



·新型激光技术专题·

采用飞秒光纤激光同步泵浦的自启动 锁模钛宝石激光研究*

宋海声¹, 刘宇平^{1,2}, 滕浩^{2,3}, 于洋^{2,4}, 冯小天², 邵晓东²,
吕仁冲^{2,4}, 韩海年², 朱江峰⁴, 魏志义^{2,3,5}

(1. 西北师范大学 物理与电子工程学院, 兰州 730070; 2. 中国科学院 物理研究所, 北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190;
3. 松山湖材料实验室, 广东 东莞 523808; 4. 西安电子科技大学 物理与光电工程学院,
西安 710071; 5. 中国科学院大学 物理科学学院, 北京 100049)

摘 要: 针对常规连续激光泵浦钛宝石激光振荡器不能自启动锁模的缺点, 采用倍频飞秒光纤激光同步泵浦, 通过调节振荡器腔长与泵浦腔长匹配, 实现了飞秒钛宝石激光的自启动锁模。实验中采用 3.4 W 的倍频掺镱光纤激光同步泵浦钛宝石激光振荡器, 获得了平均功率大于 130 mW、重复频率 75 MHz、光谱宽度大于 47 nm、脉冲宽度 17 fs 的锁模脉冲输出, 不仅能够稳定可靠地实现自启动锁模, 解决了常规钛宝石激光振荡器锁模启动的困难, 而且还具有同步输出 1040, 800, 520 nm 三束飞秒激光的特点, 为进一步开展飞秒激光相干合成以及光参量放大等研究提供了优势基础。

关键词: 同步泵浦; 钛宝石飞秒振荡器; 飞秒光纤激光; 锁模自启动

中图分类号: TN248

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202133.210346

Self-starting mode-locking Ti: sapphire oscillator synchronously pumped by femtosecond fiber laser

Song Haisheng¹, Liu Yuping^{1,2}, Teng Hao^{2,3}, Yu Yang^{2,4}, Feng Xiaotian², Shao Xiaodong²,
Lü Renchong^{2,4}, Han Hainian², Zhu Jiangfeng⁴, Wei Zhiyi^{2,3,5}

(1. School of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. Songshan Lake Material Laboratory, Dongguan 523808, China;

4. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

5. School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: We demonstrated a self-starting mode-locked Ti:sapphire laser by using a synchronously pumping scheme with a frequency doubled femtosecond Yb fiber laser. By carefully adjusting the cavity length of the Ti:sapphire oscillator to match the fiber laser, the mode-locking operation can start automatically. In the experiment, a femtosecond ytterbium-doped fiber laser at 520 nm was used to pump the Ti:sapphire laser synchronously. Under the 3.4 W pump power, 130 mW/17 fs mode locked laser pulses were obtained from the Ti:sapphire laser at the repetition rate of 75 MHz. It not only solves the difficulty of conventional Ti:sapphire oscillator for no-starting mode locking, but also synchronously supplies three femtosecond laser beams at central wavelengths of 1040, 800 and 520 nm, which paved an advanced way for further studies of coherent combination and optical parametric amplification.

Key words: synchronous pump; femtosecond Ti:sapphire oscillator; femtosecond fiber laser; self-starting mode-locking

* 收稿日期: 2021-08-10; 修订日期: 2021-11-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12034020); 国家重点研发计划项目 (2018YFB1107201); 综合极端条件实验装置项目

