

基于注入锁定技术的单频连续高功率 1 342 nm Nd:YVO₄ 激光器

周子涵^{1,2,3}, 王志敏^{1,2*}, 薄 勇^{1,2}, 张丰丰^{1,2}, 赵文成^{1,2}, 付 莉^{1,2}, 何汉星^{1,2,3}, 崔大复^{1,2}, 彭钦军^{1,2}

1. 中国科学院理化技术研究所 固体激光重点实验室, 北京 100190;
2. 中国科学院理化技术研究所 功能晶体和激光技术重点实验室, 北京 100190;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 研究了一种基于注入锁定技术的 888 nm 半导体激光器 (LD) 泵浦的高功率单频可调谐 1 342 nm Nd:YVO₄ 激光器。采用最大输出功率 20 mW 分布式反馈单频半导体 1 342 nm 激光器作为注入种子, 利用 lock-in (LI) 技术, 对 LD 端泵的 Nd:YVO₄ 环形腔激光器进行种子注入, 实现了单频可调谐激光输出。激光器最大平均输出功率为 13.9 W, 测量的线宽为 41 MHz, 调谐范围为 1 341.6774~1 341.8025 nm。x 轴和 y 轴的光束质量 M^2 因子分别为 $M_x^2=1.30$ 和 $M_y^2=1.23$ 。实验结果表明: 与先前文献报道的注入锁定 1 342 nm 可调谐激光的结果相比, 所需种子功率大幅减小, 输出功率也有所提升。

关键词: Nd:YVO₄ 激光器; 连续波; 单频; 可调谐; 注入锁定

中图分类号: O434.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230366

0 引 言

连续单频 1 342 nm 波段激光器在量子光学、光纤通信等领域有着广泛的应用^[1-2]。其中 1 342 nm 激光器倍频可得到 671 nm 红光, 正对着锂离子的吸收峰, 广泛应用于激光制冷^[3]和锂同位素分离领域。同时, 有些应用还要求 671 nm 激光器具有一定的调谐能力和足够的功率^[4]。因此, 开展高功率 1 342 nm 可调谐激光器的研究具有非常重要的意义。

目前对于单频可调谐的连续 1 342 nm 激光器已经进行了一些研究, 实现这个波段的激光输出主要分为两种方式: 一是通过分布式反馈半导体激光器或外腔半导体激光器来获得^[5]; 二是通过 Nd:YVO₄ 固体振荡器直接振荡出 1 342 nm 激光^[6]。前者由于半导体激光器难以实现高功率输出, 需要利用拉曼光纤放大器或固体放大器对种子激光进行放大。2019 年, 刘旭超等人通过一拉曼光纤放大器和三级固体放大器获得了 30 W 的 1 342 nm 激光输出^[7], 但在这个波段的拉曼放大器需要经过两次拉曼变频^[8], 系统昂贵且低效, 而 Nd:YVO₄ 激光晶体在该波段的增益又比较低, 导

致整个系统体积庞大, 价格昂贵, 不利于应用。后者由于存在腔模的问题, 进行连续调谐较为困难, 需要插入选频器件。2010 年, Fabiola 等人利用标准具对 1 342 nm 激光器进行调谐^[9], 在插入标准具后激光器输出功率从 1.7 W 下降至 1.4 W, 尽管实现了调谐, 但是却引入了相当大的损耗。

因此, 利用注入锁定, 结合低功率种子激光器和固体激光器高功率输出的优点, 通过激光注入把高功率的固体激光器的激光频率锁定在低功率单频种子激光频率上, 是实现高功率可调谐单频 1 342 nm 激光输出较好的方式。

2015 年, Peter Koch 等人利用一 34 mW 种子, 通过注入一 Nd:YVO₄ 五镜环形腔, 获得了 17.2 W 的 1 342 nm 激光输出, 线宽~40 MHz^[10]; 2021 年, 孙桂侠等人使用 PDH (Pound-Drever-Hall) 注入锁定技术^[11], 利用输出功率 1 W 的种子光, 通过注入一“8”字环形腔激光器, 最终获得了 8.3 W 的 1 342 nm 激光输出, 线宽 240 MHz^[12]。

