

掺 Tm 光纤 MOPA 准相位匹配单程倍频的单频激光器

张鹏泉¹, 杜铁钧^{1*}, 史屹君²

(1. 杭州电子科技大学 电子信息学院, 浙江 杭州 310018;
2. 天津可宏振星科技有限公司, 天津 300192)

摘要: 为获得 0.9 μm 近红外波段连续波单频激光输出, 用 50 mm 长的 PPLN 晶体对掺 Tm 光纤激光 MOPA 的连续波 1 925.08 nm 单频激光输出进行单程倍频, 通过聚焦参数和准相位匹配温度优化, 在 43.4 W 基频光功率实现了最高 9.07 W 的 962.5 nm 二次谐波输出, 转换效率达到 20.9%。二次谐波为单纵模运转, 水平和垂直方向光束质量因子分别为 1.36 和 1.52。实验中研究了聚焦因子和相位匹配温度对倍频转换效率的影响, 并讨论了聚焦条件和准相位匹配温度带宽之间的相互关系。实验结果表明: Tm 光纤激光准相位匹配单程倍频是获得 0.9 μm 波段连续波单频激光输出的有效方法。

关键词: 单频激光器; 连续波激光器; 准相位匹配; 单程倍频; 掺铥光纤激光器; 周期极化铌酸锂

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200112

Single-frequency laser based on single-pass QPM frequency doubling of Tm-doped fiber MOPA

Zhang Pengquan¹, Du Tiejun^{1*}, Shi Yijun²

(1. School of Electronics and Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;
2. Tianjin Bright Star Technology Co., LTD, Tianjin 300192, China)

Abstract: In order to obtain a 0.9 μm near-infrared continuous-wave single-frequency laser output, a 50 mm long PPLN crystal was used to perform single-pass frequency doubling of the continuous-wave 1 925.08 nm single-frequency laser output of the Tm-doped fiber MOPA, and the temperature was matched by focusing parameters and quasi-phase optimized to achieve 96.95 nm second harmonic output up to 9.07 W at a fundamental optical power of 43.4 W, with a conversion efficiency of 20.9%. The second harmonic was in single longitudinal mode with M^2 factors of 1.36 and 1.52 on x and y directions, respectively. The influence of focusing parameter and temperature on the conversion efficiency was experimentally investigated. The relationship between the focusing parameter and phase matching temperature acceptance was also discussed. The experimental results show that Tm-doped fiber laser quasi-phase matching one-way frequency doubling is an effective method to obtain 0.9 μm band continuous wave single frequency laser output.

Key words: single-frequency laser; continuous-wave laser; quasi-phase-matching; single-pass SHG; Tm-doped fiber laser; PPLN

收稿日期: 2020-03-05; 修订日期: 2020-04-20

基金项目: 国家自然科学基金 (61501153)

作者简介: 张鹏泉 (1976-), 男, 正高级工程师, 硕士, 主要从事微信号探测方面的研究。Email: zhpq1999@163.com

通讯作者: 杜铁钧 (1978-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事微波器件方面的研究。Email: dutiejun@hdu.edu.cn

0 引言

900~1 000 nm 波段的近红外激光在光谱、遥感等领域具有广泛而重要的应用背景,也是产生蓝-青波段激光所需的基频光,尤其光谱线宽窄、相干距离长的连续波单频激光光源对于精细光谱、原子物理等方面的应用非常关键^[1]。该波段激光光源常用的实现方法包括掺 Nd³⁺准三能级固体激光器、钛宝石激光器以及掺 Yb³⁺光纤激光器等。受重吸收损耗所限,准三能级 Nd:YAG、Nd:YVO₄ 等激光器难以获得较高的输出功率,且严重的热效应也对单频环形腔的设计实现带来很大困难^[2-3]。钛宝石激光器尽管能够实现该波段可调谐的单频激光输出,但由于偏离其发射峰中心较远因而效率较低,同时受热效应所限,其连续波单频输出功率在瓦量级附近^[4]。Yb³⁺光纤激光器有 0.9 μm 单频激光输出的报道,但类似 Nd³⁺准三能级固体激光器,其输出功率受重吸收损耗和 1 μm 发射峰的严重限制^[5],尽管可以通过光子晶体光纤等设计在一定程度上加以克服^[6],但方法较为繁复,也无法实现单频运转。另外,绿光泵浦的光学参量振荡器也是产生该波段连续波单频激光输出的常用方法之一,但输出功率受非线性晶体对泵浦光的吸收等方面因素限制,系统也相对复杂^[7]。

