

小型全光纤耦合非平面环形腔固体激光器

孙广伟^{1,2}, 辛国锋^{1*}, 朱韧¹, 陈迪俊^{1,3}, 冯盼¹,
侯霞¹, 蔡海文^{1,2**}, 陈卫标^{1,3}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所航天激光工程部, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³国科大杭州高等研究院物理与光电工程学院, 江苏 杭州 310024

摘要 研制了一种小型全光纤耦合非平面环形腔固体激光器, 在 1.5 W 的 808 nm 半导体激光器泵浦下, 单模保偏光纤耦合输出功率近 600 mW, 线宽小于 200 Hz, 偏振对比度优于 20 dB。对该激光器的调谐、频率稳定性、功率稳定性等性能进行了研究, 该激光器通过了力学试验(随机振动均方根加速度为 19.8g, 其中 g 为重力加速度)和温度试验(-20~+65 °C), 试验前后输出功率变化小于 5%, 可以用于对力学环境和温度环境要求较高的场合。

关键词 激光器; 非平面环形腔; 窄线宽; 稳定性; 力学试验; 温度试验

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1301002

1 引言

单频全固态激光器具有线宽窄、频率稳定等优点, 在激光雷达、重力波探测、相干通信等方面具有广泛的应用^[1-6]。自 Kane 等^[7]提出非平面环形腔固体激光器以来, 国内外对该结构的单频激光器进行了大量研究。Trutna 等^[8]对单频非平面环形腔(NPRO)晶体结构进行了改进, 设计了准平面的单块环形腔激光器, 降低了激光器对外加磁场强度的要求, 但同时也增加了晶体加工的难度。Willke 等^[9]采用 810 nm 半导体激光器泵浦 NPRO 晶体, 获得了 700 mW 的单模输出。美国 JDSU 公司基于 NPRO 晶体结构设计实现了商用化封装模块, 输出激光的功率可达到 700 mW, 线宽小于 5 kHz, 频率漂移 < 50 MHz/h^[10]。国内也有很多单位对非平面环形腔单频激光器的单频特性^[11]、可调谐性能^[12]和频率性能^[13]进行了研究。研究者研究了单块晶体成腔的单频非平面环形腔固体激光器, 在 1.83 W 的 808 nm 抽运功率下输出激光为 1.01 W, 斜率效率达到 60%, 激光线宽小于 2 kHz。梁旭等^[14]采用量子理论对单块非平面环形腔 Nd:YAG 激光器的强度噪声特性进行了研究, 当弛豫振荡峰为 311 kHz 时, 弛豫振荡峰处的强度噪声被抑制了 39 dB, 在整个频谱范围内获得了低于 -115 dB/Hz 的噪声水平。Deng 等^[15]创新采用 885 nm 二极管泵

浦, 获得了 4.54 W 的 1064 nm 激光输出, 斜率效率达到 76.9%。但是大多数研究报道都是从腔结构出发, 研制桌面试验系统, 而仅有的几款商用产品也很难满足窄线宽、小体积、高可靠性等要求。应用领域尤其是空间领域的不断扩展, 对单频固体激光器的高可靠性、小型化、气密性等提出了更高的要求。

本文研制了一种小型全光纤耦合非平面环形腔固体激光器, 将半导体制冷器、激光晶体、压电陶瓷(PZT)、热敏电阻、1/2 波片、1/4 波片、泵浦光纤、耦合光纤、永久磁铁等集于一体, 利用激光焊接固定泵浦光纤组件和耦合光纤组件, 采用平行缝焊技术实现盖板的金属焊接, 实现了小型化、高温稳定性和力学稳定性。单模保偏光纤的耦合输出功率近 600 mW, 输出线宽小于 200 Hz, PZT 调谐范围超过 ±220 MHz, 调谐系数为 2.7 MHz/V, 通过温度调谐可以实现 9 GHz 的无调模调谐, 调谐系数为 -2.8 GHz/°C, 经过力学试验(随机振动均方根加速度为 19.8g, 其中 g 为重力加速度)和温度试验(-20~+65 °C), 试验前后输出功率变化小于 5%。

