

光学学报

近厘米量级失匹长度的超短脉冲全光被动同步技术

王嫣鸾, 郭旭, 汤成, 郝强*

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093

摘要 实验采用主-从注入锁定方式搭建了基于全保偏光纤的全光被动同步超短脉冲激光光源,通过优化主激光器注入脉冲的脉冲能量和脉冲宽度实现了长达 0.879 cm 的失匹长度。所设计的同步光源包含基于非线性放大环的掺铒光纤锁模脉冲激光器和掺镱光纤锁模脉冲激光器。其中,主掺铒光纤锁模激光器的中心波长为 1560 nm,光谱宽度为 5.01 nm。在输出单脉冲能量从 0.06 nJ 提升至 3.26 nJ 的过程中,输出脉冲经过掺铒光纤放大器后,最窄脉冲宽度和最宽脉冲宽度为 221 fs 和 1.79 ps。从掺镱光纤锁模激光器中心波长为 1064 nm,光谱宽度为 0.22 nm,脉冲宽度为 9.5 ps。所提技术方案通过控制掺铒光纤放大器的输出参数,实现了主掺铒光纤锁模激光器与从掺镱光纤锁模激光器间近厘米量级的腔长失匹范围,为免除同步光源中的时间延迟控制组件和光纤光路耦合组件提供了可行方案。

关键词 非线性光学; 光纤激光器; 锁模激光器; 脉冲同步

中图分类号 O437 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1636001

Ultrashort Pulse All-Optical Passive Synchronization Technology with Near-Centimeter-Scale Mismatch Length

Wang Yanluan, Guo Xu, Tang Cheng, Hao Qiang*

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract An all-optical passive synchronous ultrashort pulse laser source based on an all-polarization-maintaining fiber is built by the master-slave injection locking method. By optimizing the pulse energy and pulse width of pulse from the master laser, the mismatch length of 0.879 cm is achieved. The designed synchronous laser source consists of an erbium-doped fiber mode-locked pulse laser (master laser) and a ytterbium-doped fiber mode-locked pulse laser (slave laser) based on nonlinear amplifying loop mirror. The central wavelength of the master laser is 1560 nm, and its spectral width is 5.01 nm. When the output single pulse energy is increased from 0.06 nJ to 3.26 nJ, the narrowest and widest pulse widths are 221 fs and 1.79 ps after the output pulse passes through the erbium-doped fiber amplifier. The central wavelength of the slave laser is 1064 nm, and its spectral width and pulse width is 0.22 nm and 9.5 ps respectively. By controlling the output parameters of the erbium-doped fiber amplifier, the tolerance range of cavity-length mismatch between the master and slave lasers approaches to centimeter level, which provides an efficient way to avoid using the time delay control components and fiber optical path coupling components in the synchronous laser source.

Key words nonlinear optics; fiber lasers; mode-locked lasers; pulse synchronization

近年,固体激光器或光纤激光器的精确同步技术在中红外脉冲产生、泵浦探测等领域中得到重要应用。在利用同步脉冲差频产生中红外脉冲的过程中,需要制备时域同步的泵浦光脉冲和信号光脉冲。当两束精确同步的脉冲同时注入到非线性晶体中时,不仅可以

提高转化效率,还可以降低非线性晶体损伤的风险^[1-2]。皮秒甚至飞秒量级的中红外超短脉冲得益于超短持续时间和极高峰值功率,在非线性光谱^[3]、材料冷加工^[4]和生物组织切割^[5]等领域中颇受关注。此外,脉冲同步光源在相干反斯托克斯拉曼散射显微成像中

收稿日期: 2022-01-26; 修回日期: 2022-03-19; 录用日期: 2022-03-30

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0407100)

通信作者: *qianghao@usst.edu.cn

也十分关键^[6]。一般地,两台自由运转的超短激光器的脉冲同步可采用主动反馈同步技术和被动全光同步技术来实现。主动反馈同步技术主要采用的是模拟电路,最典型的方法为平衡光学互相方法(BOC)^[7],同步精度可达阿秒量级,但反馈控制系统复杂,易受到光电探测器、混频器、滤波器和压电陶瓷促动器等器件的影响。被动全光同步技术是利用非线性交叉相位调制(XPM)效应^[8]来实现不同波长的激光器在时域上的精确同步。在被动全光同步技术中,主激光器与从激光器必须满足腔长匹配条件,这样才能实现同步输出,即从激光器的腔长需要在某一允许范围内,该腔长允许范围被称为失配长度。使用全保偏光纤可将脉冲光场局限在直径非常小的纤芯中,能够获得比空间光束更高的峰值功率密度和更长的作用距离,进而获得更加稳定的同步脉冲。

