



·激光器件·

## 高功率 2 μm 波长可调谐超短脉冲光纤激光器\*

宋伟华<sup>1,2</sup>, 彭志刚<sup>1,2</sup>, 侯玉斌<sup>1,2</sup>, 么鹏<sup>1,2</sup>, 张奕<sup>1,2</sup>, 王璞<sup>1,2</sup>

(1. 北京工业大学 材料与制造学部激光工程研究院, 北京 100124; 2. 北京工业大学 北京激光应用技术研究中心, 北京 100124)

**摘 要:** 高功率 2 μm 波长可调谐的超短脉冲激光具有峰值功率高、脉冲宽度窄、波长可调谐等优势, 在医疗手术、大气通信、光电对抗等领域具有广泛的应用。利用高功率的掺铒光纤放大器泵浦高非线性光纤, 在全光纤化结构中获得 1895~2165 nm 可调谐的拉曼孤子输出。采用啁啾脉冲放大技术对拉曼孤子的脉冲能量进行提升, 放大后拉曼孤子的单脉冲能量为 1.56 μJ, 平均功率达到 50.6 W, 脉冲宽度为 83 ps。经过光栅对压缩后, 脉冲宽度降低至 1.23 ps, 平均功率为 22 W, 峰值功率达到 0.55 MW。放大后的脉冲仍具有波长调谐的能力, 当输出功率为 5 W 和 50.6 W 时, 脉冲的波长调谐范围分别为 38 nm 和 8 nm。

**关键词:** 拉曼孤子; 波长可调谐; 超短脉冲; 高功率光纤激光器; 全光纤化

中图分类号: TN248

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210325

## High-power wavelength-tunable ultrashort pulse fiber laser at 2 μm

Song Weihua<sup>1,2</sup>, Peng Zhigang<sup>1,2</sup>, Hou Yubin<sup>1,2</sup>, Yao Peng<sup>1,2</sup>, Zhang Yi<sup>1,2</sup>, Wang Pu<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Laser Engineering, Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Beijing Engineering Research Center of Laser Applied Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Two-μm ultrashort pulse laser with high power and tunable wavelength has been widely applied in medical surgery, atmospheric communication, photoelectric countermeasures and other fields, owing to the advantages of high peak power, narrow pulse width, tunable-wavelength, etc. We achieved a tunable Raman soliton output at 1895~2165 nm in an all-optical fiber thinning structure using a high nonlinear fiber pumped by an erbium-doped fiber amplifier with high peak power. The pulse energy of the Raman soliton was enhanced by the chirped pulse amplification technique. After amplification, a single pulse energy of 1.56 μJ, an average power of 50.6 W and a pulse width of 83 ps were achieved. After grating pair compression, a pulse width of 1.23 ps, an average power of 22 W and a peak power of 0.55 MW could be realized. The amplified pulse still has the ability of wavelength tuning. The wavelength tuning ranges of the pulse are 38 nm at average power of 5 W and 8 nm at average power of 50.6 W, respectively.

**Key words:** Raman soliton, wavelength tunable, ultrashort pulse, high power fiber laser, all-fiber

2 μm 波段处于大气传输的窗口波段, 覆盖了许多大气分子的吸收峰, 在医疗手术、空间通信、光电对抗和非金属材料加工等领域具有特殊优势<sup>[1-4]</sup>。该波段的波长可调谐超短脉冲激光具有峰值功率高、脉冲宽度窄、波长覆盖范围广等优点, 在强场物理、阿秒脉冲产生等领域备受青睐<sup>[5-7]</sup>。目前, 超短脉冲光纤激光器实现波长调谐的方式主要有两种<sup>[8-9]</sup>, 一种是在激光器腔内引入无源滤波器直接进行波长调谐, 另一种是利用脉冲在光纤内产生的非线性频率变换实现间接的波长调谐。前者依据滤波器的结构不同, 能够产生不同波长调谐范围和调谐精度的脉冲输出。2018 年, Zhang 利用双折射滤波器在掺铒光纤振荡器内实现了波长调谐精度为 0.1 nm 的皮秒脉冲输出<sup>[10]</sup>, 次年, Dai 在掺铒光纤振荡器内引入空间的衍射光栅进行波长调谐, 获得了调谐范围宽达 300 nm 的超短脉冲<sup>[11]</sup>。受光谱滤波效应所限, 在腔内引入滤波器实现脉冲波长调谐的方式存在输出脉冲光谱带宽窄的弊端, 不利于脉冲后续的放大和压缩。

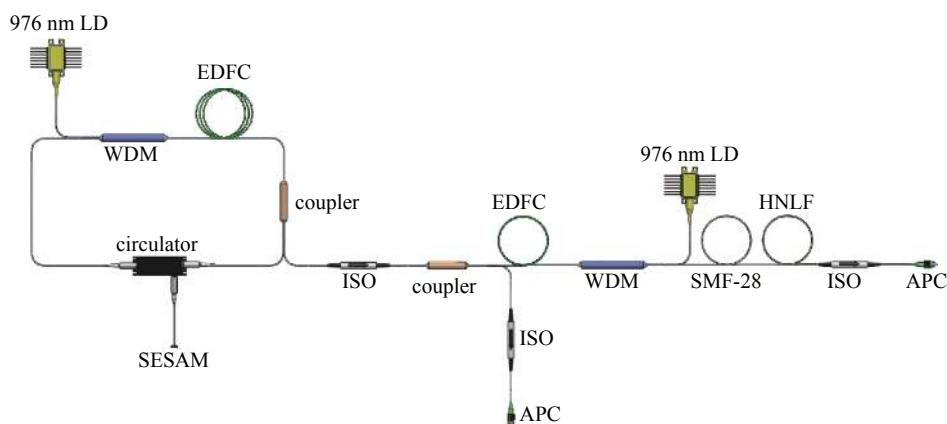
\* 收稿日期: 2021-07-27; 修订日期: 2021-09-26  
基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (62035002)  
联系方式: 宋伟华, swh18434361167@163.com。  
通信作者: 王璞, wangpuemail@163.com;  
彭志刚, pzg@bjut.edu.cn。