2 基本原理及结构

2.1 基本原理

激光晶体采用单块非平面单向行波环形腔, 结构示意图如图 1 所示, A 点为泵浦光入射点和 1064 nm

收稿日期: 2021-08-13; 修回日期: 2021-10-29; 录用日期: 2021-11-29

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFC2200300, 2020YFB0408300)、国家自然科学基金(61775225, 61875214, 61805260)、中国科学院战略性先导科技专项(XDB43000000)、上海自然科学基金(21ZR1472100)

通信作者: *gxfxin@siom.ac.cn; **hwcai@siom.ac.cn

激光输出点,激光在 B 、 C 、 D 处发生全内反射。 A 点镀有对泵浦光有高透过率、对振荡光的两个偏振光有不同透过率的介质膜。 H 为外加磁场的方向。利用光波在腔内不同空间取向的全反射面上的相位延迟和外加磁场引入的法拉第旋光效应,通过在输出耦合面上镀膜,最后实现一个方向某一个偏振态起振,从而实现单向行波振荡。

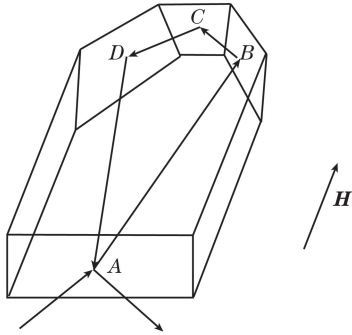


图 1 NPR0 晶体结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of NPR0 crystal

所用的 NPR0 晶体中各参数定义如图 2 所示, E 为 BD 中点, $|AB| = |AD|$, $|BC| = |CD|$, β 反映了谐振腔的非平面程度, θ_A 为入射光路与入射面法线的夹角, θ_B 为入射光路与反射面的夹角, θ_C 为反射光路与反射面中线的夹角, 外加磁场方向平行于 AE 。根

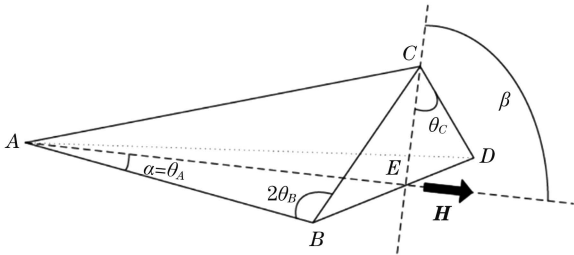


图 2 NPR0 参数定义

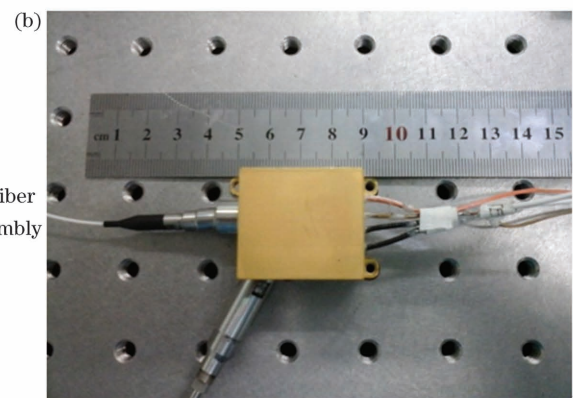
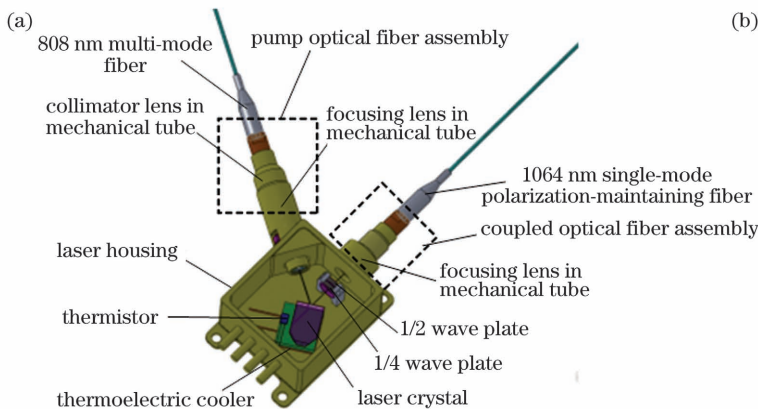


