

MgO:PPLN 级联倍频实现高转换效率 强度调制 532 nm 激光

李坤¹, 杨苏辉^{1,2*}, 王欣¹, 李卓¹, 张金英¹

¹北京理工大学光电学院, 北京 100081;

²精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室, 北京 100081

摘要 利用单块非平面环形腔单频激光器和声光移频器, 获得了输出功率为 10 mW 的 1064 nm 双频激光, 拍频调谐范围为 125~175 MHz。采用光纤功率放大器可将 1064 nm 双频激光的功率放大到 10 W。为了提高倍频效率, 采用两块长度为 15 mm 的 MgO:PPLN 晶体, 获得功率为 2.26 W 的强度调制绿色激光, 最高倍频效率为 24.5%。当基频光的频差为 150 MHz 时, 得到的绿光拍频分别为 150 MHz 和 300 MHz, 2 min 拍频稳定性分别是 2.7 Hz 和 5.3 Hz。

关键词 激光器; 双频; 倍频; 强度调制

中图分类号 O437.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0614003

Highly Efficient Intensity-Modulated 532-nm Laser Based on Second Harmonic Generation with MgO:PPLN Cascade

Li Kun¹, Yang Suhui^{1,2*}, Wang Xin¹, Li Zhuo¹, Zhang Jinying¹

¹School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

²Beijing Key Laboratory for Precision Optoelectronics Measurement Instrument and Technology,
Beijing 100081, China

Abstract A 10-mW 1064-nm dual-frequency laser is designed herein by using a single-frequency laser with a single non-planar ring oscillator and an acousto-optic modulator. The range of the beat frequency is 125-175 MHz. The 1064-nm dual-frequency laser is amplified to a power of 10 W by a fiber optic power amplifier. The 2.26 W intensity-modulated green laser, which corresponds to the maximum frequency-doubling efficiency of 24.5%, is obtained to improve the second harmonic generation efficiency by using two 15-mm-long MgO:PPLN crystals. The obtained green beat frequencies are 150 MHz and 300 MHz when the frequency difference of the fundamental light is 150 MHz, and they had a 2-min beat frequency stability of 2.7 Hz and 5.3 Hz, respectively.

Key words lasers; dual-frequency; frequency doubling; intensity modulation

OCIS codes 140.3460; 140.3515; 190.2620

1 引 言

470~540 nm 是海水的光传输窗口波段, 在海洋探测领域具有重要的应用^[1]。海水中强烈的后向散射和前向散射使探测系统的信噪比降低, 分辨率下降。载波调制激光雷达技术是利用目标及水体散射对调制信号不同的响应将信号与散射噪声分离, 提高信噪比^[2-3]。将发射波光强进行高频调制(调制频率大于 100 MHz)^[4], 目标反射的光子可以保持

其强度调制信息, 而在发射源与目标之间, 不同距离处水体散射的光子之间会产生干涉相消, 导致高频调制信号消失。由目标反射的高频信号和由水体散射的低频信号可以通过在接收端加以调制频率为中心的窄带滤波器进行分离, 提高回波信噪比。然而载波调制技术用于水下探测受限于光源的发展, 目前应用于水下探测的载波调制绿光最大功率在几百毫瓦量级, 只能进行一些水池中的原理实验, 与实际应用的功率水平相差甚远^[5]。因此, 射频强度调制

收稿日期: 2019-01-08; 修回日期: 2019-01-29; 录用日期: 2019-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(61741502, 61835001, 61875011)

* E-mail: suhuiyang@bit.edu.cn

绿光是载波调制水下激光雷达系统发展的关键。实现载波调制的方法包括电光调制和拍频方法。电光调制在高频调制方面技术成熟,但是调制深度不够大,不支持大功率光信号的调制。拍频调制采用两束具有一定频差的激光拍频实现激光的调制,通过改变双频激光的功率比可以调节激光的调制深度,两束激光的功率相同时,调制深度为 1。通过双光束干涉方法实现强度调制不受限于调制器性能(高压、低损伤阈值等),只要提高两束激光的功率便可以 直接获得大功率、深调制度的强度调制光,其性能具有很大的上升空间。1064 nm 调制激光经过光纤放大后再倍频(SHG),获得强度调制绿光。