掺 Tm³⁺光纤激光主振放大系统(MOPA)结合准相位匹配(QPM)倍频是获得 0.9 μm 波段激光的另一种有效方法。光纤激光 MOPA 能够提供高光束质量的连续波基频光,周期极化晶体可实现对连续波基频光的高效率单程倍频,结构简单稳定。2011 年,西班牙 ICFO 的 K. Devi 用周期极化铌酸锂(PPLN)晶体对 40 W 连续波 1 940 nm 光纤激光单程倍频,得到 13.1 W 的 970 nm 输出,转换效率 32.7%^[8];2016 年, M. Ganija 报道用 PPLN 晶体对 12 W 连续波 Tm 光纤激

光倍频,得到 2.3 W 975 nm 输出^[9];脉冲 Tm 光纤激光器的 QPM 高效倍频以及四倍频得到蓝光输出等方面研究也有相关报道^[10-11]。除 Tm³⁺光纤激光倍频得到 0.9 μm 输出外,对 1 μm 和 1.5 μm 光纤激光系统倍频的研究也相对较多,如 G. Samanta 用周期极化钽酸锂(PPLT)晶体对 Yb 光纤 MOPA 倍频得到 13 W 单频 532 nm 绿光^[12]、S. San’ee 用 PPLN 晶体对 1560 nm 光纤 MOPA 倍频得到 11.4 W 单频 780 nm 红光等^[13]。国内主要相关报道包括华南理工大学和中山大学分别开展对掺单频 Yb 光纤激光器和脉冲掺 Tm 光纤激光器进行 QPM 单程倍频研究,实现了较高的转换效率和数瓦级的倍频光输出^[10, 14]。然而,在连续波单频 Tm 光纤激光倍频实现近红外单频激光输出方面,国内外均未见相关报道。文中,为获得 0.9 μm 波段的近红外单频输出,采用 PPLN 晶体对自行搭建的单频掺 Tm 光纤激光 MOPA 的 1925 nm 输出进行单程倍频,43.4 W 基频光功率下 962.5 nm 二次谐波最高输出功率 9.07 W,转换效率 20.9%,并对基频光聚焦参量、相位匹配温度和允许温度之间的关系以及对转换效率的影响进行了实验研究。

1 实验装置

掺 Tm 光纤 MOPA 准相位匹配单程倍频 962.5 nm 单频激光器实验装置光路如图 1 所示。基频激光为波长 1 925.08 nm 的光纤激光 MOPA 产生,25 mW 单频种子光经三级包层泵浦放大至 45 W,输出尾纤为 25/400 μm 的保偏大模场光纤,最高输出功率时水平和垂直方向上的光束质量因子 M² 均小于 1.1,偏振消光比大于 20 dB,外差法测得光谱线宽为 78 kHz。基频激光首先经焦距透镜 L1 聚焦并由 λ/2 波片将偏振方向调整为垂直方向后进入倍频晶体,实验中透镜 L1 分别使用了焦距 30 mm 和 50 mm 的平凸透镜以得

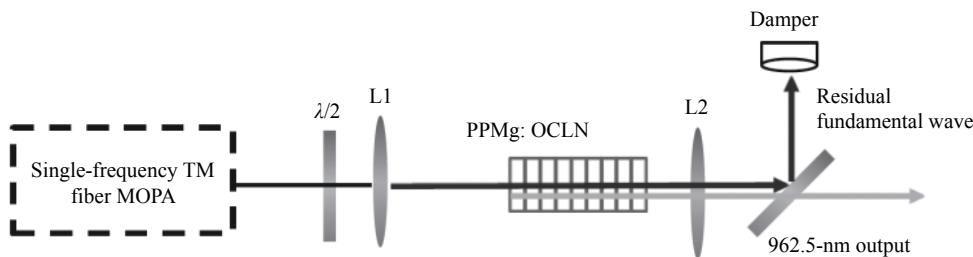


图 1 Tm 光纤 MOPA QPM 单程倍频 962.5 nm 单频激光器实验装置示意图

Fig.1 Schematic of the QPM single-pass frequency-doubled Tm-fiber MOPA at 962.5 nm

