

文章编号:1001-5078(2024)07-1016-06

· 激光器技术 ·

2 μm 可调谐全光纤脉冲激光器

武宇^{1,2}, 李保群^{1,2}, 王天枢^{1,2}

(1. 长春理工大学空间光电技术国家与地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022;

2. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 本文采用光纤尾纤型马赫曾德型(MZ)结构的周期性铌酸锂(LiNbO₃)电光强度调制器进行主动调Q, 设计了在环形腔结构中加入可调谐滤波器, 实现了波长在1882 nm~1992 nm可调谐脉冲激光的稳定输出。调节施加在调制器上的信号频率, 产生了激光器重复频率在15~70 kHz可调的脉冲激光。在重复频率为15 kHz时, 泵浦功率为1 W时, 获得最大单脉冲能量6.4 μJ , 峰值功率5.1 W。本研究具有全光纤化, 波长大范围可调等优势, 有助于进一步探索调Q脉冲激光的可调谐范围及其潜在应用。

关键词: 光纤激光器; 调Q脉冲; 主动调Q; 波长可调谐; 2 μm

中图分类号: TN248; O436 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.07.002

Wavelength tunable all-fiber pulse laser at 2 μm

WU Yu^{1,2}, LI Bao-qun^{1,2}, WANG Tian-shu^{1,2}

(1. National and Local Joint Engineering Research Center of Space Photoelectric Technology,

Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: this paper, a periodic lithium niobate (LiNbO₃) electro-optical intensity modulator with a fiber pigtail-type Mach Zengde (MZ) structure is used for active Q-tuning, and a tunable filter is designed to be incorporated into the ring cavity structure to achieve stable output of tunable pulsed lasers with wavelengths in the range of 1882 nm – 1992nm. By adjusting the signal frequency applied to the modulator, pulse lasers with a tunable repetition frequency between 15 kHz and 70 kHz are produced. At a repetition frequency of 15 kHz and a pump power of 1 W, the maximum single-pulse energy obtained is 6.4 μJ , with a peak power of 5.1 W. This research exhibits advantages of all-fiber configuration and a wide tunable wavelength range, contributing to further exploration of the tunable range and potential applications of Q-switched pulse lasers.

Keywords: fiber laser; Q-switched pulse; active Q-switch; wavelength tunable; 2 μm

1 引言

光纤激光器因其光束质量好、转换效率高、结构紧凑、系统稳定可靠且环境适应强^[1-6]等优点, 在生

命科学、材料加工、科学研究及军事国防等领域有着广泛的应用。尤其是2 μm 波段在大气透射窗口、“人眼安全”范围, 在水蒸气以及一些温室气体分子

基金项目: 重庆市自然科学基金项目(No. CSTB2022NSCQ-MSX1342)资助。

作者简介: 武宇(1999-), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器技术及其应用的研究。E-mail: 2021100250@mails.cust.edu.cn

通讯作者: 王天枢(1975-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤激光器技术及应用、高速空间激光通信技术、光纤传感技术等方面的研究。E-mail: wangts@cust.edu.cn

收稿日期: 2023-12-09

的特征吸收区域内,2 μm 波段光纤激光器在无线光通信、激光医疗和探测^[7-9]等领域具有很高的应用价值,因具有高峰值功率、大脉冲能量等特点,2 μm 脉冲光纤激光得到了广泛的研究。