为了获得更理想的结果, 文中采用了与 PDH 不同的 lock-in (LI) 技术, 该技术不需要通过调制种子获

收稿日期: 2023-06-14; 修订日期: 2023-09-19

作者简介: 周子涵, 男, 博士生, 主要从事固体激光方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 王志敏, 男, 研究员, 博士, 主要从事固体激光方面的研究。

得边带,而是通过直接高频调制压电陶瓷 (PZT) 控制腔长,从而通过正向光功率变化来获得误差信号,实现锁定。实验中,激光种子采用了一个分布式反馈半导体激光器 (DFB),输出功率为 20 mW,通过注入一个 Nd:YVO₄ 环形腔激光器,最终得到了 13.9 W 的激光输出,光束质量在两个方向上分别为 $M_x^2 = 1.30$, $M_y^2 = 1.23$,线宽为 41 MHz,并实现了从 1341.6774~1341.8025 nm 波长范围内的调谐。与之前报道的国内的工作相比,使用了更低输出功率的种子,实现了

更高功率的输出。

1 原理实验分析

实验装置如图 1 所示,种子光经过一个由旋光器偏振片等元件组成的隔离器和由两个凸面镜组成的整形器整形之后,注入到四镜环形腔内,当注入光波长与激光器一纵模波长相同、空间模式相匹配时,该模式的腔内功率会获得增强,抑制其他模式振荡,此时,由于反向运转的模式也会得到抑制,正向功率会因此增长,最终实现单向的单频激光输出。

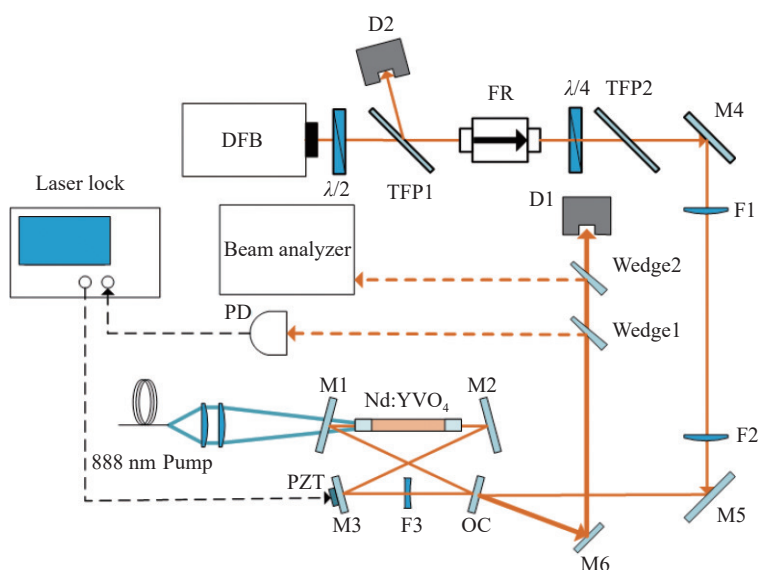


图 1 注入锁定单频 1342 nm 激光器实验结构图

Fig.1 Schematic diagram of the injection-locked single-frequency 1342 nm laser

种子光使用的是日本 NTT 公司生产的 DFB 半导体激光器 (型号: NLK1B5EAAA),输出光波长为 1342 nm,线宽为 1 MHz,最大功率为 21.5 mW,隔离器则使用分立元件搭建而成,TFP1 和 TFP2 为两片 55.6° 偏振片,FR 为法拉第旋光器,其中二分之一波片用于实现种子功率的调节,经过隔离器测得种子最大输出功率下降为 20.65 mW。种子光通过透镜 F1、F2 进行光束变换,从而与从激光器中的激光模式相匹配。

被注入激光器采用四镜环形腔结构,环形腔内插入凹透镜 F3 来扩大模体积,使激光模式与泵浦光模式相匹配,以便于实现基模振荡。总腔长为 345 mm,纵模间隔为 759 MHz,其中平面镜 M1~M3 镀 888 nm/

