

反常和正常色散区被动锁模掺铒光纤激光器的方波脉冲产生

徐震¹, 贾东方^{1*}, 李梓豪¹, 孙旭¹, 葛春风¹, 王肇颖¹, 杨天新¹, 曹晓东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的工作在耗散孤子共振(DSR)区域的被动锁模掺铒光纤激光器,分别在反常和正常色散区获得了方波脉冲输出。在腔内净色散值约为 -0.32 ps^2 的反常色散区,当泵浦功率为 481.2 mW 时,获得了最大时域宽度为 33 ns、单脉冲能量约为 12.4 nJ 的方波脉冲。通过在腔内插入一段 7 m 长的色散补偿光纤,使激光器工作在腔内净色散值约为 2.85 ps^2 的正常色散区,在同样的泵浦条件下,获得了最大时域宽度为 34.3 ns、单脉冲能量约为 9.42 nJ 的方波脉冲。这表明在满足腔内参数平衡的条件下,DSR 方波脉冲可同时在反常和正常色散区产生。另外,还研究了泵浦功率对方波脉冲的时域宽度和单脉冲能量的影响,结果表明,随着泵浦功率的增加,方波脉冲的时域宽度和单脉冲能量均呈线性变化。

关键词 激光器; 光纤激光器; 耗散孤子共振; 方波脉冲; 非线性光纤环形镜; 色散管理

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1201006

Generation of Square Pulses at Both Anomalous and Normal Dispersion Regimes in Passively Mode-Locked Erbium-Doped Fiber Laser

Xu Zhen¹, Jia Dongfang^{1*}, Li Zihao¹, Sun Xu¹, Ge Chunfeng¹, Wang Zhaoying¹,
Yang Tianxin¹, Cao Xiaodong²

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

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

Abstract The passive mode-locked erbium-doped fiber laser based on nonlinear optical loop mirror operating in the dissipative soliton resonance (DSR) region is reported. Square wave pulse output is obtained in the abnormal and normal dispersion regimes respectively. At anomalous dispersion regime, the net cavity dispersion is calculated to be -0.32 ps^2 . Stable square pulses with maximum temporal pulse duration of 33 ns are obtained when the pump power is adjusted to 481.2 mW. Correspondingly, the single pulse energy is 12.4 nJ. Subsequently, a 7 m long dispersion compensating fiber is employed to compensate the cavity dispersion to make the laser system work at the normal dispersion regime and the net cavity dispersion is 2.85 ps^2 . Under the same pump power, the maximum temporal duration of the square pulses is 34.3 ns and the single pulse energy is 9.42 nJ. It is shown that DSR square pulses can be generated at both anomalous and normal dispersion regimes under the conditions of balanced cavity parameters. Additionally, the influence of the pump power on the time domain width and single pulse energy of square wave pulse is also studied. The results show that the time domain width and single pulse energy of square wave pulse change linearly with the increase of pump power.

Key words lasers; fiber lasers; dissipative soliton resonance; square pulses; nonlinear optical loop mirror; dispersion management

OCIS codes 140.3538; 190.4370; 060.4370

收稿日期: 2020-06-15; 修回日期: 2020-08-03; 录用日期: 2020-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(61975145, 61575143)

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

1 引 言

在高功率激光系统中,主振荡功率放大(MOPA)是获得高功率激光输出的方法之一。该方法通常需要高能量、高信噪比的前端种子光源,以便在后续的放大系统中获得稳定的功率输出。宽度在纳秒量级的方波脉冲可用于此目的,目前广泛采用的方波脉冲产生方法有单频调制技术、脉冲堆积技术及数字信号处理算法技术^[1-3]。但是上述三种方法均受限于系统复杂以及需要主动调制器件,无法满足成本低廉、结构紧凑等实际应用条件。相比以上三种获得方波脉冲的方法,利用被动锁模光纤激光器来产生方波脉冲可以实现紧凑的全光纤结构,更容易集成化,且可以实现脉宽连续可调。另外,由于这种方波脉冲激光器工作在耗散孤子共振(DSR)区域,在获得较高单脉冲能量的同时避免了过高的峰值功率,抑制了受激拉曼散射(SRS)等非线性效应的产生,这有利于MOPA的后续放大^[4]。因此,工作在DSR区域的方波脉冲被动锁模光纤激光器正成为一种较为理想的可替代MOPA系统的种子光源,在激光加工、化学分析、光纤传感、测距等领域具有广阔的应用前景^[5-8],是近年来国内外光纤激光技术研究的热点之一。

