

外腔谐振倍频 8.7 W 连续单频绿光技术研究

许夏飞^{1,2} 鲁燕华^{1,2*} 张雷^{1,2} 王卫民^{1,2}

¹中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

²中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900

摘要 基于 Pound-Drever-Hall 外腔谐振倍频技术, 实现了单频、连续 1064 nm 基频光的高效倍频转换。精确锁定环形倍频腔腔长, 利用 I 类非临界相位匹配三硼酸锂晶体获得了最高 8.73 W 的倍频绿光输出, 倍频效率为 68.9%。在此基础上, 研究了倍频绿光的波长锁定与调谐特性, 当 30 min 内波长锁定均方根值小于 3 fm 时, 实现了输出绿光波长在 532.15~532.50 nm 范围内的连续可调。采用自外差拍频法测量了单频绿光的光谱特性, 谱线线宽为 18.7 kHz, 光束质量因子为 1.25, 光束质量优异。

关键词 激光技术; 绿光; 窄线宽; 外腔谐振倍频; 单频

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1101010

Technical Study of 8.7 W Continuous Wave Single Frequency Green Laser Based on Extra-Cavity Frequency Doubling

Xu Xiafei^{1,2} Lu Yanhua^{1,2} Zhang Lei^{1,2} Wang Weimin^{1,2}

¹Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

²Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract Highly effective frequency doubling conversion of continuous wave, single frequency 1064 nm fundamental laser is realized based on the Pound-Drever-Hall extra-cavity frequency doubling technique. When the length of the ring frequency doubling cavity is accurately locked, the green laser output with the highest power of 8.73 W is obtained with the use of the type I noncritical phase matching lithium triborate crystal and the frequency conversion efficiency reaches 68.9%. Based on this, the green laser wavelength locking and tuning characteristics are investigated, and when the root-mean-square value of wavelength locking within 30 min is less than 3 fm, the wavelength is continuously tunable between 532.15 nm and 532.50 nm. The spectroscopic property of the single frequency green laser is measured by the self-heterodyne method, the measured line-width is 18.7 kHz, and the beam quality factor is 1.25 which indicates a superior beam quality.

Key words laser technique; green laser; narrow line-width; extra-cavity frequency doubling; single frequency

OCIS codes 140.3480; 140.3580; 140.3538

1 引言

利用 1064 nm 激光倍频获得的连续 532 nm 绿光在许多领域具有重要的应用, 可以作为二次倍频获得深紫外光的基频光源。许多材料在绿光光谱附近具有比近红外更高的吸收系数和烧灼效率, 因此绿光在一些特殊材料加工和微加工领域具有独特的优势。高功率、单频 532 nm 激光光源具有较高信号量子噪声比, 在地基重力波探测方面具有应用潜力^[1-3]。受限于连续机制下基频光较低的峰值功率密度, 传统的腔外倍频方式很难获得高效率的倍频转换输出^[4]。外腔谐振倍频技术结合了传统的内腔倍频与腔外单通倍频的优

收稿日期: 2016-08-12; 收到修改稿日期: 2016-08-28

基金项目: 国家 863 计划(2014AA093301)、中国科学院国防创新基金

作者简介: 许夏飞(1990—), 男, 硕士, 研究实习员, 主要从事非线性频率变换技术方面的研究。E-mail: xrfmxx@sina.com

* 通信联系人。E-mail: happyeleo@yahoo.com.cn

点,使低功率、连续机制基频光的高效倍频成为可能,这项技术一直是学者们研究和应用的热点之一^[5-7]。

1966年,Ashkin等^[8]首次提出了外腔谐振倍频的概念,并在实验上获得了10倍于注入基频光功率的腔内循环功率,证明了单横模、单纵模基频光是进行外腔谐振倍频的最佳光源。1991年,Yang等^[9]通过外腔谐振倍频获得了6.4W的横向电磁波模式连续单频绿光,受限于倍频腔内的静态损耗与模式匹配程度,其谐振倍频效率仅为38%。2003年,王旭葆等^[10]进行了Nd:YAG谐振倍频实验,获得了转换效率为31.4%的绿光输出;实验比较了绿光与基频光的光束质量,认为倍频过程中环形腔具有一定的模式选择作用,可改善绿光的光束质量。2010年,Meier等^[11]采用传统三硼酸锂(LBO)晶体,将1064nm激光进行外腔谐振倍频产生了532nm绿光,获得了平均功率为134W的连续单频激光输出,倍频效率高达90%,是目前报道的输出功率和倍频效率均为最高的外腔谐振倍频实验结果。

本文采用基于Pound-Drever-Hall(PDH)外腔的谐振倍频技术,在“8”字形环形倍频腔内插入LBO倍频晶体,获得了最高为8.73W的倍频绿光输出,倍频效率为68.9%,谐振倍频绿光的波长锁定均方根(RMS)值小于3fm,波长调谐范围约为0.5nm,单频线宽为18.7kHz,光束质量因子为1.25。