1064 nm 增透和 1342 nm 高反膜,M4、M5 镀 1342 nm 45°高反膜,OC 为输出耦合镜,输出率为 20%,M3 被粘在 PZT 上。F3 为平凹透镜,镀 1064 nm、1342 nm 双点高透,透镜焦距为 $F = -150$ mm,所用的晶体为圆棒状 YVO₄-Nd:YVO₄-YVO₄ 键合晶体,键合晶体由于热源均在晶体内部,可以有效降低表面的热效应导致的端面变形,从而提升光束质量。晶体尺寸为 $\Phi 3$ mm×50 mm,两端的未掺杂晶体长度为 10 mm,掺杂部分长度为 30 mm,掺杂浓度为 0.3 at.%,采用直接水冷的方式进行制冷,晶体两端镀有 888 nm、1342 nm 和 1064 nm 增透膜。这些表面镀 1064 nm 增透膜主要是因为 Nd:YVO₄ 在 1064 nm 波段增益较高,如果不镀 1064 nm 增透膜很容易在晶体两端形成寄生振

荡,使得 1342 nm 激光输出功率下降。泵浦源为光纤耦合的半导体激光器,其中心波长为 888 nm,相比于 808 nm 泵浦,888 nm 泵浦具有更高的斯托克斯效率,泵浦吸收率较低,且与偏振无关^[13],这使得热量在晶体棒内轴向分布更加均匀,热效应小更容易实现高功率输出。光纤输出经过耦合透镜组聚焦进 YVO₄-Nd:YVO₄-YVO₄ 键合晶体中,总体泵浦光吸收率约为 70%,聚焦光斑半径约为 600 μm。

输出光经过反射镜 M6 反射,再通过两个楔形镜射入功率计 D1, M6 镀 1342 nm 高反、1064 nm/888 nm 增透膜,用于消除泵光以及荧光的影响。楔镜分出的两束光,一束用于给 PD 提供锁定信号,另一束给后面一系列的光束分析仪器提供光源。此外,还使用了一个功率计 D2 在隔离器的偏振片后用于探测反向激光功率。

腔长锁定系统采用了 LI 技术,与之前采用的 PDH 技术相比^[11],LI 技术是通过调制腔长使正向功率改变来获得误差信号,不需要 PDH 技术一样依靠解调边带信号来获得误差信号,这使得它在注入光功率很低的情况下比 PDH 技术更容易获得误差信号。虽然 LI 锁定精度较低,但是可以实现低注入功率下的腔长锁定,且 LI 具有调制频率低、结构简单、对电控系统要求低的特点。实验中的锁定模块采用德国 TEM 公司生产的 Laser Lock 模块。

2 实验结果及分析

首先研究了没有种子光注入情况下激光器的功率特征。通过 D1 和 D2 分别测试正反向功率的功率输出再相加,可以获得激光器的功率-吸收泵浦功率曲线,如图 2 所示,黑线为泵浦功率增加时的功率曲线,红线为泵浦功率减小时的功率曲线,两根曲线并不完全重合,产生了一种双稳态现象。

结合图 3 所示晶体处的激光光束半径和晶体热透镜之间的关系来看,尽管晶体的热焦距在 80~220 mm 时激光器都是稳定的,但考虑到泵浦光半径为 600 μm,实际能够实现激光振荡的区域更小,由于 1342 nm 波段低的斯托克斯效率和激发态吸收(ESA)效应,产生激光时的晶体泵浦光热转换系数比没有激光产生时的晶体热转换系数还要多^[14]。根据文献中所给出的热转换系数:在没有出光情况下,热