2014年,Sotor等^[9]提出了一种基于共同可饱和吸收体薄膜的同步系统,实现了中心波长为1558.5 nm、脉冲宽度为915 fs的掺铒光纤激光器和中心波长为1938 nm、脉冲宽度为1.57 ps的掺铒光纤激光器之间的同步,得到的同步失配量为0.78 mm。2019年,Zeng等^[10],实现了激光器的共腔结构式同步,该同步系统均采用全保偏光纤,此条件下的主从激光器光谱中心波长分别为1569.7 nm和1082.8 nm,脉冲宽度分别为9.2 ps和12.8 ps。最终测得的失配长度为16.2 mm,失配长度得到了量级突破。2020年,江云峰等^[11]用主从注入结构搭建了基于非线性放大环形镜(NALM)锁模的掺铒全保偏光纤激光器与掺镱全保偏光纤激光器的同步系统,通过提高注入功率的方式可实现的最大失配长度为26 mm。同时,发现从激光器光纤布拉格光栅(FBG)的带宽越宽,失配容忍度就越大。自同步系统采用全保偏结构以后,能够较好地抵抗环境扰动(温度、气流和振动等),因此实现了失配长度的极大提升。在飞秒与皮秒量级的同步系统方面:2011年,Hsiang等^[12]实现了基于非线性偏振旋转锁模的掺铒光纤激光器和掺镱光纤激光器的被动同步,脉冲宽度为300 fs、中心波长为1.56 μm 的脉冲和脉冲宽度为2.9 ps、中心波长为1.03 μm 的脉冲在共享光纤段上产生XPM效应,并分析了脉冲相对位置与腔长失配的关系;2014年,Zhu等^[13]研制了基于单钛宝石晶体、双泵浦光束和克尔透镜锁模的同步蓝宝石激光器,实现了飞秒与飞秒脉冲、飞秒与皮秒脉冲两种输出模式。在飞秒与飞秒脉冲同步模式下,该激光器产生了26 fs和23 fs的激光脉冲,时间抖动为7 fs。在飞秒与皮秒脉冲同步模式下,该激光器产生了29 fs和1.49 ps的激光脉冲,时间抖动为30 fs;2016年,Jia等^[14]利用 Tm^{3+} :ZBLAN光纤实现了全光纤双频脉冲激光源的被动同步,其中包括两个独立的腔体,一个是中心波长为1480 nm、脉冲半峰全宽为610 fs的环形腔调Q激光器,另一个是中心波长为1840 nm、脉冲半峰全宽为1.68 ps的线性腔结构锁模激光器。上述研究大多集中在同步激光的中心波长漂移和时序抖动上。

实际上,被动全光同步方案中失配长度的大小会影响脉冲同步系统的稳定性和同步系统的可复制性。通常情况下,失配长度主要与注入的单脉冲能量和脉冲宽度相关^[15]。对于光纤激光器来说,如果能够将两台锁模激光器的腔长失配长度增加至接近甚至超过厘米量级,将有可能在同步系统中避免使用冗长的时间延迟部件和繁杂的光纤光路耦合组件,这对降低超短脉冲激光同步系统光路部分的复杂度和改善系统的稳定性有极为重要的促进作用。