为了产生高能量脉冲激光,通常采用周期性有源增益调制^[10-12]和调 Q^[13-15]两种方式。有源增益调制对泵浦源进行调制就可以在很大范围内调整脉冲宽度和重复频率,但与调 Q 相比,输出脉冲稳定性较差,会受到增益饱和效应的影响,从而导致单个脉冲能量较低且输出脉冲宽度大于调 Q 的脉冲宽度。而调 Q 输出稳定性较好,并且可以产生高峰值功率的脉冲激光^[16]。传统的调 Q 方法包括体 Q 开关、饱和吸收调 Q,是将已有的体 Q 开关应用于光纤激光器中,但这种调 Q 激光器的结构复杂,插入损耗大、驱动电压高。被动调 Q 是基于可饱和吸收效应,例如石墨烯沉积的光纤、半导体可饱和吸收镜或各种新型材料制得可饱和吸收体等。被动调 Q 产生的脉冲重复率仅由泵浦功率决定,这限制了对激光脉冲特性和输出功率的控制。与被动调 Q 相比,当采用主动调 Q 技术时,除了改变泵浦功率,还可以通过改变信号发生器发出的信号特性来改变输出脉冲特性,从而更好地调谐脉冲激光。

随着应用需求的不断提高,对激光器的性能提出了更高的要求,例如高功率、短脉冲、波长可调谐等。其中波长可调谐的激光器在光学频谱分析、光学相干层析成像(OCT)等领域具有重要应用价值。1990年,中心波长为810 nm的光作为泵浦,产生波长为1780 nm到2060 nm和1 W量级的掺铥(Tm^{3+})波长可调谐光纤激光器(TDFL)第一次被实验证明^[17]。2015年,法国Gutty等人采用声光调制器(AOM)作为Q开关,使用声光可调滤波器作为波长选择元件,搭建了脉冲可调谐TDFL^[18]。其波长可在1860~1960 nm波段内连续调节,调谐范围为100 nm。该激光器非全光纤结构。同年,Li等人采用声光调制器作为Q开关,可调光栅作为选频元件,搭建了2 μm 波段基于调Q结构的宽带可调谐脉冲TDFL^[19]。波长可调谐范围达到了1972~2073 nm,最短脉冲宽度90 ns的激光输出。该激光器也非全光纤结构。2016年,马来亚大学的Samion等人使用多壁碳纳米管作为可饱和吸收体进行被动

调Q,使用波导型阵列光栅(AWG)作为波长选择器件,搭建了1.9 μm 波段脉冲可调谐TDFL^[20]。波长的调谐范围从1872~1889 nm。重复频率的可调谐范围为41.19 kHz~68.3 kHz。输出最小脉冲宽度为1.9 μs 。连续波可调谐TDFL近十几年来取得了较大发展,而脉冲可调谐TDFL的研究尚处于起步阶段。全光纤结构的脉冲可调谐TDFL到目前为止报道较少。

本文采用了光纤尾纤型电光调制器进行主动调Q,使用可调谐滤波器作为波长选择器件,设计了一个环形腔结构,产生了2 μm 波长可调谐脉冲激光。其具有很高的可调谐性,在室温条件下具有良好的稳定性。

2 实验结构

激光器结构如图1所示,使用环形腔结构并且具有全光纤化的特点,总腔长为14.3 m(对应光在腔内往返时间约为72 ns)。增益光纤是NUFERN公司的一段纤芯/包层直径为9/125 μm 的掺铥光纤(TSF),TSF在1565.5 nm处具有0.15的数值孔径(NA),大约为12 dB/m的纤芯吸收。选择3.4 m的TSF作为最佳长度以实现最佳的泵浦吸收。一个输出1565.5 nm的半导体分布反馈式激光器(DFB)作为种子光源,通过最高放大功率为1 W的铟镱共掺光纤放大器(EYDFA)放大作为泵浦光,泵浦光通过1550/2000 nm波分复用器(WDM)耦合进环形腔光路,对掺铥光纤进行反向泵浦。偏振无关光隔离器(PI-ISO)使光在环路中沿逆时针单向传播。可调谐滤波器(Agiltron Inc, FOTF-034221333)作为选频器件,可以实现110 nm范围的波长调谐,插入损耗3 dB,3 dB带宽为2 nm。偏振控制器(PC)用于优化输入调制器的光的偏振状态。采用IXbule公司的型号为MX2000-LN-10的光纤尾纤型LiNbO₃电光强度调制器进行调Q,利用Pockels效应调制光的相位进而调制输出光的强度,得到脉冲输出。其电光工作带宽为10 GHz,它由外部射频信号源(RIGOL, DG4162)驱动,最高可发射160 MHz信号,它对调制器施加一个方波信号改变调制器两臂的相位差。对电光调制器施加一个偏置电压(RIGOL, DP832)使其工作在最佳偏置点处,通过测得,实验将偏置电压设置在-2.11 V,信号电压设置