由于绿光波段缺乏合适的增益介质,波长在 1 μm 附近的近红外激光倍频是获得绿光的主要方法。准相位匹配在倍频中具有重要的应用,通过选择合适的周期极化晶体可以实现任意波长的相位匹配。2011 年,西班牙巴塞罗那光子科学研究所用单频光纤激光器为基频光源,将 3 个长度为 30 mm 的周期极化钽酸锂(PPLT)晶体串联,功率为 10 W 的 1064 nm 基频光获得了输出功率为 5.6 W 的绿光,倍频效率为 56%^[6]。2013 年,郝丽云等^[7]以线偏振、连续波光纤激光器为基频光源,10 mm 长的氧化镁掺杂的周期极化铌酸锂(MgO:PPLN)为倍频晶体,功率为 8.05 W 的 1064 nm 基频光可输出功率为 1.437 W 的 532 nm 绿色激光,倍频效率为 17.84%。2018 年,刘恂等^[8]对双 KTiOPO₄(KTP)晶体倍频的理论和实验进行研究,双晶体之间距离为 13 cm 时,可获得能量为 8.62 mJ 的绿色激光。尽管近红外激光倍频获得绿色激光的技术较为成熟^[9-11],但是双频调制激光倍频产生强度调制绿色激光的研究鲜有报道。

本文采用两块 MgO:PPLN 晶体串联的结构,当基频功率为 9.2 W 时,获得功率为 2.26 W 的绿色激光,最高倍频效率为 24.5%。在载波调制水下激光雷达的应用中,拍频的稳定性直接影响探测精度,对倍频后的调制频率稳定性进行测量,当基频光的拍频为 150 MHz 时,倍频光的拍频分别为 150 MHz 和 300 MHz,拍频稳定性均达到了赫兹量级。

2 理论分析

2.1 双晶体串联倍频效率分析

光学倍频是指频率为 ω_1 的光经过非线性介质后获得频率为 $\omega_2 = 2\omega_1$ 的光的现象,是三波相互作用的特殊情况。在小功率条件下,近似认为基频光功

率 P_ω 不变,高斯光束通过倍频晶体后输出功率为^[12]

$$P_{2\omega} = \eta b_1 P_\omega = |A_1|^2, \quad (1)$$

$$\eta = \frac{16\pi^2 d_{\text{eff}}^2 l h}{n_\omega n_{2\omega} c \epsilon_0 \lambda_\omega^3} P_\omega, \quad (2)$$

式中: η 为系数; A_1 为振幅; d_{eff} 为倍频晶体的有效非线性系数; n_ω 、 $n_{2\omega}$ 为基频光和倍频光在晶体中的折射率; c 为真空中光的传播速度; ϵ_0 为介电常数; λ_ω 为基频光波长; l 为倍频晶体的长度; h 为 Boyd-Kleinman 参数,理想聚焦条件下 $h(\xi = 2.84) = 1.068$ 。由于基频光的光束质量、晶体对激光的吸收以及相位失配等因素的影响,实际倍频功率往往低于理论值,因此引入损耗参数 b_1 , $0 \leq b_1 \leq 1$ 。

当基频光通过两块倍频晶体时,第二块倍频晶体产生的倍频光振幅 $A_2 = \sqrt{\eta b_2} P_\omega$,其中 b_2 为第二块倍频晶体的损耗参数。总倍频光的振幅为

$$A_D = A_1 \exp(i\phi) + A_2, \quad (3)$$

式中: ϕ 为两块倍频晶体产生的倍频光的相位差。基频光和倍频光在空气中传播时会产生 27.4 ($^\circ$)/cm 的相位差,在凹面镜反射时产生的相位差与凹面镜的表面镀膜材料有关^[13-15]。因此,通过调节两块倍频晶体之间的距离,当 $\phi = 2n\pi$, $n = 0, 1, 2, \dots$ 时,总倍频光振幅最大,输出功率为

$$P_D = |A_D|^2 = \frac{16\pi^2 d_{\text{eff}}^2 l h}{n_\omega n_{2\omega} c \epsilon_0 \lambda_\omega^3} (\sqrt{b_1} + \sqrt{b_2})^2 P_\omega^2. \quad (4)$$