实验装置如图1所示。主激光器为掺铒光纤锁模激光器,中心波长为1560 nm,从激光器为掺镱光纤锁模激光器,中心波长为1064 nm。两台光纤激光器均基于全保偏光纤结合NALM实现锁模脉冲输出^[16]。如图1(a)所示,主激光器包括激光二极管(LD1),980/1550 nm波分复用器(WDM1),100 cm长的掺铒光纤(EDF),50:50光分束器(OC1)和10:90光分束器(OC2)。分束器的一端连接光纤反射镜(FM)构成线性臂。在环形器内采用相移器(PS1)来提供 $\pi/2$ 的非对易线性相位差,以降低锁模激光器的锁模阈值。掺铒光纤激光器的重复频率约为18.5 MHz,OC2输出的平均功率约为4.75 mW,3 dB光谱宽度约为5.01 nm,脉冲宽度为1.29 ps,如图1(d)所示。图1(b)为掺铒光纤放大器(EDFA),种子光经过用于防止回返光的隔离器(ISO1)后,平均功率最大可提升至63.1 mW。随后,10:90光分束器的90%端口连接一段单模保偏光纤(PMF),对该放大器的输出脉冲进行脉宽压缩,10%端口的输出脉冲用于监测和后续实验备用^[17]。从激光器的光路结构与主激光器类似,如图1(c)所示。该激光器采用130 cm长的掺镱光纤(YSF)作为增益介质,两个光纤准直器(Col)分别固定于两个五维调整架上,通过调节五维调整架来提高两个光纤准直器的耦合效率和控制激光器的几何腔长,进而精确控制激光器的重复频率。线性端以反射带宽为1 nm的窄带光纤布拉格光栅(FBG)作为滤波反射镜。从激光器3 dB光谱宽度约为0.22 nm,脉冲宽度为9.5 ps,如图1(e)所示。该同步系统中两台振荡器输出的脉冲序列最终通过光电探测器(PD1、PD2)在示波器上显示。

在实验中,通过调节两个五维调整架中一个的螺旋测微器来测量本同步系统的失配长度。经过多次测量发现,当改变掺铒光纤放大器的输出功率时,脉冲形状的变化会造成同步系统的失配长度发生显著变化。实验结果如图2所示。当EDFA的泵浦光未开启时,主激光器脉冲通过掺铒光纤放大器后的剩余能量为0.06 nJ,以该能量注入从激光器即可实现脉冲同步,所测得的失配长度仅为0.53 mm。在开启EDFA的泵浦光后,当放大脉冲的能量从0.09 nJ提升至0.92 nJ时,在距WDM2和YSF分别为1.0 m和0.5 m的位置处,测量到的主激光器脉冲的脉冲宽度从0.43 ps增加至1.76 ps,所测得的失配长度从1.72 mm增加至6.04 mm,如图2(a)所示。图2(d)为以螺旋测

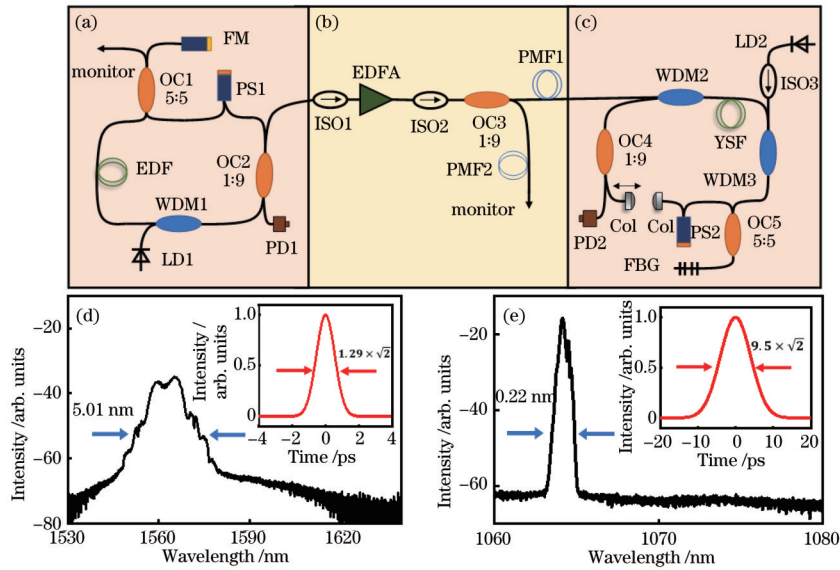


图 1 实验装置和激光参数。(a)掺铒光纤锁模激光器;(b)掺铒光纤放大器;(c)掺镱光纤锁模激光器;(d)掺铒光纤锁模激光器光谱和脉宽;(e)掺镱光纤锁模激光器光谱和脉宽
 Fig. 1 Experimental setup and laser parameters. (a) Erbium-doped fiber mode-locked laser; (b) erbium-doped fiber amplifier; (c) ytterbium-doped fiber mode-locked laser; (d) spectrum and pulse width of erbium-doped fiber mode-locked laser; (e) spectrum and pulse width of ytterbium-doped fiber mode-locked laser