利用脉冲在光纤内产生的非线性频率变换效应能够有效地改善脉冲光谱的带宽, 轻松获得百纳米以上的波长调谐量<sup>[12-14]</sup>。孤子自频移(SSFS)作为非线性频率变换中的典型技术具有波长调谐范围广泛、结构简单、拉曼光谱带宽大等优势, 利用不同基质的拉曼位移光纤能够产生近红外至中红外可调谐的拉曼孤子<sup>[15-20]</sup>。目前, Tang 利用掺铒光纤放大器泵浦氟化钡光纤获得了 2~4.3  $\mu\text{m}$  可调谐的拉曼孤子脉冲, 实现了当前所能达到的最长波长的拉曼孤子<sup>[21]</sup>。然而, 孤子自频移效应受泵浦功率和转化效率所限, 产生的孤子普遍存在单脉冲能量低的缺点。为了提高拉曼孤子的能量, 2016 年, D. Klimentov 等人利用掺铒光纤作为拉曼位移光纤, 通过调控泵浦功率获得了 1.98~2.22  $\mu\text{m}$  可调谐的拉曼孤子, 并在 2.15  $\mu\text{m}$  处获得了最大单脉冲能量为 36 nJ 的孤子<sup>[22]</sup>。通过更换有源光纤作为拉曼位移光纤能够大幅度提高拉曼孤子的能量, 但受孤子自频移效应所限拉曼孤子的脉冲能量普遍低于百纳焦。虽然利用脉冲放大技术能将拉曼孤子的能量提升至微焦量级但放大后的脉冲多不具备波长调谐能力<sup>[23]</sup>。

本文报道了一种高功率 2  $\mu\text{m}$  波长可调谐的超短脉冲光纤激光器。利用全光纤化的拉曼孤子光源作为种子源, 该光源能够在 1895~2165 nm 之间调谐。采用啁啾脉冲放大系统对拉曼孤子的能量进行提升, 经过四级放大后拉曼孤子的平均功率达到 50.6 W, 相应的单脉冲能量为 1.56  $\mu\text{J}$ , 放大后的脉冲仍具有 8 nm 的波长调谐能力。

## 1 实验装置

高功率 2  $\mu\text{m}$  波长可调谐超短脉冲光纤激光器由拉曼孤子光源和啁啾脉冲放大系统两部分组成。拉曼孤子光源采用全光纤化结构搭建, 其实验装置如图 1 所示。主要由色散管理掺铒光纤振荡器、掺铒光纤放大器和无源高非线性光纤组成。掺铒光纤振荡器采用最大输出功率为 360 mW 的 976 nm 单模半导体激光器作为泵浦源, 通过 980/1550 nm 的波分复用器(WDM)将泵浦光和信号光耦合进单包层掺铒增益光纤内(EDFC, 6.5 dB/m@976 nm)。由掺铒光纤输出的信号光经分束器(Coupler)30%的分束端输出至腔外, 在输出端引入隔离器(ISO)防止反向回光影响腔内锁模。分束器 70%分束端连接环形器(Circulator)的一端口, 环形器的二端口与 SESAM 相连为谐振腔引入可饱和吸收体, 环形器三端口与 WDM 信号端尾纤相连形成闭合环路。实验所用的 SESAM 来自德国 BATOP 公司, 其工作中心波长为 1550 nm, 调制深度为 19%, 恢复时间为 2 ps。



WDM: wavelength division multiplexer; EDFC: erbium-doped fiber; SESAM: semiconductor saturable absorption mirror; ISO: isolator  
APC: angled physical contact; SMF-28: single-mode fiber; HNLF: highly nonlinear optical fiber

Fig. 1 Experimental setup of Raman soliton laser

图 1 拉曼孤子光源实验装置图

掺铒光纤振荡器所用光纤的详细参数见表 1, 激光器的总腔长为 6.4 m, 增益光纤的长度为 2.5 m, 光纤器件尾纤的长度为 3.8 m。两款光纤在 1550 nm 处的色散值相反, 经计算整个振荡器的净色散值为  $-0.028 \text{ ps}^2$ 。

由振荡器输出的脉冲经分束器 5% 的分束端提取信号进行外部监测, 剩余 95% 的信号输入进 5 m 长的单包层掺铒增益光纤中进行反向泵浦放大, 掺铒光纤的型号与振荡器中光纤的型号相同。放大后的脉冲经过一段 1.45 m

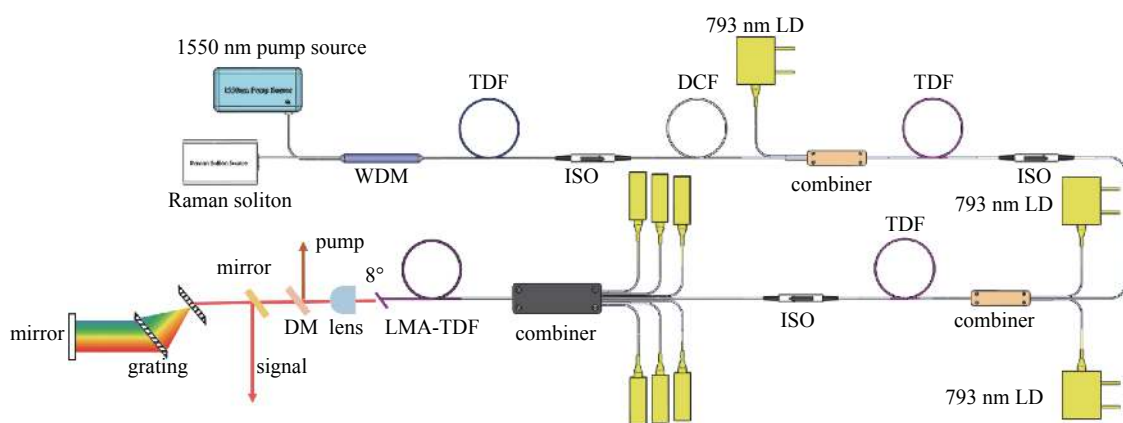
表 1 色散管理掺铒光纤振荡器中的光纤参数

Table 1 Fiber parameters of the dispersion managed erbium-doped fiber laser

fiber type	dispersion/(ps <sup>2</sup> /km, @1550 nm)	fiber length/m	net dispersion/ps <sup>2</sup>
EDFC	23.495	2.5	-0.028
SMF-28	-22.86	3.8	

