

低噪声连续单频 532 nm/1.06 μm 双波长激光器

高英豪¹, 李渊骥^{1,2}, 冯晋霞^{1,2}, 张宽收^{1,2*}

¹山西大学光电研究所,量子光学与光量子器件国家重点实验室,山西太原 030006;

²山西大学极端光学协同创新中心,山西太原 030006

摘要 研制出一台全固态低噪声连续单频 Nd:YVO₄-LBO 双波长激光器,通过优化三硼酸锂(LBO)的匹配温度,获得了波长为 1.06 μm 的激光功率为 3.8 W、波长为 532 nm 的激光功率为 7.8 W 的连续单频双波长激光输出,并有效降低双波长激光的强度噪声和相位噪声。实测的 1.06 μm 和 532 nm 波长激光的强度噪声均在分析频率大于 3.5 MHz 时达到散粒噪声极限,相位噪声均在分析频率大于 5 MHz 时达到散粒噪声极限。当采用 Pound-Drever-Hall 锁腔技术锁定激光器的腔长时,1.06 μm 波长激光在 1 h 内的频率漂移小于 ± 0.8 MHz。实测的 1.06 μm 和 532 nm 波长激光在 5 h 内的功率波动分别小于 $\pm 0.63\%$ 和 $\pm 0.47\%$,光束质量因子分别为 1.04 和 1.12。

关键词 激光器;连续单频;频率漂移;强度噪声;相位噪声

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0401005

Low Noise Continuous-Wave Single-Frequency Dual-Wavelength Laser Operating at 532 nm and 1.06 μm

Gao Yinghao¹, Li Yuanji^{1,2}, Feng Jinxia^{1,2}, Zhang Kuanshou^{1,2*}

¹State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

²Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

Abstract A kind of all-solid-state Nd:YVO₄-LBO dual-wavelength laser with low noise and continuous wave (CW) single frequency is developed. By optimizing the matching temperature of LBO crystals, a CW single-frequency dual-wavelength laser with 1.06 μm output power of 3.8 W and 532 nm output power of 7.8 W is realized. The intensity and phase noises of this dual-wavelength laser are also reduced. The measured intensity noises of the 1.06 μm and 532 nm lasers reach the shot noise limit (SNL) when the analysis frequency is above 3.5 MHz, and the measured phase noises reach the SNL when the analysis frequency is above 5 MHz. When the Pound-Drever-Hall cavity-locking technique is used for the stabilization of laser cavity length, the frequency drift of 1.06 μm laser is less than ± 0.8 MHz. The measured power fluctuations of the 1.06 μm and 532 nm lasers within 5 hours are less than $\pm 0.63\%$ and $\pm 0.47\%$, and the beam quality factors are 1.04 and 1.12, respectively.

Key words lasers; continuous-wave single-frequency; frequency drift; intensity noise; phase noise

OCIS codes 140.3425; 140.3570; 140.3580; 140.3530

1 引 言

高功率、低噪声的连续单频稳频双波长激光器在高精度相干测距、合成孔径相干激光雷达、量子科学研究等领域具有广泛的应用^[1-8]。在激光外差干涉测距中,采用双波长单频稳频激光器作为发射源,可以有效、实时地补偿在采用单波长激光进行干涉

测量的过程中由大气折射率的不均匀分布及随机起伏等因素导致的误差,从而降低测距的不确定度^[9]。此外,采用低噪声连续单频激光器作为激光发射源,可以有效改善干涉测量的信噪比,从而提高测距分辨率^[10]。

目前,主要通过单向行波腔选模技术和内腔倍频技术来制作高功率连续单频双波长激光器。2014

收稿日期: 2019-01-24; 修回日期: 2019-02-05; 录用日期: 2019-02-15

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405203)