2008年,Chang等^[9-11]通过求解复立方-五次方金兹堡-朗道方程(CGLE)发现,当参数处于某一特定的区域时可以得到方波脉冲,这种脉冲的能量可近似无限增加而不会产生光波分裂,并将这种现象称为耗散孤子共振。2010年,Grelu等^[12]通过求解CGLE获得了脉冲能量与色散、非线性增益的二维强度图,从理论上证实了正常色散区与反常色散区均可以产生DSR方波脉冲。

2009年,Wu等^[13]通过非线性偏振旋转(NPR)锁模技术,由工作在正常色散区的掺铒光纤激光器实现了DSR方波脉冲输出。2012年,Duan等^[14]报道了基于NPR锁模的掺铒光纤激光器,首次在反常色散区观察到DSR方波脉冲。2013年,Yang等^[15]首次通过非线性放大环形镜(NALM)锁模技术,在被动锁模掺铒光纤激光器中发现了正常色散区的DSR方波脉冲。2015年,本课题组报道了基于非线性光纤环形镜(NOLM)与NPR的混合锁模掺铒光纤激光器,获得了极宽可调节范围(135~

2272 ns)的反常色散区DSR方波脉冲^[16]。同年,本课题组还报道了基于NPR的被动锁模掺铒光纤激光器,同样获得了工作在反常色散区的无光波分裂的DSR方波脉冲输出^[17]。2015年,Krzempek^[18]首次报道了在铒镱共掺双包层光纤激光器中,利用NALM锁模技术在反常色散区产生高能量方波脉冲,其单脉冲能量高达2.13 μJ,最大时域脉冲宽度为170 ns。

除1.5 μm波段外,2015年,Xu等^[19]利用NALM锁模技术搭建了被动锁模掺铒光纤激光器,通过在腔内加入一段高数值孔径光纤控制色散,首次获得了工作在正常色散区的2 μm波段的DSR方波脉冲输出。2019年,Wu等^[20]利用NALM锁模技术搭建了被动锁模掺铒光纤激光器,获得了工作在反常色散区的2 μm波段的DSR方波脉冲输出。2017年,本课题组报道了基于NPR锁模技术的被动锁模掺铒光纤激光器,实现了工作在正常色散区的DSR方波脉冲输出^[21]。2019年,本课题组报道了基于NOLM锁模技术的被动锁模掺铒光纤激光器,实现了工作在正常色散区的DSR方波脉冲输出,并研究了腔长对脉冲特性的影响^[22]。掺铒光纤以及普通单模光纤在1 μm波段均为正常色散,因此需要特殊的色散补偿元件如长周期光纤布拉格光栅、光子晶体光纤、微纳光纤^[23-25]等使激光器工作在反常色散区,但目前还没有关于反常色散区的DSR方波脉冲掺铒光纤激光器的报道。2019年,Ahmad等^[26]通过NOLM锁模技术,首次在被动锁模掺铒光纤激光器中获得了正常色散区的DSR方波脉冲输出,再一次拓宽了DSR方波脉冲的工作波长范围。

本文基于NOLM被动锁模掺铒光纤激光器,通过色散管理技术获得了分别工作在反常和正常色散区的DSR方波脉冲,最大时域宽度分别为33 ns和34.3 ns,最大单脉冲能量分别为12.4 nJ和9.42 nJ。同时,还研究了泵浦功率对方波脉冲的时域宽度、单脉冲能量、光谱等输出特性的影响。

2 理论基础

CGLE可作为描述光脉冲在光纤激光器中传输的方程,该方程所建立的模型不是单独适用于某个激光器模型,而是描述光脉冲在光纤激光器中传输的普遍现象。该方程表示为^[9]

$$i\psi_z + \frac{D}{2}\psi_{zz} + |\psi|^2\psi + \nu|\psi|^4\psi = i\delta\psi + i\epsilon|\psi|^2\psi + i\beta\psi_{zz} + i\mu|\psi|^4\psi, \quad (1)$$

式中： $\psi = \psi(t, z)$ 为光场复振幅分布； t 为延迟时间； z 为传输距离。方程左侧 D 描述了腔内的净色散， $D > 0$ 表示反常色散区， $D < 0$ 表示正常色散区， ν 代表五阶非线性效应。方程右侧包含了所有的耗散成分，其中 δ 代表线性损耗， ϵ 代表非线性增益， β 代表光谱滤波， μ 代表非线性增益的饱和。各个参数所取的都是平均值，没有具体的单位和量纲。假定激光器工作在稳定的区域，不存在任何瞬态的过程，而平均增益和损耗由右侧的耗散参数决定。CGLE 综合考虑了损耗、增益、色散和非线性效应的影响，其中更高阶的耗散参数描述了非线性转换过程，令方程右侧等于零，即去除耗散部分，则该方程简化为非线性薛定谔方程(NLSE)。