在 $\pm 3.21\text{V}$ 。在调制器后面引入了 70/30 的光纤耦合器(OC),用来提取环形腔内 70 % 的光作为输出,剩余 30 % 再循环回到腔内振荡。耦合器 70 % 端口输出的脉冲光使用功率计和光谱分析仪(YOKOGAWA, AQ6375)分别测量和记录激光的平均功率和光谱,光谱仪的分辨率为 0.05 nm。输出脉冲激光由光电探测器(EOT, ET-5000)探测,将光信号转化为电信号,100 M 带宽的示波器(RIGOL, MSO5102)观测其脉冲形状及脉冲宽度。

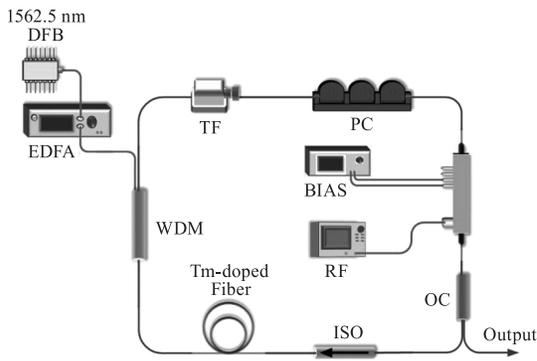


图 1 $2\ \mu\text{m}$ 可调谐全光纤调 Q 激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a tunable all-fiber Q-switched laser at $2\ \mu\text{m}$

3 实验结果和分析

为保证受调制的光束质量,测量了连续光状态下的输出特性。首先,不施加射频信号在电光调制器上时,光环路系统输出连续光(CW)。图 2 为输出连续光状态下,输出功率随泵浦功率变化曲线图,输出激光阈值为 480 mW,当施加平均功率为 1 W 的泵浦功率时,输出功率达到了 107 mW,泵浦光斜率效率为 26.6 %。

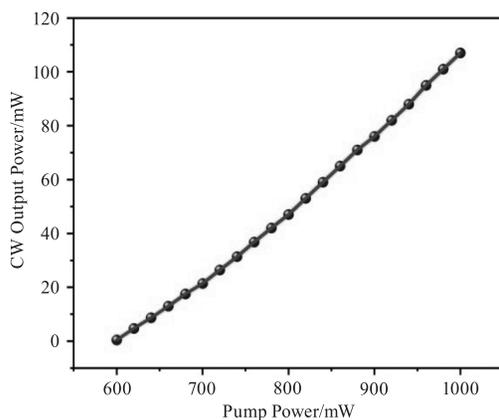


图 2 连续光输出功率随泵浦功率变化曲线

Fig. 2 Curve of continuous optical output power variation with pump power

图 3 为激光中心波长为 1882 nm 时的输出光谱图,信噪比(SNR)为 62 dB,同时光谱中无明显的 1565.5 nm 光的吸收峰,证明泵浦光已实现最佳吸收。该激光器较好的光谱特性得益于使用了相当长度的 TSF,适当长度的 TSF 可以充分吸收泵浦光,且对短波 ASE 成分具有重吸收效应,有利于 ASE 的抑制和长波段激光的激发。其次,滤波器在环形腔内滤波提供了足够强的信号光反馈,使 $2\ \mu\text{m}$ 波段的激光与其他光谱成分的谱线增益竞争中占据优势,从而有助于抑制寄生振荡和短波 ASE。

