (c) RF spectrum; (d) pulse train

DSR 脉冲的频率啁啾也具有鲜明的特点:脉冲的中间部分,也就是平顶部分的啁啾很小,且近似为线性;脉冲的两翼具有较大的非线性啁啾。同时,在泵浦功率和脉冲宽度增大过程中,脉冲所累积的啁啾几乎保持不变。换言之,在传输过程中,脉冲的中间部分几乎保持相同的速度,而两翼的非线性啁啾又能抵消大部分色散的影响,从而实现了无波分裂的高能量方波脉冲输出^[9]。此外,脉冲中间部分的线性啁啾可以通过适当的色散补偿光纤或光栅对进行补偿,从而实现脉冲的压缩,这也是本研究中后续工作的重点之一。

在本实验中,一旦通过精细调节偏振控制器使激光器运行在 DSR 方波区域,则在后续实验期间方波脉冲均处于非常稳定的状态;重启时,通过示波器和光谱仪可再次观察到特征相同的时域波形和光谱,脉宽和单脉冲能量与泵浦功率的线性关系依然保持,从而验证了 DSR 方波脉冲的稳定性。

为进一步研究腔长对 DSR 方波脉冲特性的影响,将上述实验中单模光纤的长度先后改成 500 m 和 1000 m,分别进行实验,并观测输出方波脉冲特性的差异。当泵浦功率分别为 114.08, 127.75, 140.93, 154.61, 167.79, 181.47 mW 时,记录腔长为 502, 1002, 1502 m 的激光器输出的 DSR 方波脉冲的动态演化,结果如图 5(a)、(c)、(e)所示,对应的

方波脉冲的宽度和单脉冲能量随泵浦功率的变化分别如图 5(b)、(d)、(f)所示。可以看出,方波脉冲在演化过程中其峰值恒定,脉宽和单脉冲能量随泵浦功率的增大而呈线性增大,输出特性与 DSR 理论的预期非常一致^[5]。

选取泵浦功率为 181.47 mW 时三个不同腔长激光系统输出的 DSR 方波脉冲,将它们の時域波形绘制在图 6(a)中。通过对比可知,在同样大小的泵浦功率下,腔长越长,得到的 DSR 方波脉冲越宽,峰值功率越低,这一实验结果与如图 6(b)所示的本研究组利用 MATLAB 进行数值模拟得到的结果一致。这一现象有力地证明了运行在 DSR 模式的长腔被动锁模光纤激光器在实现单脉冲能量随泵浦功率增大而近似无限增大的同时,可以在很大程度上避免过高的脉冲峰值功率可能带来的副作用。

4 结 论

本研究组基于“8”字型长腔被动锁模掺镱光纤激光器实现了稳定的 DSR 方波脉冲输出。通过在腔中加入一段 1500 m 长的单模光纤,验证了通过简单增加腔长来降低脉冲重复频率的可行性,并实现了 133.18 kHz 低重复频率的 DSR 方波脉冲输出。输出 DSR 方波脉冲的宽度和单脉冲能量均随泵浦功率的增大而呈线性增大,当泵浦功率为