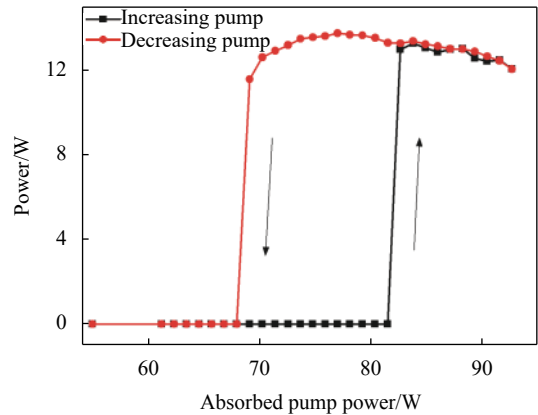


图 2 1342 nm 环形腔激光器在无种子注入的情况下输出功率随着吸收泵浦功率变化

Fig.2 Output power of the 1342 nm ring laser versus absorbed pump power without injection

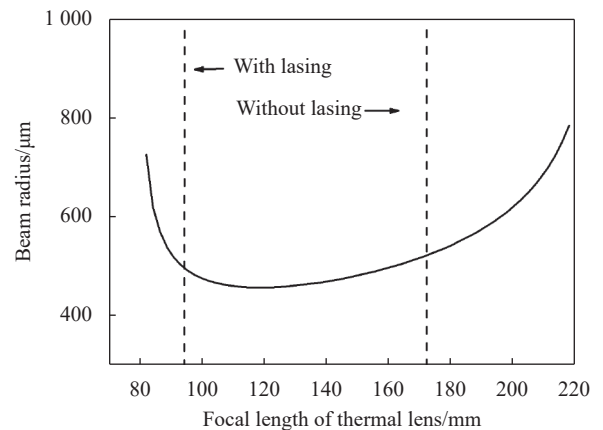


图 3 激光晶体中光束半径随着热透镜焦距的变化

Fig.3 Beam radius in laser crystal in versus focal length of thermal len

转换系数为 0.22;在存在 1342 nm 激光输出的情况下,热转换系数为 0.4,如图 3 中的虚线所示,在相同泵浦功率下晶体热透镜焦距在是否产生激光的不同情况下可分别位于稳区两端。因此,在泵浦光功率上升过程中,1342 nm 激光产生后,晶体热焦距由于激光的产生迅速变短,此时焦距越短越,谐振腔越稳定,这促使激光功率变高,然而更高的激光功率会进一步增加晶体产热,从而形成正反馈,激光功率迅速增加,直到达到稳区另外一端,此时如果继续增加泵浦会导致激光光斑半径变大及泵浦光的匹配程度变差,因而增加泵浦并不会让输出功率上升。另一方面,当泵浦光功率下降时,由于存在激光继续产热,需要降低相比上升过程时更多的泵浦光功率才能让激光器离开稳区,导致功率上升过程和下降过程产生了双稳态现象。

如图 2 所示, 激光器最大输出功率在泵浦功率下降时出现, 约为 13.7 W, 此时被吸收的泵浦功率约为 75 W。

将该输出功率的最高点作为实验的实际工作点, 并根据该工作点的腔内空间模式对种子激光进行严格优化, 使之主激光器的空间模式与从激光器最大程度地匹配。锁定激光输出功率由功率计 D1 测量, 反向激光功率由 D2 测量。图 4 所示为种子功率对注入锁定功率和反向功率的影响。实验中, 尝试降低注入光功率时, 反向激光功率会增加, 正向激光功率由于反向激光背向散射等效应的影响产生了自调制^[15], 尽管还是单纵模运转, 但是产生了大量强度噪声, 锁定系统信噪比下降, 当种子功率低于 4.47 mW 时, 锁定系统无法正确捕捉误差信号, 激光器处于完全失锁状态, 此时激光器处于多纵模震荡状态, 正向功率和反向功率均为 6.9 W 左右。当种子光功率高于该值时, 激光器进入锁定状态, 正向激光单纵模运行, 输出功率会随着种子功率增加而逐渐增加, 当种子功率达到 20.65 mW 时, 环形腔的输出功率达到最高 13.9 W, 相比于种子功率, 增益达到 28.21 dB, 提取效率为 18.3%, 与先前报道的工作相比^[12], 增益增加约 20 dB 以上, 且功率输出相比于先前报道的结果 (8.3 W) 也有 50% 左右的提升。

