

重复频率 100 MHz 脉冲宽度 39 fs 的掺铒光纤激光器

马挺^{1,2}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽省光子器件重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 提出一种在非高重复频率下获得窄脉宽脉冲输出的呼吸孤子掺铒光纤激光器设计方案。通过缩短腔内具有大色散系数的正负色散光纤的长度来保证腔内脉冲有较大的呼吸比,通过引入零色散光纤来降低激光器的重复频率。采用波分复用器及隔离器集于一体的光纤混合器,并以前向抽运方式来降低腔内脉冲能量的损耗,并且通过优化腔内负色散光纤的分布来确定输出端的位置。基于此,构建出重复频率为 100 MHz 的呼吸孤子掺铒光纤激光器,其输出光谱宽度为 112 nm,直接输出脉冲宽度为 68 fs,色散补偿后的输出脉冲宽度为 39 fs,当抽运功率为 900 mW 时输出脉冲的平均功率为 94.5 mW。

关键词 激光器; 飞秒脉冲; 锁模; 脉冲宽度; 重复频率

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0801004

Erbium-Doped Fiber Laser with 100-MHz Repetition Rate and 39-fs Pulse Width

Ma Ting^{1,2}

¹Anhui Provincial Key Laboratory of Photonics Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract This study proposes a structural design for a breath soliton erbium (Er)-doped fiber laser under a relatively low (100 MHz) repetition rate to obtain a pulse output having narrow pulse width. An output pulse with a large breathing ratio can be ensured by shortening the lengths of the positive and negative dispersion fibers with a large dispersion coefficient in the cavity. And, a fiber with zero dispersion is introduced to reduce the repetition rate of the laser. The energy loss of the pulse in the cavity is reduced using a fiber optic mixer, which integrates the wavelength division multiplexer and the isolator with the forward pumping method. The distribution of the negative dispersion fiber in the cavity is optimized and designed to determine the output position of the laser. Based on this, a breath soliton Er-doped fiber laser having a repetition rate of 100 MHz is constructed; the laser's output spectrum and direct output pulse width are 112 nm and 68 fs, respectively. After dispersion compensation, the laser's output pulse width is 39 fs, and its average power of output pulse is 94.5 mW at a pump power of 900 mW.

Key words lasers; fiber laser; femtosecond pulse; mode locking; pulse width; repetition rate

OCIS codes 140.3510; 320.2250; 140.4050; 320.5540

1 引言

超短脉冲光纤激光器在微加工^[1]、频率计量^[2-3]、生物成像^[4]等领域具有广泛的应用。被动锁模技术是构建超短脉冲光纤激光器的主流方案,主要有非线性光学环形镜^[5-6]、非线性偏振旋转

(NPR)^[7]及可饱和吸收体锁模技术^[8]。相比之下,基于腔内偏振器件的 NPR 技术具有调制深度大、饱和吸收效应快的特点,在产生窄脉宽脉冲上极具潜力。此外,有研究表明色散管理结构更有利于光纤激光器产生更窄脉宽的脉冲^[9-10]。因此,NPR 锁模及其色散管理结构已经成为掺铒光纤激光器获得

收稿日期: 2019-01-24; 修回日期: 2019-02-24; 录用日期: 2019-03-04

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405100, 2017YFB0405200)、国家自然科学基金(61377044)、中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB21010300)

* E-mail: mt2013@mail.ustc.edu.cn

窄脉宽脉冲的最佳选择。

掺铒光纤激光器因受到增益带宽的限制而难以获得超窄脉宽脉冲输出。为此,人们利用腔内非线性效应拓宽脉冲光谱,进而突破增益带宽的限制,获得更窄脉宽的脉冲输出。2007年 Tang 等^[11]通过控制激光器输出位置及强度来控制腔内非线性效应对脉冲的影响,构建了重复频率为 38.3 MHz、脉冲宽度为 47 fs 的掺铒光纤激光器。由于腔内正负色散光纤过长,脉冲呼吸比较小,使得激光器输出脉冲宽度仍然较宽。2010年, Ma 等^[12]通过减短腔内正负色散光纤长度,提高腔内脉冲呼吸比,构建了重复频率为 225 MHz 的掺铒光纤激光器,获得了 37.4 fs 的脉冲宽度。2015年 Li^[13-14]等在减短腔内正负色散光纤的基础上增加非线性光纤的长度,并且减小输出耦合比,构建了 200 MHz 的掺铒光纤激光器,其输出光谱宽度为 148 nm,直接输出脉冲宽度为 44.6 fs,压缩后获得 34.3 fs 的超窄脉宽脉冲。由此可见,提高腔内脉冲呼吸比对获得窄脉宽至关重要,但是提高腔内脉冲呼吸比的同时增加了激光器的重复频率。然而在一些应用中,则期望在非高重复频率下(≤ 100 MHz)获得超窄脉宽输出,例如构建宽光谱范围的高精度高分辨率双光梳光谱仪^[15-16]。虽然在腔外采用调制器可以控制脉冲串的重复频率,但是功率损失严重^[17]。另外,腔外超连续光谱的产生^[18]及两个激光器相干合成的方法可以产生超窄脉宽^[19],但这些方法操作困难且系统复杂。因此,研究非高重复频率窄脉宽掺铒光纤激光器有重要的意义。