2.2 双频激光倍频

倍频晶体的光谱接收带宽在纳米量级,远大于双频激光的频率差,因此双频激光倍频可采用单频激光倍频的表达式。双频基频光的电场可以表示为

$$E(t) = E_1(t) + E_2(t) =$$

$$A_1 \exp[i(\omega_1 t + \varphi_1)] + A_2 \exp[i(\omega_2 t + \varphi_2)], \quad (5)$$

式中: A_1 、 A_2 、 ω_1 、 ω_2 、 φ_1 、 φ_2 分别为双频激光两频率光的振幅、角频率和初始相位; E_1 、 E_2 分别为双频激光两频率光的电场; t 为时间。

基频光的光功率为

$$P_\omega(t) = E(t) \cdot E(t)^* = \{A_1 \exp[i(\omega_1 t + \varphi_1)] + A_2 \exp[i(\omega_2 t + \varphi_2)]\} \{A_1 \exp[-i(\omega_1 t + \varphi_1)] + A_2 \exp[-i(\omega_2 t + \varphi_2)]\} = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)], \quad (6)$$

式中: $*$ 代表求共轭。

由倍频光功率公式可知:

$$P_{2\omega}(t) \propto [P_\omega(t)]^2 = (A_1^2 + A_2^2)^2 + 2A_1^2 A_2^2 + 4A_1 A_2 (A_1^2 + A_2^2) \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)] + 2A_1^2 A_2^2 \cos[2(\omega_1 - \omega_2)t + 2(\varphi_1 - \varphi_2)]. \quad (7)$$

拍频为 $\omega_1 - \omega_2$ 的双频源经过倍频后, 具有 $\omega_1 - \omega_2$ 、 $2(\omega_1 - \omega_2)$ 两个拍频, 拍频的强度比为

$$R = \frac{4A_1A_2(A_1^2 + A_2^2)}{2A_1^2A_2^2} = \frac{2(A_1^2 + A_2^2)}{A_1A_2} \geq 4. \quad (8)$$

通过双频倍频, 可以产生强度调制的绿光, 其调制频率基本可以保持基频光调制频率的稳定性。除此之外, 还会产生一个二倍拍频的频谱, 通过调节双频激光的功率比, 可以改变两个拍频的强度比。在水下探测激光雷达的应用中, 使用窄带滤波器进行回波信号分离, 为了提高信噪比, 降低二倍拍频的强度, 需要适当减小两个频率激光的功率比, 降低拍频调制深度。因此, 实际应用中要综合考虑双频激光的调制深度和回波信号的信噪比, 选择合适的双频

激光功率比。

3 实验结构

双晶体串联倍频结构如图 1 所示。1064 nm 单频种子源为 Nd:YAG 单块非平面环形腔激光器, 单频激光通过保偏光纤分束器分为两路, 一路经过声光移频器后, 采用保偏光纤合束器与另一路激光耦合, 实现双频 10 mW 的 1064 nm 激光输出。非移频的光路中加入一个光纤衰减器, 通过调节光纤衰减器来调节两束激光的功率比, 从而调节输出双频激光的调制深度。双频激光经过光纤功率放大器后输出功率为 10 W, 拍频的调谐范围为 125~175 MHz^[16-17]。

