

重复频率可调的全保偏掺镱光纤激光器及高效倍频技术研究

刘亮, 李岗, 郝强, 杨康文*

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093

摘要 实验搭建了重复频率可调的全保偏掺镱光纤激光器,可输出重复频率在 5~20 MHz 内可调的皮秒脉冲光。采用掺杂氧化镁的周期性极化铌酸锂 (PPMgLN) 晶体进行倍频研究,并对比了输出光谱、脉宽和温度相位匹配曲线,在 20、10、5 MHz 的重复频率下,最大转换效率分别为 39.2%、35.3%、31.0%,输出功率分别为 744、600、496 mW。测试了倍频光的稳定性,4 h 内倍频光的相对抖动低至 0.74%。该光源具有输出光束质量高、稳定性好等优点,为高效获得重复频率可调的绿色皮秒脉冲光提供了一种方案。

关键词 光纤激光器; 倍频; 全保偏; 周期性极化铌酸锂; 重复频率可调

中图分类号 O437 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS231167

绿色皮秒脉冲激光在相干反斯托克斯拉曼散射成像^[1-2]、材料微加工^[3-5]等领域具有广泛的应用,特别是在生物医学成像^[6]中,不同重复频率的绿色皮秒脉冲与样品损伤程度、穿透深度和信号质量有直接的关系。因此,高效产生不同重复频率的绿色脉冲光引起了越来越多的关注。光纤激光器可通过腔外选频的方法输出不同重复频率的高功率脉冲光,进而通过二次谐波波技术,即倍频来高效产生不同重复频率的绿色脉冲光。

光学倍频过程中,基频光和倍频光由于波矢失配,在晶体中的传播速度不同,从而会降低倍频转换效率。目前,一种比较可靠的解决技术是准相位匹配 (QPM) 技术^[7]。QPM 技术利用晶体铁电畴周期反转产生的倒格矢去补偿失配的波矢,在避免走离效应的同时使晶体达到高的非线性系数,进而提高倍频转换效率^[8-9]。常见的 QPM 晶体有磷酸钛氧钾 (KTP)、LiNbO₃ 和 LiTaO₃ 等,然而光折变效应的存在严重制约了 QPM 晶体的应用^[10-11]。与上述晶体材料相比,掺杂氧化镁的周期性极化铌酸锂 (PPMgLN) 晶体可在保持高非线性系数的前提下,进一步提升晶体的光折变阈值及损伤阈值,是一种良好的 QPM 倍频器件^[12]。2017 年, Kang 等^[13] 利用具有 125~175 MHz 可调谐拍频的双频激光器倍频 PPMgLN 晶体,获得了调制频率在 125~175 MHz 和 250~350 MHz 两个范围内的绿光,最高转换效率为 14.6%。2018 年, He 等^[14] 利用锁模皮秒激光器倍频 PPMgLN 晶体,获得了脉冲宽度为

15.5 ps 的绿色脉冲光,最高输出功率为 245 mW,对应的转换效率为 27.4%。2022 年, Sundar 等^[15] 通过非线性偏振旋转 (NPR) 锁模的掺镱光纤激光器,利用 20 mm 的 PPMgLN 晶体获得了绿色脉冲光,最高转换效率为 18.7%,且 NPR 锁模方式的出射光偏振态易受环境干扰,从而导致倍频效率降低,甚至失锁^[16]。

为了高效稳定地获得不同重复频率的绿色脉冲光,本文基于全保偏结构,利用非线性放大环形镜锁模 (NALM) 方案,该方案具有锁模稳定、不易受到环境干扰、偏振对比度高等优点,并结合声光调制器 (AOM) 和主振荡功率放大器 (MOPA),搭建了重复频率可调的全保偏掺镱光纤激光器作为基频光光源,结合 PPMgLN 晶体倍频,最终获得不同重复频率的绿色脉冲光,其中转换效率最高达 39.2%,对应的输出功率为 744 mW。

实验装置如图 1 所示,其中: LD1 和 LD2 采用中心波长为 976 nm、最高输出功率为 400 mW 的激光二极管; WDM 为波分复用器; YSF 为长 0.9 m 的单模保偏掺镱光纤; 光纤布拉格光栅 (FBG) 的中心波长和带宽分别为 1030 nm 和 1 nm; PS 为相移器,提供 $\pi/2$ 的非对易性相位差来降低锁模阈值; ISO 为偏振相关光隔离器,用于防止后向传输光影响激光器正常工作。