联系方式: 宋海声, 653526491@qq.com。

通信作者: 滕浩, hteng@iphy.ac.cn。

随着激光增益晶体和激光技术的进步,超短脉冲激光的产生与调控已经日益成熟,并成功应用于科研、工业加工、医疗、国防等领域。在众多增益介质中,掺钛蓝宝石晶体^[1]具有增益高、宽光谱、优良的热导率等优点,所以它是产生超短脉冲激光的首选晶体。常规钛宝石激光振荡器的泵浦源是采用连续绿光激光,利用钛宝石晶体的克尔效应实现锁模。1991年 W. Sibbett 研究组首次在实验上实现了钛宝石激光的自锁模,产生了脉冲宽度为 60 fs 的锁模脉冲序列^[2],并由 F. Salin 在理论上解释为由于钛宝石晶体自身克尔效应实现的锁模,称为克尔透镜锁模^[3]。随后,基于钛宝石飞秒振荡器以及放大器的研究成为超快激光的重点研究方向之一^[4]。随着色散精密控制的啁啾镜进展,目前基于克尔透镜锁模的钛宝石振荡器直接输出的脉冲宽度已小于 5 fs^[5]。但要实现宽光谱窄脉冲锁模脉冲输出,首先要考虑钛宝石晶体和空气的色散补偿,如色散棱镜对^[6]、啁啾镜^[7-8]等;其次,需要不断地精细优化钛宝石晶体与两侧凹面反射镜之间的位置,使得晶体中具有强的非线性效应,此时推动端镜给振荡腔一个“微扰”从而实现克尔透镜锁模。而常规钛宝石振荡器一般采用连续绿光激光作为泵浦源,对泵浦激光的光束质量、稳定性、噪声等方面要求非常高,以至于只有少数厂家能生产这样的绿光激光,所以成本一直居高不下。虽然近年来也发展了采用蓝光二极管激光泵浦的钛宝石振荡器^[9],成本降低了,但没有解决精确调节晶体与凹面镜之间的距离和启动锁模的难题。

如上所述,由于锁模钛宝石激光对泵浦光的稳定性和噪声等参数性能要求较高,在一定程度上限制了其推广和应用。而基于蓝光 LD 直接泵浦的方案中,LD 发散角大,需要使用光束整形优化 LD 输出光束以此实现腔内良好的模式匹配。同时,LD 的功率与钛宝石在蓝光波段的吸收特性,也影响了高功率锁模脉冲的获得。此外,传统的锁模需要在腔内引入扰动或可饱和吸收体,不利于自启动的锁模飞秒激光输出。近几年来,采用同步泵浦的方式实现自启动的钛宝石飞秒振荡器实现锁模输出备受关注^[10-11]。同步泵浦的方式极大缓解了钛宝石振荡器难以自启动锁模的缺点,同时也降低了对连续泵浦激光高品质的要求。目前皮秒激光器或全固态掺镱飞秒振荡器的倍频光是实现同步泵浦的钛宝石飞秒振荡器的首选泵浦源。

本文选用高功率掺镱光纤飞秒激光通过倍频获得了 520 nm 的绿光激光作为钛宝石振荡器的泵浦源,采用同步泵浦的方式实现了自启动的飞秒钛宝石锁模激光输出。在 3.4 W 的泵浦功率下,获得了重复频率为 75 MHz、平均功率为 130 mW、光谱半高宽约为 47 nm、脉冲宽度为 17 fs 的飞秒激光输出。该方案的验证,不仅同时实现了 520 nm 和 800 nm 飞秒激光的同步输出,而且也在相干合成、光参量放大和光学频率梳方面有重要的应用前景。

1 同步泵浦锁模机制

在平面波近似条件下,泵浦光脉冲和产生的飞秒脉冲在钛宝石晶体内的相互作用可以用非线性薛定谔方程来描述激光脉冲的线性和非线性传输过程^[11]

$$\frac{\partial A_g}{\partial z} + \frac{\alpha}{2} A_g + k_1(\omega_g) \frac{\partial A_g}{\partial t} + \frac{ik_2(\omega_g) \partial^2 A_g}{\partial t^2} = ir_g |A_g|^2 A_g + i2r_g |A_p|^2 A_g \quad (1)$$

式中: A_g 和 A_p 分别表示钛宝石激光和泵浦光在慢变近似条件下的光场振幅; k_1 和 k_2 分别代表频率为 ω_g 时的二阶、三阶群速度色散系数; α 代表非共振介质吸收系数; r_g 代表与 A_g 和 A_p 有关的非线性系数; $ir_g |A_g|^2 A_g$ 代表钛宝石激光脉冲的自相位调制; $i2r_g |A_p|^2 A_g$ 代表互相相位调制。

式(1)只有在特定的条件下才能成立,在这里忽略了钛宝石晶体对泵浦光脉冲造成的展宽作用。在忽略了损耗项后,可以得到在泵浦光振荡影响下的瞬时频率 $\delta\omega_{\text{cpm}}$ 的表达式

$$\delta\omega_{\text{cpm}} = -2r_g \frac{\partial |A_p|^2}{\partial t} z = -\frac{n_2 \omega_g}{c} \frac{\partial I_p}{\partial t} z \quad (2)$$