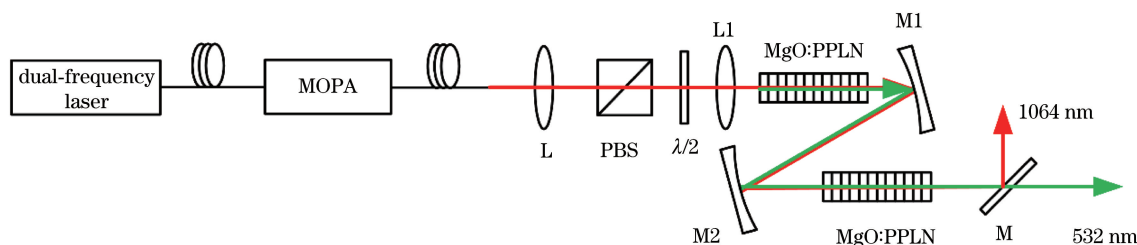


图 1 双晶体串联 SHG 实验装置示意图

Fig. 1 Diagram of experimental setup of SHG by double crystal cascade

常用的倍频晶体有 KTP、LiB₃O₅ (LBO)、PPLN、PPLT 等。KTP、LBO 晶体具有很高的损伤阈值(KTP: 4.6 GW/cm³; LBO: 18.9 GW/cm³), 但是非线性系数较低(KTP: 3.4 pm/V; LBO: 0.817 pm/V), 通常用于脉冲激光器的倍频。周期极化晶体具有较高的非线性系数, 倍频效率高。PPLN 晶体的非线性系数为 16 pm/V, PPLT 晶体的非线性系数为 10 pm/V。通过向晶体中掺入一定比例的 MgO, 可以有效地提高晶体的损伤阈值。

光纤功率放大器输出激光经过透镜 L 准直后, 束腰半径为 2.5 mm, 发散角为 1 mrad。激光经过格兰棱镜后变为线偏振激光, 采用半波片(λ/2)调整激光的偏振方向。线偏振激光经过透镜 L1 后聚焦到第一块 MgO:PPLN 晶体中间, 输出的倍频光和剩余的基频光由凹面镜 M1 准直后, 再由凹面镜 M2 聚焦到第二块 MgO:PPLN 晶体中间, 使剩余的基频光再次倍频。将凹面镜 M2 和第二块晶体温控炉放置在三维调整架上, 通过调整凹面镜 M1 的角度和 M2 的位置来调整 M1、M2 之间的距离, 然后再调整第二块晶体的位置使输出激光的功率最大。通过不断改变凹面镜 M1 的角度和 M2 的位置, 从而改变晶体之间的距离, 获得系统的最大输出功率。最后, 使用双色镜 M 将余下的基频光滤除, 输出绿

色激光。两倍频晶体的温度由半导体制冷器(TEC)进行控制以实现准相位匹配, 温度调节精度为 0.01 °C。为了减少环境温度对晶体的影响, 晶体由钢箔包裹放置在铜质底座上, 并在底座上加隔热塑料盖以隔绝空气。

为了获得较高的倍频效率, 需要对基频光进行聚焦, 提高光功率密度。聚焦光斑太小, 光功率密度过大会造成晶体损伤, 而且基频高斯光束发散角较大容易导致角度失配。聚焦光斑太大, 光功率密度小, 倍频效率低。因此, 基频光具有一个最佳聚焦光斑半径, 此时倍频效率最大。聚焦参数 ξ 的定义为^[18]

$$\xi = \frac{l}{b} = \frac{l}{k_1 \omega_0^2}, \quad (9)$$

式中: l 为晶体长度; b 为共焦参数; k_1 为波矢; ω_0 为束腰半径。理想聚焦条件下聚焦参数 $\xi_{opt} = 2.84$, 从而可以计算出最佳聚焦光斑半径 $\omega_{opt} = 20.37 \mu\text{m}$ 。因此, 基频光聚焦透镜 L1 选择焦距为 150 mm 的薄透镜, 透镜两面镀 1064 nm 增透膜。

双晶体倍频时, 由于第二块倍频晶体对倍频光吸收较多, 晶体的热效应较严重, 第二块倍频晶体中基频光的束腰半径要略大于第一块倍频晶体中基频光的束腰半径。当两凹面镜之间的夹角较小时, 经过两凹面镜后输出激光的束腰半径与输入激光束腰

半径的关系约为 $w_1 = w_0 R_2 / R_1$ 。所以,凹面镜的曲率半径 R_2 大于 R_1 ,选择 $R_2 = 250$ mm, $R_1 = 200$ mm的凹面镜,则第二块倍频晶体中基频光的束腰半径约为 $w_1 = 25.46$ μm ,两凹面镜分别镀532 nm和1064 nm高反膜。