* E-mail: kuanshou@sxu.edu.cn

年,Zhang等^[11]采用波长为888 nm的激光二极管端面抽运低掺杂Nd:YVO₄晶体来降低晶体热效应,采用内腔倍频的四镜环形腔设计实现了波长为1.06 μm的激光功率为33.7 W、波长为532 nm的激光功率为1.3 W的连续单频双波长输出。2015年,Amili等^[12]利用短腔法结合内腔标准具技术研制出一台1.06 μm波长的激光输出功率为0.1 W、532 nm波长的激光输出功率为0.6 mW的连续单频激光器;通过引入较弱的非线性转化,可降低波长为1.06 μm的激光弛豫振荡噪声。2016年,Jin等^[13]通过反馈控制三硼酸锂(LBO)晶体的温度,提高了连续单频双波长激光运转的稳定性。但是在大功率运转条件下,关于非线性转化效率等实验参数对波长分别为1.06 μm和532 nm的激光强度和相位噪声的影响鲜有报道。

本文利用激光二极管端面抽运、环形谐振腔设计、单向行波选模和内腔倍频技术研制出一台高功率连续单频Nd:YVO₄-LBO双波长激光器,在此基础上通过控制倍频晶体LBO的温度来降低输出基频和倍频激光的强度和相位噪声,并利用自制的高精度法布里-珀罗(F-P)腔作为频率标准,对激光器的频率进行锁定,获得了长期稳定且无跳模运转的低噪声连续单频稳频激光器。

2 实验装置

图1为高功率低噪声连续单频稳频Nd:YVO₄-LBO双波长激光器的实验装置图。抽运源采用光纤耦合输出的激光二极管(LD; LIMO-A 1294, LIMO公司,德国)。激光二极管的中心波长为808 nm,最大输出功率为60 W,光纤芯径为400 μm。激光二极管出射的抽运光经过由准直透镜、偏振分束棱镜、半波片以及两个全同的聚焦透镜组成的望远镜系统之后,分为两束功率近似相等的s偏振(光线的偏振矢量垂直于光束传播平面)光,并从激光晶体的两个端面入射。沿着a轴(单轴激光晶体的光轴之一)将Nd:YVO₄晶体切割成尺寸为3 mm×3 mm×20 mm的块体,其中Nd离子的掺杂原子数分数为0.2%。Nd:YVO₄晶体的两个端面均镀了波长分别为808 nm和1.06 μm的减反膜(反射率 $R_{1.06 \mu\text{m} \& 808 \text{ nm}} < 0.25\%$),其中一个切角为1.5°的端面用来抑制σ偏振(光线的偏振矢量垂直于单轴激光晶体的主光轴)激光的起振和消除激光晶体的标准具效应^[14]。环形谐振腔由腔镜M₁~M₆构成,将激光器的腔长设置为490 mm,以保证高

功率抽运下激光器可在稳定区域运转。其中:平面输入耦合镜M₁和M₂分别镀入射激光与镜面法线的夹角为45°的1.06 μm高反膜和808 nm高透膜($R_{1.06 \mu\text{m}} > 99.8\%$,透射率 $T_{808 \text{ nm}} > 95\%$);平面镜M₃和M₆分别镀入射激光与镜面法线的夹角为45°的1.06 μm高反膜;M₄和M₅为曲率半径 $r = 100 \text{ mm}$ 的平凹镜,M₄镀入射激光与镜面法线的夹角为0°的1.06 μm高反膜,并将其固定在压电陶瓷上以控制激光器腔长,M₅为输出耦合镜,镀入射激光与镜面法线的夹角为0°的1.06 μm部分反射膜($T_{1.06 \mu\text{m}} = 1.3\%$)。通过在环形谐振腔内插入由铽石榴石晶体(TGG)和半波片构成的光学单向器,使激光器单向行波运转。倍频晶体选取损伤阈值高、温度接受范围大的I类非临界相位匹配的LBO晶体,晶体尺寸为3 mm×3 mm×18 mm,晶体两个端面均镀1.06 μm和532 nm减反膜($R_{532 \text{ nm} \& 1.06 \mu\text{m}} < 0.25\%$),倍频晶体放置在2个凹面镜的中间位置。实验中,使用控温精度为0.003 °C的自制温度控制仪分别对激光晶体和倍频晶体的温度进行精确控制。Nd:YVO₄晶体的温度控制为26 °C,本实验中通过控制LBO晶体的温度来优化激光器的输出功率和噪声特性。