式中: I_p 为泵浦光功率; n_2 为非线性折射率。

从式(2)可以看出,泵浦光与钛宝石激光在晶体内的相互作用可导致后者相速度的降低,且与泵浦光功率成正比,从而改变了钛宝石激光的脉冲宽度和光谱的中心频率。

由于泵浦光的影响,钛宝石激光脉冲的载波频率会发生改变,式(2)在色散理论的一级近似条件下会得出群速度发生变化最终导致脉冲在腔内往返时间发生变化,引起的色散量可以表示为

$$\left. \frac{\partial U}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_g} = -\frac{U^2}{l} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \omega^2} > 0 \quad (3)$$

式中: l 代表钛宝石激光器的腔长,可以看出总色散量为负值;钛宝石激光脉冲的群速度 U 变化量为

$$\Delta U = -\frac{n_2 \omega_g}{c} z \frac{dI_p}{dt} \frac{\partial U}{\partial \omega} \Big|_{\omega = \omega_g} \quad (4)$$

从式(4)中可以看出,假设刚开始钛宝石激光稍微落后于泵浦光,并且与后者脉冲的下降沿重叠时,钛宝石激光的光谱会变窄,同时群速度增加,因此钛宝石激光脉冲下一次在谐振腔中传播时,在时域上与泵浦光之间的延时缩短,钛宝石激光脉冲在谐振腔内多次往返的过程中,其与泵浦光得到充分的相互作用。经过腔内多次往返后,钛宝石激光脉冲领先于泵浦光,这时其与泵浦光的上升沿重合,导致其群速度减小,最终与泵浦光在时域上获得了相对稳定的时间延时,这时两个脉冲在时域上的重合程度最大,钛宝石激光脉冲载波中心频率将不再移动,重复频率被锁定,即实现了和泵浦源的完全同步^[11]。考虑到钛宝石激光器的腔长可能会因周围环境的扰动发生微小漂移,这个波动范围只有不超过腔长的容忍量,才可实现自启动的锁模飞秒激光输出。

与自相位调制对比,互相位调制在飞秒激光同步泵浦钛宝石锁模过程中具有更为重要的作用^[12],这是因为利用飞秒激光作为泵浦源时,具有较高峰值功率的泵浦光和锁模激光相互叠加引起非线性耦合效应,钛宝石激光才实现锁模。泵浦光和钛宝石激光的互相位调制作用引起的三阶非线性效应使得二者在负色散区域条件下,在时域上“互相吸引”。

2 实验装置和结果

基于上述同步泵浦时延迟稳定的分析,我们开展了相关的实验研究,所设计的飞秒光纤激光同步泵浦钛宝石激光振荡器的系统光路如图1所示,由高功率飞秒 Yb 光纤激光、倍频模块和钛宝石飞秒振荡器三部分构成。飞秒光纤激光使用啁啾脉冲放大(CPA)技术^[13],由 NPE 锁模振荡器^[14]、光纤展宽器、三级光纤放大和压缩器构成^[15],该保偏光纤 CPA 系统能够输出重频 75 MHz、中心波长 1040 nm、脉宽 150 fs、平均功率为 12 W 的激光脉冲。再通过 LBO 晶体倍频,最高可获得 5.6 W, 520 nm 绿光输出,其在 x 和 y 方向上的光束质量(M^2)分别为 1.3 和 1.4。钛宝石振荡器采用啁啾镜补偿材料色散的直线折叠腔,为了调节腔长,将端镜固定在一维精密平移台上。

