

全正色散高阶谐波锁模掺 Yb 光纤激光器

朱晓军 章国安 曹张华 曾 凤 朱友华

(南通大学电子信息学院通信工程系, 江苏 南通 226019)

摘要 在全正色散(ANDi)系统中,报道了最高为 21 阶的被动谐波锁模(HML)掺 Yb 光纤激光器。利用级联长周期光纤光栅(C-LPFG)作为全光纤结构的光谱滤波器,以非线性偏振演化(NPE)效应作为锁模机理,得到了重复频率可调谐的被动谐波锁模掺 Yb 激光输出,实现输出脉冲重复频率 1.544~32.42 MHz 的可调谐。并进一步论证了谐波阶次的提高不仅与抽运功率有关,而且与光纤的长度有关。

关键词 光纤光学;谐波锁模;光纤激光;全正色散;长周期光栅

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0814002

High-Order Harmonic Mode-Locked Yb-Doped Fiber Laser with All Normal Dispersion

Zhu Xiaojun Zhang Guoan Cao Zhanghua Zeng Feng Zhu Youhua

(Department of Communication Engineering School of Electronics and Information,
Nantong University, Nantong, Jiangsu 226019, China)

Abstract A high-order harmonic and passively mode-locked Yb-doped with all-normal dispersion fiber laser is reported and demonstrated. With the mode-locking mechanism of nonlinear polarization evolution (NPE) effect and a cascade long period fiber grating (C-LPFG) as an all-fiber format spectral filter for the strong pulse shaping, a maximum of 21th-order harmonic mode-locked (HML) Yb-doped fiber laser can be tunably achieved with the repetition rate from 1.544 MHz to 32.42 MHz. It is further confirmed that the order of the HML is dependent on the cavity length and the pump power.

Key words fiber optics; harmonic mode-locked; fiber laser; all normal dispersion; long period fiber grating

OCIS codes 140.4050; 140.3615; 060.2320

1 引 言

近年来,脉宽为皮秒到纳秒量级的脉冲激光光源在工业微加工、生物测量等领域具有广泛的应用^[1]。通常纳秒量级脉宽的脉冲是通过调 Q 激光器来实现,然而调 Q 的脉冲宽度在数十个纳秒,很难达到几百个皮秒到几个纳秒量级的脉宽^[2-3]。相比于调 Q 激光器,光纤激光器具有效率高、易集成、易倍频等方面的优势。而在高能量超短脉冲光纤放大系统中,为了避免放大过程中积累的过量的非线性相移,在啁啾脉冲放大(CPA)过程中,通常使用大模场光纤^[4]。

2008 年, Renninger 等^[5]报道了在全正色散(ANDi)激光腔中,利用 62 m 的单模光纤(SMF),实现了重复频率为 3 MHz,脉冲宽度为 150 ps 的高能量巨啁啾脉冲。由于在 ANDi 腔中,得到的脉冲啁啾为线性啁啾,因此可以通过增加激光腔长来实现脉冲展宽。同时线性啁啾脉冲可以通过腔外光栅对其直接进行脉宽压缩。因此,可以将 ANDi 系统输出脉冲作为 CPA 技术的种子源直接进行放大,来取代 CPA 技术中脉冲展宽所需要的脉冲展宽、脉冲选择和脉冲预放大。然而,在 ANDi 激光腔中,想要得到纳秒到皮秒量级的脉冲宽度,所需要的激光腔

收稿日期: 2014-03-03; **收到修改稿日期**: 2014-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(61371113)、江苏省自然科学基金(SBK201341292)、江苏省高校省级重点实验室开放课题(KJS1204)、南通市科技计划项目(BK2013042)

作者简介: 朱晓军(1983—),男,博士,讲师,主要从事光纤器件与光纤激光器方面的研究。

E-mail: zhuxj0122@ntu.edu.cn

体长度比较长,这就导致了输出脉冲的重复频率较低。谐波锁模(HML)提供了在脉冲宽度不变情况下,提高脉冲重复频率的有效方法。而在传统HML激光器中,孤子脉冲和色散管理孤子得到的锁模脉冲能量一般比较低^[6-7]。ANDi系统相对于传统的孤子激光器和色散管理激光器,因其具有输出脉冲能量高、腔型结构简单等特点得到了广泛的研究^[8-18]。然而,在ANDi系统中,相关的HML输出报道非常有限。Haboucha等^[16]报道了掺Er光纤中,在正常色散光纤中产生最高为5阶的谐波脉冲输出,指出抽运功率是限制谐波阶次提高的主要原因,由于抽运功率的限制,只能得到最高为5阶的HML输出。本课题组在文献^[17-18]中的ANDi掺Yb光纤激光器中,分别观察到了3阶HML和14阶次HML现象,并介绍了谐波阶次的提高受到抽运功率的限制,同时预测了谐波阶次与腔体长度有关。