CGLE 就是在非线性薛定谔方程的基础上，增加了增益与损耗项，也就是考虑了与外界的能量交换。传统孤子锁模脉冲是腔内色散与自相位调制共同作用形成的，其为仅考虑色散项与非线性项的 CGLE 也就是 NLSE 的解。当耗散效应较强无法忽略时，腔内参数就需要额外的增益与损耗来达到平衡，进而产生 DSR 脉冲。

3 实验装置

基于 NOLM 锁模技术产生 DSR 方波脉冲的实验装置如图 1 所示，该激光器为一个“8”字腔结构，由左侧的单向环路及右侧的 NOLM 组成，中间由一个分光比为 80/20 的耦合器连接。在左侧的单向环路中插入一个偏振无关的光隔离器(PI-ISO)，以保证光脉冲的单向传输；中心波长为 980 nm 的激光二极管(LD)作为泵浦源，980/1550 nm 的波分复用器(WDM)将泵浦光耦合入一段 3 m 长的掺铒光纤(EDF)中，EDF 的色散系数为 16.08 ps²/km；偏振控制器(PC1)用来改变左侧环路的光脉冲的偏振态。

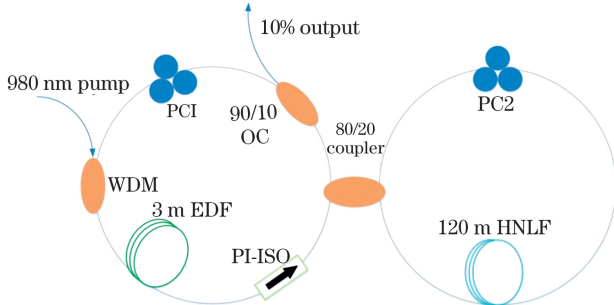


图 1 基于 NOLM 的被动锁模掺铒光纤激光器的实验装置
Fig.1 Experimental setup of a passively mode-locked Er-doped fiber laser based on NOLM

右侧的 NOLM 包含一段 120 m 长的高非线性光纤(HNLF)，用来增强右侧腔内的非线性效应并增加腔长，HNLF 的色散系数为 $-2.42 \text{ ps}^2/\text{km}$ ，非线性系数为 $11.44 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ；偏振控制器(PC2)同样用来调节腔内光脉冲的偏振态。经过两侧的环路之后，光脉冲通过左侧的一个 90/10 的耦合器(OC)，取 10% 的端口作为输出端并通过 3 dB 耦合器连接到观测仪器中，同时观察输出方波脉冲的时域波形和光谱。带宽为 3 GHz 的光电探测器及示波器(TDS500MHz 3052C, Tektronix, 美国)用于对锁模脉冲时域波形进行观测，光谱仪(AQ-6315A, Ando, 日本)和电谱仪(N9010A, Agilent Technologies, 美国)分别对脉冲的光谱和射频(RF)谱进行观测，光功率计用于测量输出脉冲的平均功率。实验中通过加入色散补偿光纤(DCF)管理腔内色散，以得到不同色散区的 DSR 方波脉冲。

4 分析与讨论

通过表 1 中单模光纤(SMF)、EDF 和 HNLF 的长度、色散系数及群延时色散(GDD)可以计算出该光纤激光器的腔长为 143 m，净色散值为 -0.74 ps^2 ，所以该激光器工作在反常色散区。

表 1 实验中所用光纤的长度及其色散值

Table 1 Length and dispersion of optical fibers utilized in the experiment

Optical fiber	Length /m	$\beta_2 / (\text{ps}^2 \cdot \text{km}^{-1})$	GDD /ps ²
SMF	20	-24.85	-0.4970
EDF	3	16.08	0.0482
HNLF	120	-2.42	-0.2904
DCF	7	452.47	3.1673