本文采用 NPR 锁模方式构建呼吸孤子掺铒光纤激光器,通过控制腔内正负色散量,引入零色散光纤控制重复频率,并采用光纤混合器及前向抽运的方式来减小腔损并优化腔内负色散光纤分布,实现重复频率为 100 MHz、色散补偿后脉宽为 39 fs 的超短脉冲输出。

2 实验结构

激光器结构如图 1 所示,其中 EDF 为掺铒光纤,ZDF 为零色散光纤,SMF 为单模光纤,Co 为光纤准直器,QWP 为四分之一波片,HWP 为二分之一波片,PBS 为偏振分束棱镜,hybrid 为光纤混合器,LD 为半导体激光器。激光器由光纤、光纤器件和类可饱和吸收体三部分构成。光纤部分由 EDF、ZDF 及 SMF 组成。EDF 采用 Liekki 公司 Er110-4/125 型高掺杂光纤,其在 980 nm 和 1530 nm 处的

吸收系数分别为 60 dB/m 与 110 dB/m,是激光器腔内唯一的正色散光纤;ZDF 为 OFS980 光纤,其色散系数为普通单模光纤的 1/17;SMF 采用 SMF-28 光纤,是腔内负色散的主要提供者。各部分光纤的群速度色散(GVD)、三阶色散(TOD)和非线性系数(γ)详见表 1。光纤器件包括 Co 和 hybrid,腔内采用的微型光纤准直器具有体积小、耦合效率高的优点。将波分复用器(WDM)与光隔离器(ISO)集于一体的 hybrid 用于腔内,在 1550 nm 下的器件插损为 0.37 dB,小于两个器件独立使用时插损之和(WDM 的插损约为 0.4 dB,ISO 的插损约为 0.35 dB),有利于降低脉冲能量在腔内的损耗,同时能够有效缩短器件的尾纤长度,有助于减短腔内大色散值光纤的长度,使得激光器结构更加简单紧凑。类可饱和吸收体由两片 QWP、一片 HWP 与 PBS 构成。PBS 不仅起到起偏与检偏的作用,还起到输出耦合的作用。

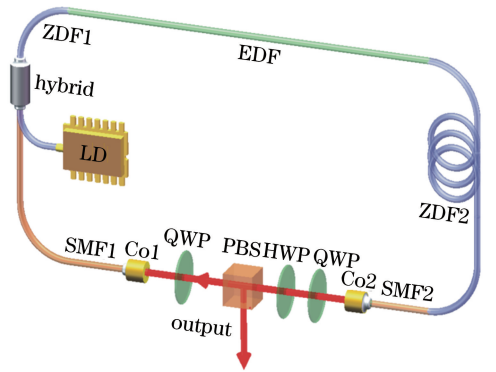


图 1 基于 NPR 锁模的呼吸孤子掺铒光纤激光器结构示意图
Fig. 1 Structural schematic of breath soliton Er-doped fiber laser based on mode locking by NPR

表 1 激光器腔内光纤参数

Table 1 Parameters of fibers in laser cavity

Fiber	GVD / ($\text{fs}^2 \cdot \text{mm}^{-1}$)	TOD / ($\text{fs}^3 \cdot \text{mm}^{-1}$)	γ / ($\text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)
SMF-28	-22	127	0.0012
OFS980	-1.3	50	0.0023
Er110-4/125	11	45	0.0032

腔内脉冲呼吸比(腔内脉宽最大值与最小值之比)越大越有益于非线性脉冲整形^[12]。为保证腔内有较大的脉冲呼吸比,腔内正负色散值较大的光纤长度应尽可能短。Er110-4/125 是腔内正色散光纤,同时也是增益光纤,其过短,就会导致激光器难以实现锁模,过长则激光器容易形成多脉冲。为保证足够的增益及较小的正色散量,Er110-4/125 光纤的长度选为 45 cm。腔内负色散光纤为 SMF-28