如图 1(a) 所示,得益于全保偏结构,采用 NALM 方案的振荡器具有锁模稳定、环境适应性强、光路呈现“9”字腔型结构的特点,锁模后通过输出耦合器 (OC)

收稿日期: 2023-06-21; 修回日期: 2023-07-25; 录用日期: 2023-08-07; 网络首发日期: 2023-08-15

基金项目: 国家自然科学基金 (11974248)

通信作者: *kangwenyang@yeah.net

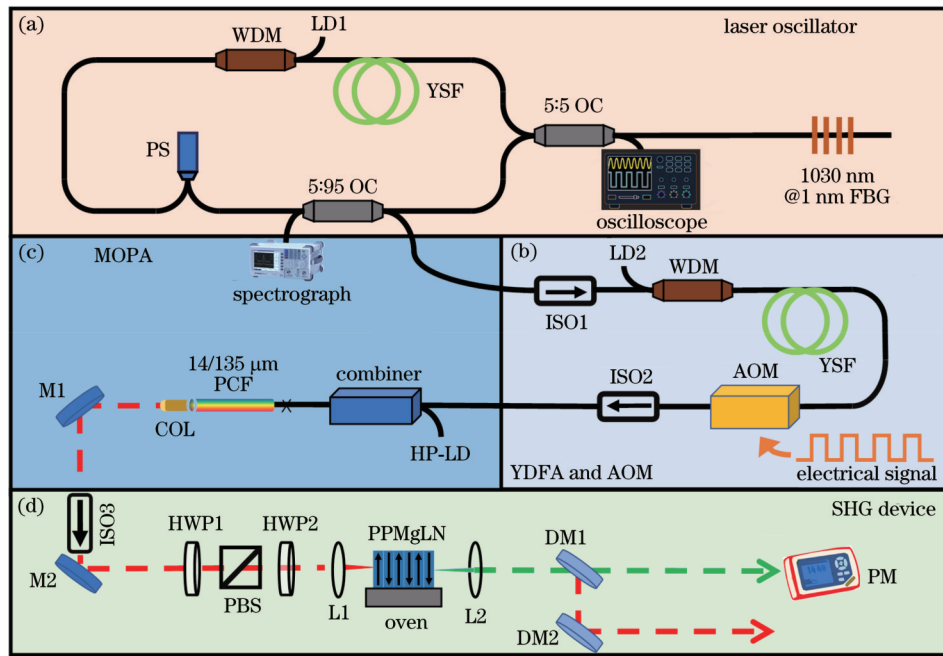


图 1 实验装置。(a)振荡器;(b)掺镱光纤放大器和声光调制器;(c)主振荡功率放大器;(d)倍频装置

Fig. 1 Experimental setup. (a) Laser oscillator; (b) Yb-doped fiber amplifiers and AOM; (c) master oscillator power amplifier; (d) SHG device

实现种子脉冲输出, 剩余的输出端用于监测锁模、观测频谱等信息。图 1(b) 所示为掺镱光纤放大器 (YDFA) 和 AOM, 用于初步提升功率和腔外选频。图 1(c) 所示的 MOPA, 其泵浦源采用高功率激光二极管 (HP-LD), 最高输出功率为 7 W。增益介质采用长度为 0.8 m 的 DC-135/14-PM-YB 型双包层掺镱大模场光子晶体光纤, 纤芯直径为 14 μm , 内包层直径为 135 μm , 有效地提高了光-光转换效率, 同时抑制了光纤中的非线性效应。MOPA 输出的激光脉冲经准直器 (COL) 准直后, 输出束腰直径为 1.68 mm、发散角为 0.78 mrad、光束质量 M^2 因子为 1.15 的空间光, 为倍频提供了高光束质量的高功率基频光。

倍频装置如图 1(d) 所示, 两个半波片 (HWP1、HWP2) 和偏振分光器件 (PBS) 用于调节基频光偏振态, 以满足准相位匹配条件。光束经过两面镀 1030 nm 增透膜、焦距为 50 mm 的透镜 L1 后聚焦到 PPMgLN 晶体, 产生倍频效应。PPMgLN 晶体的反转周期为 6.3 μm , 通光孔径为 2 mm \times 0.5 mm, 通光方向长度为 10 mm。为了减少外部扰动对倍频效率的影响, 将晶体置于控温精度为 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 的温控炉 (oven) 内, 并在底座上加隔热盖以隔绝空气, 同时将温控炉放置在五维调整架上。新输出的倍频光和剩余的基频光由两面镀 515 nm 增透膜、焦距为 70 mm 的透镜 L2 准直后, 使用两面 515/1030 nm 二向色镜的 DM1 和 DM2 将基频光和倍频光分束, 并使用光功率计 (PM) 探测倍频光强度和测试倍频光功率稳定性。