本文通过实验验证了在ANDi系统中,HML阶次的提高不仅与激光抽运功率有关,而且与激光腔体的长度有关。在一定的抽运功率下,可以通过增加激光腔体光纤长度来提高谐波的阶次,以此来实现具有高重复频率锁模脉冲输出。通过实验观察到了稳定的21阶次的被动HML脉冲输出,在激光系统中,利用级联长周期光纤光栅(C-LPFG)作为全光纤结构的光谱滤波器,利用非线性偏振演化(NPE)效应作为锁模机理,实现重复频率从1.544 MHz[基频(FML)]到32.42 MHz(21阶次谐波)HML脉冲的可调谐。在21阶HML脉冲输出时,脉冲宽度为0.47 ns,最大输出单脉冲能量为2.90 nJ。

2 实验装置

可调谐高阶谐波ANDi被动锁模掺Yb光纤激光器的结构装置如图1(a)所示。其中,环形腔的增益是由一段长为28 cm的掺Yb增益光纤(YDF)提供(在976 nm的吸收系数为612 dB/m)。最大功率为530 mW,波长为976 nm的抽运激光二极管通过波分复用器(WDM)与增益光纤连接提供激光抽运。长为118 m的SMF与WDM一端相连,长4.2 m的SMF与增益光纤另一端相连,隔离器保证光的单向传输特性。激光器的NPE作为可饱和吸收,由两个1/4波片($\lambda/4$)、一个1/2波片($\lambda/2$)和一个偏振光分束器(PBS)来完成,激光由PBS的输出端输出,整个环形腔体的总长度为123 m。C-LPFG作为全光纤结构的光谱滤波器熔接在激光腔体中,

其透射谱如图1(b)所示。其中,C-LPFG的中心波长为1034 nm,通带半峰全宽(FWHM)为7 nm。在实验中,输出光谱由AQ-6370光谱分析仪测量,输出脉冲和脉冲频谱分别由高速探测器(上升沿小于40 ps)与带宽为12.5 GHz的高速示波器(Tektronix M071254)和频率分析仪(Agilent E4447A)测量。

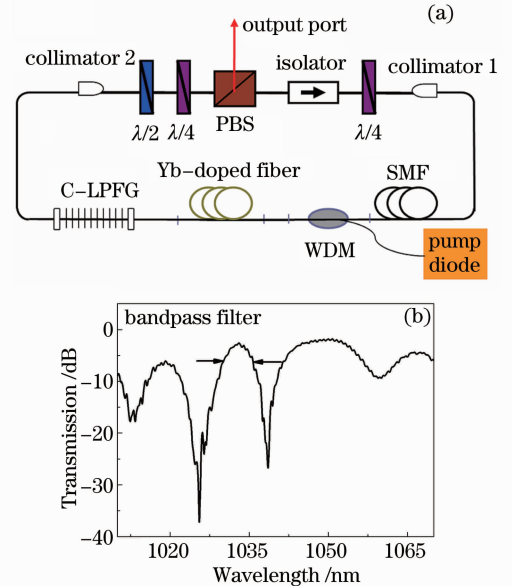


图1 (a)基于ANDi的掺镱被动锁模激光器的结构图;(b)C-LPFG的透射谱

Fig. 1 (a) Configuration of an all normal dispersion passive mode-locked Yb-doped fiber cavity; (b) transmission spectrum of a C-LPFG

3 实验结果及讨论

在ANDi高次HML实验中,激光腔总长度为123 m,对应于1.544 MHz的基频重复频率。锁模阈值为123 mW,当抽运功率大于123 mW时,得到了稳定的基频脉冲锁模。当抽运功率从123 mW增加530 mW,通过调节波片,可以实现重复频率从2阶谐波(3.08 MHz)到21阶谐波(32.42 MHz)的可调谐。

图2为抽运功率530 mW时,重复频率实现从1阶到21阶HML可调的脉冲序列图。图2(a)显示的是基频的脉冲序列,基频重复频率为1.544 MHz对应于123 m的腔体总长度。输出脉宽为1.30 ns,最大输出功率为98.8 mW,对应于63.9 nJ的单脉冲能量。图2(b)显示的是重复频率为10.78 MHz,7阶次的HML脉冲序列。由图2(b)可见,脉冲之间的间隔均匀。其中,脉宽为0.67 ns时,最大输出功率为105 mW。图2(c)为实验得到的重复频率为