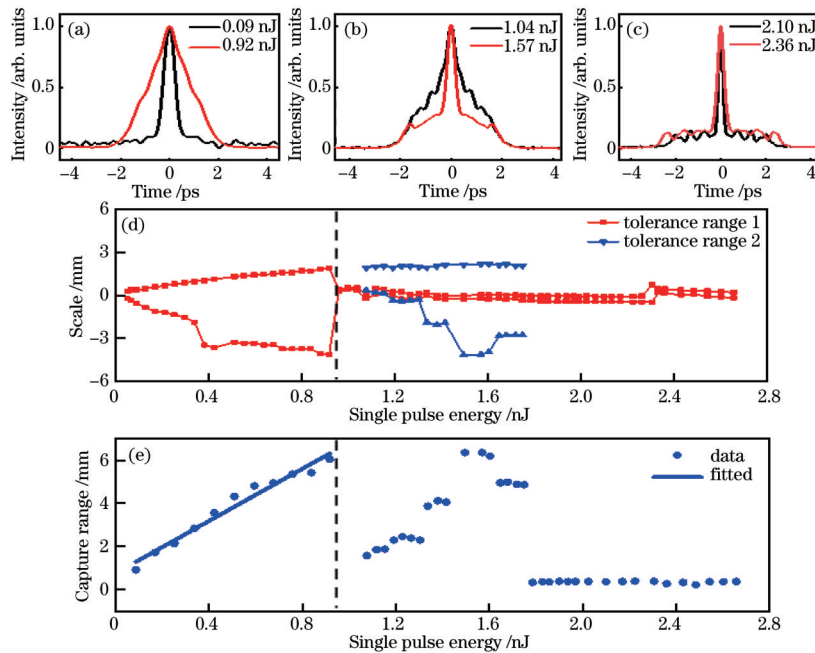


图 2 实验结果。(a)~(c)不同单脉冲能量下的脉宽;(d)不同单脉冲能量下的失配范围;(e)不同单脉冲能量下的失配长度
 Fig. 2 Experimental results. (a)~(c) Pulse width under different single pulse energies; (d) tolerance range under different single pulse energies; (e) mismatch length under different single pulse energies

微器一固定起始位置为零点,分别向两侧移动,在两脉冲失去同步状态的那一刻,所记录的螺旋测微器的值。图 2(e)显示了输入脉冲能量和螺旋测微器总位移(失配范围)的关系。从图 2(a)和图 2(e)中可以看出,当主注入脉冲能量小于 0.92 nJ 时,脉冲宽度会随着脉冲能量的增加逐渐展宽。同时,光强增强会引起从激光器中光纤折射率的变化,非线性相移增大,失配长度与注入脉冲能量基本成线性增加关系,如图 2(e)中的实

线所示。当注入脉冲能量从 0.95 nJ 增加至 1.80 nJ 时,由于较强的非线性效应,故脉冲光谱展宽,脉冲自相关曲线中心峰值明显压缩,而两侧表现为重叠的多峰结构,如图 2(b)所示。此时,对应的同步范围分为两段,不仅主峰可以与从激光器脉冲同步,对应 2(d)图中方块点线范围部分,其基底还可与从激光器脉冲同步,对应图 2(d)中三角点线范围部分。在此过程中:主峰的脉宽较窄,失配长度较小,在 0.5 mm 左右;

脉冲基底逐渐展宽,失匹长度相对较大。同时,在非线性效应的作用下,脉冲峰值的移动速率较两翼慢,表现出明显的自陡效应^[18]。因此,当单脉冲能量从 1.0 nJ 增加至 1.5 nJ 时,可以观察到失匹长度有明显单边缺失现象,这是由脉冲形状不对称所导致的。失匹长度基本呈现阶段性增加,最大可达 6.35 mm。当脉冲能量从 1.5 nJ 增加至 1.8 nJ 时,非线性效应导致光谱进一步展宽,脉冲自相关曲线进一步分裂,失匹长度再次减小。当主激光器脉冲能量超过 2.1 nJ 时,脉冲自相关曲线表现出了剧烈的分裂现象,脉冲基底显著增宽且强度显著降低。当脉冲能量在 1.95~2.66 nJ 范围内时,主激光器脉冲仅能通过中心主峰与从激光器脉冲同步,测得的失匹长度在 0.5 mm 左右。