在实验中, 当 LD1 的功率达到 160 mW 时, 振荡器实现锁模自启动, 产生的种子脉冲重复频率为

20 MHz。种子脉冲经 YDFA 和 AOM 后, 通过驱动 AOM, 使基频光重复频率在 5~20 MHz 内可调。MOPA 的 HP-LD 输出功率与最终重复频率为 20、10、5 MHz 的功率转换曲线如图 2(a) 所示, 当 HP-LD 的输出功率为 5.3 W 时, 3 个重复频率下能达到的最大功率分别为 1850、1700、1600 mW, 峰值功率分别为 10.9、20.0、37.6 kW, 对应的光谱图如图 2(b) 所示, 中心波长分别为 1030.59、1031.51、1030.64 nm, 光谱的半峰全宽从进入主放大器前的 0.52 nm 分别展宽到 1.21、1.98、3.29 nm。虽然放大过程中的自相位调制作用导致放大脉冲的光谱展宽, 但是光谱整体宽度仍较窄, 且脉冲放大后输出到自由空间中, 未经历多余的色散介质, 因此测得不同重复频率下的基频光脉宽均为 8.5 ps, 其中 20 MHz 时的自相关曲线如图 2(c) 所示, 其余重复频率时的脉宽基本不变。

在光学倍频中, 通过调节温度和五维调整架来调整晶体的温度和位置, 确定基频光入射到 PPMgLN 晶体的最佳位置, 使其达到最佳相位匹配条件, 输出倍频光功率最高。不同重复频率基频光产生的倍频光功率及倍频效率如图 2(d) 所示, 随着基频光功率的逐渐增加, 不同重复频率下的倍频效率都先快速上升后逐渐向饱和趋势靠拢, 20、10、5 MHz 下分别能产生的最高倍频光功率分别为 744、600、496 mW, 对应的转换效率分别为 39.2%、35.3% 和 31.0%, 对应的单脉冲能量分别为 37.2、60.0、99.2 nJ, 相应产生的倍频光中心波长分别为 515.12、514.73、514.49 nm, 光谱半峰全宽受到晶体接收带宽的限制都为 0.15 nm, 如图 2(e) 所示。同时测得 20 MHz 时倍频光的自相关曲线, 脉