实验过程中，缓慢增加激光二极管输出的泵浦功率并仔细调整两个挤压式偏振控制器，当泵浦功率为 147.5 mW 时，观察到稳定的方波脉冲输出。然后逐渐增加泵浦功率并记录示波器中的单脉冲波形，得到了方波脉冲随泵浦功率从 147.5 mW 增加到 481.2 mW 时的脉冲演化情况，如图 2 所示。可以看到，由于峰值功率钳制(PPC)效应^[27]，随着泵浦功率的增加，方波脉冲的时域宽度从 11.8 ns 逐渐增大至 33 ns，而其峰值功率保持基本不变，并且获得的方波脉冲没有产生分裂。实验中，激光二极管所能提供的最大泵浦功率为 481.2 mW，这限制了所得方波脉冲的最大时域宽度。如果使用可以输出更高泵浦功率的激光二极管，则方波脉冲的时域

宽度可以继续增大且不发生脉冲分裂。

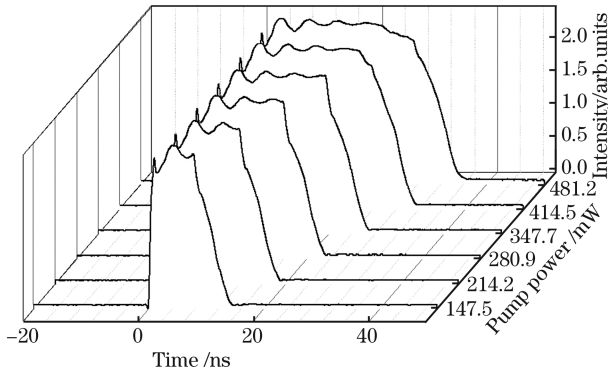


图 2 反常色散区方波脉冲波形的演化

Fig. 2 Dynamic evolution of square pulses at anomalous dispersion regime

实验过程中,同时记录下方波脉冲的光谱随泵浦功率的变化关系,如图 3 所示。方波脉冲的光谱的中心波长为 1565 nm,3 dB 带宽约为 2.2 nm;当泵浦功率从 147.5 mW 增加到 481.2 mW 时,仅引起方波脉冲的光谱强度的改变,而光谱的形状和中心波长基本保持一致。方波脉冲光谱的这些特性证实该激光器工作在 DSR 区域^[28]。此外,这种 DSR 脉冲与通过被动锁模形成的同样具有方波形状的类噪声(NL)脉冲还可以通过测量它们的自相关迹来区分:NL 脉冲自相关迹的典型形状是在宽的基座上叠加一个窄的相干峰,而 DSR 脉冲的自相关迹中不包含任何精细结构^[29]。

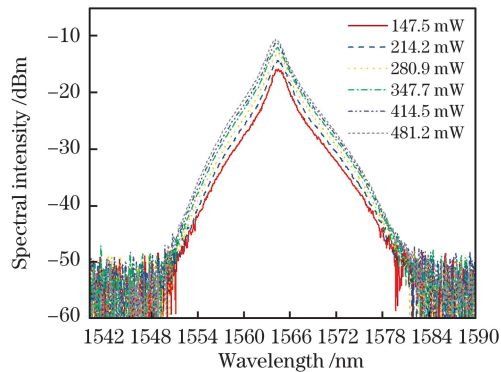


图 3 不同泵浦功率下方波脉冲对应的光谱

Fig. 3 Corresponding spectra of square pulses under different pump powers

为了进一步研究方波脉冲的演化规律,将方波脉冲的时域宽度和单脉冲能量随泵浦功率变化的数据进行拟合,如图 4 所示。根据拟合结果可知,方波脉冲的时域宽度和单脉冲能量随泵浦功率呈现出线性变化的趋势,这也就证实了该被动锁模掺铒光纤

激光器工作在 DSR 区域^[9],同时说明 DSR 方波脉冲可以在反常色散区产生。

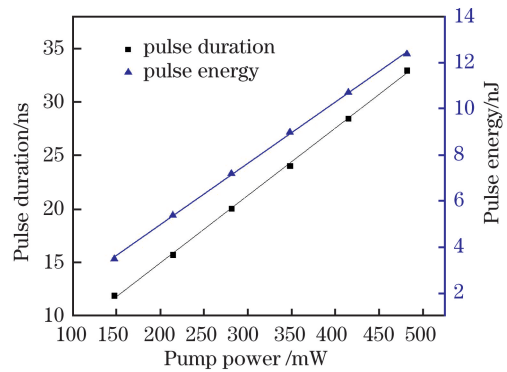


图 4 反常色散区方波脉冲的时域宽度和单脉冲能量随泵浦功率的变化

Fig. 4 Measured temporal duration and single pulse energy of square pulse at anomalous dispersion regime change with pump power