2 基于PDH技术外腔谐振倍频实验结果与分析

2.1 实验装置

外腔谐振倍频是利用多光束干涉原理来实现基频光在倍频腔内的谐振增强,可在基频光功率较低的情况下获得高转换效率的倍频光输出。在“8”字形环形腔内插入LBO晶体作为外部谐振倍频腔,实验装置示意图如图1所示。实验装置主要由基频激光器、环形谐振倍频腔和PDH腔长反馈控制电学系统组成。为了获得单频特性好、波长稳定的基频光光源,将光束质量近衍射极限的1064nm种子激光注入光纤放大器。1064nm种子激光器输出功率为10mW,线宽小于5kHz,经光纤放大器放大后可获得大于12W的单频连续1064nm基频光输出。准直器输出的基频光经过焦距均为240mm的模式匹配透镜组L1和L2耦合进外部环形倍频腔,实现了基频光腔内空间模式与腔本征模式的重合。环形倍频腔由两平面镜M1、M2以及两曲率半径均为100mm的凹面镜M3、M4组成,其中M1对基频光的反射率为90%。在M1后方放置吸收池用于吸收未耦合进环形倍频外腔的基频光;M2、M3、M4均对1064nm激光高反;在M4上镀532nm增透膜以实现绿光输出。为了获得最大的倍频效率,将倍频晶体LBO放置于两凹面镜中心。LBO晶体采用I类非临界相位匹配方式切割,晶体尺寸为8mm×8mm×30mm。为满足温度匹配要求,实验中将LBO晶体放置于铜制热沉中并将其温度控制在(150.0±0.02)℃范围内。

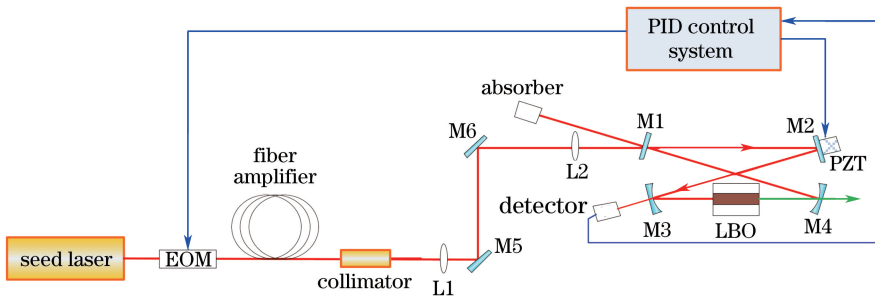


图1 外腔谐振倍频实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup for extra-cavity frequency doubling

PDH腔长反馈控制电学系统的作用是对环形倍频腔的腔长进行精确控制,以实现基频光在腔内循环一周的光程稳定在其波长的整数倍,确保倍频过程中基频光在腔内始终处于谐振增强状态,从而获得最佳谐振倍频效率。PDH腔长反馈控制技术的工作原理是^[12]:在1064nm种子源与光纤放大器之间插入电光相位调制器(EOM)对基频光进行相位调制,分别产生两个距中心频率为12.5MHz的边频;将锯齿波扫描信号加载到腔镜M2上的压电陶瓷(PZT)以实现腔长的扫描,并由光电探测器探测基频光经腔镜M3的漏光信号;电学反馈控制系统接收漏光信号进行解调产生误差信号,该信号经比例-积分-微分(PID)控制模块处理后作用于PZT,并以基频激光中心频率为基准,实现对腔长的实时反馈控制。

2.2 实验结果与分析

获得高效外腔谐振倍频转换的前提是实现环形倍频腔腔长的精确、稳定和实时的锁定,因此开展了连续 1064 nm 单频激光注入外部环形倍频腔腔长锁定实验。精确调节耦合透镜组的位置、环形腔腔镜的反射角和 PID 反馈控制模块的参数,使得腔长锁定时 M3 后方的 1064 nm 激光漏光功率最大,即 1064 nm 基频光腔内谐振功率最大。当注入环形倍频腔的光功率为 10 W 时,测得漏光功率为 102.3 mW。根据 M3 对 1064 nm 激光的反射率为 99.93%,可推算出腔长锁定时环形腔腔内基频光的循环功率为 152.69 W,即谐振增强因子(定义为腔内循环功率与注入功率之比)为 15.3,腔长锁定状态较理想。