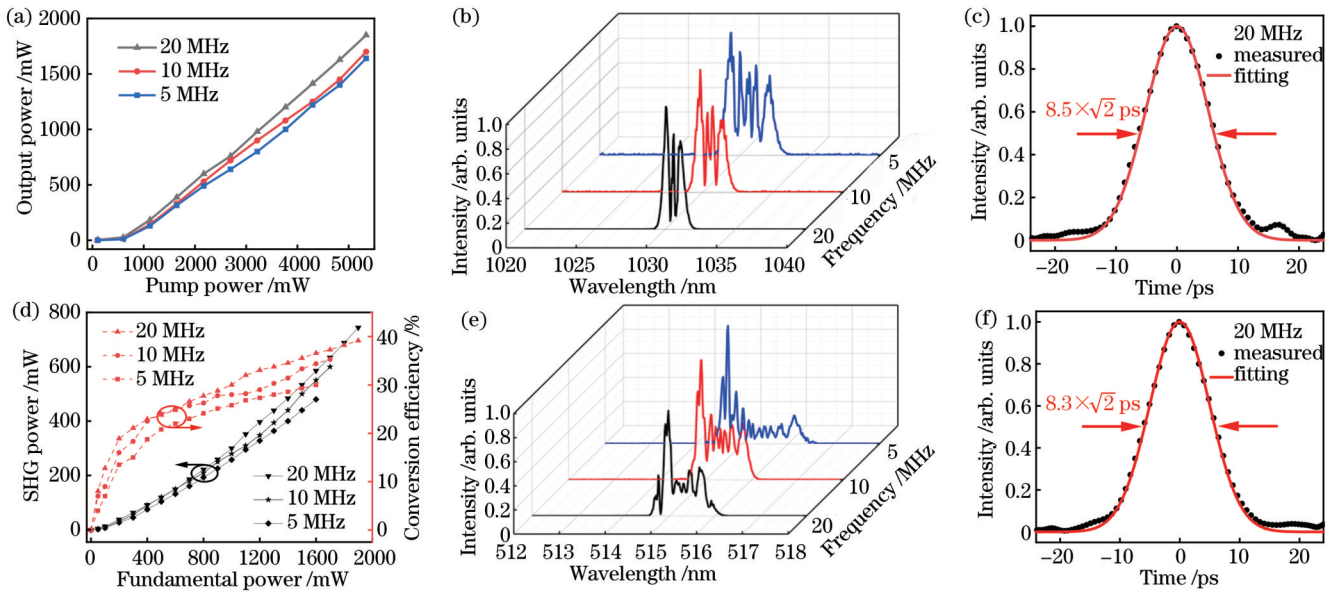


图 2 实验结果。(a)HP-LD的泵浦效率曲线;(b)不同重复频率下的基频光光谱;(c)20 MHz时的基频光脉宽;(d)倍频光功率效率转换曲线;(e)不同重复频率下的倍频光光谱;(f)20 MHz时的倍频光脉宽

Fig. 2 Experimental results. (a) Pumping efficiency curves of HP-LD; (b) spectra of fundamental frequency laser corresponding to different repetition frequencies; (c) pulse width of fundamental frequency laser at 20 MHz; (d) SHG power efficiency conversion curves; (e) SHG spectra at different repetition frequencies; (f) SHG pulse width at 20 MHz

冲宽度为 8.3 ps, 如图 2(f) 所示, 其余重复频率下脉冲宽度区别不大。

此外, 测试了晶体温度与倍频光功率的关系, 结果如图 3(a) 所示, 测得 20、10、5 MHz 重复频率下晶体的相位匹配温度分别为 42.5、37.5、32.5 °C, 随着温度逐渐偏离相位匹配温度, 倍频光功率呈下降趋势。由于改变晶体温度可在一定程度上对准相位匹配波长进行调谐, 实验测试了基频光重复频率为 20 MHz 时, 晶体在 27.0、42.5、53.5、60.0 °C 下的倍频光光谱, 如图 3(b) 所示。其中在 27.0 °C 和 53.5 °C 下, 倍频效率降至 2/3, 60 °C 下的倍频效率降至 1/2。可见, 不

同温度下倍频光光谱的半峰全宽都为 0.15 nm, 但是中心波长不同, 分别为 515.09、515.12、515.79、515.85 nm, 因此在很宽的温度范围内, 基频光都能有效倍频。为测试该系统的长期功率稳定性, 实验记录了基频光连续 4 h 内在 20 MHz、42.5 °C 下产生绿色脉冲激光的功率波动情况, 如图 3(c) 所示, 其输出功率均值为 733 mW, 功率波动均方根(RMS)误差仅为 0.74%, 此过程中未发现晶体光折变损伤。图 3(c) 中的插图为在准直透镜 L2 后 1 m 处测得的倍频光光斑图像, 光斑半径为 1.1 mm, 圆度为 93.2%, M^2 因子为 1.22。

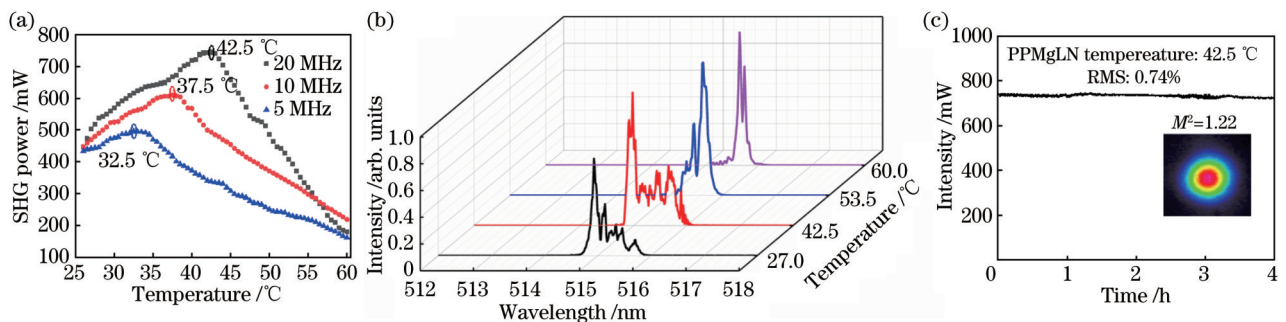


图 3 晶体温度对倍频的影响和倍频光功率稳定性。(a)不同重复频率下倍频光功率与晶体温度的关系;(b)20 MHz时不同温度下的倍频光光谱图;(c)倍频光功率稳定性及光斑(插图)