利用一个双色分束镜(DBS)将激光器输出的基频和倍频光分开,其中:基频光通过半波片、偏振分束器和2个分束镜后被分为4束;倍频光通过分束镜后被分为2束。将功率较高的一束基频光和一束倍频光分别注入功率计PM₁和PM₂(LabMax-TOP,Coherent公司,美国)来测量输出功率并记录其长期波动情况。功率较弱的3束基频光中,一束基频光注入一个扫描F-P干涉仪(F-P₁,自由光谱范围为375 MHz,精细度为350)来监视其纵模的模式并记录其频率漂移情况;一束基频光注入作为频率标准的F-P腔(F-P₂,自由光谱范围为375 MHz,精细度为1100),对激光器的频率进行锁定;剩余的一束波长为1.06 μm的基频光和一束波长为532 nm的倍频光经双色分束镜耦合后注入由一个环形分析腔和两对自制的共模抑制比达40 dB的平衡零拍探测器(BHD1、BHD2)组成的噪声分析系统,以实现基频和倍频激光的强度噪声、相位噪声的同步测量。环形分析腔由输入输出耦合镜M₁₀($R_{1.06 \mu\text{m} \& 532 \text{ nm}} = 96\%$)、高反镜M₁₁($R_{1.06 \mu\text{m} \& 532 \text{ nm-2}} > 99.8\%$)和一个固定在压电陶瓷上的曲率半径为1000 mm的高反镜M₁₂($R_{1.06 \mu\text{m} \& 532 \text{ nm-2}} > 99.8\%$)构成,分析腔的腔长为1810 mm。根据失谐分析腔噪声转化理论^[15],

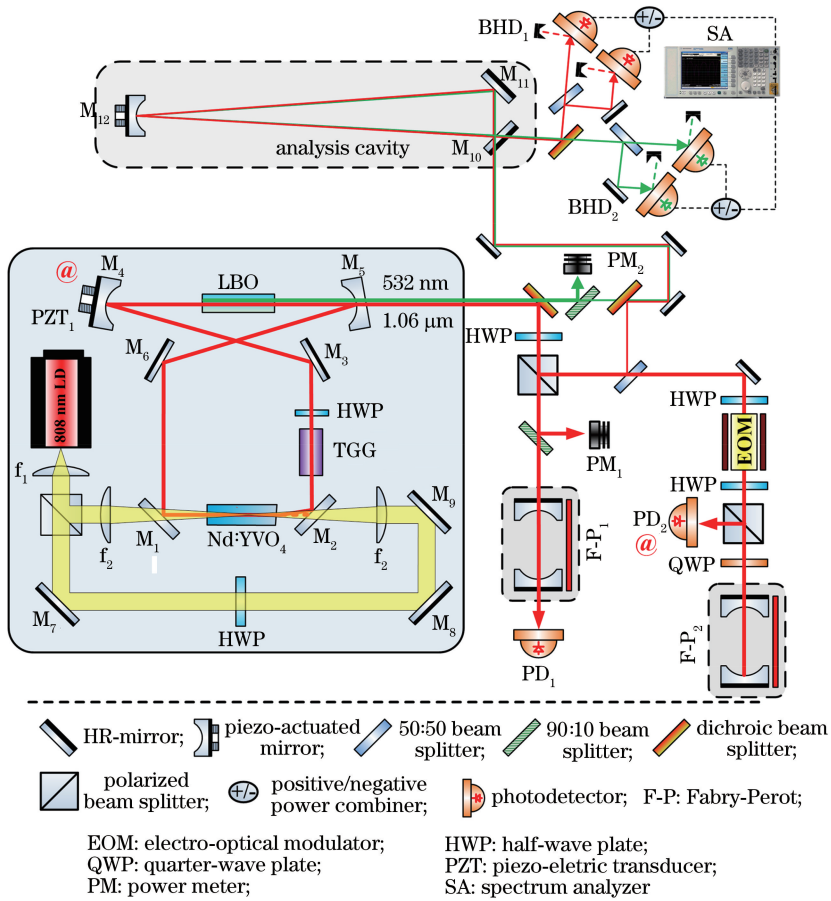


图 1 连续单频双波长激光器实验装置图

Fig. 1 Schematic of experimental setup of continuous-wave single-frequency dual-wavelength laser