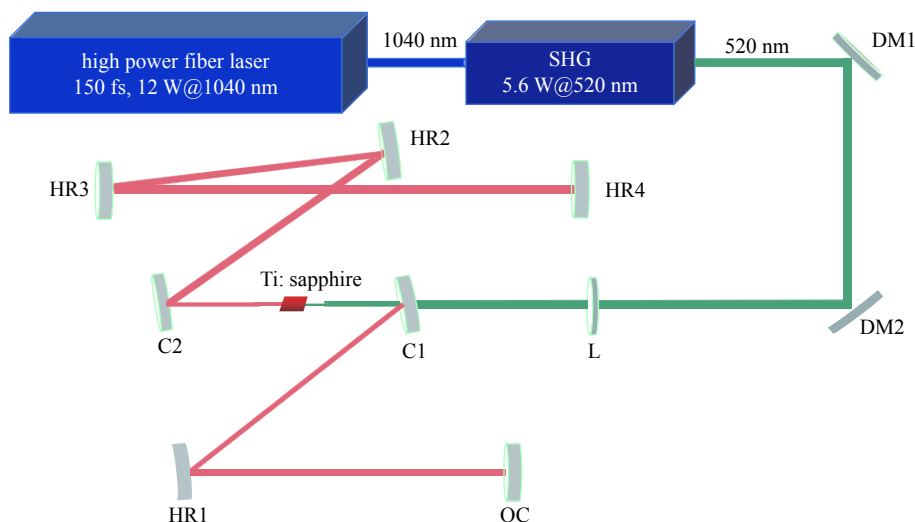


Fig. 1 Optical circuit diagram of femtosecond fiber laser synchronous pumping Ti:sapphire oscillator system

图1 倍频飞秒光纤激光同步泵浦钛宝石振荡器系统光路图

实验中,首先实现钛宝石振荡器连续光输出,然后通过优化腔内结构和调节端镜,使连续光输出的功率最大,之后通过精密调节平移台调节腔长,当钛宝石谐振腔的腔长与泵浦源腔长相同时,就可以实现稳定的自启动的钛宝石锁模激光输出。为了确定钛宝石振荡器的输出脉冲有无多脉冲和调Q存在,利用光电二极管和示波器测量钛宝石振荡器锁模后输出的脉冲序列。其测量结果如图2所示,在40 ns的时间尺度下锁模脉冲序列幅度和间隔稳定,表明钛宝石振荡器处于十分稳定的连续锁模运转状态,没有出现调Q包络现象。

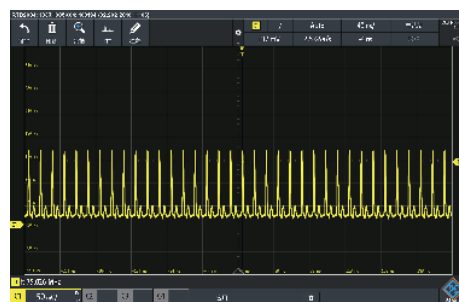


Fig. 2 Mode-locked pulse train for Ti:sapphire oscillator

图2 钛宝石振荡器的锁模脉冲序列

为进一步验证钛宝石锁模激光的稳定性,采用频谱仪测量了锁模脉冲频谱,如图3所示,频谱峰值位于75 MHz,信噪比高达70 dB,且1 GHz范围内频谱为一系列平稳梳齿,表明激光器锁模状态非常稳定。当钛宝石振荡器实现稳定锁模输出后,利用一台示波器同时测量倍频飞秒光纤激光和钛宝石振荡器的锁模脉冲信号,如图4所示。当钛宝石振荡器实现稳定锁模输出后,示波器上显示的钛宝石振荡器锁模脉冲序列与光纤飞秒激光脉冲序列非常稳定,表明钛宝石振荡器输出脉冲与光纤飞秒脉冲同步。