的 SMF-28 光纤进行非线性压缩, 压缩后的高峰值功率脉冲用于泵浦 8 m 长的高非线性光纤 (HNLf), 以产生波长可调谐的拉曼孤子。其中, 高非线性光纤的模场直径为 2.23 μm, 在 1550 nm 处的群速度色散为 2.187 ps·nm<sup>-1</sup>·km<sup>-1</sup>, 非线性系数约为 9 W<sup>-1</sup>·km<sup>-1</sup>。

啁啾脉冲放大系统的实验装置如图 2 所示, 主要由一级纤芯放大器, 一段脉冲展宽光纤和三级包层放大器组成。纤芯放大器采用正向泵浦方式, 所用的泵浦源为自制的 1550 nm 单频光纤放大器, 最高输出功率为 600 mW。泵浦光经过 WDM 耦合进一段 2 m 长的单模掺铥光纤 (TDF, TH512) 中, 用于提高拉曼孤子的能量。放大后的脉冲经隔离器输入进约 60 m 长的正色散光纤 (DCF, UHNA-4) 中进行脉冲展宽, 以降低后续放大过程中的非线性效应。展宽脉冲输入进包层放大器中继续进行脉冲能量的提升, 第一级包层放大器采用一个中心波长 793 nm, 最大输出功率 12 W 的半导体泵浦源进行泵浦, 通过 (2+1)\*1 的泵浦合束器将信号光和泵浦光耦合进 2.6 m 长的双包层掺铥光纤中 (TDF, PM-TDF-10P/130-HE) 进行放大, 放大后的信号经过泵浦剥离光纤和隔离器进入第二级包层放大器中。第二级包层放大器所用的泵浦源为 1 个 30 W 的 793 nm 多模半导体激光器, 增益光纤的型号与前级相同, 长度为 3 m, 放大后的信号同样经过泵浦剥离光纤和隔离器进入下一级包层放大器中。



WDM: wavelength division multiplexer; TDF: thulium-doped fiber; DCF: dispersion compensating fiber; ISO: isolator; DM: dichroic mirror

Fig. 2 Experimental device diagram of thulium-doped fiber amplifier

图 2 掺铥光纤放大器实验装置图

为了进一步提高脉冲的能量, 第三级包层放大器采用大模场双包层掺铥光纤作为增益介质 (LMA-TDF, LMA-TDF-25P/250-HE 9.5 dB/m@793 nm), 长度为 2.4 m。泵浦增益光纤的光源为 6 个中心波长为 793 nm, 平均功率为 50 W 的半导体激光器, 由 (6+1)\*1 的合束器将信号光和泵浦光耦合到一起, 由于合束器的耦合效率约为 90%, 因此泵浦光所能提供的实际泵浦功率约为 270 W。当第三级包层放大器采用 270 W 的泵浦光进行泵浦时预计会产生百瓦的热量, 较强的热效应会影响放大器的放大效率, 降低输出脉冲的光束质量, 因此需要对增益光纤进行热管理。为快速降温选择将光纤放在水管内, 通过低温快速的水循环带走光纤表面的热量, 实验设定水循环的温度为 13 ℃。

由大模场光纤输出的脉冲进入到压缩装置中, 该装置由准直透镜、二向色镜、D 形镜、衍射光栅和金镜组成。脉冲经过焦距为 20 mm 的氟化钙平凸透镜 (1.65-3 μm 增透, LA5315-D) 获得准直输出, 准直后的激光经过长波导通的二向色镜 (DM, DMLP-1180R) 实现对泵浦光的剥离, 随后输入 Treacy 型光栅中实现脉冲压缩, 压缩后的光由 D 形镜导出后接入功率衰减装置进行光信号探测。

## 2 实验结果及讨论

精细调节色散管理掺铥光纤振荡器中 SESAM 的空间位置, 并缓慢提高泵浦功率。当泵浦功率提升至约 45 mW 时, 掺铥光纤振荡器得到了稳定的自启动锁模脉冲输出, 测得此时脉冲输出的平均功率为 2 mW。对激光器的光谱、时域脉冲序列、频谱曲线、自相关曲线和功率稳定性曲线进行测量, 结果如图 3 所示。测试所用的光谱仪为横河光谱仪 (Yokogawa AQ6370C), 测量精度为 0.02 nm。示波器为 KEYSIGHT 的 1 GHz 示波器 (InfiniiVision DSO-X3102T), 光电探头为索雷博公司 5 GHz 带宽的 InGaAs 光电探测器 (DET08CL), 频谱仪为安捷伦公司高带宽的频谱仪 (N9030A), 自相关仪为 1.5 μm 波段的商用自相关仪 (FEMTOCHROME RESSEARCH, INC FR-103XL), 功率计为索雷博公司的光敏功率计 S148C。