分析腔输出场的强度噪声可表示为一个输入光场的强度噪声和相位噪声的线性叠加函数,其中的两个叠加因子与腔的失谐量有关。在固定分析频率下扫描分析腔的腔长时,可观察到输出光场的强度噪声谱在腔共振位置附近出现“M”型突起。“M”型噪声突起的顶部略微偏离腔共振位置,测得的输出场强度噪声完全由输入场的相位噪声转化而来。

3 实验结果

为获得无跳模运转的连续单频双波长激光输出,首先研究了非线性转化系数对 $1.06 \mu\text{m}$ 和 532 nm 双波长激光器的主振荡模与非振荡模的净增益,即增益与包含线性损耗及非线性损耗在内的总损耗之差的影响。根据理论模型^[16],当注入的抽运光功率为 40 W 时,通过将倍频晶体的温度控制在 $157.9 \sim 163.9 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内,使得非线性转化系数高于 $3.3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{W}$,即可保证主振荡模起振,同时非振荡模由于达不到阈值条件而无法起振。图 2(a)所示为实验测量的波长分别为 $1.06 \mu\text{m}$ 和

532 nm 的激光输出功率随 LBO 晶体温度的变化关系,其中竖虚线表示理论计算得到的无跳模连续单频运转的非线性晶体临界温度($163.9 \text{ }^\circ\text{C}$)。当 LBO 晶体温度高于该临界温度时,激光器为多纵模运转。当 LBO 晶体温度在 $157.9 \sim 163.9 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围时,实验测量的扫描干涉仪 F-P₁ 的透射曲线如图 2(b)所示,激光器可实现无跳模运转的连续单频激光输出。图 2(a)中竖点划线表示 LBO 晶体的最佳相位匹配温度($160.88 \text{ }^\circ\text{C}$)。在此相位匹配温度下,激光器输出波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 的基频光,其功率为 3.8 W ,同时输出波长为 532 nm 的倍频光,其功率为 8.0 W 。可以看到,在设计的激光谐振腔中 LBO 晶体的倍频相位匹配温度范围较宽,当 LBO 晶体的温度在 $(160.88 \pm 0.3) \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内变化时, 532 nm 和 $1.06 \mu\text{m}$ 波长的激光输出功率变化范围分别小于 0.4 W 和 0.2 W 。当 LBO 晶体温度从 $160.88 \text{ }^\circ\text{C}$ 升至 $163.88 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,连续单频 $1.06 \mu\text{m}$ 波长的激光输出功率从 3.8 W 增加至 5.7 W ,而 532 nm 波长的激光输出功率则从 8 W 降低至 0.6 W 。

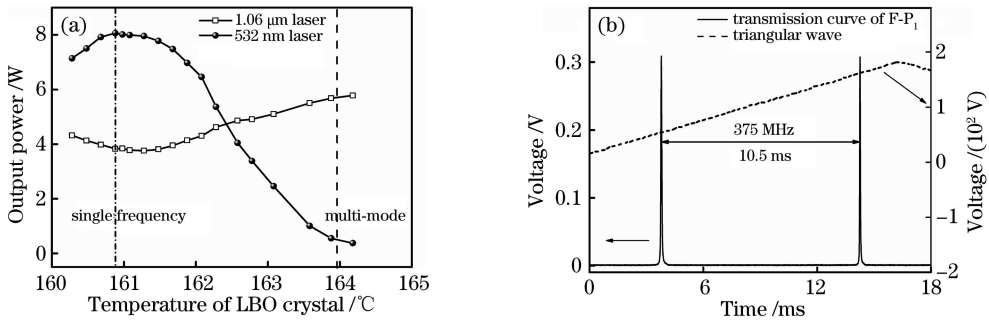


图 2 双波长激光器的输出功率和纵模模式。(a)输出功率随 LBO 晶体温度的变化曲线;(b)扫描 F-P 干涉仪的透射曲线

Fig. 2 Output power and longitudinal modes of dual-wavelength laser. (a) Output power versus temperature of LBO crystal; (b) transmittance curve of scanning F-P interferometer