到不同的基频光光斑半径, L1 和 $\lambda/2$ 波片均镀有 1 920~1 960 nm 防反膜以减小损耗 ($R<0.5\%$), 实际入射倍频晶体的最高 1 925 nm 基频激光功率约 43.4 W。

实验所用倍频晶体为 HC Photonics 公司生产的周期极化掺氧化镁同成分铌酸锂晶体 (Periodically-poled MgO-doped congruent LiNbO₃, PPMg:OCLN) 晶体, 尺寸 50 mm×12.3 mm×1 mm, 包含 28.4~33.6 μm 、间隔 0.6 μm 的 10 个极化周期通道, 每个通道宽度 1 mm, 相隔 0.7 mm。晶体端面镀有 1 925~2 300 nm 和 960~1 150 nm 防反膜 ($R<0.5\%$), 实验中选用极化周期 $\Lambda=28.4 \mu\text{m}$ 对基频激光进行倍频, 对应理论准相位匹配温度 123 $^{\circ}\text{C}$ ^[15], 用精度 $\pm 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的加热炉对晶体进行热管理。经过倍频晶体后产生的 962.5 nm 激光和 1 925 nm 基频光经透镜 L2 重新汇聚后被双色镜 M1 分离, 分别用功率计 (表头 Ophir VEGA、探头 FL250A-BB-35) 测量功率。透镜 L2 焦距 100 mm, 镀有 950~1 000、1 920~1 960 nm 增透膜, 双色镜 M1 为平镜, 镀有 950~1 000 nm 增透、1 920~1 960 nm 高反膜。

2 实验结果与讨论

首先, 使用不同焦距的聚焦透镜 L1 并改变透镜与光纤输出端的相对位置来调节 PPLN 晶体中的基频光光斑大小, 研究聚焦参数对倍频转换效率的影响。根据 Boyd 等人提出的 $\xi\sim 2.84$ 时有最高转换效率的理论预期^[16], 分别选取基频光束腰半径 w_0 为 42 μm 、51 μm 和 61 μm 进行实验, 对应聚焦因子 ξ 分别为 4.05、2.83 和 1.93, 为避免晶体损伤, 未尝试更大的聚焦参数。最高基频光功率 43.4 W 下, 最高转换效率 20.9% 出现在 $w_0=50.8 \mu\text{m}$, 即 $\xi=2.80$ 时, 而 ξ 值为 4.08 和 1.93 时的转换效率较低, 分别为 16.0% 和 18.2%, 与理论预期相符。图 2 给出聚焦因子 $\xi=2.80$ 时 962.5 nm 二次谐波功率和转换效率随 1925 nm 基频光功率的变化曲线。图中可见二次谐波功率随基频光功率的增加而上升, 且上升的斜率有增大的趋势, 在入射基频光功率 43.4 W 时最高输出功率 9.07 W; 对应转换效率随基频光功率的增加而上升的趋势在基频光功率超过 20 W 后逐渐趋缓, 而非高斯光束倍频效率公式中所预期的随基频光功率线性增加的趋势, 其原因主要在于较高的转效率对基频光消耗以及二次谐波功率较高后发生的逆转换过程。

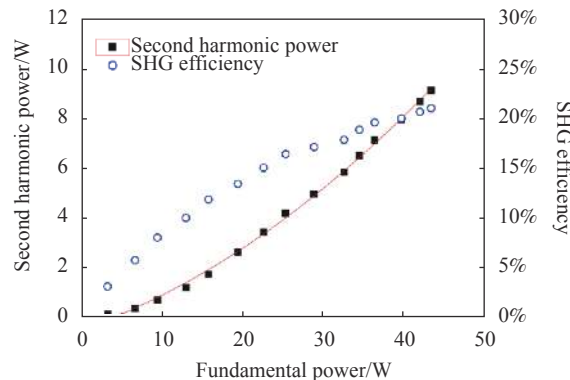


图 2 $\xi=2.80$ 时 962.5 nm 倍频光输出功率和转换效率随 1 925 nm 基频光功率的变化关系

Fig.2 962.5 nm second harmonic power and conversion efficiency as functions of 1 925nm fundamental power with $\xi=2.80$