当泵浦功率增加到最大值 481.2 mW 时,由示波器观测的方波脉冲的时域波形如图 5(a)所示,此时方波脉冲具有 33 ns 的最大时域宽度,单脉冲能量为 12.4 nJ。图 5(b)为方波脉冲的序列图,相邻脉冲的间隔为 0.7 μ s,与光脉冲在 143 m 长的谐振腔内循环一周所需的时间相对应。图 5(c)为所得方波脉冲的射频频谱,可知方波脉冲的重复频率为 1.42 MHz,信噪比大于 83 dB,这说明所得的方波脉冲非常稳定。图 5(d)为方波脉冲的光谱,其中心波长为 1565 nm,3 dB 带宽约为 2.2 nm。计算其时间带宽积(TBP)约为 8892.6,也就是说 DSR 方波脉冲具有极大的啁啾,而根据 DSR 方波脉冲理论,啁啾主要来自于脉冲两翼的非线性啁啾,脉冲中间部分的啁啾很小并且近似于线性,所以脉冲两翼的非线性啁啾可以抵消大部分色散,在传输过程中脉冲的中间部分几乎保持相同速度,从而实现无波分裂的高能量方波脉冲输出^[10]。

锁模掺铒光纤激光器工作在反常色散区时通常会产生传统的孤子脉冲,但是在本实验中增益与损耗效应不可忽略,在引入损耗机制并满足腔内参数平衡的条件下,本文在反常色散区获得了 DSR 方波脉冲。在获得反常色散区 DSR 方波脉冲的基础上,采用色散管理方案,即在原光纤激光器右侧环路的 PC2 和 HNLF 之间加入一段 7 m 长的色散补偿光纤。根据表 1 的色散数据,计算此时腔内净色散值为 2.43 ps²,说明此时光纤激光器工作在正常色散区。

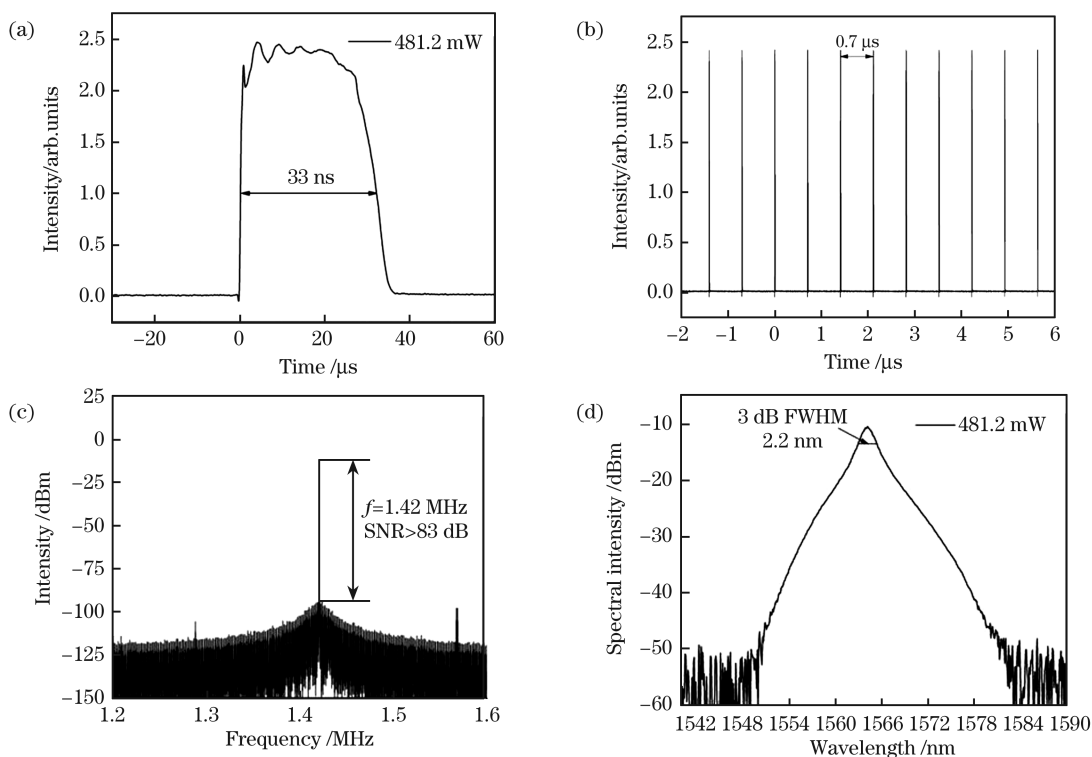


图 5 泵浦功率为 481.2 mW 时反常色散区的输出方波脉冲。(a)单脉冲波形;(b)脉冲序列;(c) RF 谱;(d)光谱
Fig. 5 Square pulse at anomalous dispersion regime under the pump power of 481.2 mW. (a) Single pulse profile; (b) pulse train; (c) RF spectrum; (d) optical spectrum