Fig. 3 Effect of crystal temperature on frequency doubling and SHG power stability. (a) Relationship between SHG power and crystal temperature at different repetition frequencies of fundamental frequency laser; (b) spectra of SHG laser at 20 MHz at different temperatures; (c) SHG power stability and facula (inset)

随着基频光重复频率的降低, 虽然峰值功率大幅提升, 但是光谱也有一定展宽和劣化, 受到晶体光谱接

收带宽的限制, 仅有小范围内的光谱能够有效转换成倍频光, 因此峰值功率虽然提升, 但转换效率反而降

低。此外,受到主放大增益光纤和 HP-LD 最大泵浦功率的限制,基频光的输出功率相对较低,因此在图 2 (d)中也没有出现转换效率饱和的现象,预计更换高功率的泵浦源或纤芯直径更大的增益光纤可获得更高平均功率和峰值功率的基频光,在不损伤晶体的情况下,有望进一步提升转换效率。

综上所述,实验验证了基于全保偏掺镱光纤激光器的高效倍频方案,并分析了重复频率、基频光功率和晶体温度对倍频效率的影响规律,利用 PPMgLN 晶体获得了不同重复频率的绿色皮秒脉冲光,最大功率为 744 mW,对应的转换效率高达 39.2%。所提方案结构简单、输出绿光功率稳定度高,为掺镱光纤激光器产生不同重复频率的绿色脉冲光提供了有益参考。

参 考 文 献

- [1] Zhao X D, Baudisch M, Beutler M, et al. Tunable picosecond optical parametric amplifier pumped by 1 ps pulses at 1 μm for coherent anti-Stokes Raman scattering[J]. Optics Express, 2022, 30(19): 33850-33859.
- [2] Yang K W, Wu J M, Ao J P, et al. Generation of broadband parabolic pulses based on a pre-chirper free, core-pumped nonlinear fiber amplifier for coherent anti-Stokes Raman imaging [J]. Optics Express, 2022, 30(5): 7636-7646.
- [3] Hauschwitz P, Stoklasa B, Kuchařik J, et al. Micromachining of invar with 784 beams using 1.3 ps laser source at 515 nm[J]. Materials, 2020, 13(13): 2962.
- [4] Kudryashov S I, Smirnov N A, Gakovic B, et al. Dependence of the two-photon absorption coefficient of steel on the pulse duration during its ablation by femto- and picosecond laser pulses [J]. JETP Letters, 2019, 110(2): 107-110.
- [5] 周远航, 张健, 冯爱新, 等. 皮秒绿激光修整青铜基金刚石砂轮损伤规律与机制[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 0602116. Zhou Y H, Zhang J, Feng A X, et al. Damage law and mechanism of bronze-based diamond grinding wheel sharpening with picosecond green laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 0602116.
- [6] Fu Y, Wang H F, Shi R Y, et al. Characterization of photodamage in coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy[J]. Optics Express, 2006, 14(9): 3942-3951.
- [7] 杨占军, 郝强, 汤成, 等. 全保偏掺镱光纤皮秒脉冲及高效率倍频技术研究[J]. 中国激光, 2021, 48(13): 1315003. Yang Z J, Hao Q, Tang C, et al. Picosecond pulse and high efficiency frequency doubling based on all-polarization-maintaining Er-doped fibers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(13): 1315003.
- [8] Guo W, Chen H X, Zhang X B, et al. Broadband second-harmonic generation in a tapered PPLN waveguide[J]. Optoelectronics Letters, 2020, 16(4): 252-255.
- [9] 吴嘉瑞, 吕志强, 陆星, 等. 基于准相位匹配的掺镱飞秒光纤激光器倍频特性研究[J]. 中国激光, 2018, 45(7): 0701001. Wu J R, Lü Z Q, Lu X, et al. Characteristics of second harmonic generation in erbium doped femtosecond fiber lasers based on quasi phase matching[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 0701001.
- [10] 苏梦琪, 尤阳, 全昭, 等. 高效率单通倍频实现 610 W 连续波单模绿光输出[J]. 中国激光, 2021, 48(13): 1315002. Su M Q, You Y, Quan Z, et al. 610-W continuous-wave single-mode green laser output based on highly efficient single-pass frequency doubling[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(13): 1315002.
- [11] 韦丽娟, 曹剑, 张庆茂, 等. 基于窄线宽光栅的光纤激光器倍频技术[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 1914010. Wei L J, Cao J, Zhang Q M, et al. Frequency doubling of fiber laser based on narrow linewidth grating[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1914010.
- [12] Galutskiy V V, Stroganova E V, Shmargilov S A, et al. Frequency conversion in compositionally graded PPLN crystals [J]. Quantum Electronics, 2014, 44(1): 30-33.
- [13] Kang Y, Yang S H, Brunel M, et al. Second-harmonic generation of a dual-frequency laser in a MgO:PPLN crystal[J]. Applied Optics, 2017, 56(11): 2968-2972.
- [14] He C J, Yu H J, Zhang J Y, et al. High efficiency single-pass SHG of low power CWML and QML laser in an MgO:PPLN [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 106: 197-201.
- [15] Sundar S, Prabhakar A. Frequency doubling in three laser regimes using nonlinear polarization rotation laser[J]. Proceedings of SPIE, 2022, 11981: 1198117.
- [16] Yu B H, Hao Q, Tang C, et al. Femtosecond green light generation using a MgO-doped periodically poled lithium niobate crystal pumped by a Yb-doped fiber laser[J]. Applied Sciences, 2022, 12(3): 1391.