图 3(a) 为脉冲的光谱曲线, 光谱的中心波长为 1555.5 nm, 3 dB 带宽为 15.1 nm, 光谱无明显的 Kelly 边带产

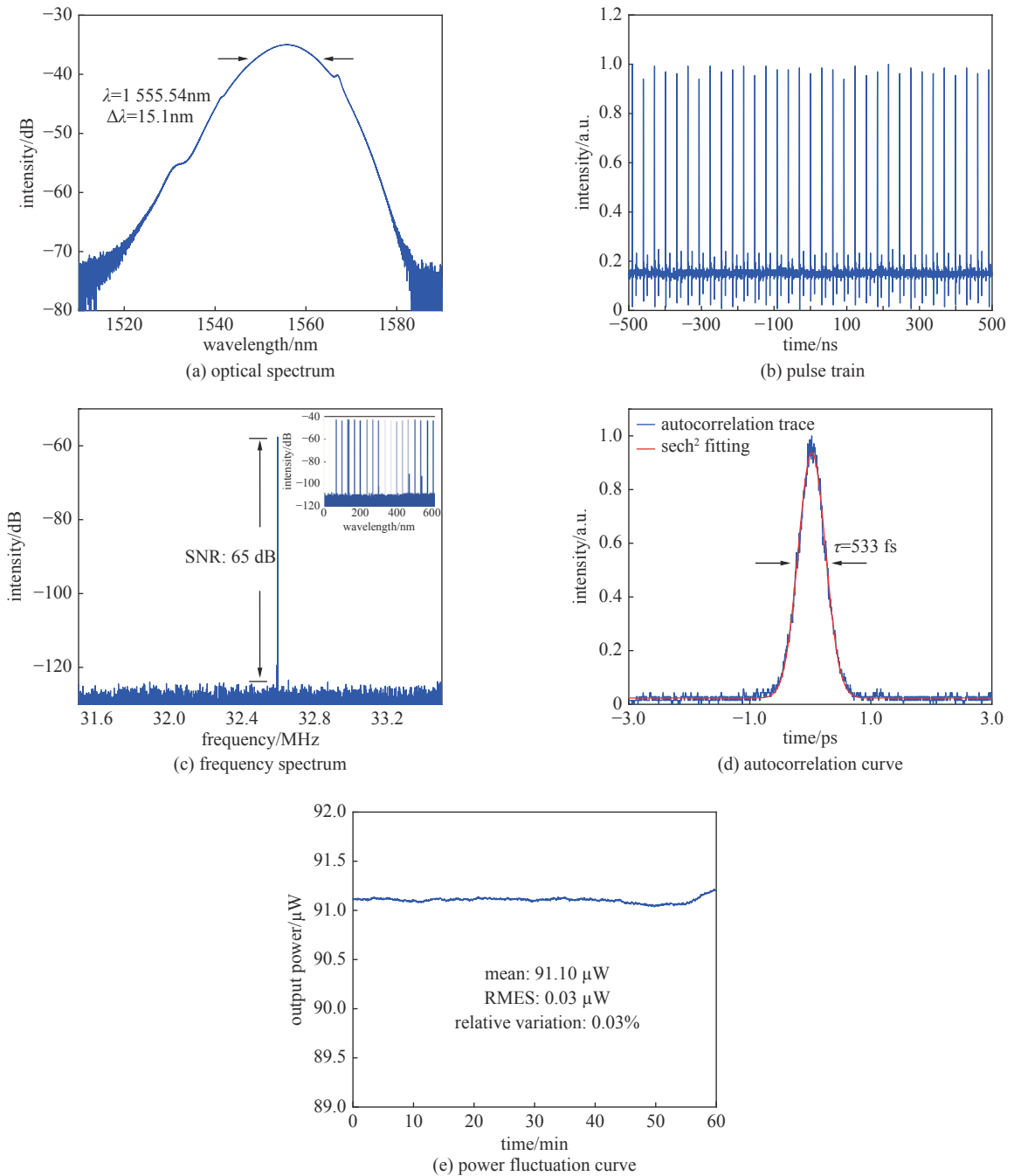


Fig. 3 Pulse output characteristics of erbium-doped fiber oscillator

图 3 掺铒光纤振荡器的脉冲输出特性

生。这是由于激光器腔内加入了正色散掺铒增益光纤改善了腔内的净色散,使得脉冲能够在腔内“呼吸”运行,降低了非线性相移的积累,抑制了光谱 Kelly 边带的产生<sup>[24]</sup>。图 3(b)为时域脉冲序列,脉冲的重复频率为 32.5 MHz 与实际腔长相对应,表明激光器工作在基频锁模状态下。在 1 kHz 分辨率,600 MHz 测量范围内测得脉冲的频谱特性,如图 3(c)所示。其基频信噪比约为 65 dB,长程序列无调制现象,表明锁模脉冲工作状态稳定。图 3(d)为脉冲的自相关曲线,假设脉冲形状为双曲正割型测得输出脉冲的宽度为 533 fs,经计算其时间带宽积约为 1,比双曲正割脉冲的时间带宽积大,表明脉冲内仍还有部分啁啾。图 3(e)为振荡器监测端在 30 min 内平均功率的波动情况。从图上可以看出脉冲平均功率的均值为 91.10  $\mu\text{W}$ ,均方根值为 0.03  $\mu\text{W}$ ,功率波动程度为 0.03%,较低的功率波动情况表明脉冲处于一个稳定的状态。

由振荡器输出的脉冲进入到掺铒光纤放大器中进行放大,当泵浦功率为 330 mW 时,脉冲平均功率达到 22.8 mW。放大后的脉冲进入到 1.45 m 长的 WDM 尾纤中发生非线性压缩效应,测得不同输出功率下脉冲宽度的曲线,如



图 4(a)所示。从图中可以看出脉冲宽度随着泵浦功率的提升不断降低,因为脉冲较高的峰值功率会激发光纤中的自相位调制效应产生正的频率啁啾。当光纤提供的负啁啾量大于脉冲携带的正啁啾量时,脉冲宽度随着泵浦功率的提高不断降低,实验中测得最窄的脉冲宽度为 87.5 fs,相应的脉冲峰值功率为 8.02 kW,自相关曲线如图 4(b)所示。当进一步提高脉冲的峰值功率,使脉冲携带的正啁啾量与光纤提供的负啁啾量相等时能够得到理论最窄的脉冲宽度。但是,从测量得到的自相关曲线可以看出压缩后的脉冲具有基座,这种由高阶色散和高阶非线性带来的基座不利于后续拉曼孤子的产生<sup>[25]</sup>,因此未对脉冲进行进一步的压缩。