与此同时,为了研究正常色散区方波脉冲的演化规律,同样记录了不同泵浦功率下的方波脉冲的时域波形,如图 6 所示。在泵浦功率从 147.5 mW 缓慢增加到 481.2 mW 的过程中,方波脉冲的峰值功率基本不变,脉宽从 11.0 ns 增加至 34.3 ns,其演化过程与反常色散区类似。

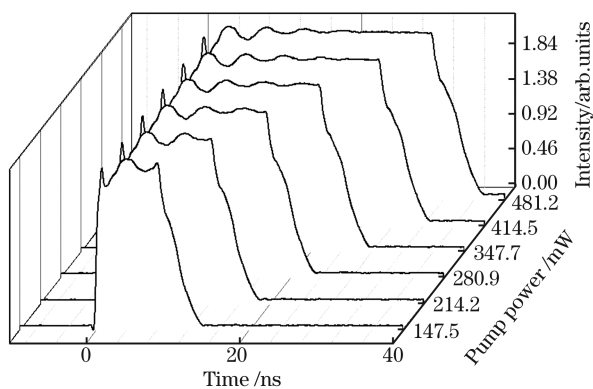


图 6 正常色散区方波脉冲波形的演化
Fig. 6 Dynamic evolution of square pulses at normal dispersion regime

为了进一步证实获得的方波脉冲工作在 DSR 区域,将方波脉冲的时域宽度和单脉冲能量随泵浦功率变化的散点图分别进行线性拟合,结果如图 7 所示。

可以看出,方波脉冲的时域宽度和单脉冲能量均随泵浦功率呈线性变化关系,这充分证明,利用 NOLM 锁模掺铒光纤激光器可以在正常色散区同样获得与反常色散区输出特性相同的 DSR 方波脉冲。

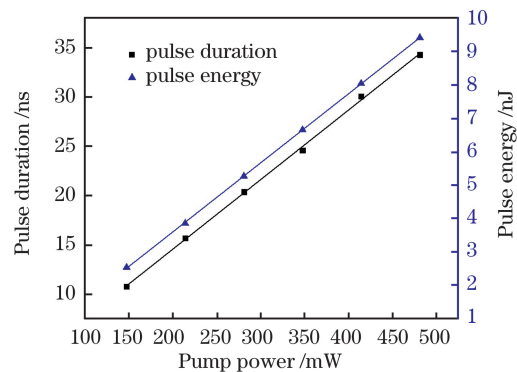


图 7 正常色散区方波脉冲的时域宽度和单脉冲能量随泵浦功率的变化
Fig. 7 Measured temporal duration and single pulse energy of square pulse at normal dispersion regime change with pump power

在泵浦功率同样为 481.2 mW 的情况下,通过仔细调节偏振控制器,同样获得了方波脉冲输出。图 8(a)为单脉冲时域波形图,此时方波脉冲的时域宽度为 34.3 ns,单脉冲能量约为 9.42 nJ。方波脉

冲序列如图 8(b)所示,由于色散补偿光纤的加入,光脉冲在腔内循环一周的时间即脉冲周期增加至 $0.75 \mu\text{s}$,与 150 m 的腔长相对应。图 8(c)为所得方波脉冲的射频谱,方波脉冲的重复频率为 1.32 MHz,信

噪比大于 76 dB。图 8(d)为方波脉冲的光谱,中心波长为 1558 nm,3 dB 带宽约为 2.3 nm,光谱形状与反常色散区方波脉冲的光谱类似,相较于反常色散区,其中心波长发生蓝移且带宽仅增加了 0.1 nm。