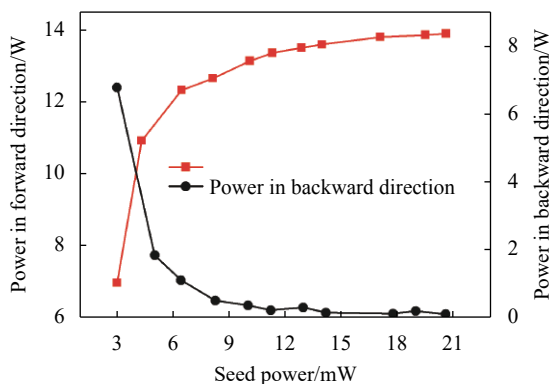


图 4 当吸收泵浦功率为 75 W 时, 锁频激光输出功率和反向功率随着种子光功率的变化

Fig.4 Output power of injection-locked laser and backward power versus the seed power with absorbed pump power of 75 W

注意到, 即便是种子功率最高的情况下, 通过 D2 仍然可以测到约 0.15 W 的反向输出功率, 并不为 0, 这是由 LI 技术的特点决定的, LI 技术需要正向功

率有一定变化来获得误差信号, 于是在调制 PZT 的过程中, 正向功率在某些时刻会有些许下降, 则一部分反向运行的激光模式会起振, 从而产生反向激光输出。

然后利用波长计 Highfinesse WS-6 测试了锁定激光的调谐性能, 如图 5 所示, 当种子功率为 20.65 mW 时, 激光器实现了从 1341.6774 nm 到 1341.8025 nm 的调谐, 调谐范围为 0.12 nm, 如果种子波长超过该范围, 锁定就会完全丢失, 激光器输出功率会变得很低, 这个范围相比于传统的行波放大要小得多^[16]。输出功率最高时的激光波长为 1341.7359 nm, 此时输出功率为 13.94 W。

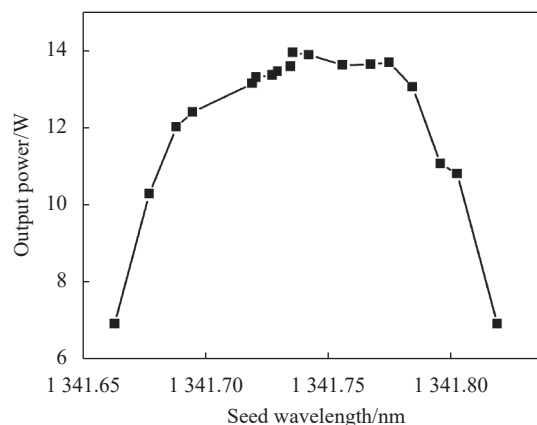


图 5 当种子光功率为 20.65 mW 时, 输出功率与种子光波长的关系

Fig.5 Dependence of the output power from the seed wavelength with seed power of 20.65 mW

锁定激光输出的单频性能用共焦 F-P 干涉仪 (美国 Thorlabs 公司, 型号为 SA200-8B) 表征。在激光输出功率最大时, 测量的 F-P 透过率曲线如图 6 所示。由图 6 可见, 激光器为单频运转, 线宽 41 MHz。可以发现, 放大后的激光线宽比种子激光线宽要宽 (种子光线宽约 1 MHz), 产生这样结果的主要原因是注入光功率较弱, 且存在反向运转的激光模式的影响, 因而展宽了线宽。

在上述条件下, 利用 CINOGY CS200 光束质量分析仪测量了锁定状态下激光输出的光束质量因子 M^2 , 如图 7 所示, 其中 x 轴方向上的光束质量因子为 $M_x^2 = 1.30$, y 轴方向上的光束质量因子为 $M_y^2 = 1.23$ 。图 6 中的插图为光斑的二维强度分布, 表明激光束为高斯基横模。