32.42 MHz, 最高为 21 阶次的 HML 脉冲序列。需要说明的是, 由于受到抽运功率的限制, 在目前的抽

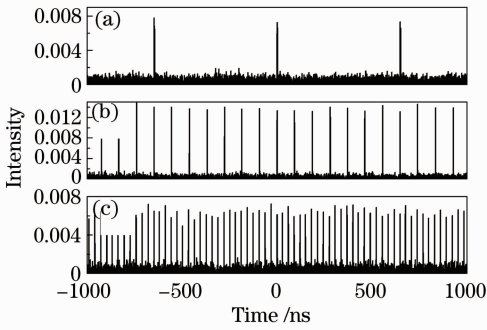


图 2 锁模脉冲的脉冲序列图。(a) FML 时, 基频为 1.544 MHz; (b) 7 阶 HML 时, 基频为 10.78 MHz; (c) 21 阶 HML 时, 基频为 35.2 MHz

Fig. 2 Oscilloscope traces of the mode-locked pulses. (a) FML at 1.544 MHz; (b) 7th harmonic mode-locked at 10.78 MHz; (c) 21th harmonic mode-locked at 35.2 MHz

运功率下, 仅能得到最高为 21 阶的 HML 脉冲。

为了更加了解 21 阶 HML 的特性, 图 3 显示的是抽运功率为 530 mW 时, 21 阶谐波被动锁模的光谱图和频谱图。图 3(a) 为 21 阶 HML 的光谱图。由图可知, 输出光谱的 FWHM 为 1.9 nm, 光谱中心波长为 1034.2 nm, 对应于 C-LPFG 的带通滤波器中心波长, 并且光谱形状为近似高斯型, 这是典型的 ANDi 光谱特征^[8]。此时, 输出脉冲宽度 τ 为 0.47 ns, 平均输出功率为 94 mW, 对应于 2.90 nJ 的最大输出单脉冲能量。图 3(b) 为 21 阶谐波的射频 (RF) 频谱图。由图可知, 测得的频率为 32.42 MHz, 对应于 FML 重复频率 1.544 MHz 的 21 阶次谐波, 脉冲信号的信噪比大于 56 dB (带宽为 850 kHz, 精度为 1 kHz), 插图为带宽 150 MHz, 精度为 250 kHz 的频谱图, 由图可知, 超模抑制比大于 23 dB。经过测试, 此时的 HML 状态可以连续稳定工作 7 h 而不发生功率衰减。

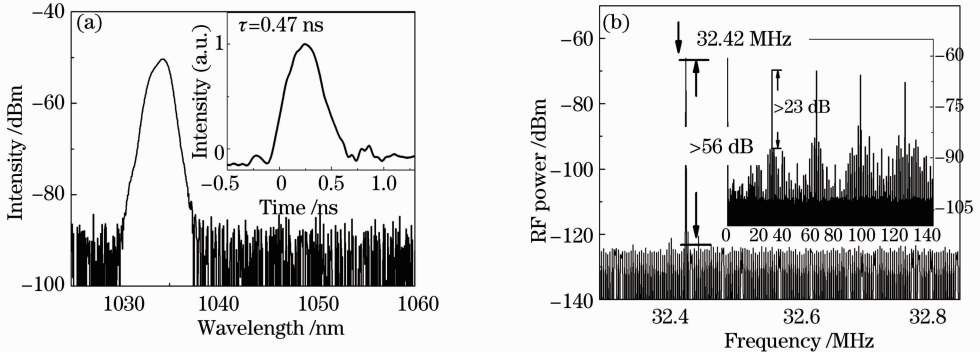


图 3 21 阶 HML 脉冲输出特性。(a) 光谱图; (b) 频谱图

Fig. 3 Detailed characteristics of the 21th harmonic mode-locked output. (a) Spectrum of 21th harmonic mode-locked fiber laser; (b) radio-frequency spectrum of the 21th pulse train output