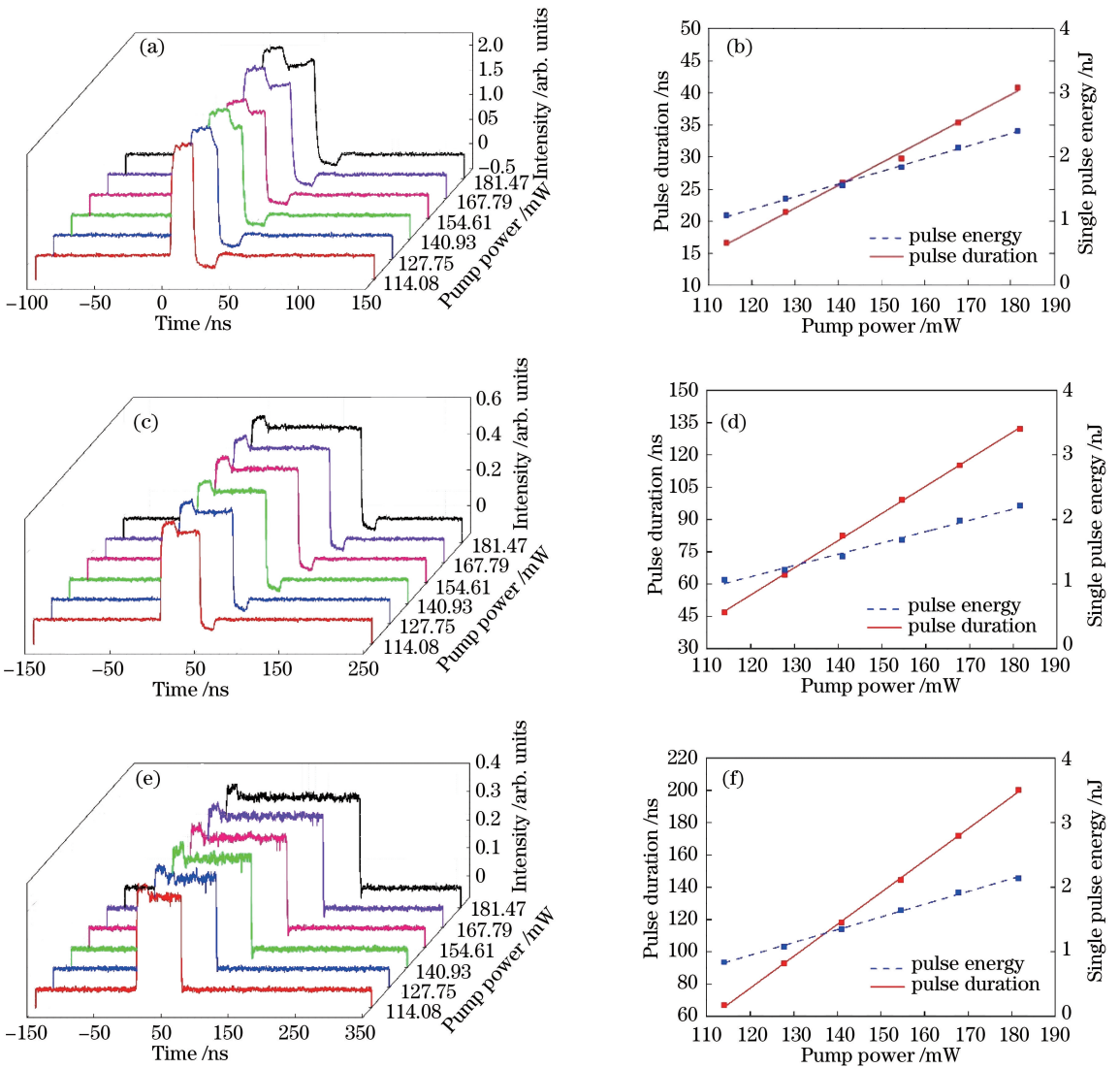


图 5 腔长对比实验结果。(a)(c)(e)腔长分别为 502,1002,1502 m 时输出方波脉冲的波形演化；

(b)(d)(f)腔长分别为 502,1002,1502 m 时方波脉冲的宽度及单脉冲能量随泵功率的变化

Fig. 5 Comparative experimental results of cavity length. (a)(c)(e) Dynamic evolutions of square pulse profile when cavity lengths are 502, 1002, and 1502 m; (b)(d)(f) measured pulse duration and output single pulse energy versus pump power when cavity lengths are 502, 1002, and 1502 m

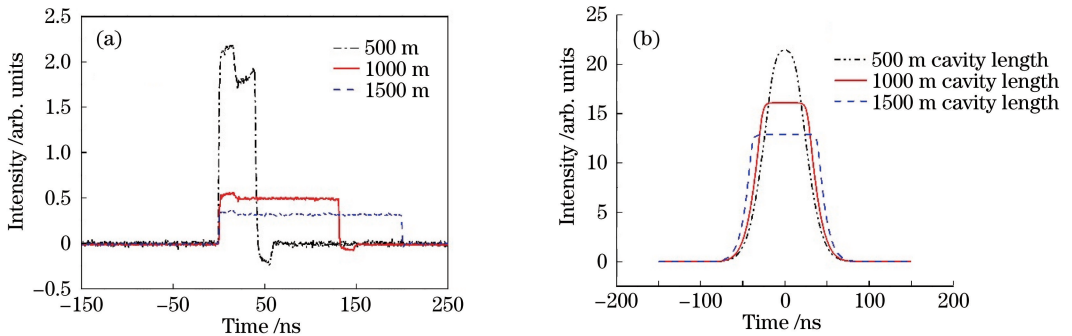


图 6 实验结果与仿真结果。(a)泵浦功率为 181.47 mW 时不同腔长激光器输出的 DSR 方波脉冲波形；(b)数值模拟结果

Fig. 6 Results of experiment and simulation. (a) Profiles of DSR square pulses from lasers with different cavity lengths under 181.47 mW pump power; (b) numerical simulation results