在理想的腔长锁定状态下,基频光与环形外腔的模式匹配效率以及阻抗匹配程度是影响谐振倍频效率的主要因素。实验中,将模式匹配透镜 M2 放置于四维可调支架上进行精确调节,使基频光进入环形外腔后光束的空间分布与腔的本征模式重合,以实现模式匹配。为了确定 M1 的最佳反射率,实现阻抗匹配,对反射镜 M1 进行谐振倍频实验,M1 对基频光反射率分别为 88%、90%、93%和 95%。将 LBO 晶体逐渐加热到最佳匹配温度,当温度为 150.0 °C 时,LBO 晶体谐振倍频的绿光功率和倍频效率随注入基频光功率变化关系的结果如图 2 所示。由图可见,随着基频光功率的增加,倍频绿光功率与倍频转换效率均显著增大。环形倍频腔对基频光的损耗、腔内基频光束腰半径大小以及腔镜 M1 对基频光反射率等参数对谐振倍频效率的影响较大。实验测得,在环形倍频腔对基频光静态损耗为 5.3%的条件下,当基频光束腰半径为 50 μm、腔镜 M1 对基频光的反射率为 90%时,可获得最佳谐振倍频转换效率。当注入基频光功率为 12.67 W 时,获得最大功率为 8.73 W 的单频连续绿光输出,最大倍频转换效率为 68.9%。

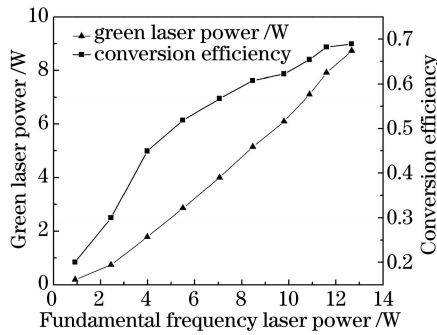


图 2 倍频绿光功率和转换效率随基频光功率的变化

Fig. 2 Variations of power and conversion efficiency of green laser obtained by frequency doubling with fundamental frequency laser power

作为电学反馈控制系统的参考基准,基频光波长的稳定性一方面影响了环形倍频腔腔长锁定的精度和稳定性,另一方面也决定了倍频绿光的波长特性。实验中,利用波长计(WS7, High Finesse 公司,德国)监测基频激光自由运转 30 min 内绿光的输出波长稳定性,测试结果如图 3(a)所示。在 30 min 内,绿光波长在 532.29326~532.29333 nm 范围内变化,峰谷(PV)值约为 70 fm, RMS 值大于 20 fm。波长锁定装置结构示意图如图 3(b)所示,利用波长计自带的闭环控制系统以及线性电压放大器将补偿信号输送至基频光种子源内置的 PZT 上可实现激光波长的锁定。由图 3 可知,在锁定状态下绿光波长的波动范围稳定在 532.29328~532.29329 nm 之间,30 min 内的 RMS 值小于 3 fm,波长稳定性较未锁定状态得到显著提高。

谐振倍频时绿光功率随绿光波长的变化曲线如图 4 所示。当绿光波长在 532.15~532.50 nm 范围内变化时,腔长反馈控制系统可补偿波长变化带来的偏差。实验结果表明,只要基频光具备在 1 nm 范围内连续可调的能力,利用该倍频装置就可以实现在相应范围内调谐输出的倍频绿光波长。

采用自外差法和频谱仪测量了单频绿光线宽,结果如图 5 所示。由图可知,拍频谱线线宽为 37.4 kHz。根据自外差法测量原理,实际倍频绿光线宽为拍频谱线的一半,即 18.7 kHz。利用光束质量仪测得绿光的光束质量因子为 1.25。

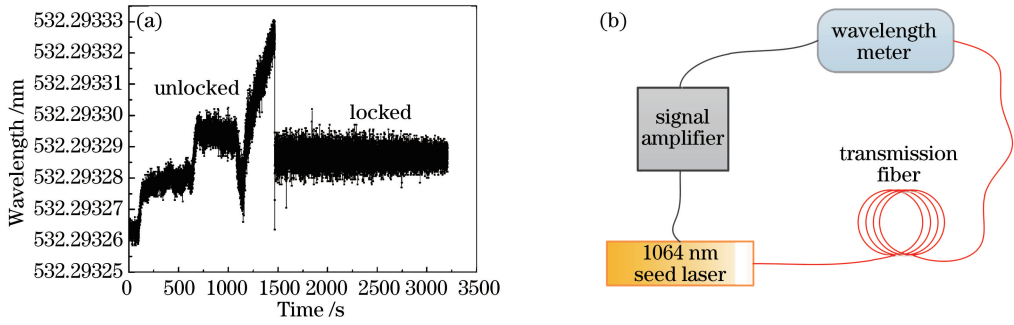


图 3 (a) 锁定和未锁定下的波长变化; (b) 波长锁定装置结构示意图

Fig. 3 (a) Variation of wavelength under locked and unlocked conditions; (b) schematic diagram of setup for wavelength locking