All-Polarization-Maintaining Yb-Doped Fiber Lasers with Adjustable Repetition Frequency and Efficient Frequency Doubling

Liu Liang, Li Gang, Hao Qiang, Yang Kangwen*

School of Optical Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract

Objective Green picosecond pulse laser has a wide range of applications in coherent anti-Stokes Raman scattering imaging, material micromachining, and other fields. Especially in biomedical imaging, green picosecond pulses with different repetition frequencies are directly related to sample damage, penetration depth, and signal quality. Therefore, it is meaningful to study the efficient generation of green pulse lasers with different repetition frequencies.

Methods The nonlinear amplification loop mirror (NALM) mode-locked resonant cavity is used as the seed pulse. After

a fiber pre-amplifier, an acousto-optic modulator (AOM) is used to change the repetition frequency outside the optical resonant cavity. Then, a master oscillator power amplifier (MOPA) scheme is used to obtain a high-power infrared laser with different repetition frequencies. After that, a green pulsed laser with different repetition frequencies is generated by second harmonic technology (SHG) in a frequency doubling quasi-phase-matched (QPM) periodically poled lithium niobate (PPLN) crystal.

Results and Discussions An all-polarization-maintaining ytterbium-doped fiber laser with an adjustable repetition frequency is built in the experiment, which can output a picosecond pulse laser with an adjustable repetition frequency of 5–20 MHz. The frequency doubling of MgO-doped periodically poled lithium niobate (PPMgLN) crystal is studied. At the repetition frequencies of 20, 10, and 5 MHz, the corresponding maximum conversion efficiencies are 39.2%, 35.3%, and 31.0%, respectively, corresponding to output powers of 744, 600, and 496 mW, respectively, as shown in Fig. 2 (d). The output spectra [Figs. 2(b), (e)], pulse widths [Figs. 2(c), (f)], and temperature phase matching curve [Fig. 3(a)] are compared. Finally, the stability and beam profile of the frequency doubling laser are tested. The relative jitter of the output power for the green laser is as low as 0.74% within four hours, as shown in Fig. 3(c).

Conclusions In this paper, an efficient frequency doubling scheme based on an all-polarization-maintaining ytterbium-doped fiber laser with adjustable repetition frequency is verified, and the effects of repetition frequency, fundamental frequency optical power, and crystal temperature on frequency doubling efficiency are tested. A green picosecond pulse laser with different repetition frequencies is obtained by using PPMgLN crystal. The highest conversion efficiency is 39.2%, and the corresponding highest average power of the green laser is 744 mW. The measured root mean square (RMS) of frequency doubling optical power fluctuation is 0.74% within four hours. The proposed scheme has a simple structure and high stability. It provides a useful reference for the efficient generation of green pulsed lasers from high-power Yb-doped fiber lasers with different repetition frequencies.

Key words fiber lasers; frequency doubling; all-polarization-maintaining; periodically poled lithium niobate; adjustable repetition frequency