图 3 所示为利用频谱分析仪(SA; N9010A, Agilent 公司, 美国)在不同的 LBO 晶体温度下测得的 1.06 μm 和 532 nm 波长激光的强度噪声(用实线表示)和相位噪声(用散点图表示)特性。其中, 强度噪声曲线的频率 f 测量范围为 0.1~5 MHz; 相

位噪声的频率测量范围为 1~5 MHz, 测量间隔为 0.25 MHz。为了精确测量低频处的激光强度噪声特性, 频谱分析仪的分辨率带宽(RBW)和视频带宽(VBW)分别设置为 100 kHz 和 100 Hz, 扫描周期设置为 500 ms。

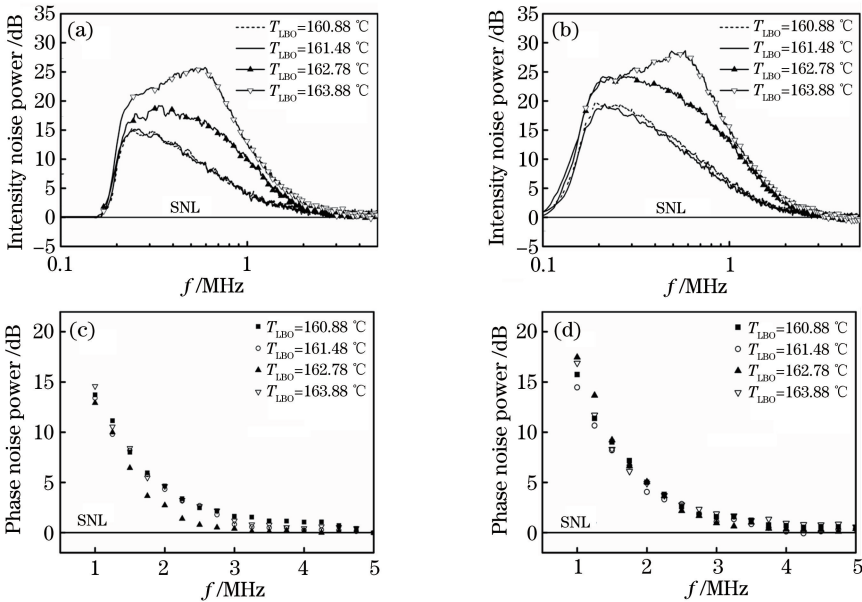


图 3 不同波长输出激光的强度噪声(实线)和相位噪声(散点)。(a)(c) 1.06 μm;(b)(d) 532 nm

Fig. 3 Measured intensity noise (line) and phase noise (scatter) of output lasers with different wavelengths.

(a)(c) 1.06 μm; (b)(d) 532 nm

从图 3 可以看到, 1.06 μm 和 532 nm 波长激光的强度噪声均在分析频率大于 3.5 MHz 的范围达到散粒噪声极限(SNL), 但在分析频率小于 3.5 MHz 的范围内存在一个弛豫振荡峰。当非线性转化效率较低时, 弛豫振荡峰的分析频率约为 570 kHz, 随着非线性转化效率的提高, 弛豫振荡峰的分析频率向低频方向移动, 对应的强度噪声也相应降低。当 LBO 晶体温度降低到 LBO 晶体的最佳相位匹配温度(160.88 °C)时, 弛豫振荡峰的分析频率约为 250 kHz, 其峰值强度噪声比 LBO 晶体温度为 163.88 °C 时降低了 10.5 dB。

与强度噪声相比, 在较低的分析频率范围内, 1.06 μm 和 532 nm 波长激光的相位噪声相对较高, 但均在分析频率大于 5 MHz 的范围内达到散粒噪声极限。为了更直观地比较不同 LBO 晶体温度下 1.06 μm 和 532 nm 波长激光在弛豫振荡峰附近的噪声特性, 图 4 给出了 1.06 μm 和 532 nm 波长激光在分析频率为 1 MHz 和 2 MHz 处的强度噪声和相位噪声随 LBO 晶体温度的变化关系。从图 4 可以看出, 当 LBO 晶体温度为 161.48 °C 时, 1.06 μm 和 532 nm 波长激光的强度噪声和相位噪声均比较低。