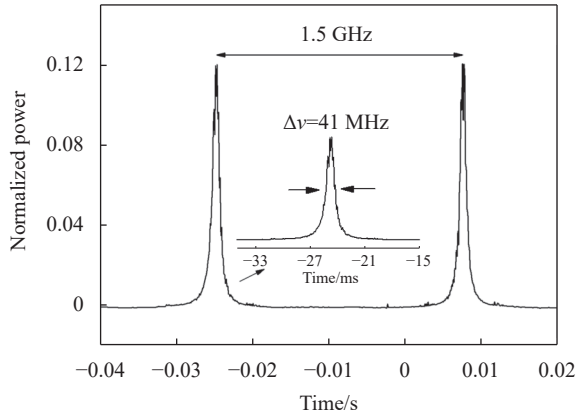


图 6 1342 nm 锁定激光输出的 F-P 扫描干涉仪透过率强度 (插图: 其中一个透射峰的放大图)

Fig.6 Transmitted intensity of the scanned F-P interferometer for the 1342 nm inject-locked laser output (Inset: magnified profile of one transmitted peak)

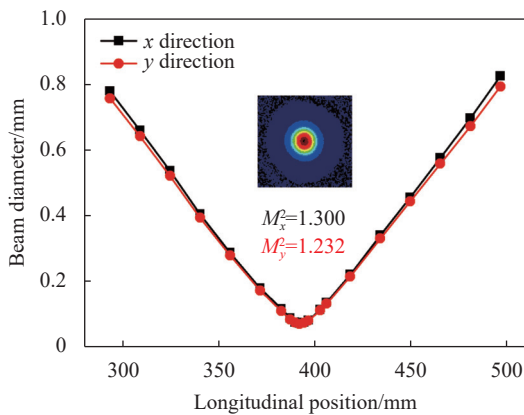


图 7 最大功率下输出激光的光束质量因子 M^2 测量 (插图: 二维光强分布图)

Fig.7 Beam quality factor M^2 measured at maximum output power (Inset: 2D beam intensity profile)

对于一些重要应用,亮度是关键指标,激光束的亮度由下式定义^[17]:

$$B = \frac{CP}{\lambda^2 M_x^2 M_y^2}$$

式中: P 为功率; λ 为激光波长; M^2 为光束质量因子; C 为一常数 (对于高斯光束 $C=1$)。通过计算,可以得到在该条件下,激光亮度为 $B=4.7 \times 10^{12} \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr}$ 。

图 8 为激光器最大输出功率下锁定运转时的功率稳定性曲线与波长稳定性测量图,此时平均功率为 13.9 W, 1 h 内功率稳定度为 $\pm 0.4\%$, 对应的平均波长为 1341.74203 nm, 1 h 内波长的波动范围为 2.9 pm。

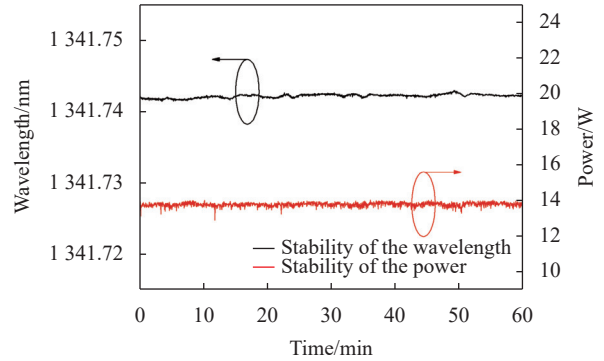


图 8 激光器的功率稳定性及波长稳定性测量图

Fig.8 Measurement of the power stability and wavelength stability of the locked laser

3 结 论

设计研究了单频可调谐 1342 nm 环形 Nd:YVO₄ 注入锁定激光器,在 20 mW 种子光的注入条件下,获得了最高 13.9 W 的单频连续 1342 nm 激光输出,线宽为 41 MHz, x 轴和 y 轴的光束质量因子分别为 $M_x^2=1.30$ 、 $M_y^2=1.23$,相应的亮度为 $4.7 \times 10^{12} \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr}$, 1 小时内功率稳定度为 $\pm 0.4\%$ 。