4 实验结果

4.1 双晶体串联倍频输出激光的功率和效率

首先搭建单块晶体倍频结构,基频光通过透镜L1聚焦到倍频晶体中间,通过调整晶体的温度使其达到最佳相位匹配条件,使得输出功率最大。在双晶体串联倍频结构中,由于空气的色散效应,经过第一块晶体的基频光和倍频光在空气传播的过程中不断产生相位差,经过改变两晶体之间的距离可以调节基频光和倍频光之间的相位差,从而改变倍频效率。实验发现,两晶体之间的距离为425 mm时,倍频效率最高。如图2所示,基频光功率为9.2 W,拍频频差为150 MHz,双晶体串联倍频获得的绿色激光的最高功率为2.26 W,最高倍频效率为24.5%。归一化倍频效率与两晶体之间距离的变化关系如图3所示,双晶体之间的距离由最高效率距离偏移3.3 cm,倍频效率降低到最大值的一半。

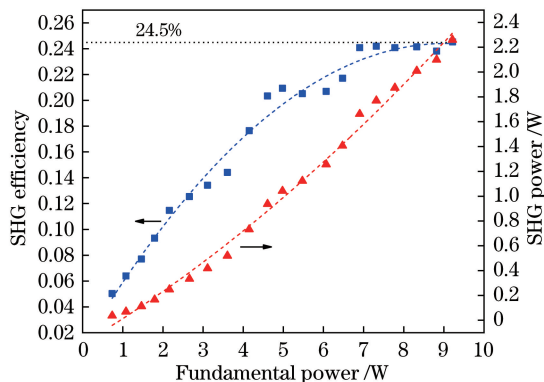


图2 双晶体 SHG 结构下的 SHG 功率与 SHG 效率
Fig. 2 SHG power and efficiency of double crystal SHG structure

如图4所示,与单晶体倍频相比,双晶体串联倍频提高了绿色激光的输出功率和倍频效率,是获得高功率绿色激光的有效方法。由于抽运光入射到第二块晶体中的光功率密度降低以及热效应的影响,第二块晶体的倍频效率低于第一块晶体。

4.2 倍频晶体的最佳相位匹配温度

为了使 MgO:PPLN 晶体达到对1064 nm 基频光的准相位匹配,晶体的温度需满足一定的条件。如图5所示,随着基频光功率的增加,晶体的最佳

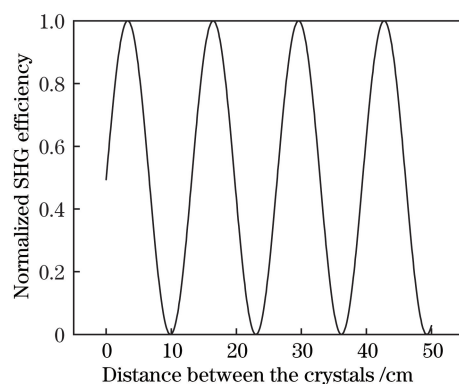


图3 归一化 SHG 效率与双晶体之间距离的关系
Fig. 3 Normalized SHG efficiency as a function of distance between two crystals