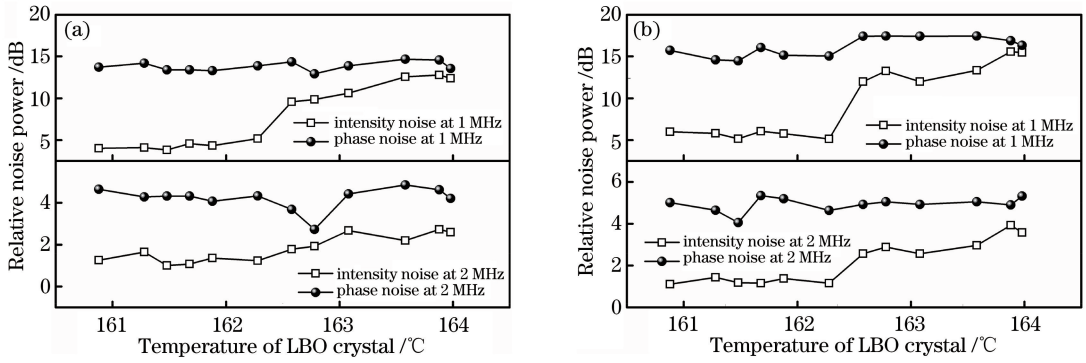


图 4 当分析频率为 1 MHz 和 2 MHz 时,不同波长激光的强度噪声和相位噪声随 LBO 晶体温度的变化关系。

(a) 1.06 μm ; (b) 532 nm

Fig. 4 Measured intensity and phase noises versus temperature of LBO crystal for lasers with different wavelengths when analysis frequencies are 1 MHz and 2 MHz. (a) 1.06 μm ; (b) 532 nm

当注入抽运光功率为 40 W、LBO 晶体温度为 161.48 $^{\circ}\text{C}$ 时,激光器输出的 1.06 μm 和 532 nm 波长激光的功率分别为 3.8 W 和 7.8 W。为提高激光器输出激光的频率稳定性,将共焦 F-P₂ 腔的共振频率作为频率标准,利用 Pound-Drever-Hall 锁腔技术锁定激光器的腔长。为了减小频率标准自身误差导致的频率漂移,采用圆柱筒状殷钢材料作为共焦 F-P₂ 腔的腔体,并将其紧密嵌套在外形为长方体的紫铜块之中。在此基础上,利用自制的控温精度为 0.003 $^{\circ}\text{C}$ 的控温仪驱动 6 个热电制冷器(TEC,尺寸

为 40 mm \times 40 mm) 模块对整个 F-P₂ 腔体进行控温,实际测得腔体在 1 h 内的温度漂移小于 ± 0.006 $^{\circ}\text{C}$ 。图 5 所示为持续测量 1 h 得到的自由运转激光和频率锁定后 1.06 μm 激光的频率漂移。可以看到:激光器自由运转时,1.06 μm 激光在 1 h 内的频率漂移为 ± 4.3 MHz;当激光器频率锁定后,1.06 μm 激光在 1 h 内的频率稳定性优于 ± 0.8 MHz。可以计算出,当激光器频率锁定后,532 nm 激光在 1 h 内的频率稳定性优于 ± 1.6 MHz。

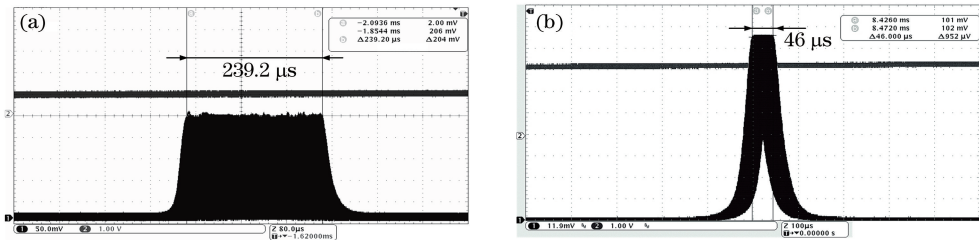


图 5 1.06 μm 激光的频率漂移。(a) 自由运转;(b) 频率锁定后

Fig. 5 Frequency drift of 1.06 μm laser. (a) Free running; (b) after frequency stabilization