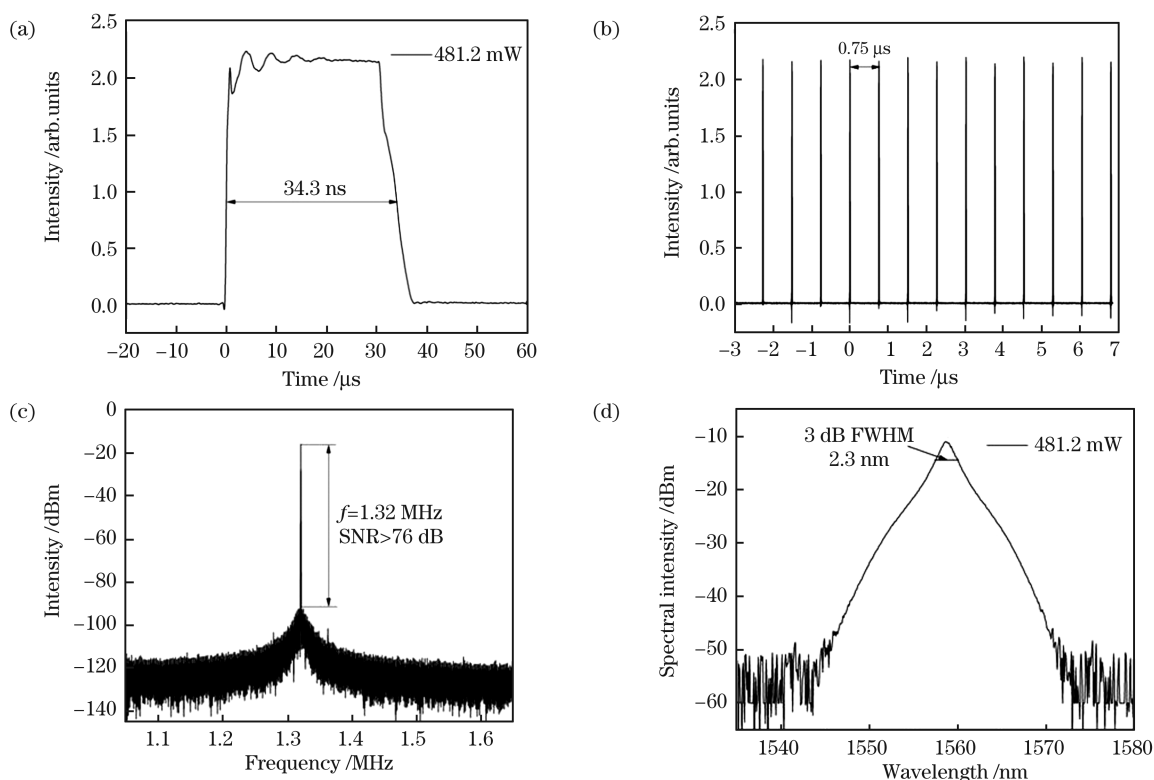


图 8 泵浦功率为 481.2 mW 时正常色散区的输出方波脉冲。(a)单脉冲波形;(b)脉冲序列;(c) RF 谱;(d)光谱

Fig.8 Square pulse at normal dispersion regime under the pump power of 481.2 mW. (a) Single pulse profile; (b) pulse train; (c) RF spectrum; (d) optical spectrum

5 结 论

本文报道了一种基于 NOLM 锁模技术的“8”字腔方波脉冲被动锁模掺铒光纤激光器,并通过插入一段 7 m 长的色散补偿光纤管理腔内色散,验证了 DSR 方波脉冲的色散不敏感性。相比于以往报道中的单一色散区 DSR 方波脉冲,该激光器在反常色散区和正常色散区均获得了稳定的 DSR 方波脉冲输出,且 DSR 方波脉冲的时域宽度和单脉冲能量均随泵浦功率的增加而线性增大。在腔内净色散值约为 -0.32 ps^2 的反常色散区,在泵浦功率为 481.2 mW 的条件下,DSR 方波脉冲的最大时域宽度为 33 ns,单脉冲能量约为 12.4 nJ。在腔内净色散值约为 2.85 ps^2 的正常色散区,在同样的泵浦功率下,DSR 方波脉冲的最大时域宽度为 34.3 ns,单脉冲能量约为 9.42 nJ。实验结果证明,无论 NOLM 被动锁模掺铒光纤激光器是工作在反常色散区还是正常色散区,只要腔内各参数达到平衡,都可

以获得稳定的 DSR 方波脉冲输出,且它们的输出特性相同,这为 DSR 方波脉冲提供了更多潜在的应用。

参 考 文 献

- [1] Kramer P, Estrailier P, Rouyer C. Megajoule optical pulse generation system [J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3047: 587-591.
 - [2] Skeldon M D, Bui S T, Letzring S A, et al. Implementation of pulse shaping on the OMEGA laser system [J]. Proceedings of SPIE, 1992, 1627: 246-251.
 - [3] Ngo N Q, Binh L N. New approach for the design of an optical square pulse generator [J]. Applied Optics, 2007, 46(17): 3546-3560.
 - [4] Wen R H, Hu C Z, Wei K H, et al. All-PM “figure-of-eight” cavity mode-locked fiber laser and its power amplification [J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(5): 0506002.
- 温如华, 胡澄之, 魏凯华, 等. 基于全保偏八字腔结构锁模的光纤激光器及其功率放大 [J]. 光子学报,