为了实现更稳定、线宽更窄的单频激光输出,后续可以对谐振腔进行封闭保护,以减少外部震动对锁定稳定性的影响,另外,还可以采用更高功率的种子和使用外部参考腔,以便于实现更窄的激光线宽。

参考文献:

- [1] Soos J I, Rosemeier R G. High frequency GaAs bulk acousto-optic devices for modulators and frequency shifters at 1.3 μm and 1.5 μm in fiber-optics [C]//Proceedings of SPIE, 1989, 987: 119-127.
- [2] Hou F Y, Yu L, Jia X J, et al. Experimental generation of optical non-classical states of light with 1.34 μm wavelength [J]. *European Physical Journal D*, 2011, 62: 433-437.
- [3] Barry J F, McCarron D J, Norrgard E B, et al. Magneto-optical trapping of a diatomic molecule [J]. *Nature*, 2014, 512: 286-289.
- [4] Symons E A. Lithium isotope separation: A review of possible techniques [J]. *Separation Science and Technology*, 1985, 20(9-10): 633-651.
- [5] Kaushik A. Trapping, transport and polarisation of ultracold lithium[D]. London: Imperial College London, 2014.
- [6] Ma Y, Li Y, Feng J, et al. High-power stable continuous-wave single-longitudinal-mode Nd:YVO₄ laser at 1342 nm [J]. *Optics*

- Express*, 2018, 26(2): 1538-1546.
- [7] Liu X C, Zhang F F, Wang Z M, et al. 30 W single-frequency continuous-wave master oscillator power amplifier laser at 1342 nm [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(8): 2606-2609.
- [8] Dianov E M, Bufetov I A, Bubnov M M, et al. 1.3- μm Raman fiber amplifier [C]//Proceedings of SPIE, 2000, 4083: 101-110.
- [9] Camargo F A, Zanon-willette T, Badr T, et al. Tunable single-frequency Nd:YVO₄ BiBO ring laser at 671 nm [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, 46(5): 804-809.
- [10] Koch P, Ruebel F, Bartschke J, et al. 5.7 W cw single-frequency laser at 671 nm by single-pass second harmonic generation of a 17.2 W injection-locked 1342 nm Nd:YVO₄ ring laser using periodically poled MgO:LiNbO₃ [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(33): 9954-9959.
- [11] Nabors C D, Farinas A D, Day T, et al. Injection locking of a 13-W cw Nd:YAG ring laser [J]. *Optics Letters*, 1989, 14(21): 1189-1191.
- [12] Sun Guixia, Ling Feitong, Xiong Ming, et al. A tunable CW single-frequency 1342-nm injection-locked ring laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(7): 0701004. (in Chinese)
- [13] McDonagh L, Wallenstein R, Knappe R, et al. High-efficiency 60 W TEM₀₀ Nd:YVO₄ oscillator pumped at 888 nm [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(22): 3297-3299.
- [14] Lenhardt F, Nittmann M, Bauer T, et al. High-power 888-nm-pumped Nd:YVO₄ 1342-nm oscillator operating in the TEM₀₀ mode [J]. *Applied Physics B*, 2009, 96: 803-807.
- [15] Qiu H Y, Liu Y, Sun L Q, et al. Rotation sensitivity self modulation in bi-directional CW Nd:YVO₄ ring laser [C]//Proceedings of SPIE, 2005, 6020: 60202P.
- [16] Zhou Z H, Wang Z M, Zhang Y X, et al. Wavelength tunable continuous wave single-frequency 1342 nm amplifier exceeding 44 W [J]. *Laser Physics Letter*, 2022, 19(8): 085003.
- [17] Kim J W, Yarrow M J, Clarkson W A. High power single-frequency continuous-wave Nd:YVO₄ master-oscillator power amplifier [J]. *Applied Physics B*, 2006, 85: 539-543.