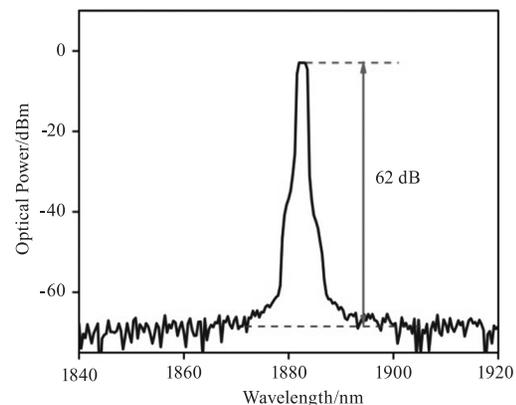


图 3 中心波长为 1882 nm 时输出光谱图

Fig. 2 Spectrum of output light at a central wavelength of 1882 nm

偏置电压设置在 -2.11V ,射频电压设置在 $\pm 3.21\text{V}$,调制信号频率在 15 kHz ~ 70 kHz 时,系统实现稳定的脉冲输出。图 4 和图 5 分别展示了调制频率在 15 kHz 时,示波器观测到的大范围输出脉冲序列和单脉冲序列,时间刻度分别设置在 $100\ \mu\text{s}/\text{div}$ 和 $10\ \mu\text{s}/\text{div}$ 。从图中可以看出,Q 开关脉冲具有均匀的脉冲形状,并且脉冲序列的峰值强度波动非常小,这表明输出脉冲具有良好的稳定性。其中输出脉冲的频率等于调制频率为 15 kHz,脉冲间隔是 $66.67\ \mu\text{s}$,插图展示了单脉冲拟合图,测得脉宽为 $1.26\ \mu\text{s}$ 。

图 6 为当泵浦功率固定在 1 W,重复频率设置在 15 kHz,得到的可调谐调 Q 光纤激光器的输出光谱,通过调谐可调谐滤波器,调 Q 光纤激光器的波长从 1882 ~ 1992 nm 范围可调,调谐范围大于 100 nm,所有光谱边模抑制比均高于 50 dB,中心波长为 1882 nm 时可获得最高的输出功率。由图可以看出最小 SNR 约为 47 dB,最大 SNR 为 63 dB。