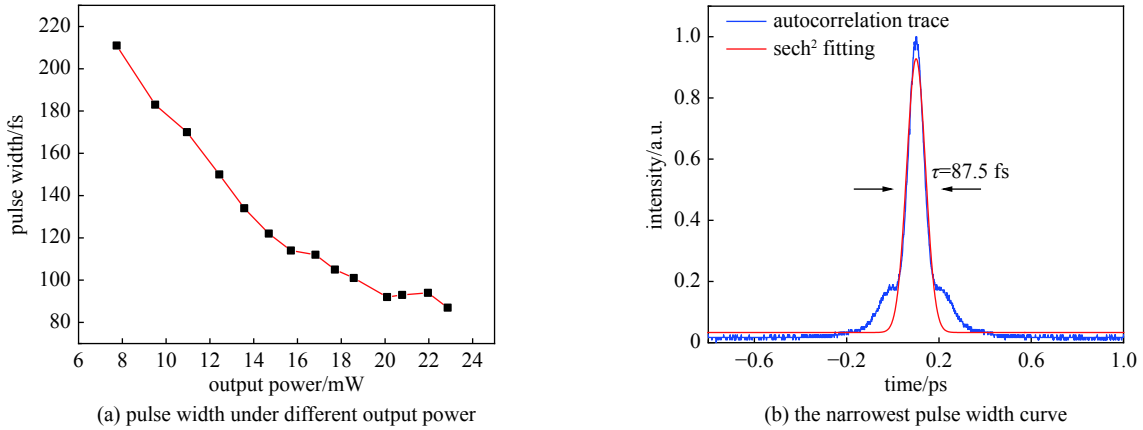


Fig. 4 Pulse output characteristics of erbium-doped fiber amplifier

图 4 掺铒光纤放大器的脉冲输出特性

将高功率的飞秒脉冲泵浦进 8 m 长的 HNLF 中,得到了不同泵浦功率下的拉曼孤子光谱,如图 5(a)所示。光谱图中从短波至长波共三部分光谱,短波的光谱包络为泵浦光,中间的光谱包络为二阶拉曼光,长波的光谱包络为一阶拉曼光。当脉冲平均功率达到 5.6 mW 时,光谱产生了二阶拉曼。其中一阶拉曼峰的中心波长为 1895 nm,该拉曼峰的位置覆盖了 OH<sup>-1</sup> 离子的吸收峰致使部分光谱成分有所缺失。随着泵浦功率的不断提升,一级拉曼峰的中心波长可以从 1895 nm 红移至 2165 nm,如图 5(b)所示。可以看出一阶拉曼孤子的红移速度随着泵浦功率的提升而不断降低,因为在拉曼孤子红移的过程中孤子感应的色散值提高,非线性效应降低,脉冲峰值功率降低,使得拉曼感应频移量减小降低了拉曼的转化速度,限制了拉曼的红移波长。

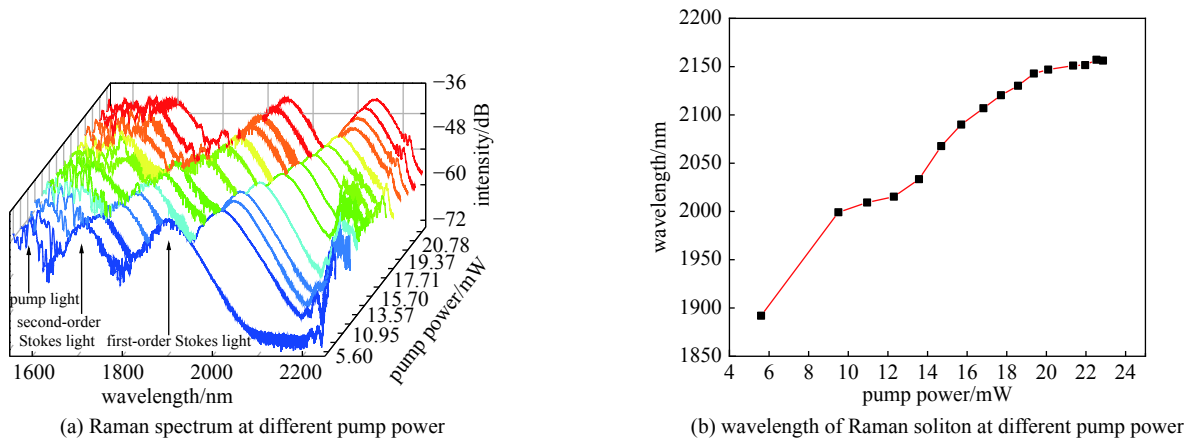


Fig. 5 Output characteristics of Raman soliton at different pump power

图 5 不同泵浦功率下拉曼孤子的输出特性

通过调节泵浦 HNLF 的功率,使拉曼孤子一阶拉曼峰的波长固定在 1999.8 nm 处。由于拉曼光谱含有多阶拉曼并且 2 μm 处孤子的功率较低(约在 μW 量级),需要利用一级纤芯放大器对脉冲的功率进行提升。当泵浦功率达到 400 mW 时,脉冲的平均功率提高到 3 mW。放大后的脉冲输入进 60 m 长的正色散光纤中进行展宽,得到 185 ps 的展宽脉冲,如图 6(b)所示。脉冲光谱的中心波长为 1990 nm,3 dB 光谱带宽为 53.4 nm,从光谱的线性图(图 6(a))可以看出,前级放大器使拉曼孤子产生了较强的滤波效果,其他的频率成分在放大的过程中消失。