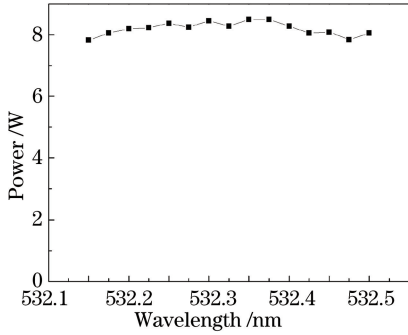


图 4 倍频光功率随波长的变化

Fig. 4 Variation of frequency doubled green laser power with wavelength

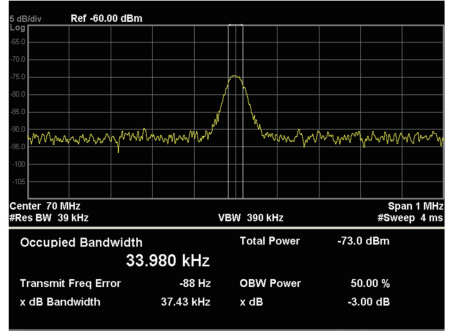


图 5 单频绿光线宽测量结果

Fig. 5 Measurement result of single frequency green laser line width

3 结 论

采用基于 PDH 技术的外腔谐振倍频方法,当注入的单频、连续基频光功率为 12.7 W 时,获得了最高 8.73 W 的倍频绿光输出,倍频效率高达 68.9%。在此基础上研究了倍频绿光的波长锁定特性与调谐特性,当波长锁定 RMS 值小于 3 fm 时,实现了输出绿光波长在 532.15~532.50 nm 范围内的连续可调。获得的绿光具有优异的参数特性,其单频线宽为 18.7 kHz,光束质量因子为 1.25。

参 考 文 献

- 1 Sakuma J, Asakaw Y, Obara M. Generation of 5-W deep-UV continuous-wave radiation at 266 nm by an external cavity with a CsLiB₆O₁₀ crystal[J]. Opt Lett, 2004, 29(1): 92-94.
- 2 Hummelt G. Solid state lasers: TEM₀₀ CW green laser is a powerful tool[J]. Laser Focus World, 2006, 42(8): 77-82.
- 3 Basu C, Webels P, Neumann J, et al. High power single frequency solid state master oscillator power amplifier for gravitational wave detection[J]. Opt Lett, 2012, 37(14): 2862-2864.
- 4 Feng Yan, Bi Yong, Zhang Hongbo, et al. 20 W diode dumped external frequency-doubled Nd:YAG green laser[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(4): 469-471.
冯 衍, 毕 勇, 张鸿博, 等. 20 W 腔外倍频全固态 Nd:YAG 绿光激光器[J]. 光学学报, 2003, 23(4): 469-471.
- 5 Ge Qing, Yu Lin, Jia Xiaojun, et al. Extracavity frequency doubled red laser with single frequency[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1744-1748.
葛 青, 于 琳, 贾晓军, 等. 外腔谐振倍频单频红光激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1744-1748.
- 6 Li Ying, Luo Yu, Pan Qing, et al. Experimental generation of bright green light in amplitude-squeezed state via extracavity frequency doubler[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(10): 5030-5035.
李 莹, 罗 玉, 潘 庆, 等. 用外腔谐振倍频产生明亮绿光振幅压缩态光场[J]. 物理学报, 2006, 55(10): 5030-5035.
- 7 Luke R. Taylor, Yan Feng, Calia D B. 50 W CW visible laser source at 589 nm obtained via frequency doubling of three

- coherently combined narrow-band Raman fiber amplifiers[J]. *Opt Express*, 2010, 18(8): 8540-8555.
- 8 Ashkin A, Boyd G D, Dziedzic J M. Resonant optical second harmonic generation and mixing [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1966, 2(6): 109-124.
- 9 Yang S T, Pohalski C C, Gustafson E K, *et al.* 6.5-W 532-nm radiation by cw resonant external-cavity second-harmonic generation of an 18-W Nd:YAG laser in LiB₃O₅ [J]. *Opt Lett*, 1991, 16(19): 1493-1495.
- 10 Wang Xubao, Chen Jimin, Li Gang, *et al.* Study of frequency doubling in a KTP crystal on Q-switch Nd:YAG laser by the resonant external ring cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(4): 477-480.
王旭葆, 陈继民, 李 港, 等. 调 Q Nd:YAG 环形腔外腔倍频技术研究 [J]. *光学学报*, 2004, 24(4): 477-480.
- 11 Meier T, Willke B, Danzmann K. Continuous-wave single-frequency 532 nm laser source emitting 130 W into the fundamental transversal mode [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(22): 3742-3744.
- 12 Bian Zhenglan, Huang Chongde, Gao Min, *et al.* Research on control technique for Pound-Drever-Hall laser frequency stabilizing system [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(3): 0302001.
卞正蓝, 黄崇德, 高 敏, 等. PDH 激光稳频控制技术研究 [J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0302001.