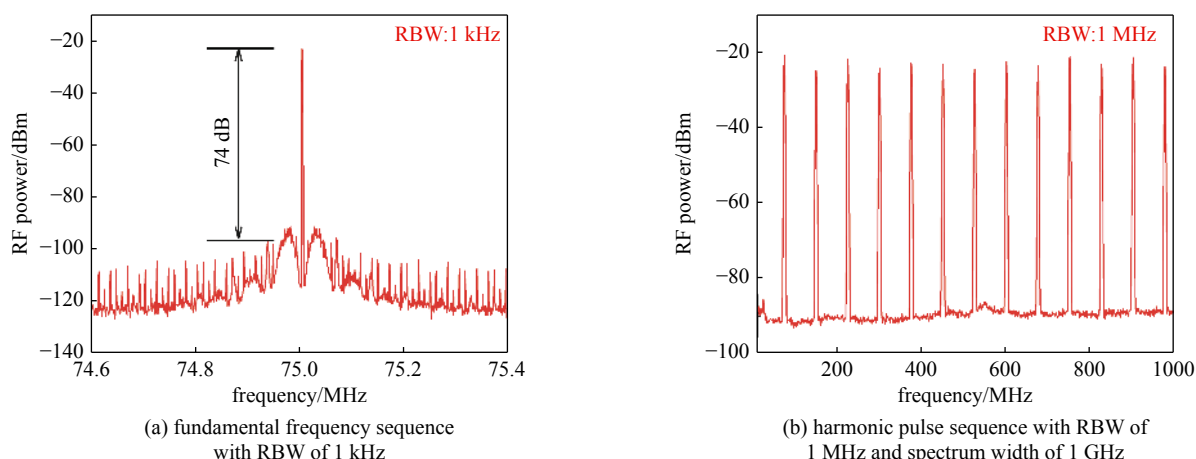


Fig. 3 Ti sapphire oscillator spectrum sequences

图3 钛宝石振荡器频谱序列

在钛宝石振荡器稳定锁模状态下,利用自相关仪测量钛宝石振荡器输出脉冲的宽度,如图5所示,其中紫色轨迹是实验测量数据,红色实线为双曲正割拟合结果,可以看出信号强度两边对称。同时使用光谱仪测量此时的光谱,显示光谱比较平坦,半高宽为47 nm,如图6所示。由测得的锁模脉冲宽度17 fs计算得到时间带宽积为0.36,接近双曲正割脉冲傅里叶变换极限的0.315,没有得到变换极限脉宽的原因:一方面是来自于测量方面的引起的误差,另一方面是腔内的色散补偿并没有达到理想状态,激光脉冲还存在一定的啁啾。

实验过程中没有对激光腔长进行专门的锁定,虽可以观察到一个较为明显的同步锁模现象,但因2个谐振腔长度的相对漂移,同步运行时间持续20~30 h后会丢失同步锁定模式。研究发现,同步的稳定性主要受腔的状态和腔内色散的影响,对于2个激光器存在的腔长漂移,主要是由于环境温度、气流和仪器噪声等引起的。下一步将采用腔长锁定技术,渴望实现更长时间的稳定锁模和同步锁定输出。

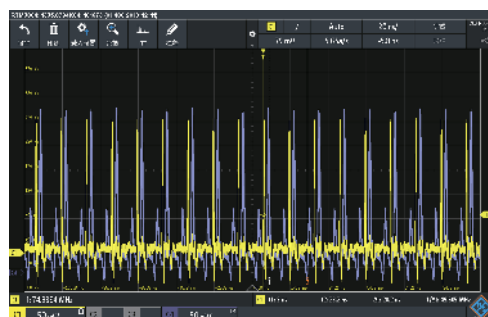


Fig. 4 Mode-locked pulse train for a Ti:sapphire oscillator and femtosecond pump source