将输出功率为 3 mW 的脉冲进行一级包层放大,当泵浦功率达到 7.8 W 时,脉冲的平均功率提高至 366 mW,脉

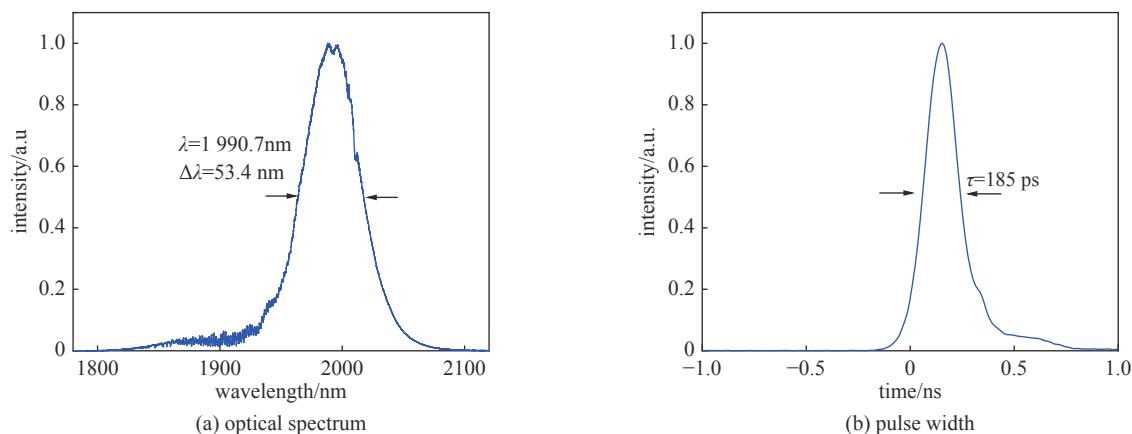


Fig. 6 Optical spectrum and pulse width of broadened pulse

图6 展宽脉冲的光谱和脉宽

冲宽度降低至 145 ps, 脉冲光谱的中心波长在放大的过程中蓝移至 1980 nm, 光谱 3 dB 带宽减小至 42.5 nm。较宽的脉冲宽度和较低的峰值功率使脉冲在放大过程中未产生明显的非线性效应。利用二级包层放大器进一步放大, 当泵浦功率达到 14.5 W 时脉冲的平均功率提高至 5 W, 相应的单脉冲能量为 154 nJ。从图 7 可以看出, 随着泵浦功率的提升, 放大后脉冲的光谱进一步蓝移至 1976.8 nm, 3 dB 带宽窄化至 29.3 nm。光谱中心频率处产生了毛刺结构, 相应脉冲宽度降低至 100 ps, 放大器的斜效率为 33%。

为验证百 nJ 下脉冲的波长可调谐特性, 将纤芯放大器的泵浦功率固定在 400 mW, 一级包层放大器的泵浦功率固定在 7.8 W, 二级包层放大器的泵浦率固定在 14.5 W, 调节拉曼光源的波长。测得放大后脉冲光谱的中心波长能够在 1960~1998 nm (~38 nm) 之间调谐, 如图 8 所示。与拉曼光源的波长调谐范围相比, 脉冲在放大过程中受一级纤芯放大器的放大滤波效应和掺铒双包层光纤放大器增益窄化效应的影响, 波长调谐能力降低。

维持前级放大器的泵浦功率不变, 将第三级包层放大器的泵浦功率提高至 110 W。此时, 主放大器输出了平

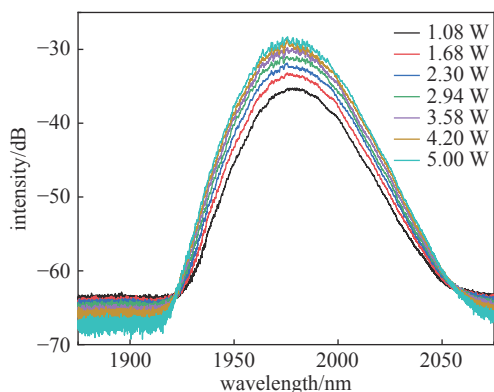


Fig. 7 Output optical spectrum of the second stage cladding amplifier at different output power

图7 不同输出功率下二级包层放大器的输出光谱

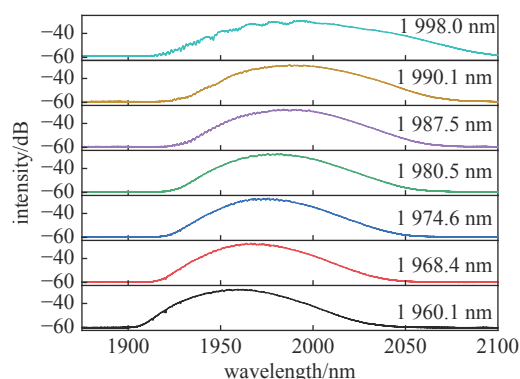


Fig. 8 Optical spectrum of the second stage cladding amplifier at different Raman wavelengths

图8 不同拉曼波长下二级包层放大器的输出光谱

均功率为 50.6 W, 单脉冲能量 1.56  $\mu$ J 的皮秒脉冲。实验中利用多模光纤耦合脉冲信号进行光谱测量, 测得脉冲光谱的中心波长为 1989.6 nm, 3 dB 带宽为 43.9 nm, 如图 9(a) 所示。与预放大脉冲信号相比, 放大后脉冲的光谱中心波长红移, 可能是预放大脉冲的光谱与增益光纤的增益峰未完全匹配导致的。放大后的脉冲宽度降低到 83 ps (图 9(b)), 主放大器的斜效率为 40.7% (图 9(c)), 没有出现明显的功率饱和趋势, 但是放大后脉冲的光谱信噪比约为 12.5 dB 并且随着泵浦功率的提高而不断降低, 因此没有进一步提高泵浦功率来获取更高的脉冲能量。维持当前的放大参数调节前级拉曼光源的中心波长, 主放大器输出脉冲光谱的中心波长相应变化 8 nm, 如图 9(d) 所示。

将放大后的光进行光栅压缩, 调节输入光以利特罗角度入射, 不断提高泵浦功率并调节光栅对之间的距离。当泵浦功率达到 110 W 时, 压缩脉冲的输出功率为 22 W, 脉冲宽度为 1.23 ps, 峰值功率为 0.55 MW。压缩后的脉冲光谱如图 10(a) 所示, 中心波长为 2007.6 nm, 3 dB 带宽为 6.7 nm, 光谱的信噪比有所提升达到 20 dB 以上。在压缩过程中通过拉长光栅之间的距离来提高色散补偿量, 但是较长的光栅距离使得衍射光斑加长, 超出了光栅所能补