在该实验系统中, 窄带宽的 C-LPFG 作为全光纤结构的光谱滤波器和 NPE 的过饱和和吸收共同作用是产生高阶 HML 的主要原因。文献^[16]报道了

滤波器是产生多脉冲的原因, 其特征是通过增加抽运功率, 使输出脉冲的个数也依次增加。抽运功率和脉冲个数成正比, 即抽运功率越高, 得到的脉冲个

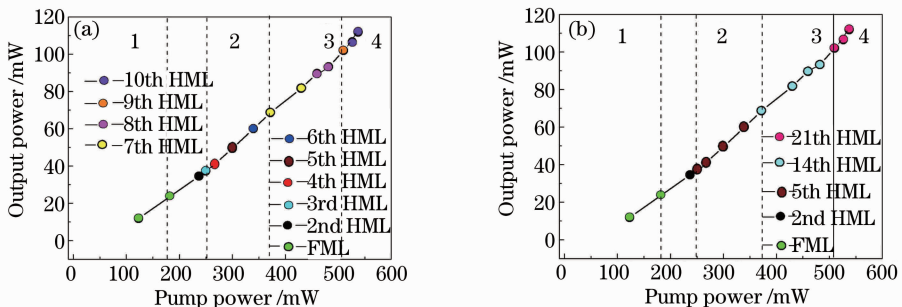


图 4 不同谐波阶次和抽运功率之间的关系图

Fig. 4 Measured output harmonic order versus pump power with a mode-locking threshold of 123 mW

数也越多,这种现象在低阶次(小于 10 阶)的 HML 实验中也得以实现,如图 4(a)所示。图 4(a)显示了不同阶次的 HML 脉冲输出能量和抽运功率之间的关系图。如图 4 所示,当抽运功率大于锁模阈值 123 mW 时,得到了基频的锁模脉冲(1.544 MHz)。当抽运功率提高到区域 2(267~372 mW)的范围时,随着抽运功率的增大,2 阶、3 阶依谐波次产生,直到出现最高为 7 阶(10.78 MHz)的 HML 脉冲输出。此时,继续增大抽运功率,8 阶、9 阶谐波依次出现,当抽运功率增加到 520 mW 时,得到了最高为 10 阶(15.45 MHz) HML 脉冲输出,由图可知谐波阶次与抽运功率是成正比的。此时,继续增加功率,当抽运功率达到最大的 530 mW,再没有更高阶次的谐波出现,这个现象说明当激光腔中的可饱和吸收(SA)强度固定(波片固定),仅在滤波器的作用下,仅能得到最高为 10 阶的 HML 脉冲,为了获得更高级次的谐波,必须通过调节偏振片来实现更高阶次的 HML 输出。

图 4(b)是在激光系统中,通过调节腔内的偏振状态,锁模谐波阶数和抽运功率的关系图。由图可知,当抽运功率在区域 3(372~510 mW)时,通过调节 1/2 波片,可以得到最高为 14 阶(重复频率为 21.62 MHz)的 HML。当进一步提高抽运功率,达

到区域 4(510~530 mW)时,通过调节波片,得到最高为 21 阶(重复频率为 32.42 MHz)的 HML 脉冲输出。这个现象说明,通过改变腔体内的 NPE(旋转波片),可以实现高阶的 HML 输出。因 NPE 类似 SA^[19],其透射强度具有正弦函数关系如图 5(a)所示。假设当最大抽运功率一定,激光腔体的长度一定,则腔体内的总脉冲能量一定,其中脉冲能量是由腔体内的色散和非线性效应一起决定,为方便理解可以认为脉冲能量是一个定值如图 5(b)所示。由于一个给定系统的 SA 透射率是有一个有限的值,这个值可以通过偏振片调节腔的调制深度和非线性损耗来改变。当积累的脉冲能量大于最大的 SA 强度(NPE 的过饱和吸收),脉冲将会发生劈裂,谐波将会产生。而总的脉冲能量大小决定了可以形成谐波的阶数,因此这样就可以很直观地解释图 4 的实验现象。当 NPE 的透射率在图 5(a)中 1 的位置时,由于透射率高,而脉冲的总能量(“面积”)固定,因此在这种情况下只能通过最高为 10 阶的 HML,如图 4(a)所示。此时,通过调节波片,改变腔体的 SA,当调节到 5(a)中 3 的位置时,这时候 NPE 透射率降低,脉冲总能量可以分裂成很多满足这一条件的脉冲,形成具有最高为 21 阶次的 HML 输出,如图 4(b)所示。