在聚焦因子 $\xi=2.80$ 、基频光功率 8.2 W 条件下测量 PPLN 晶体倍频的温度特性。晶体实际最佳工作温度为 128.8 $^{\circ}\text{C}$, 与根据 MgO:LN 晶体的 Sellmeier 方程得到的 $\sim 123 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的准相位匹配温度略有出入, 可能由于晶体制作过程中的误差以及基频光聚焦和晶体热效应等因素所致。图 3 给出归一化的二次谐波功率随晶体温度的变化关系, 准相位匹配温度的 3 dB 带宽 $\sim 4.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 略宽于 2.9 $^{\circ}\text{C}$ 的理论值, 原因主要在于理论计算中采用平面波近似, 而实际高斯光束的聚焦使得部分基频光倾斜入射倍频晶体, 使得等效的极化周期与正入射情况下有所不同。

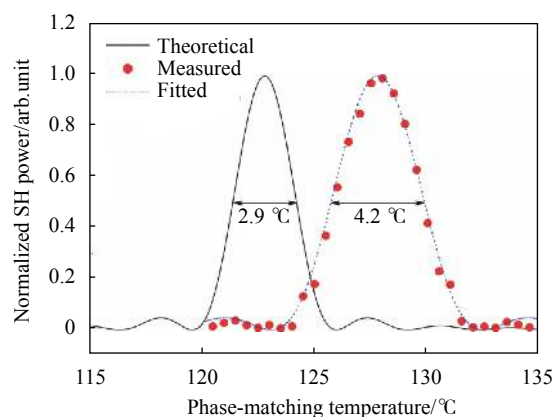


图 3 $\xi=2.80$ 时归一化倍频效率随温度变化关系的理论和实验曲线

Fig.3 Theoretical and experimental normalized SHG efficiency as functions of crystal temperature with $\xi=2.80$

通过刀口法对经过透镜 L2 聚焦后的 962.5 nm 倍频光光束质量进行测量, 最高输出功率 9.07 W 时水平和垂直方向上的光束质量因子 M^2 分别为 1.36 和

1.52, 如图 4(a) 所示。扫描共焦干涉仪 Thorlabs SA200-8B 对二次谐波输出进行扫描, 波形显示二次谐波为单纵模, 如图 4(b) 所示。扫描干涉仪的分辨率不足以测量这一量级的光谱线宽, 而笔者所用的外差法线宽测量系统中调制器的工作带宽没有覆盖这一波长, 因而未能对线宽进行进一步精确测量。根据基频光 78 kHz 的光谱线宽可估算 962.5 nm 二次谐波线宽不超过 150 kHz。

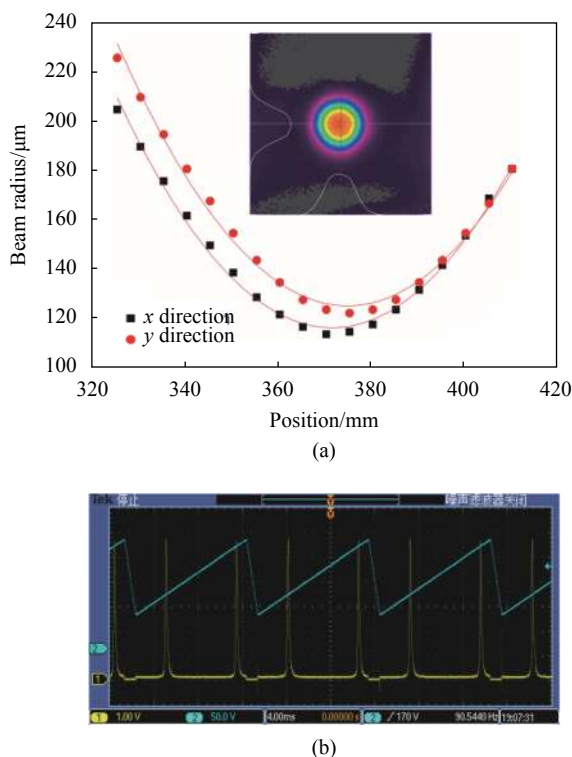


图 4 962.5 nm 倍频光光束质量和单纵模测量(插图为光斑能量分布)
Fig.4 M^2 measurement and the single-longitudinal-mode operation of the 962.5 nm second-harmonic(Inset is the beam profile)