- 2017, 46(5): 0506002.
- [5] Mei X S, Yang Z X, Zhao W Q. Laser hole drilling on surface of electronic ceramic substrates [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500011. 梅雪松, 杨子轩, 赵万芹. 电子陶瓷基板表面激光孔加工综述[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500011.
- [6] Xie G C, Ye Y D, Li J M, et al. Echo characteristics and range error for pulse laser ranging [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0610001. 谢庚承, 叶一东, 李建民, 等. 脉冲激光测距回波特性及测距误差研究[J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0610001.
- [7] Peng X, Jordens B, Hooper A, et al. Generation of programmable temporal pulse shape and applications in micromachining [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7193: 719324.
- [8] Liu C, Mao X L, Mao S S, et al. Nanosecond and femtosecond laser ablation of brass: particulate and ICPMS measurements [J]. Analytical Chemistry, 2004, 76(2): 379-383.
- [9] 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.
- [10] Chang W, Ankiewicz A, Soto-Crespo J M, et al. Dissipative soliton resonances [J]. Physical Review A, 2008, 78(2): 023830.
- [11] Chang W, Soto-Crespo J M, Ankiewicz A, et al. Dissipative soliton resonances in the anomalous dispersion regime [J]. Physical Review A, 2009, 79(3): 033840.
- [12] Grellu P, Chang W, Ankiewicz A, et al. Dissipative soliton resonance as a guideline for high-energy pulse laser oscillators [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(11): 2336-2341.
- [13] Wu X, Tang D Y, Zhang H, et al. Dissipative soliton resonance in an all-normal-dispersion erbium-doped fiber laser [J]. Optics Express, 2009, 17(7): 5580-5584.
- [14] Duan L N, Liu X M, Mao D, et al. Experimental observation of dissipative soliton resonance in an anomalous-dispersion fiber laser [J]. Optics Express, 2012, 20(1): 265-270.
- [15] 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 Journal, 2013, 5(3): 1500806.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Krzempek K. Dissipative soliton resonances in all-fiber Er-Yb double clad figure-8 laser [J]. Optics Express, 2015, 23(24): 30651-30656.
- [19] Xu Y, Song Y L, Du G G, et al. Dissipative soliton resonance in a wavelength-tunable thulium-doped fiber laser with net-normal dispersion [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(3): 1-7.
- [20] Wu Y F, Tian J R, Dong Z K, et al. Generation of two dissipative soliton resonance pulses in an all-anomalous-dispersion regime thulium-doped fiber laser [J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(6): 1-8.
- [21] 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.
- [22] Sun X, Jia D F, Li Z H, et al. Generation of square pulses in passively mode-locked ytterbium-doped fiber laser with long cavity [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0101003. 孙旭, 贾东方, 李梓豪, 等. 长腔被动锁模掺镱光纤激光器的方波脉冲产生 [J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0101003.
- [23] Hou L, Sun J, Guo H Y, et al. Stable dispersion-managed soliton molecules in Yb-doped polarization-maintaining fiber laser with chirped fiber Bragg grating [J]. Optical Engineering, 2018, 57(8): 086102.
- [24] Zhang Z X, Şenel, Hamid R, et al. Sub-50 fs Yb-doped laser with anomalous-dispersion photonic crystal fiber [J]. Optics Letters, 2013, 38(6): 956-958.
- [25] Wang L Z, Xu P Z, Li Y H, et al. Femtosecond mode-locked fiber laser at 1 μm via optical microfiber dispersion management [J]. Scientific Reports, 2018, 8: 4732.
- [26] 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.
- [27] Zhao L M, Tang D Y, Cheng T H, et al. Nanosecond square pulse generation in fiber lasers with normal dispersion [J]. Optics Communications, 2007, 272(2): 431-434.
- [28] Zhao G K, Lin W, Chen H J, et al. Dissipative soliton resonance in Bismuth-doped fiber laser [J]. Optics Express, 2017, 25(17): 20923-20931.
- [29] Zheng X W, Luo Z C, Liu H, et al. High-energy noise-like rectangular pulse in a passively mode-locked figure-eight fiber laser [J]. Applied Physics Express, 2014, 7(4): 042701.