在单脉冲能量超过 2.66 nJ 后,脉冲分裂明显。图 3(a) 显示了注入脉冲能量为 3.02 nJ 时的脉冲自相关曲线,分裂为 4 个较强脉冲。实验发现,分裂后的多个脉冲均可与从激光器脉冲实现同步。同样地,以螺旋测微器的起始位置为水平坐标轴的零点,向两端推进,改变腔长。图 3(b) 显示了 4 段脉冲同步的失匹过程和相应的失匹范围。在注入脉冲序列幅值保持不变的状

态下,从激光器腔长在变化,且脉冲序列幅值也在显著变化。示波器上观察到的主-从激光器脉冲序列分别如图 3(b) 中 A~D 的上下两列脉冲所示。A 为注入脉冲中的主峰与从激光器脉冲的同步情况,从激光器脉冲的幅值在示波器上显示约为 267 mV,失匹范围为 -0.25~0.25 mm(圆点线)。当从激光器的腔长变化,失匹范围增加至 -2.5~0.5 mm(方块点线)时,其脉冲的幅值有所降低,在示波器上显示约为 234 mV,如图 3(b) 中 B 所示。在继续改变从激光器的腔长后,在 -6.6~-3.0 mm 失匹范围(六边形点线)和 1.1~2.7 mm 失匹范围(三角点线)中,均可实现脉冲同步,同时从激光器脉冲的幅值进一步降低,在示波器上显示约为 149 mV。当从激光器的腔长位移超过 -6.6~2.7 mm 范围后,示波器上显示从激光器失去了锁模模式,进入了连续波工作模式,如图 3(b) 中 D 所示。从激光器脉冲幅值逐步降低至失去锁模的原因在于:注入脉冲中的多个分裂脉冲的能量和宽度不同造成从激光器中非线性干涉环境锁模过程的非线性相移存在差异。在整个过程中,最终测得的最大失匹长度为 0.879 cm。

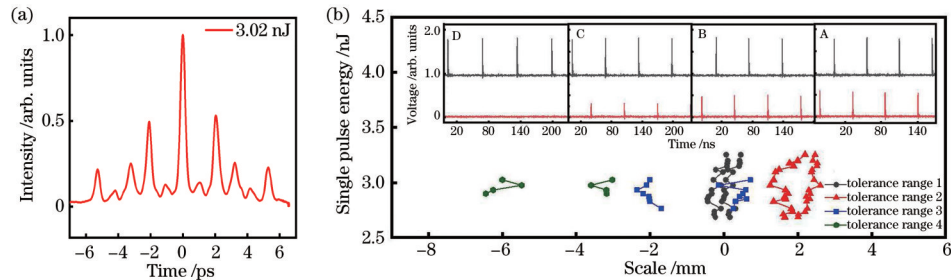


图 3 脉冲分裂状态下的同步情况。(a) 分裂脉冲的自相关曲线;(b) 不同单脉冲能量下的失匹范围,其中 A~D 为不同失匹范围的同步序列

Fig. 3 Synchronization in pulse splitting state. (a) Autocorrelation curve of splitting pulse; (b) tolerance range under different single pulse energies, where A~D are synchronous sequences with different tolerance ranges

综上所述,实验搭建了基于全保偏光纤的主-从全光被动同步光源,实现了中心波长为 1560 nm 和 1064 nm 的超短脉冲同步。通过优化注入脉冲能量得到了最大的腔长失匹长度(0.879 cm),并详细研究了脉冲能量增加过程中脉冲形状的改变对失匹范围的影响。所搭建的同步系统可提供飞秒与皮秒量级、飞秒与飞秒量级的同步光源,为宽带中红外超短脉冲的产生提供了一种可选方案。

参 考 文 献

- [1] 徐明航, 武佳美, 李博文, 等. 基于被动全光同步的高效率中红外差频产生技术研究[J]. 光学学报, 2020, 40(20): 2036001.
Xu M H, Wu J M, Li B W, et al. Efficient mid-infrared difference-frequency generation technology based on passive all-optical synchronization[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(20): 2036001.
- [2] 李博文, 武佳美, 徐明航, 等. 基于被动同步的宽调谐中红外差频技术研究[J]. 中国激光, 2020, 47(11):

1115001.