3 结 论

用 PPLN 晶体对 1925.08 nm 连续波掺 Tm 单频光纤激光 MOPA 实现了高效的准相位匹配单次通过倍频, 得到 962.5 nm 单频近红外输出。实验研究了基频光聚焦对转换效率的影响, 并测量了准相位匹配的允许温度带宽。在聚焦因子 $\zeta=2.80$ 时, 43.4 W 基频光功率下倍频光最高输出功率 9.07 W, 转换效率 20.9%, 而过大或过小的聚焦均不利于实现高效倍频。962.5 nm 单纵模倍频光最高功率时水平和垂直方向上的光束质量因子分别为 1.36 和 1.52。掺 Tm 光纤激光 MOPA

准相位匹配单程倍频是获得 0.9 μm 波段连续波单频输出的有效技术途径, 后续笔者将进一步对 0.9 μm 二次谐波进行倍频以获得连续波单频蓝光输出。

参 考 文 献:

- [1] Heumann E, Bar S, Rademaker K, et al. Semiconductor-laser-pumped high-power upconversion laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(6): 061108-061110.
- [2] Yan R, Yu X, Chen D, et al. The thermal effect in diode-end-pumped continuous-wave 914-nm Nd: YVO₄ laser [J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21(2): 350-356.
- [3] Wang Yaoting, Zhou Qianqian, Li Yuanji, et al. All-solid-state CW Nd: YAG blue laser of single frequency operation with 770 mW output power [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(7): 1714-1718. (in Chinese)
王垚廷, 周倩倩, 李渊骥, 等. 输出 770 mW 的全固态连续单频蓝光激光器[J]. *中国激光*, 2009, 36(7): 1714-1718.
- [4] Li F, Shi Z, Li Y, et al. Tunable single-frequency intracavity frequency-doubled Ti: Sapphire laser around 461 nm [J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28(12): 124205.
- [5] Zhu X, Zhu G, Shi W, et al. 976 nm single-polarization single-frequency ytterbium-doped phosphate fiber amplifiers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(14): 1365-1368.
- [6] Röser F, Jauregui C, Limpert J, et al. 94 W 980 nm high brightness Yb-doped fiber laser [J]. *Optics Express*, 2008, 16(22): 17310-17318.
- [7] Samanta G K, Fayaz G R, Ebrahimzadeh M. 1.59 W, single-frequency, continuous-wave optical parametric oscillator based on MgO: sPPLT [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(17): 2623-2625.
- [8] Devi K, Kumar S C, Ebrahimzadeh M. 13.1 W, high-beam-quality, narrow-linewidth continuous-wave fiber-based source at 970 nm [J]. *Optics Express*, 2011, 19(12): 11631-11637.
- [9] Ganija M, Simakov N, Hemming A, et al. Second harmonic generation using a monolithic, linearly polarized thulium doped fiber laser[C]// ACOFT, 2016.
- [10] Zhang B, Jiao Z, Wang B. Efficient second-harmonic generation from polarized thulium-doped fiber laser with periodically poled MgO: LiNbO₃ [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 69: 60-64.
- [11] Creeden D, Setzler S D. 486 nm blue laser operating at 500 kHz pulse repetition frequency[C]// SPIE LASE, 2016, 11: 9728-9729.
- [12] Samanta G K, Kumar S C, Devi K, et al. Multicrystal, continuous-wave, single-pass second-harmonic generation with 56% efficiency [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(20): 3513-3515.

- [13] Sané S S, Bennetts S, Debs J E, et al. 11 W narrow linewidth laser source at 780 nm for laser cooling and manipulation of Rubidium [J]. *Optics Express*, 2012, 20(8): 8915–8919.
- [14] Yang Changsheng. Study on high-performance high-power kHz linewidth single-frequency fiber laser and its application in frequency doubling[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2015. (in Chinese)
- 杨昌盛. 高性能大功率kHz线宽单频光纤激光器及其倍频应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [15] Smith A V. Software SNLO version 67[DB/OL]. <http://www.as-photonics.com/products/snlo>
- [16] Boyd G D, Kleinman D A. Parametric interaction of focused Gaussian light beams [J]. *Journal of Applied Physics*, 1968, 39(8): 3597–3639.