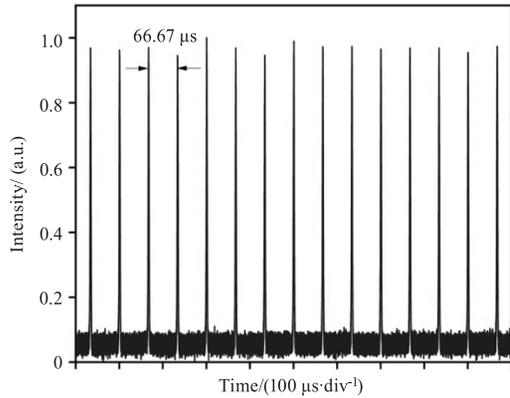


图4 大范围脉冲序列图

Fig. 4 Pulse trains of wide range

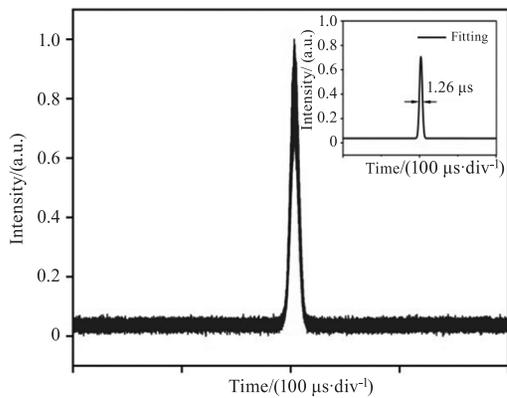


图5 单脉冲波形图及拟合图

Fig. 5 Single-pulse waveform and fitted plot

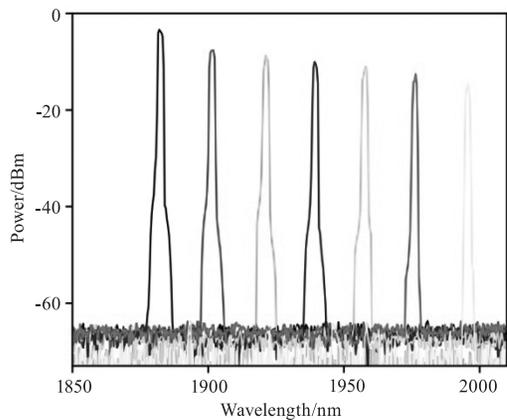


图6 波长可调谐光谱图

Fig. 6 Output spectra of the tunable Q-switched operation

图7展示了室温下1913 nm单波长输出的稳定性,这些结果是在60 min持续时间内以10 min间隔执行多次扫描后获得的。实验腔放置在稳定的环境中,即具有低热变化和低振动干扰的实验条件。0.08 dB的最大功率波动如插图所示。激光器在单波长输出时的波长漂移和功率波动都很小,表明激光器系统随着时间的推移单波长输出具有良好的稳

定性。

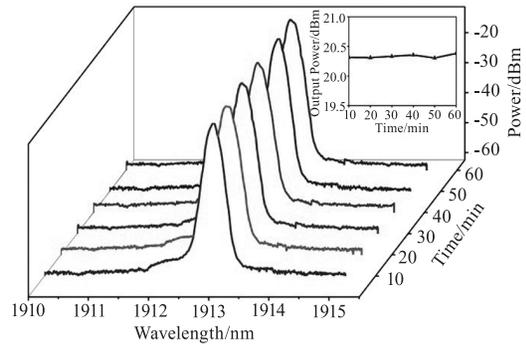


图7 60 min单波长输出稳定性测量图

Fig. 7 Stability measurement of Q-switched operation for 60 minutes

图8为固定泵浦功率为1 W时,射频信号频率在15~70 kHz之间可以连续调节得到稳定的调Q脉冲,随着调制频率的增加峰值功率逐渐变小。分析可得,在泵浦功率不变的情况下,增大调制频率工作物质的储能时间减小,激光上能级反转粒子数没有足够的时间达到最大值,输出脉冲的峰值功率必然下降,并且由于增益减少,脉冲宽度与脉冲建立时间都会增加。当调制频率超过70 kHz时,由于能量存储不足Q脉冲会变形甚至丢失,增大泵浦功率,可以在更高重频频率下获得稳定的调Q脉冲;当调制频率低于15 kHz时,泵浦功率相对过大,Q开关未能“关”断所有的光而产生静态激光,使得输出脉冲特性变差,降低泵浦功率可以获得更稳定的脉冲输出。

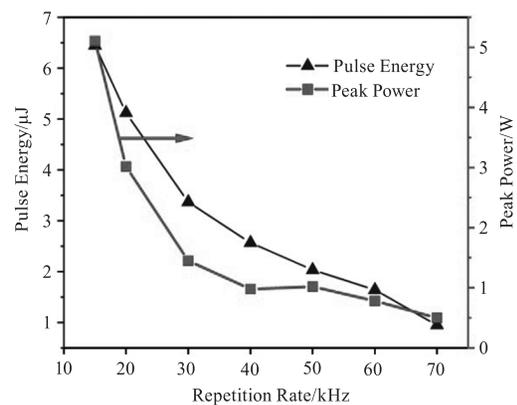


图8 脉冲能量和峰值功率随重复频率变化曲线

Fig. 8 Variation of pulse energy and peak power with repetition rate

图9为在重复频率分别为15 kHz和70 kHz情况下,泵浦功率对脉冲宽度的影响。在泵浦功率为750~1000 mW范围内调节,重频频率在15 kHz~70 kHz范围内可以获得稳定的脉冲激光