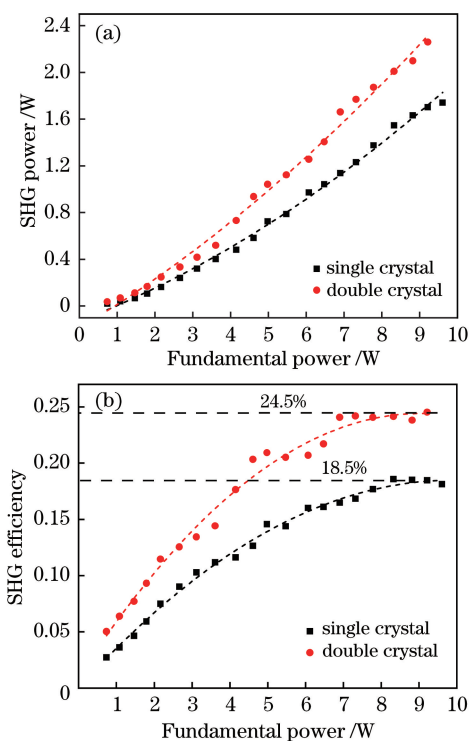


图4 双晶体 SHG 与单晶体 SHG 的对比。
(a)输出功率;(b)倍频效率

Fig. 4 Comparison of SHG with double crystal and single crystal. (a) Output power; (b) efficiency of SHG
相位匹配温度不断降低,约为 -0.232 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。当基频光功率增加时,倍频晶体对基频光和倍频光的吸收增大,导致晶体的温度升高,控制温度降低。此外,由于晶体的热膨胀效应,随着晶体温度的升高,晶体极化周期增大,最佳相位匹配温度降低^[19]。

周期极化倍频晶体对温度的要求较高,当晶体的温度偏离最佳相位匹配温度时,倍频光输出功率降低。如图6所示,当基频光功率为3 W时,相位

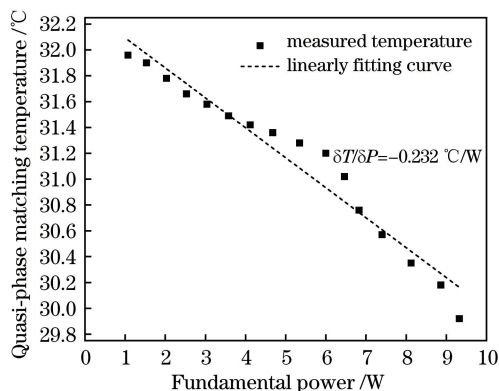


图 5 准相位匹配温度

Fig. 5 Quasi-phase matching temperature

匹配温度的半峰全宽为 1.93 °C;当基频光功率为 6 W 时,相位匹配温度的半峰全宽为 1.90 °C。当基频光功率较高时,由于晶体对基频光和倍频光具有吸收作用,晶体内部产生温度梯度,晶体的控制温度偏离最佳相位匹配温度时,对晶体内部的温度影响更为明显。因此,当基频功率较高时,晶体的温度带宽变窄,受温度的影响更为显著^[20]。

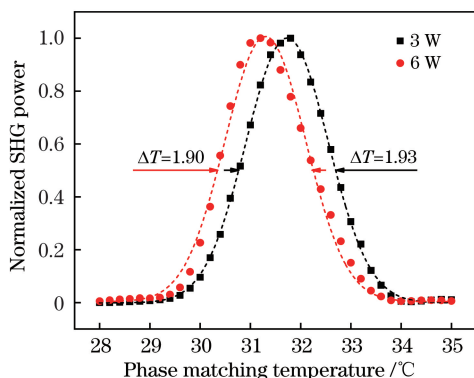


图 6 MgO:PPLN 晶体的相位匹配温度带宽

Fig. 6 Phase matching temperature bandwidth of MgO:PPLN crystal

4.3 倍频激光的拍频频谱和稳定性

当双频基频光的拍频为 150 MHz,双频功率比为 1:1,抽运光功率为 3 W 时,如图 7 所示,倍频光的拍频分别为 150 MHz 和 300 MHz。

当抽运功率为 3 W,双频拍频为 150 MHz,双频功率比为 1:1 时,采用频率计 (KEYSIGHT: 53220A,频率分辨率为 12 bit/s)测量绿色激光的频率稳定性,测量结果如图 8 所示。绿色激光的 150 MHz 拍频在 2 min 内的频率稳定性约为 2.7 Hz,300 MHz 拍频在 2 min 内的频率稳定性约为 5.3 Hz,频率稳定性较高,二倍拍频的稳定性约为一倍拍频的 2 倍。