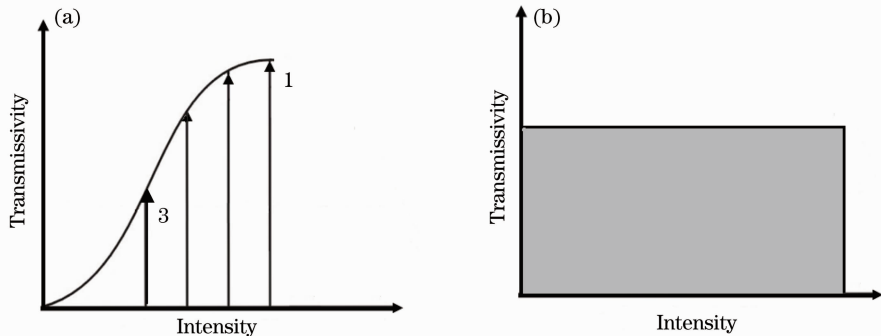


图 5 (a) NPE 透射强度; (b) 脉冲能量图

Fig. 5 (a) Transmissivity of NPE; (b) pulses energy

图 6 实验测量了不同谐波阶次下,谐波的腔体输出脉冲能量和单一脉冲能量的变化曲线图。由图 6 可知,在不同的谐波阶次下,腔体的输出功率分布比较固定,均在 101 mW 左右,证明了在不同的谐波阶次下腔体总能量是一个定值的假设。同时图 6 给出了不同谐波阶次下,单一脉冲的能量变化图,即随着谐波阶次的提高,HML 的单脉冲能量单调递减,这一现象说明了单脉冲能量具有一个极限值(饱和值),通过改变激光腔体的 NPE 透射率,就可以在低的 SA 下,获得高阶次的谐波如图 4(b)所示。

一般认为,谐波阶次的提高仅与抽运功率有关^[6,16],通过实验验证,可以认为谐波的阶次不仅与抽运功率有关,而且与光纤长度有关。由图 5(b)可知,脉冲的总能量可以通过腔体内色散和非线性效应两种途径来改变,抽运功率可以改变非线性效应,光纤长度可以改变腔体的色散,而当在抽运功率一定时(即非线性效应一定),可以通过增加色散提高脉冲的总能量来实现高阶次的谐波。因此,在抽运功率一定时,通过改变光纤长度来实现脉冲的总能量的变化,以此来实现高阶次的谐波。对比文献

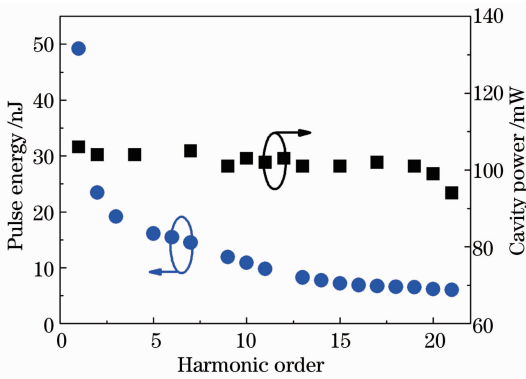


图6 不同阶次腔体输出功率及脉冲能量图

Fig. 6 Cavity power and output pulse energy versus harmonic order

[17–18],在最大抽运功率一定的情况下,通过增加激光腔体光纤的总长度,改变激光腔体总能量,实现了21阶次的HML脉冲输出,验证了谐波阶次不仅与抽运功率有关,而且与光纤长度有关。

4 结 论

在ANDi谐波系统中,得到了稳定的、可调谐的、最高为21阶(重复频率为32.42 MHz)的被动HML光纤激光器。利用123 m的激光腔长,实现了输出脉冲重复频率的可调谐,可调谐范围为1.544 MHz(基频)到32.42 MHz(21阶次谐波)。通过实验验证了谐波阶次的提高不仅与抽运功率有关,而且与腔内的色散(光纤长度)有关,为了得到高阶次的谐波,在抽运功率受限的条件下,可以通过增加色散(光纤长度)来增大脉冲的总能量,实现具有高重复频率的HML脉冲输出。在最大抽运功率为530 mW时,得到了稳定的21阶HML输出,输出脉冲宽度为0.47 ns,最大单脉冲能量为2.90 nJ。

参 考 文 献

- Guo Feng, Zhu Zhiwu, Zhu Rongzhen, *et al.*. Experimental study of damage effect on complementary metal oxide semiconductor detector irradiated by 1064 nm nanosecond single-pulse laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(s1): s114013.
郭 锋, 朱志武, 朱荣臻, 等. 1064 nm 纳秒单脉冲激光对互补金属氧化物半导体探测器的损伤效应实验研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(s1): s114013.
- Liu Rui, Yu Yongji, Chen Xinyu, *et al.*. 150 kHz Q-switched adhesive-free bond composite NdYVO₄/NdGdVO₄ laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(6): 0602001.
刘 瑞, 于永吉, 陈薪羽, 等. 150 kHz 生长型复合 NdYVO₄/NdGdVO₄ 电光调 Q 激光器[J]. *中国激光*, 2012, 39(6): 0602001.
- He Jing, Zhao Hongming, Zhou Jun, *et al.*. Single-ended fiber coupled acousto-optic Q-switched all-fiber laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(5): 0502008.
何 晶, 赵宏明, 周 军, 等. 单端光纤耦合的声光调 Q 全光纤

化光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, 39(5): 0502008.