及 OFS980, SMF-28 光纤为腔内负色散的主要提供者, Co 的尾纤及 hybrid 的信号端为 SMF-28 光纤, 考虑到腔净色散近零偏负, 及器件尾纤的熔接长度, 将其总长选为 29 cm. hybrid 的公共端 ZDF1 的长度为 8 cm. 腔内的正色散量为 0.004950 ps^2 , 负色散量为 -0.006484 ps^2 , 腔净色散量为 -0.001534 ps^2 , 腔内正负色散均较小, 确保了脉冲具有较大的呼吸比. 此时激光器结构决定的激光器重复频率为 216.2 MHz. 通过在腔内 ZDF2 位置处引入 OFS980 光纤来降低激光器的重复频率.

3 结果与讨论

首先研究 OFS980 光纤的引入对激光器光谱和重复频率的影响. 已有报道, OFS980 光纤位于掺杂光纤后对光谱的展宽效果优于位于掺杂光纤前^[20]. 采用长度分别为 35.4, 74.2, 107.5, 157.5 cm 的 OFS980 光纤放置于腔内 ZDF2 的位置构建光纤激光器, 对应的重复频率分别为 140, 120, 100, 80 MHz, 输出光谱如图 2 所示. 可见激光器重复频率从 140 MHz 降至 100 MHz 时, 激光器光谱宽度明显加宽且光谱变平坦. OFS980 光纤的非线性系数较高, 是 SMF-28 光纤的 2.67 倍, 并且处在非线性光纤的位置, 因此其内部积累的非线性效应较大. 但是当激光器重复频率降为 80 MHz 时, 光谱虽然更宽, 但调制增多, 且有连续波成分叠加, 表明腔内非线性过大, 这不利于窄脉宽的获得. 因此, OFS980 光纤降低重复频率的时候, 可有效地展宽光谱, 但是因其非线性系数大, 使得重复频率降至 80 MHz 左右时已经导致激光器输出光谱质量变差, 进而限制了重复频率的进一步降低.

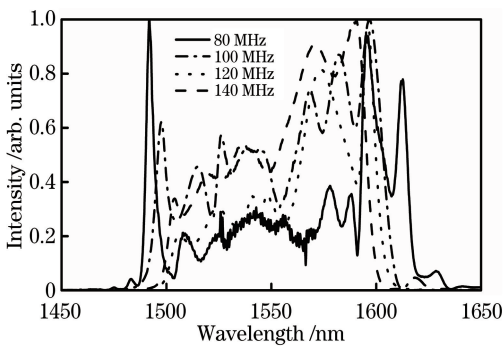


图 2 不同重复频率下的激光器输出光谱

Fig. 2 Output spectra of laser under different repetition rates

接着研究 OFS980 光纤的引入对腔内脉冲呼吸比的影响. OFS980 光纤相较于 SMF-28 光纤引入

腔内的负色散量较小. 本文基于广义非线性薛定谔方程, 利用对称分步傅里叶算法进行数值模拟分析^[12]. 在模拟过程中光纤参数的选取与构建激光器所用光纤参数一致, 取脉冲饱和功率 P_{sat} 为 1.5 kW, 增益饱和能量 E_{sat} 为 0.36 nJ, 拉曼效应项 T_R 为 5 fs. 当 ZDF2 长为 0 cm 和 107.5 cm 时对腔内的脉冲宽度演化情况进行模拟, 结果如图 3(a)、(b) 所示, 可见在两种长度下腔内脉冲存在明显的呼吸演化, ZDF2 的长度分别为 0, 107.5 cm 时对应的激光器腔内脉冲呼吸比为 4.85、4.08, 因此 ZDF2 的引入使得激光器重复频率从 216 MHz 降为 100 MHz, 对脉冲呼吸比影响较小.