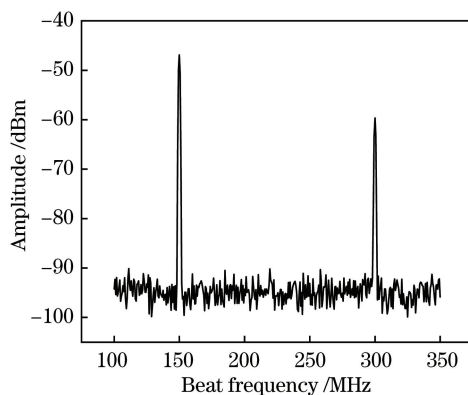


图 7 SHG 激光的拍频

Fig. 7 Beat frequency of SHG laser

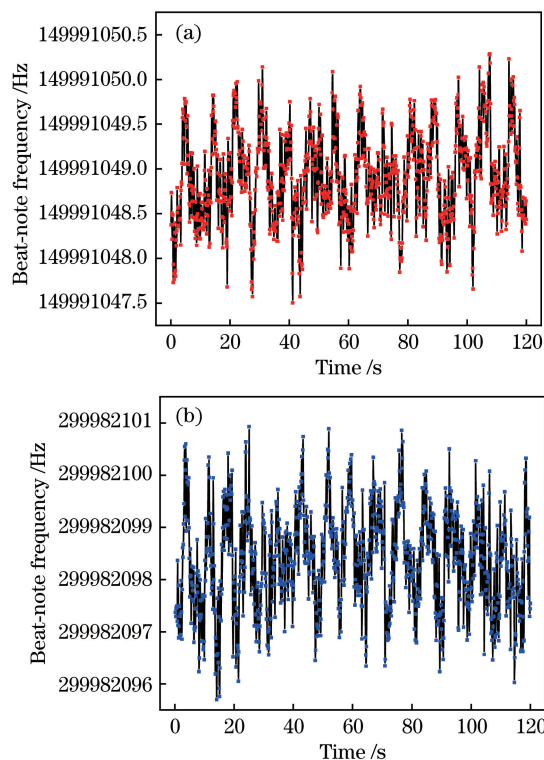


图 8 绿色激光的拍频。(a) 150 MHz 拍频稳定性; (b) 300 MHz 拍频稳定性

Fig. 8 Beat frequency of green laser. (a) Beat frequency stability of 150 MHz; (b) beat frequency stability of 300 MHz

5 结 论

高功率、深调制、高频强度调制绿光是载波调制激光雷达水下目标探测系统的关键,以长、宽、高分别为 15 mm、2 mm、0.5 mm 的双 MgO:PPLN 级联结构对 1064 nm 双频激光倍频,获得输出功率为 2.26 W 的绿色激光,倍频效率为 24.5%。1064 nm 双频激光拍频调谐范围为 125~175 MHz,主要受声光移频器的限制。当 1064 nm 双频激光

的拍频为 150 MHz 时,倍频光的拍频为 150 MHz 和 300 MHz,2 min 拍频稳定性分别是 2.7 Hz 和 5.3 Hz。所获得的高功率射频强度调制绿光具有较高的拍频稳定性,是实现水下目标精确距离测量的理想光源。