图 6 所示为连续单频双波长激光器自由运转时,连续测量 5 h 得到的波长分别为 1.06 μm 和 532 nm 输出激光的功率波动曲线。可以看出:1.06 μm 波长激光在 5 h 内的功率波动小于 $\pm 0.63\%$;532 nm 波长激光在 5 h 内的功率波动小于 $\pm 0.47\%$ 。由于激光器实现了无跳模连续单频运转,当激光器频率锁定后,1.06 μm 和 532 nm 波长激光在 5 h 内的功率波动与激光器自由运转时基本相同。图 7 所示为采用光束质量分析仪(M2-200-BB, Spiricon 公司,德国; CCD: GRAS-20S4M-C)测量得到的 1.06 μm 和 532 nm 波长激光的光束质量。可以看到,实测的 1.06 μm 波长激光在水平和

竖直方向上的光束质量因子分别为 1.04 和 1.05,实测的 532 nm 波长激光在水平和竖直方向上的光束质量因子 M_x^2 、 M_y^2 分别为 1.04 和 1.12。

4 结 论

研制出一台低噪声、高功率连续单频稳频双波长激光器。采用双端面偏振抽运减小激光晶体的热效应,利用六镜环形单向行波腔设计进行模式选择,并控制 LBO 晶体温度来优化引入的非线性损耗。当注入抽运光的功率为 40 W 时,获得了波长为 1.06 μm 的激光功率为 3.8 W、波长为 532 nm 的激光功率为 7.8 W 的无跳模连续单频双波长激光输

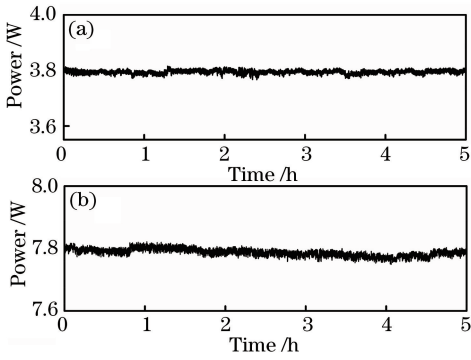


图 6 5 h 内不同波长的输出激光的功率起伏。
(a) 1.06 μm ; (b) 532 nm

Fig. 6 Power fluctuations of output lasers with different wavelengths within 5 hours. (a) 1.06 μm ; (b) 532 nm

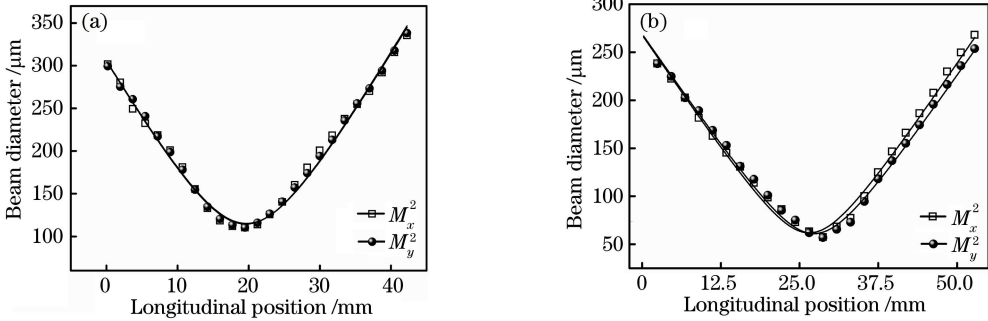


图 7 不同波长的输出激光的光束质量。(a) 1.06 μm ; (b) 532 nm

Fig. 7 Beam qualities of output lasers with different wavelengths. (a) 1.06 μm ; (b) 532 nm

参 考 文 献

[1] Jang Y S, Wang G C, Hyun S, *et al.* Comb-referenced laser distance interferometer for industrial nanotechnology [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 31770.

[2] Huang L. Research of optimization performance and high accuracy measurement technology for single frequency laser interferometer [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013.
黄雷. 单频激光干涉系统性能优化及高精度测量技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2013.