图4 钛宝石振荡器与飞秒泵浦源的锁模脉冲序列

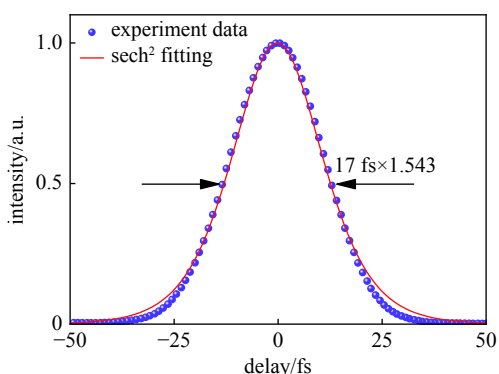


Fig. 5 Autocorrelation curve of Ti:sapphire laser pulse

图5 钛宝石激光脉冲自相关曲线

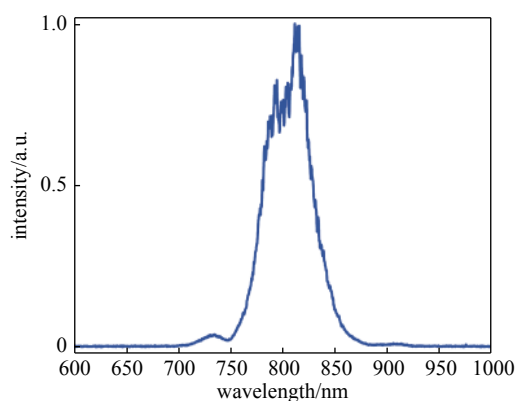


Fig. 6 Spectral curve corresponding to laser pulse autocorrelation curve

图6 与激光脉冲自相关曲线相对应的光谱曲线

3 结 论

研究了一种基于飞秒光纤激光倍频实现同步泵浦自启动锁模的钛宝石振荡器。在 3.5 W, 150 fs 的倍频 520 nm 绿光泵浦下, 通过调节钛宝石振荡器腔长, 当腔长与光纤飞秒激光腔长相同的情况下, 钛宝石激光振荡器可实现自启动锁模脉冲输出, 获得中心波长 800 nm、重复频率为 75 MHz、脉宽为 17 fs 的飞秒脉冲。光纤飞秒激光同步泵浦钛宝石振荡器既可以克服传统振荡器中锁模启动困难的问题, 又可以同时实现三路飞秒激光的同步输出, 将在光学频率梳、光场调控相干合成、光参量放大等领域具有重要的应用价值。

参考文献:

- [1] Rapoport W R, Khattak C P. Titanium sapphire laser characteristics[J]. *Applied Optics*, 1988, 27(13): 2677-2684.
- [2] Spence D E, Kean P N, Sibbett W. 60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti: Sapphire laser[J]. *Optics Letters*, 1991, 16(1): 42-44.
- [3] Salin F, Squier J, Piché M. Mode locking of Ti: sapphire lasers and self-focusing: a Gaussian approximation[J]. *Optics Letters*, 1991, 16(21): 1674-1676.
- [4] 何会军. 超短脉冲激光放大及中红外飞秒激光产生的研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院物理研究所), 2018 (He Huijun. Amplification of ultrashort pulse laser and generation of mid-infrared femtosecond pulses[D]. Beijing: Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018)
- [5] Sutter D H, Steinmeyer G, Gallmann L, et al. Semiconductor saturable-absorber mirror-assisted Kerr-lens mode-locked Ti: sapphire laser producing pulses in the two-cycle regime[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(9): 631-633.
- [6] Asaki M T, Huang C P, Garvey D, et al. Generation of 11-fs pulses from a self-mode-locked Ti: sapphire laser[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(12): 977-979.
- [7] Szipöcs R, Ferencz K, Spielmann C, et al. Chirped multilayer coatings for broadband dispersion control in femtosecond lasers[J]. *Optics Letters*, 1994, 19(3): 201-203.
- [8] Chen Y, Kärtner F X, Morgner U, et al. Dispersion-managed mode locking[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1999, 16(11): 1999-2004.
- [9] Liu Han, Wang Geyang, Jiang Jianwang, et al. Sub-10-fs pulse generation from a blue laser-diode-pumped Ti: sapphire oscillator[J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18: 071402.
- [10] Ell R, Angelow G, Seitz W, et al. Quasi-synchronous pumping of modelocked few-cycle titanium sapphire lasers[J]. *Optics Express*, 2005, 13(23): 9292-9298.
- [11] Didenko N V, Konyashchenko A V, Konyashchenko D A, et al. Ti: sapphire laser synchronised with femtosecond Yb pump laser via nonlinear pulse coupling in Ti: sapphire active medium[J]. *Quantum Electronics*, 2017, 47(1): 7-13.
- [12] 孟祥昊. 全固态锁模激光及其同步泵浦的飞秒脉冲产生与应用研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院物理研究所), 2018 (Meng Xianghao. Generation and application of tunable femtosecond laser pulse synchronously pumped by all solid state mode-locking laser[D]. Beijing: Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018)
- [13] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. *Optics Communications*, 1985, 56(3): 219-221.
- [14] Pask H M, Carman R J, Hanna D C, et al. Ytterbium-doped silica fiber lasers: versatile sources for the 1-1.2 μm region[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1995, 1(1): 2-13.
- [15] 于洋. 掺镱光纤激光放大器及波长扩展技术的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020 (Yu Yang. Ytterbium-doped fiber laser amplification and wavelength extension[D]. Xi'an: Xidian University, 2020)