输出。可以看出,在固定重复频率下,增加泵浦功率可以导致更窄的脉冲宽度。重复频率为 15 kHz 时,当泵浦功率从 750 mW 增大到 1000 mW,脉宽从 3.76 μs 减小到 1.26 μs 。泵浦功率略高于激光发射阈值时,脉冲建立时间较长,脉冲宽度较宽,随着泵浦功率的增大,较高的泵浦功率提供较高的增益,导致在能级处积累的反转粒子数增加,从而脉冲的建立时间和熄灭时间变短,因此脉冲宽度变窄。

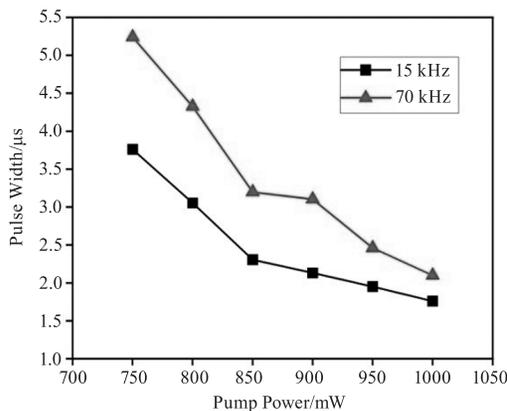


图9 重复频率分别在 15 kHz 和 70 kHz 时,脉宽随泵浦功率变化曲线

Fig.9 Variation of pulse width with pump power at repetition frequencies of 15 kHz and 70 kHz

4 总结

采用尾纤型 MZ 电光调制器,环形腔中加入可调谐滤波器,实现了 2 μm 全光纤化波长可调谐调 Q 脉冲激光器,实验对输出特性进行了分析,泵浦功率固定时单脉冲能量和峰值功率随重复频率的增大而减小;重复频率固定时输出脉冲宽度随着泵浦功率的增大而减小。使用尾纤型电光强度调制器调 Q 的激光器实现了全光纤化,采用可调谐滤波器实现了波长可调谐,激光器结构紧凑,可调谐性能较好,输出脉冲周期稳定。波长在 1882 ~ 1992 nm 间可调,重复频率在 15 kHz ~ 70 kHz 间可调,调制频率为 15 kHz 时得到峰值功率达 5.1 W 的输出脉冲,实现了全光纤化波长可调谐等优点。可调谐性能在光学频谱分析、光学相干层析成像具有良好的应用前景,也为波长可调谐高能量光源的设计拱了一定的借鉴。

参考文献:

[1] Zhang Dayong, Zhagn Kun, Zhu Chen, et al. All-fiber high

peak power narrow pulse width fiber lasers with 63.2 W output [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46 (10): 1234 - 1237. (in Chinese)

张大勇,张昆,朱辰,等. 63.2 W 高功率窄脉宽全光纤脉冲光纤激光器[J]. *激光与红外*, 2016, 46(10): 1234 - 1237.

[2] Janeczek M, Rybak Z, Lipińska A, et al. Local effects of a 1940 nm thulium-doped fiber laser and a 1470 nm diode laser on the pulmonary parenchyma: an experimental study in a Pig model [J]. *Materials* 2021, 14: 5457.

[3] Li Yao, Zhang Kun, Li Zheng, et al. Research progress of high energy nanosecond pulsed fiber lasers [J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(8): 1192 - 1198. (in Chinese)

李尧,张昆,李政,等. 大能量纳秒脉冲光纤激光器研究进展[J]. *激光与红外*, 2022, 52(8): 1192 - 1198.

[4] Boccuzzi K A, Newburgh G A, Marciante J R. Tm/Ho-doped fiber laser systems using coaxial fiber [J]. *Opt. Express* 2019, 27: 27396 - 27408.