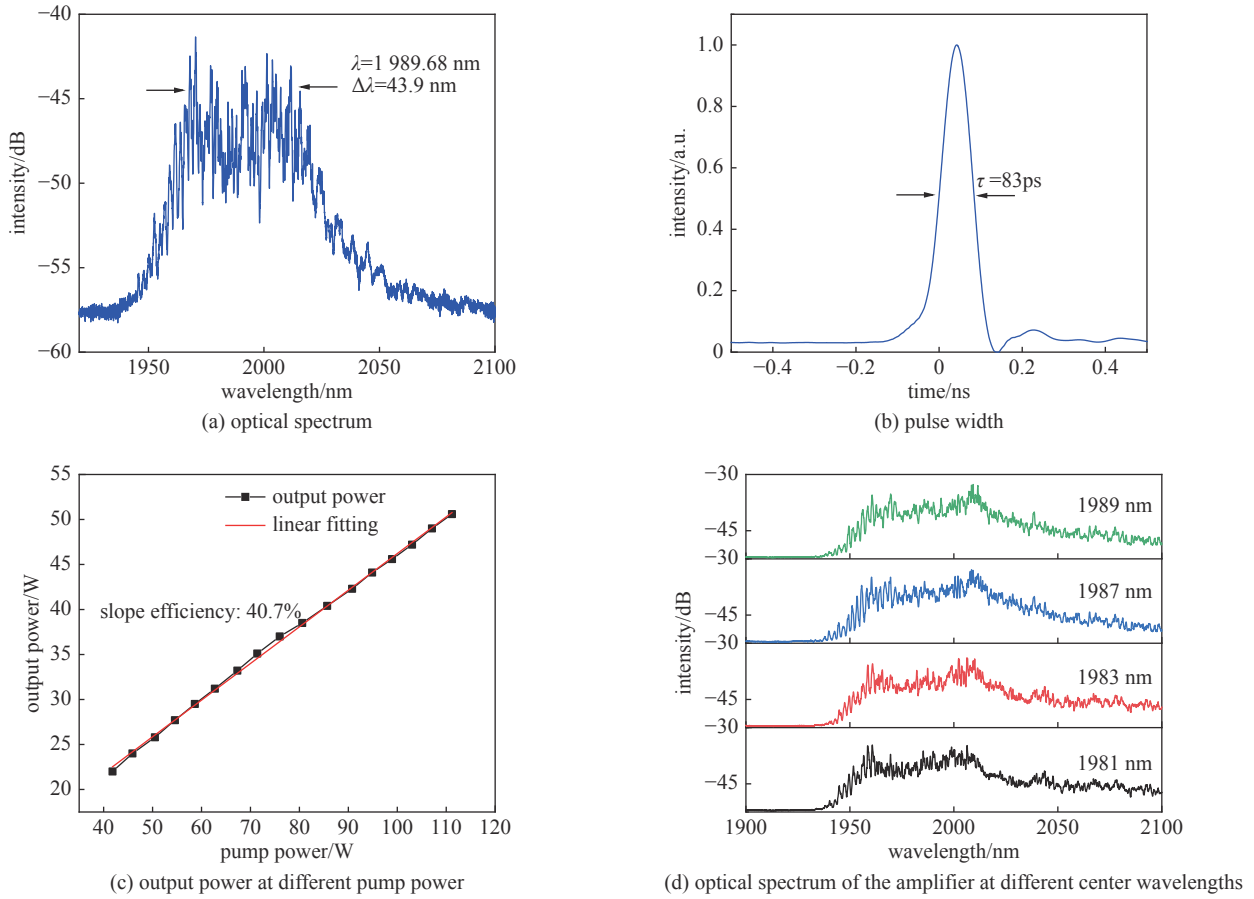


Fig. 9 Output pulse characteristics of the third stage cladding amplifier

图 9 三级包层放大器输出脉冲的特性

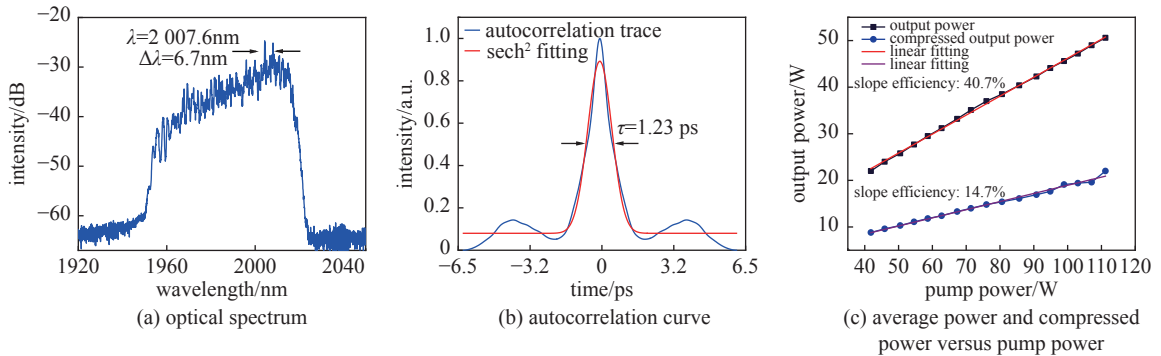


Fig. 10 Output characteristics of compressed pulse

图 10 压缩脉冲的输出特性

偿的极限使光谱两侧有少量成分被滤除,导致压缩后光谱的信噪比得到了提升。压缩后脉冲的自相关曲线如图 10(b) 所示,从图上可以看出自相关曲线底部具有明显的基座,主要是由于压缩所用的大刻线密度光栅具有较大的高阶色散,导致最后获得的压缩脉冲无法完全补偿高阶色散。此外最后一级放大器大幅度提高了脉冲的能量,产生了较强的非线性效应引入了不可压缩的非线性啁啾。压缩后放大器的斜效率为 14.7%,脉冲的压缩效率为 42.8%,如图 10(c) 所示。压缩所用的透射光栅衍射效率为 90% 并且仅在 s 偏振态下能获得最高的衍射效率,由于放大后的脉冲光为随机偏振态,因此压缩后脉冲的效率较低。

### 3 结论

本文利用高功率的掺铒光纤放大器泵浦石英基质的无源高非线性光纤,在全光纤化的结构中实现了 1895~2165 nm 波长可调谐的拉曼孤子输出。利用啁啾脉冲放大系统提升拉曼孤子的单脉冲能量,经过四级放大后脉冲的平均功率达到 50.6 W,单脉冲能量为 1.56 μJ,脉冲宽度为 83 ps。利用光栅进行脉冲压缩,获得了平均功