参 考 文 献

- [1] Duntley S Q. Light in the sea[J]. Journal of the Optical Society of America, 1963, 53(2): 214-233.
- [2] Mullen L, Cochenour B, Laux A, *et al.* Optical modulation techniques for underwater detection, ranging and imaging[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8030: 803008.
- [3] Ma Y, Ji H, Liang K, *et al.* Application of modulated lidar on optical carrier for ocean exploration[J]. Laser Technology, 2008, 32(4): 346-349.
马泳, 冀航, 梁琨, 等. 载波调制激光雷达技术在海洋探测中的应用[J]. 激光技术, 2008, 32(4): 346-349.
- [4] Bartolini L, de Dominicis L, de Collibus M F, *et al.* Underwater three-dimensional imaging with an amplitude-modulated laser radar at a 405 nm wavelength[J]. Applied Optics, 2005, 44(33): 7130-7135.
- [5] Illig D W, Rumbaugh L, Jemison W D, *et al.* Statistical backscatter suppression technique for a wideband hybrid lidar-radar ranging system[C]//2014 Oceans-St. John's, September 14-19, 2014, St. John's, NL, Canada. New York: IEEE, 2014: 7003086.
- [6] Kumar S C, Samanta G K, Devi K, *et al.* High-efficiency, multicrystal, single-pass, continuous-wave second harmonic generation[J]. Optics Express, 2011, 19(12): 11152-11169.
- [7] Hao L Y, Su C, Qi Y F, *et al.* Second harmonic generation characteristics of continuous wave all-fiber laser oscillator in PPMgO:LN[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(6): 0602007.
郝丽云, 苏岑, 漆云凤, 等. 基于 PPMgO:LN 晶体的连续波全光纤激光器倍频特性[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602007.
- [8] Liu X, Shen X J, Yin J L, *et al.* Research on extending temperature acceptance bandwidth of second harmonic generation in cascaded crystals[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0108001.
刘恂, 沈学举, 殷建玲, 等. 级联晶体倍频器件温度适应性扩展研究[J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0108001.
- [9] Zhang Y P, Zhang H Y, He Z H, *et al.* A 36 W intracavity-frequency-doubled diode-side-pumped Nd:YAG/KTP continuous wave green laser[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(7): 4647-4651.
张玉萍, 张会云, 何志红, 等. 36 W 侧面抽运腔内倍频 Nd:YAG/KTP 连续绿光激光器[J]. 物理学报, 2009, 58(7): 4647-4651.
- [10] 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.
吴嘉瑞, 吕志强, 陆星, 等. 基于准相位匹配的掺铒飞秒光纤激光器倍频特性研究[J]. 中国激光, 2018, 45(7): 0701001.
- [11] Zhao R C, Fu X H, Sun J F, *et al.* High power 507.4 nm continuous laser generated by high efficient external cavity frequency doubling[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(7): 0701001.
赵儒臣, 付小虎, 孙剑芳, 等. 高效率外腔倍频产生大功率 507.4 nm 连续激光[J]. 中国激光, 2017, 44(7): 0701001.
- [12] Stappel M, Kolbe D, Walz J. Continuous-wave, double-pass second-harmonic generation with 60% efficiency in a single MgO:PPLT crystal[J]. Optics Letters, 2014, 39(10): 2951-2954.
- [13] Mizuuchi K, Morikawa A, Sugita T, *et al.* High-power continuous wave green generation by single-pass frequency doubling of a Nd:GdVO₄ laser in a periodically poled MgO:LiNbO₃ operating at room temperature[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2003, 42(Part 2, No. 11A): L1296-L1298.
- [14] Kumar S C, Samanta G K, Ebrahim-Zadeh M. High-power, single-frequency, continuous-wave second-harmonic-generation of ytterbium fiber laser in PPKTP and MgO:sPPLT[J]. Optics Express, 2009, 17(16): 13711-13726.
- [15] Tovstonog S V, Kurimura S, Kitamura K. High power continuous-wave green light generation by quasi phase matching in MgSLT[C]//2007 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 6-11, 2007, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE, 2007: 4452419.
- [16] Kang Y, Cheng L J, Yang S H, *et al.* High power optical-carried radio frequency signal fiber power amplification[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(9): 0914002.
康英, 程丽君, 杨苏辉, 等. 高功率全光纤光载微波信号功率放大器[J]. 光子学报, 2016, 45(9): 0914002.
- [17] Xie S Y, Zhang X F, Yang C L, *et al.* Continuous-wave single-frequency 589 nm yellow laser generated from sum frequency of single-block non-planar ring cavity laser in periodically poled KTiOPO₄ crystal[J].

- Acta Physica Sinica, 2016, 65(9): 094203.
谢仕永, 张小富, 杨程亮, 等. 周期极化 KTiOPO_4 晶体和频单块非平面环形腔激光产生连续单频 589 nm 黄光[J]. 物理学报, 2016, 65(9): 094203.
- [18] Chen Y F, Chen Y C. Analytical functions for the optimization of second-harmonic generation and parametric generation by focused Gaussian beams[J]. Applied Physics B, 2003, 76(6): 645-647.
- [19] Yarborough J M, Falk J, Hitz C B. Enhancement of optical second harmonic generation by utilizing the dispersion of air[J]. Applied Physics Letters, 1971, 18(3): 70-73.
- [20] Bhar G C, Chatterjee U, Datta P. Enhancement of second harmonic generation by double pass configuration in barium borate[J]. Applied Physics B, 1990, 51(5): 317-319.