[5] Holmen L G, Shardlow P C, Barua P, et al. Tunable holmium-doped fiber laser with multiwatt operation from 2025 nm to 2200 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2019, 44: 4131 - 4134.

[6] Evsikova L G, Goremykin Y A. Determining the atmospheric transmittance for laser wavelengths on an oblique track [J]. *Opt. Technol.*, 2016, 83: 486 - 489.

[7] Traxer O, Sierra A, Corrales M. Which is the best laser for lithotripsy? Thulium fiber laser [J]. *European Urology Open Science*, 2022, 44: 15 - 17.

[8] Tao M, Tao B, Hu Z, et al. Development of a 2 μm Tm-doped fiber laser for hyperspectral absorption spectroscopy applications [J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 32386 - 32394.

[9] Huang Y, Jivraj J, Zhou J, et al. Pulsed and CW adjustable 1942 nm single-mode all-fiber Tm-doped fiber laser system for surgical laser soft tissue ablation applications [J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16674 - 16686.

[10] Pal D, Paul A, Chowdhury S D, et al. Hybrid pumped gain-switched thulium fiber laser at a high repetition rate [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(13): 3546 - 3550.

[11] Liu S L, Dou Z Y, Zhang B, et al. High repetition rate gain-switched thulium-doped fiber laser pumped by 1.6 μm noise-like pulses [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 138: 106856.

[12] Zhang H R, Lin W, Wu D D, et al. Direct generation of 7 W, 360 μJ multi-pulse laser from an ultra-compact all-fiber gain switched Tm³⁺-doped double-clad fiber laser

- [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33(22): 1258 – 1261.
- [13] Cheng Tenghu, Dai Tengfei, Zhang Xiaoying, et al. Passive Q switched laser based on graphene oxide and perovskite composites[J]. Laser & Infrared, 2023, 53(10): 1513 – 1519. (in Chinese)
程腾虎, 戴腾飞, 张晓颖, 等. 基于氧化石墨烯与钙钛矿复合材料的被动调 Q 激光器[J]. 激光与红外, 2023, 53(10): 1513 – 1519.
- [14] Fang S Y, Zhou B L, Guan Z, et al. Compact passively Q-switched single-frequency distributed Bragg reflector fiber laser at 2.0 μm [J]. Applied Optics, 2021, 60(34): 10684 – 10688.
- [15] Chen Kai, Zhu Lianqing, Yao Qifeng, et al. Study on mode-locked fiber laser based on graphene saturable absorber[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(3): 291 – 295. (in Chinese)
陈恺, 祝连庆, 姚齐峰, 等. 基于石墨烯可饱和吸收的锁模光纤激光器研究[J]. 激光与红外, 2017, 47(3): 291 – 295.
- [16] Huang Y J, Liu H L, Chen Y F. High-average-power 2 μm few-cycle optical parametric chirped pulse amplifier at 1 kHz repetition rate [J]. Optics Letters, 2014, 39(22), 6541 – 6544.
- [17] Hanna D C, Percival R M, Smart R G, et al. Efficient and tunable operation of a Tm-doped fibre laser [J]. Opt. Commun, 1990, 75: 283 – 286.
- [18] Guty F, Grisard A, Joly A, et al. Multi-kW peak power acousto-optically tunable thulium-doped fiber laser system [J]. Optics Express, 2015, 23(5): 6754.
- [19] F Li, H Zhu, Y Zhang. High-power widely tunable Q-switched thulium fiberlasers [J]. Laser Phys. Lett., 2015, 12: 95102.
- [20] Samion M Z, Ismail M F, Muhamad A, et al. Tunable passively Q-switched thulium-doped fiber laser operating at 1.9 μm using arrayed waveguide grating(AWG)[J]. Optics Communications, Elsevier, 2016, 380: 195 – 200.