- Liu Gang, Yang Fei, Ye Qing, *et al.*. Study of mode characteristics for large-mode-area double-clad fiber gratings [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(6): 0605002.
刘 刚, 杨 飞, 叶 青, 等. 大模场面积双包层光纤光栅模式特性研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(6): 0605002.
- W H Renninger, A Chong, F W Wise. Giant-chirp oscillators for short-pulse fiber amplifiers [J]. *Opt Lett*, 2008, 33(24): 3025–3027.
- A B Grudinin, S Gray. Passive harmonic mode locking in soliton fiber lasers [J]. *J Opt Soc Am B*, 1997, 14(1): 144–154.
- K S Abedin, J T Gopinath, L A Jiang, *et al.*. Self-stabilized passive, harmonically mode-locked stretched-pulse erbium fiber ring laser [J]. *Opt Lett*, 2002, 27(20): 1758–1760.
- W H Renninger, A Chong, F W Wise. Dissipative solitons in normal-dispersion fiber lasers [J]. *Phys Rev A*, 2008, 77(2): 023814.
- Chi Junjie, Li Pingxue, Yang Chun, *et al.*. A theoretical and experimental study on all-normal-dispersion Yb-doped mode-locked fiber lasers [J]. *Chin Phys B*, 2013, 22(4): 044204.
- Zhang Liqiang, Zhuo Zhuang, Pan Zhiyong, *et al.*. Wavelength tunable Yb-doped double-clad dissipative soliton fiber laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(12): 1202007.
张丽强, 卓 壮, 潘志勇, 等. 可调谐掺 Yb 双包层光纤耗散孤子锁模激光器[J]. *中国激光*, 2013, 40(12): 1202227.
- Zhang Zuxing, Dai Guoxing. All-normal-dispersion dissipative soliton ytterbium-doped fiber laser without additional filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0214005.
张祖兴, 戴国星. 全正色散耗散孤子掺镱光纤激光器 [J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0214005.
- H Zhang, D Y Tang, L M Zhao, *et al.*. Compact graphene mode-locked wavelength-tunable erbium-doped fiber lasers: from all normal anomalous dispersion to all normal dispersion [J]. *Laser Phys Lett*, 2010, 7(8): 591–596.
- H G Liu, J H Huang, J H Li, *et al.*. Above 100 nJ all-normal-dispersion femtosecond pulse generation from a large-core multi-mode fiber laser [J]. *Laser Phys Lett*, 2013, 10(5): 055101.
- Chi Junjie, Li Pingxue, Yang Chun, *et al.*. A theoretical and experimental study on all-normal-dispersion Yb-doped mode-locked fiber lasers [J]. *Chin Phys B*, 2013, 22(4): 044204.
- X M Liu. Numerical and experimental investigation of dissipative solitons in passively mode-locked fiber lasers with large net-normal-dispersion and high nonlinearity [J]. *Opt Express*, 2009, 17(25): 22401–22416.
- A Haboucha, A Komarov, H Leblond, *et al.*. Mechanism of multiple pulse formation in the normal dispersion regime of passively mode-locked fiber ring lasers [J]. *Opt Fiber Technol*, 2008, 14(4): 262–267.
- D F Liu, X J Zhu, C H Wang, *et al.*. Passive harmonically mode-locked Yb³⁺-doped fiber laser free from anomalous dispersion [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2010, 22(23): 1726–1728.
- X J Zhu, C H Wang, S X Liu, *et al.*. Tunable high-order harmonic mode-locking in Yb-doped fiber laser with all-normal dispersion [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24(9): 754–756.
- G Martel, C Chédot, A Hideur, *et al.*. Numerical maps for fiber lasers mode locked with nonlinear polarization evolution: comparison with semi-analytical models [J]. *Fiber Integrated Opt*, 2008, 27(5): 320–340.

栏目编辑: 王晓球