- Li B W, Wu J M, Xu M H, et al. Study on widely tunable mid-infrared difference-frequency generation based on passive synchronization[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(11): 1115001.
- [3] Schliesser A, Picqué N, Hänsch T W. Mid-infrared frequency combs[J]. Nature Photonics, 2012, 6(7): 440-449.
- [4] Malinauskas M, Žukauskas A, Hasegawa S, et al. Ultrafast laser processing of materials: from science to industry[J]. Light: Science & Applications, 2016, 5(8): e16133.
- [5] Serebryakov V A, Boiko É V, Petrishchev N N, et al. Medical applications of mid-IR lasers: problems and prospects[J]. Journal of Optical Technology, 2010, 77(1): 6-17.
- [6] Selm R, Winterhalder M, Zumbusch A, et al. Ultrabroadband background-free coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy based on a compact Er: fiber laser system[J]. Optics Letters, 2010, 35(19): 3282-

- 3284.
- [7] Tian H C, Song Y J, Yu J H, et al. Optical-optical synchronization between two independent femtosecond Yb-fiber lasers with 10^{-20} instability in 10^5 s[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(5): 3200607.
- [8] Hsiang W W, Chang C H, Cheng C P, et al. Passive synchronization between a self-similar pulse and a bound-soliton bunch in a two-color mode-locked fiber laser[J]. Optics Letters, 2009, 34(13): 1967-1969.
- [9] Sotor J, Sobon G, Tarka J, et al. Passive synchronization of erbium and thulium doped fiber mode-locked lasers enhanced by common graphene saturable absorber[J]. Optics Express, 2014, 22(5): 5536-5543.
- [10] Zeng J, Li B W, Hao Q, et al. Passively synchronized dual-color mode-locked fiber lasers based on nonlinear amplifying loop mirrors[J]. Optics Letters, 2019, 44(20): 5061-5064.
- [11] 江云峰, 武佳美, 郝强, 等. 全保偏被动同步的双色锁模光纤激光器的实验研究[J]. 光学学报, 2020, 40(9): 0936001.
- Jiang Y F, Wu J M, Hao Q, et al. Experimental study on all-polarization-maintaining passive synchronization for dual-color mode-locked fiber lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(9): 0936001.
- [12] Hsiang W W, Chiao W C, Wu C Y, et al. Direct observation of two-color pulse dynamics in passively synchronized Er and Yb mode-locked fiber lasers[J]. Optics Express, 2011, 19(24): 24507-24515.
- [13] Zhu C J, Zhang G Q, Xue B, et al. Two synchronized modes of ultrashort optical pulses in a two-beam pumped Ti: sapphire laser[J]. Applied Optics, 2014, 53(27): 6162-6167.
- [14] Jia C, Shastri B J, Abdurkerim N, et al. Passively synchronized Q-switched and mode-locked dual-band Tm^{3+} : ZBLAN fiber lasers using a common graphene saturable absorber[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 36071.
- [15] Rusu M, Herda R, Okhotnikov O G. Passively synchronized two-color mode-locked fiber system based on master-slave lasers geometry[J]. Optics Express, 2004, 12(20): 4719-4724.
- [16] Chen F H, Hao Q, Zeng H P. Optimization of an NALM mode-locked all-PM Er: fiber laser system[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(23): 2119-2122.
- [17] 胡晓蕾, 甘继伟, 杨占军, 等. 基于全保偏光纤利用脉冲同步技术差频产生中红外皮秒激光[J]. 光学学报, 2020, 40(7): 0736001.
- Hu X L, Gan J W, Yang Z J, et al. Difference-frequency generation of mid-infrared picosecond laser by pulse synchronization technology based on all polarization-maintaining fibers[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(7): 0736001.
- [18] (美) Govind P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 3rd ed. 贾东方, 余震虹, 译. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- Agrawal G P. Nonlinear fiber optics & applications of nonlinear fiber optics[M]. 3rd ed. Jia D F, Yu Zhen H, Transl. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2010.