上文已经讨论过腔内 OFS980 光纤长度对激光器重复频率、谱宽、呼吸比的影响, 另外, 激光器输出位置也影响腔内 SMF-28 长度的分布. 虽然 SMF-28 光纤的非线性系数较低, 但是腔内脉宽最小值位于 SMF-28 光纤中, 因此其内部积累的非线性效应不可忽视, 所以激光器输出位置显得尤为主要. 通过数值模拟研究腔内 SMF-28 光纤分布对激光器输出脉冲宽度的影响. 模拟结果如图 3(c) 所示, 在 SMF-28 光纤总长度不变, SMF1 长度由长变短的过程中, 激光器输出脉冲去啁啾后脉宽由宽变窄再变宽. 当 SMF1 长 21 cm (SMF2 长 8 cm) 时, 激光器输出脉冲经压缩后最窄, 这意味着腔内 SMF-28 光纤长度按此分布有利于腔内非线性效应拓宽光谱, 同时可保证脉冲的可压缩性, 这为光纤激光器确定输出位置提供了重要的参考.

基于以上设计, 实验最终采用的 ZDF2、SMF1、SMF2 长度分别为 107.5, 21, 8 cm. 激光器采用前向抽运的方式, 当抽运功率为 700 mW 时, 通过调节波片, 获得稳定无多脉冲现象和可自启动的锁模脉冲序列, 激光器输出脉冲的平均功率为 74 mW. 当激光器抽运功率在 900 mW 时, 激光器仍然在稳定的单脉冲输出状态下工作, 此时激光器的输出功率为 94.5 mW, 转换效率为 10.5%. 由于受到激光器抽运功率及 hybrid 承受功率的限制无法继续提升抽运功率, 但从抽运功率 700 mW 提升到 900 mW 时线性的光-光转换效率可知, 若使用更高功率的抽运激光器和承受功率更高的 hybrid, 激光器输出脉冲的平均功率有望得到进一步的提升. 使用光谱分析仪 (OSA) 测量所得激光器的输出光谱如图 4(a) 所示, 由于腔内非线性效应使得输出光谱存在调制. 光谱 3 dB 带宽为 112 nm, 假设脉冲呈高斯型分布, 则对应的极限脉冲宽度为 31.5 fs.

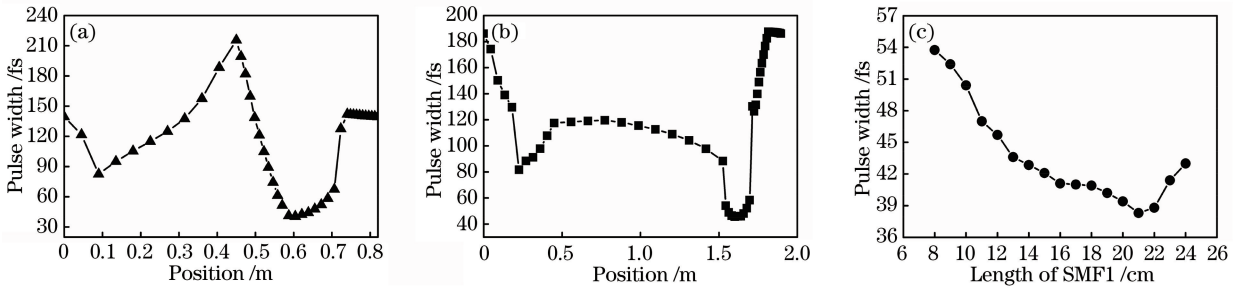


图3 脉冲宽度的模拟结果。(a)长度为 0 cm 的 ZDF2;(b)长度为 107.5 cm 的 ZDF2;
(c)不同 SMF1 长度下的激光器输出脉冲宽度

Fig. 3 Simulated results of pulse width. (a) ZDF2 with length of 0 cm; (b) ZDF2 with length of 107.5 cm;
(c) output pulse width of laser for SMF1 with different lengths

图 4(b)是用频率分辨光逻辑门(FROG)测量得到的激光器的直接输出脉冲时域信息(实线)及相位信息(虚线),脉宽为 68 fs。将激光器输出脉冲耦合进模场直径为 $6\ \mu\text{m}$ 、 $1550\ \text{nm}$ 下色散系数为 $46\ \text{fs}^2/\text{mm}$ 的色散补偿光纤 DCF-38 进行色散补偿,平均功率耦合效率为 85%,经过约 5 cm 的 DCF-38 光纤后输出脉冲压缩至最窄,可见激光器输出脉冲所含啁啾较小。脉冲色散补偿后的光谱如图 4(c)所示,在光纤压缩过程中,光纤内部存在一定的非线性

性效应,使得压缩后的光谱较激光器直接输出光谱变宽且调制深度变大。压缩后的脉冲时域及相位如图 4(d)所示,脉冲宽度为 39 fs。图 5(a)和(b)分别为由高速光电探测器(EOT-3000A)后接示波器(OSA)与频谱分析仪(RF-SA)测得的激光器的输出脉冲序列与频谱,可见脉冲重复频率为 100 MHz,频谱信噪比为 45 dB(分辨率带宽 RBW 为 300 kHz),没有其他亚结构,表明激光器输出了稳定的单脉冲序列。