率为 22 W, 单脉冲能量为 0.68  $\mu\text{J}$ , 脉冲宽度为 1.23 ps, 峰值功率为 0.55 MW 的压缩脉冲。经过放大后的脉冲仍具有 8 nm 的波长调谐范围。这种高功率的波长可调谐光源可以作为软玻璃光纤的泵浦源来产生跨倍频程的超连续谱, 也可以泵浦气体填充的空芯光纤进行非线性光谱展宽以获取极窄的脉冲输出, 在高功率中红外激光的产生上具有较大的发展前景。

#### 参考文献:

- [1] Kadwani P, Sims R A, Baudelet M, et al. Atmospheric propagation testing using broadband thulium fiber systems[C]//Fiber Laser Applications 2011. Istanbul: Optical Society of America, 2011.
- [2] Scholle K, Lamrini S, Koopmann P, et al. 2  $\mu\text{m}$  laser sources and their possible applications[M]//Pal B. Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics. Vukovar: Intech, 2010.
- [3] Sarp A S K, Gulsoy M. Determining the optimal dose of 1940-nm thulium fiber laser for assisting the endodontic treatment[J]. *Lasers in Medical Science*, 2017, 32(7): 1507-1516.
- [4] Hutchens T C, Gonzalez D A, Irby P B, et al. Fiber optic muzzle brake tip for reducing fiber burnback and stone repulsion during thulium fiber laser lithotripsy[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2017, 22: 018001.
- [5] Corkum P B. Plasma perspective on strong field multiphoton ionization[J]. *Physical Review Letters*, 1993, 71(13): 1994-1997.
- [6] Krausz F, Ivanov M. Attosecond physics[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2009, 81(1): 163-234.
- [7] Sepp G, Protz R. Laser beam source for a directional infrared countermeasures (DIRCM) weapon system: 6587486 [P]. 2003-07-01.
- [8] Luo Hongyu, Yang Jian, Li Jianfeng, et al. Tunable sub-300 fs soliton and switchable dual-wavelength pulse generation from a mode-locked fiber oscillator around 2.8  $\mu\text{m}$ [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(4): 841-844.
- [9] Qian Kai, Luo Hao, Qiu Da, et al. Broadband and tunable 920-nm femtosecond pulse generated by an all-fiber Er: fiber laser system[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 29600-29664.
- [10] 张怡静, 刘江, 王璞. 全光纤结构波长可调谐被动锁模掺铥光纤激光器[J]. *中国激光*, 2018, 45: 1001003. (Zhang Yijing, Liu Jiang, Wang Pu. All-fiber wavelength-tunable passively mode-locked thulium-doped fiber laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45: 1001003)
- [11] Dai Ruihong, Meng Yafei, Li Yao, et al. Nanotube mode-locked, wavelength and pulsewidth tunable thulium fiber laser[J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 3518-3527.
- [12] Yao Chuanfei, Zhao Zhipeng, Jia Zhixu, et al. Mid-infrared dispersive waves generation in a birefringent fluorotellurite microstructured fiber[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109: 101102.
- [13] Wang Peng, Shi Hongxing, Tan Fangzhou, et al. Tunable femtosecond pulse source from 1.6 to 2.3  $\mu\text{m}$  with 100 kW peak power in an all-fiber system[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14: 091405.
- [14] Hua Yi, Zhou Gengji, Liu Wei, et al. Femtosecond two-color source synchronized at 100-as-precision based on SPM-enabled spectral selection[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(13): 3410-3413.
- [15] Wang Peng, Shi Hongxing, Tan Fangzhou, et al. Enhanced tunable Raman soliton source between 1.9 and 2.36  $\mu\text{m}$  in a Tm-doped fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 16643-16651.
- [16] Li Yanhong, Du Tuanjie, Xu Bin, et al. Compact all-fiber 2.1-2.7  $\mu\text{m}$  tunable Raman soliton source based on germania-core fiber[J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 28544-28550.
- [17] Liu Fei, Li Jianfeng, Luo Hongyu, et al. Study on soliton self-frequency shift in a Tm-doped fiber amplifier seeded by a Kelly-sideband-suppressed conventional soliton[J]. *Optics Express*, 2021, 29(5): 6553-6562.
- [18] Liu Lai, Tian Qijun, Liao Meisong, et al. All-optical control of group velocity dispersion in tellurite photonic crystal fibers[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(24): 5124-5126.
- [19] Li Zhenrui, Li Nan, Yao Chuanfei, et al. Tunable mid-infrared Raman soliton generation from 1.96 to 2.82  $\mu\text{m}$  in an all-solid fluorotellurite fiber[J]. *AIP Advances*, 2018, 8: 115001.
- [20] Cheng Tonglei, Kanou Y, Asano K, et al. Soliton self-frequency shift and dispersive wave in a hybrid four-hole AsSe<sub>2</sub>-As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> microstructured optical fiber[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104: 121911.
- [21] Tang Yuxing, Wright L G, Charan K, et al. Generation of intense 100 fs solitons tunable from 2 to 4.3  $\mu\text{m}$  in fluoride fiber[J]. *Optica*, 2016, 3(9): 948-951.
- [22] Klimentov D, Dvoryn V V, Tolstik N, et al. Raman soliton fiber lasers tunable between 1.98-2.22  $\mu\text{m}$ [C]//Mid-Infrared Coherent Sources 2016. Long Beach: Optical Society of America, 2016.
- [23] Tan Fangzhou, Shi Hongxing, Sun Ruoyu, et al. 1  $\mu\text{J}$ , sub-300 fs pulse generation from a compact thulium-doped chirped pulse amplifier seeded by Raman shifted erbium-doped fiber laser[J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 22461-22468.
- [24] Fermann M E, Andrejco M J, Stock M L, et al. Passive mode locking in erbium fiber lasers with negative group delay[J]. *Applied Physics Letters*, 1993, 62(9): 910-912.
- [25] Herrmann J, Kalosha V P, Müller M. Higher-order phase dispersion in femtosecond Kerr-lens mode-locked solid-state lasers: sideband generation and pulse splitting[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(4): 236-238.