414.47 mW 时, DSR 方波脉冲达到最大宽度 (761.6 ns), 单脉冲能量可达 60.2 nJ。此外, 本课题组又将腔中单模光纤的长度分别缩短至 500 m 和 1000 m, 研究了腔长对所得 DSR 方波脉冲特性的影响。结果表明, 运行在 DSR 模式下的长腔被动锁模光纤激光器, 不但可以实现单脉冲能量随泵浦功率增大而近似无限增大的方波脉冲输出, 而且可以在很大程度上避免过高的脉冲峰值功率可能带来的副作用。这种 DSR 方波脉冲可以作为多级放大中的理想种子光源, 在机械加工、光纤传感等领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Chen J, Jia D F, Yang J W, et al. All-fiber passively mode-locked erbium-doped fiber laser with ultra-low repetition rate[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(6): 0602005.
陈炯, 贾东方, 杨敬文, 等. 超低重复频率全光纤被动锁模掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0602005.
- [2] Liu T H, Jia D F, Liu Y, et al. Observation of wave-breaking-free square pulses in a fiber ring laser [J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(10): 101401.
- [3] Zhang F, Zhang H K, Chen T, et al. Nd-doped double-clad large-mode-area polarization-maintaining photonic crystal fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0201020.
张峰, 张海鹏, 陈涛, 等. 掺钕双包层大模场保偏光子晶体光纤激光器[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0201020.
- [4] Maine P, Strickland D, Bado P, et al. Generation of ultrahigh peak power pulses by chirped pulse amplification [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1988, 24(2): 398-403.
- [5] Liem A, Nickel D, Limpert J, et al. High average power ultra-fast fiber chirped pulse amplification system[J]. Applied Physics B, 2000, 71(6): 889-891.
- [6] Mao D. Experimental and theoretical studies on mode-locked erbium-doped fiber lasers[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences, 2013: 49.
毛东. 掺铒锁模光纤激光的实验与理论研究[D]. 西安: 中国科学院大学, 2013: 49.
- [7] Shi J, Wang J F, Zhang C, et al. Transmission characteristics of bright-dark soliton pair in fiber lasers [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5): 0519001.
- 石佳, 王娟芬, 张聪, 等. 光纤激光器中亮暗孤子对的传输特性[J]. 光学学报, 2018, 38(5): 0519001.
- [8] Ma T. Erbium-doped fiber laser with 100-MHz repetition rate and 39-fs pulse width [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0801004.
马挺. 重复频率 100 MHz 脉冲宽度 39 fs 的掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0801004.
- [9] Chang W, Ankiewicz A, Soto-Crespo J M, et al. Dissipative soliton resonances [J]. Physical Review A, 2008, 78(2): 023830.
- [10] Chang W, Ankiewicz A, Soto-Crespo J M, et al. Dissipative soliton resonances in laser models with parameter management [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2008, 25(12): 1972-1977.
- [11] Li X H, Liu X M, Hu X H, et al. Long-cavity passively mode-locked fiber ring laser with high-energy rectangular-shape pulses in anomalous dispersion regime[J]. Optics Letters, 2010, 35(19): 3249-3251.
- [12] Zhang X M, Gu C, Chen G L, et al. Square-wave pulse with ultra-wide tuning range in a passively mode-locked fiber laser[J]. Optics Letters, 2012, 37(8): 1334-1336.
- [13] Li X L, Zhang S M, Zhang H X, et al. Highly efficient rectangular pulse emission in a mode-locked fiber laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(20): 2082-2085.
- [14] Liu T H, Jia D F, Liu Y, et al. Generation of microseconds-duration square pulses in a passively mode-locked fiber laser[J]. Optics Communications, 2015, 356: 416-420.
- [15] 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]. Optics Express, 2016, 24(8): 8399-8404.
- [16] 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]. Applied Optics, 2017, 56(24): 6742-6747.
- [17] Shang C, Li X L, Yang Z J, et al. Harmonic dissipative soliton resonance in an Yb-doped fiber laser[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(20): 4932-4935.
- [18] Ahmad H, Aidit S N, Tiu Z C. Dissipative soliton resonance in a passively mode-locked praseodymium fiber laser[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 112: 20-25.