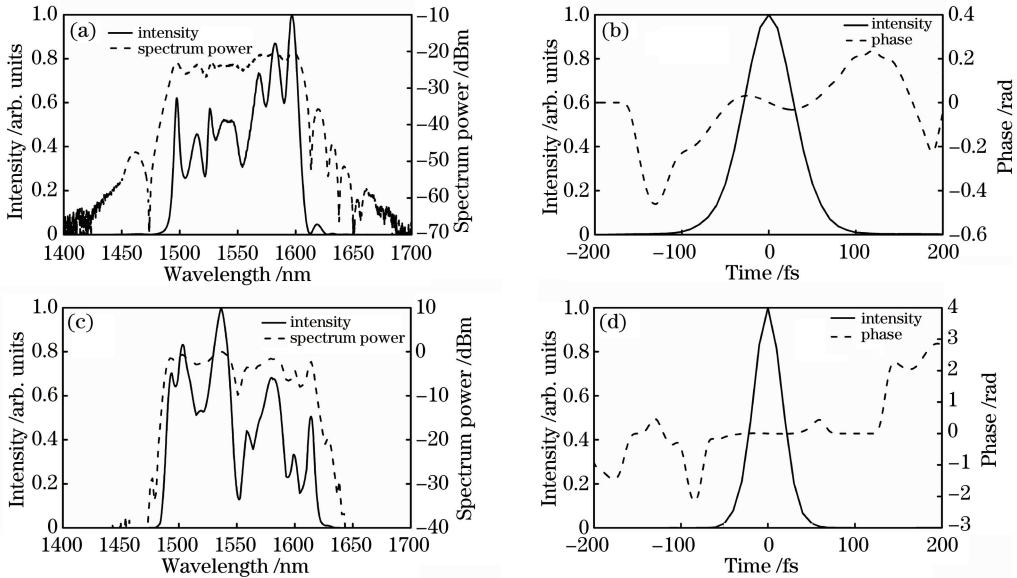


图4 激光器输出特性。线性(实线)及对数(虚线)坐标下(a)直接输出光谱与(c)压缩后输出光谱;
(b)直接输出与(d)压缩后输出的脉冲时域(实线)与相位(虚线)分布

Fig. 4 Output characteristics of the laser. (a) Direct output spectra and (c) output spectra after compression in linear (solid line) and logarithmic (dashed line) coordinates; distributions of pulse time domain (solid line) and phase (dashed line) for (b) direct output and (d) output after compression

4 结 论

本文报道了一种呼吸孤子掺铒光纤激光器在非高重复频率下获得超窄脉宽脉冲输出的结构设计方

案。通过控制腔内正负色散量,保证较大的脉冲呼吸比,并通过引入零色散光纤来降低光纤激光器的重复频率。采用光纤混合器以及前向抽运的方式来减小腔内器件对脉冲能量的损耗,增强腔内非线性

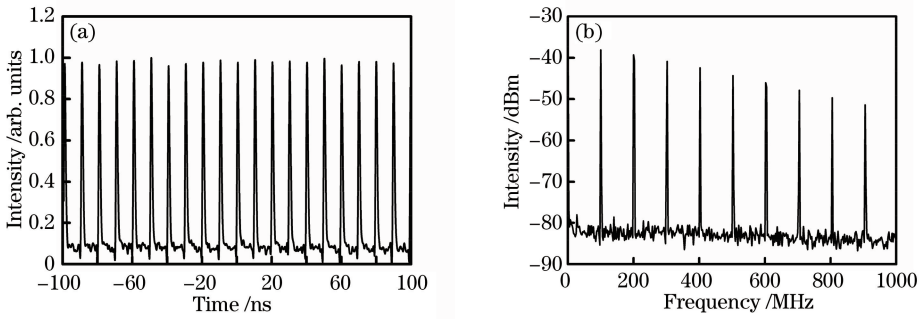


图 5 锁模光纤激光器输出。(a)脉冲序列;(b)频谱

Fig. 5 Output of mode-locking fiber laser. (a) Pulse trains; (b) frequency spectrum

展宽光谱的效应。合理设计腔内负色散分布,构建了重复频率为100 MHz的掺铒光纤激光器,其输出脉冲宽度为68 fs,经光纤压缩后为39 fs。受到零色散光纤非线性系数较大的影响,更长的零色散光纤长度将导致出现多脉冲现象。降低零色散光纤的非线性系数,有望使激光器在更低的重复频率下获得更窄脉宽的脉冲输出。

参 考 文 献

[1] Tünnemann A, Nolte S, Limpert J. Femtosecond vs. picosecond laser material processing: challenges in ultrafast precision laser micromachining of metals at high repetition rates [J]. *Laser Technik Journal*, 2010, 7(1): 34-38.