A high-power single-frequency continuous-wave 1 342 nm Nd:YVO₄ laser with injection-locking

Zhou Zihan^{1,2,3}, Wang Zhimin^{1,2*}, Bo Yong^{1,2}, Zhang Fengfeng^{1,2}, Zhao Wencheng^{1,2},
Fu Li^{1,2}, He Hanxing^{1,2,3}, Cui Dafu^{1,2}, Peng Qinjun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Solid-state Laser, Technical Institute of Physics and Chemistry,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Key Laboratory of Functional Crystal and Laser Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100190, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract:

Objective The single-frequency lasers operating at 1.3 μm have been extensively investigated in a variety of fields, including quantum optics and fiber optical communication. A noteworthy example is the single-frequency tunable continuous-wave 671 nm laser based on frequency doubling of 1 342 nm laser, which is near the D-line atomic transitions (670.97 nm) of lithium vapor. Consequently, it finds important applications in the field of atomic physics related to lithium atoms, such as optical cooling, lithium atom interferometer, and lithium isotope separation. In applications like the lithium atom interferometer, a higher output power of the laser can yield improved results. At present, the output power of single-frequency continuous-wave 1 342 nm diode lasers is as low as several milliwatts, necessitating application by Raman laser amplifiers and solid-state laser amplifiers. Therefore, the entire system becomes large and heavy. This paper introduces an injection-locked single-frequency tunable 1 342 nm Nd:YVO₄ laser with high output power. The injection-locked laser offers the advantages of a small size and high gain, making it suitable for special demands.

Methods In this paper, an injection-locked 1 342 nm continuous-wave single-frequency tunable Nd:YVO₄ laser is developed. The system employs an end-pumped Nd:YVO₄ ring laser as the slave laser, with a distributed feedback laser (DFB) as the seed laser. The seed laser is coupled into the Nd:YVO₄ ring laser through output mirror (Fig.1). To achieve cavity length locking, a lock-in (LI) module is employed. The LI module detects laser intensity through a photoelectric detector and provides feedback control by adjusting the voltage on the piezoelectric transducer (PZT). The Nd:YVO₄ ring laser operates bidirectionally under free operation. When the PZT on the cavity mirror is adjusted to match the cavity length with the wavelength of the injected seed laser, the laser can operate unidirectionally, resulting in a single-frequency continuous-wave 1 342 nm laser. The laser's tuning capability is achieved by changing the wavelength of the seed laser.

Results and Discussions The measured output laser power in free operation is 13.9 W as recorded by power meter (Fig.2). In this state, the influence of the seed power on the injection locking of the ring laser is obtained (Fig.3). An output power of 13.9 W for the injection-locked laser is achieved with an input seed laser power of 20.69 mW. Under this condition, the tuning range of the laser is measured by a wave-meter, and a tuning range from 1 341.677 4 nm to 1 341.802 5 nm is achieved (Fig.4). Simultaneously, the laser line-width is studied using an F-P scanning interferometer (Fig.5). The laser operates in a single frequency with a line-width of approximately 41 MHz. The line-width of the output laser is enhanced compared to the seed laser, a result attributed to low seed power and the reverse-running laser mode in the cavity. The beam quality factors M^2 of the injection-locked 1 342 nm laser are determined to be $M_x^2 = 1.3$ in the x direction and $M_y^2 = 1.23$ in the y direction using a laser beam analyzer (Fig.6). The power fluctuations (RMS) at the 13.9 W of the laser are measured and the stability is better than $\pm 0.5\%$ (Fig.7).

Conclusions A high-power tunable single-frequency 1 342 nm Nd:YVO₄ laser based on LI injection-locked technology was successfully designed. The output power of injection-locked 1 342 nm laser reached 13.9 W, with a DFB seed laser power of 20 mW. The tuning range of the laser system was analyzed using a wave-meter, and the measured tuning range spanned from 1 341.677 4 nm to 1 341.802 5 nm. Various characteristics, including beam quality, laser line-width, power stability were comprehensively measured. To achieve the better stability and lower system noise, the methods of employing a seed laser with higher power and implementing methods such as reducing vibration and enclosed the structures have been identified as effective.

Key words: Nd:YVO₄ laser; continuous-wave; single-frequency; tunable; injection-locked