[3] Jang Y S, Kim S W. Compensation of the refractive index of air in laser interferometer for distance measurement[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2017, 18(12): 1881-1890.

[4] Chen H F, Tang L, Shi Z Y, *et al.* ZEMAX simulation method for laser tracing system based on dual-wavelength method for compensating air refractive index[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0104009.

出。在此基础上,通过研究非线性转化效率对双波长激光的强度噪声和相位噪声的影响,对 LBO 晶体的温度进行了实验优化。当 LBO 晶体的温度控制在 161.48 $^{\circ}\text{C}$ 时,1.06 μm 和 532 nm 波长激光的强度噪声均在分析频率大于 3.5 MHz 的范围内达到散粒噪声极限,相位噪声均在分析频率大于 5 MHz 的范围内达到散粒噪声极限。将自制的高精细度共焦 F-P 腔作为频率标准,实现了双波长低噪声激光器的频率锁定,实测的 1.06 μm 波长激光在 1 h 内的频率漂移小于 ± 0.8 MHz。实测的 1.06 μm 和 532 nm 波长激光在 5 h 内的功率波动分别小于 $\pm 0.63\%$ 和 $\pm 0.47\%$ 。输出的 1.06 μm 和 532 nm 波长激光的光束质量因子分别为 1.04 和 1.12。

陈洪芳, 汤亮, 石照耀, 等. 基于双波长法补偿空气折射率的激光追踪系统 ZEMAX 仿真方法[J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0104009.

[5] Long J X, Li G, Yang B, *et al.* Progress in injection-seeded all-solid-state single-frequency pulse laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 090001.
龙江雄, 李刚, 杨彬, 等. 种子注入的全固态单频脉冲激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(9): 090001.

[6] Lu J, Ding J Y, He Y, *et al.* High repetition rate sub-nanosecond dual-wavelength solid-state laser for airborne lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 082804.
陆俊, 丁建永, 贺岩, 等. 机载激光雷达用高重复频率亚纳秒双波长全固态激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(8): 082804.

[7] Lian Y M, Xie C D, Peng K C. Continuous variable multipartite entanglement and optical implementations of quantum communication networks [J]. *New Journal of Physics*, 2007, 9(9): 314.

[8] Vahlbruch H, Chelkowski S, Danzmann K, *et al.* Quantum engineering of squeezed states for quantum communication and metrology [J]. *New Journal of*

- Physics, 2007, 9(10): 371.
- [9] Kang H J, Chun B J, Jang Y S, *et al.* Real-time compensation of the refractive index of air in distance measurement[J]. Optics Express, 2015, 23(20): 26377-26385.
- [10] Fu H J, Wu G L, Hu P C, *et al.* Highly thermal-stable heterodyne interferometer with minimized periodic nonlinearity[J]. Applied Optics, 2018, 57(6): 1463-1467.
- [11] Zhang C W, Lu H D, Yin Q W, *et al.* Continuous-wave single-frequency laser with dual wavelength at 1064 and 532 nm[J]. Applied Optics, 2014, 53(28): 6371-6374.
- [12] Amili A E, Alouini M. Noise reduction in solid-state lasers using a SHG-based buffer reservoir[J]. Optics Letters, 2015, 40(7): 1149-1152.
- [13] Jin P X, Lu H D, Su J, *et al.* Scheme for improving laser stability via feedback control of intracavity nonlinear loss[J]. Applied Optics, 2016, 55(13): 3478-3482.
- [14] Zheng Y H, Li F Q, Wang Y J, *et al.* High-stability single-frequency green laser with a wedge Nd:YVO₄ as a polarizing beam splitter [J]. Optics Communications, 2010, 283(2): 309-312.
- [15] Zhang Y, Zhang T C, Li T Y, *et al.* Phase noise measurement by F-P cavity[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(4): 465-471.
张云, 张天才, 李廷鱼, 等. 法布里-珀罗腔对相位噪声测量的影响[J]. 光学学报, 2000, 20(4): 465-471.
- [16] Ma Y Y, Li Y J, Feng J X, *et al.* High-power stable continuous-wave single-longitudinal-mode Nd:YVO₄ laser at 1342 nm[J]. Optics Express, 2018, 26(2): 1538-1546.