[2] Rauschenberger J, Fortier T, Jones D, *et al.* Control of the frequency comb from a mode-locked erbium-doped fiber laser: errata [J]. *Optics Express*, 2003, 11(11): 1345-1345.

[3] Wu H Y, Shi L, Ma T, *et al.* Design and development technique for optical frequency comb based on femtosecond fiber lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(6): 0601008.
吴浩煜, 时雷, 马挺, 等. 基于飞秒光纤激光器的光频率梳设计与研制技术 [J]. *中国激光*, 2017, 44(6): 0601008.

[4] Lu F K, Zheng W, Lin J, *et al.* Integrated coherent anti-Stokes Raman scattering and multiphoton microscopy for biomolecular imaging using spectral filtering of a femtosecond laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(13): 133701.

[5] Ilday F Ö, Wise F W, Sosnowski T. High-energy femtosecond stretched-pulse fiber laser with a nonlinear optical loop mirror [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(17): 1531-1533.

[6] Duling I N. All-fiber ring soliton laser mode locked with a nonlinear mirror [J]. *Optics Letters*, 1991, 16(8): 539-541.

[7] Matsas V J, Newson T P, Richardson D J, *et al.*

Selfstarting passively mode-locked fibre ring soliton laser exploiting nonlinear polarisation rotation [J]. *Electronics Letters*, 1992, 28(15): 1391-1393.

[8] Xia H D. Research on novel mode-locked fiber lasers and their dynamics [D]. Chengdu: University of Electric Science and Technology of China, 2015: 7-10.
夏汉定. 新型锁模光纤激光器及其动力学特性研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015: 7-10.

[9] Tamura K, Nelson L E, Haus H A, *et al.* Soliton versus nonsoliton operation of fiber ring lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 1994, 64(2): 149-151.

[10] Zhang Z G. Advances in high repetition rate femtosecond fiber lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900130.
张志刚. 高重复频率飞秒光纤激光技术进展 [J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900130.

[11] Tang D Y, Zhao L M. Generation of 47-fs pulses directly from an erbium-doped fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(1): 41-43.

[12] Ma D, Cai Y, Zhou C, *et al.* 37.4 fs pulse generation in an Er: fiber laser at a 225 MHz repetition rate [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(17): 2858-2860.

[13] Li X, Zou W W, Yang G, *et al.* Direct generation of 148 nm and 44.6 fs pulses in an erbium-doped fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(1): 93-96.

[14] Li X, Chen J P, Zou W W. 34.3 fs pulse generation in an Er-doped fibre laser at 201 MHz repetition rate [J]. *Electronics Letters*, 2015, 51(4): 351-352.

[15] Chen Z, Hänsch T, Picqué N. Mid-infrared dual-comb spectroscopy at high signal-to-noise ratio around 3 μm [C] // *Mid-infrared Coherent Sources*, March 26-28, 2018, Strasbourg, France. Washington, D.C.: OSA, 2018: MW4C.6.

[16] Lu Q, Shi L, Mao Q H. Research advances in dual-comb spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(4): 0400001.

- 路桥, 时雷, 毛庆和. 双光梳光谱技术研究进展[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0400001.
- [17] Chen W, Liu B W, Song Y J, *et al.* High pulse energy fiber/solid-slab hybrid picosecond pulse system for material processing on polycrystalline diamonds [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2018, 6(2): 43-49.
- [18] Takayanagi J, Nishizawa N, Sugiura T, *et al.* Generation of pedestal-free 22-fs ultrashort pulse using highly nonlinear fiber and reverse-dispersion fiber [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2006, 42(3): 287-291.
- [19] Krauss G, Lohss S, Hanke T, *et al.* Synthesis of a single cycle of light with compact erbium-doped fibre technology[J]. Nature Photonics, 2010, 4(1): 33-36.
- [20] Zhang C, Chai L, Song Y J, *et al.* Ultra-broadband optical spectrum generation from a stretched pulse fiber laser utilizing zero-dispersion fiber[J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(5): 051403.