图 3 非平面环形腔激光器集成设计。(a)非平面环形腔激光器结构示意图;(b)封装器件照片

Fig. 3 Integrated design of nonplanar ring oscillator laser. (a) Structural diagram of nonplanar ring oscillator laser;

(b) photography of packaged device

据文献[16]的理论和分析,取 AE 、 CE 、 α 和 β 为描述晶体环路的 4 个参数,设计晶体环路结构参数为: $|AE| = 10.5 \text{ mm}$, $|CE| = 1.5 \text{ mm}$, $\alpha = 16.10^\circ$, $\beta = 45^\circ$, 输入输出面的 s 偏振光反射率为 $R_s = 97\%$, p 偏振光反射率为 $R_p = 85\%$ 。

2.2 激光器的集成设计

将半导体制冷器、热敏电阻、激光晶体等通过金属焊接方式集成在激光器壳体 ($35 \text{ mm} \times 32 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$) 内,泵浦光纤组件和耦合光纤组件通过激光焊接被固定在激光壳体外部,两组件光轴成 61° , 内部引线通过焊接被引出到激光器壳体对应的管脚上,最后将固定有永久磁铁(两块尺寸为 $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ 的磁铁,强度约为 0.2 T) 的盖板放置在激光器壳体上,通过平行缝焊技术将盖板焊接在激光器壳体上,磁铁距离晶体上表面约 1 mm ,结构示意图如图 3(a)所示,集成后的器件如图 3(b)所示。泵浦光经过准直透镜(被放在泵浦光纤组件内部)、聚焦透镜(被放在泵浦光纤组件内部)耦合到激光晶体表面,通过泵浦激光晶体吸收,形成环形腔;输出激光先后通过 $1/4$ 波片和 $1/2$ 波片, $1/4$ 波片距晶体约 4 mm (波长为 1064 nm , 直径为 5 mm , 厚度为 0.5 mm), 然后通过聚焦透镜(被放在耦合光纤组件内部)耦合到单模保偏光纤;通过旋转 $1/2$ 波片,输出激光的偏振方向与保偏光纤的快轴或慢轴对准。通过内部集成的半导体制冷器和热敏电阻,实现了输出激光频率的稳定或大范围温度调谐;通过激光晶体上面的 PZT,可以实现输出激光频率的微调, PZT 尺寸为 $11 \text{ mm} \times 9 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$, 满幅值驱动电压为 100 V 。激光晶体 Nd:YAG 的外形尺寸为 $12 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 泵浦光纤芯径为 $105 \mu\text{m}$, 数值孔径为 $NA = 0.22$, 耦合光纤为熊猫型保偏光纤, 芯径为 $6 \mu\text{m}$, 数值孔径为 $NA = 0.12$ 。

3 试验结果

3.1 输出光功率

泵浦光源采用 Alfalight 公司生产的波长锁定光

纤耦合输出半导体激光器,波长为 808 nm , 光纤芯径为 $105 \mu\text{m}$, 数值孔径为 $NA = 0.22$, 最大输出功率为 2 W 。图 4 给出了该激光器的输入输出功率曲线,可以看出,泵浦功率阈值为 200 mW , 在 1475 mW 泵浦

功率下,激光晶体的输出功率达到 800 mW,光光转换效率为 54%,斜率效率为 69.5%,如图 4(a)所示,将激光晶体输出激光耦合进单模保偏光纤后的输出功率曲线如图 4(b)所示,单模保偏光纤的输出功率为

597 mW,输出偏振消光比优于 20 dB(在外力或温度扰动下),单模光纤耦合效率大于 75%。从输出功率曲线来看,没有热饱和现象,随着泵浦功率的提高,输出功率还可以增加。

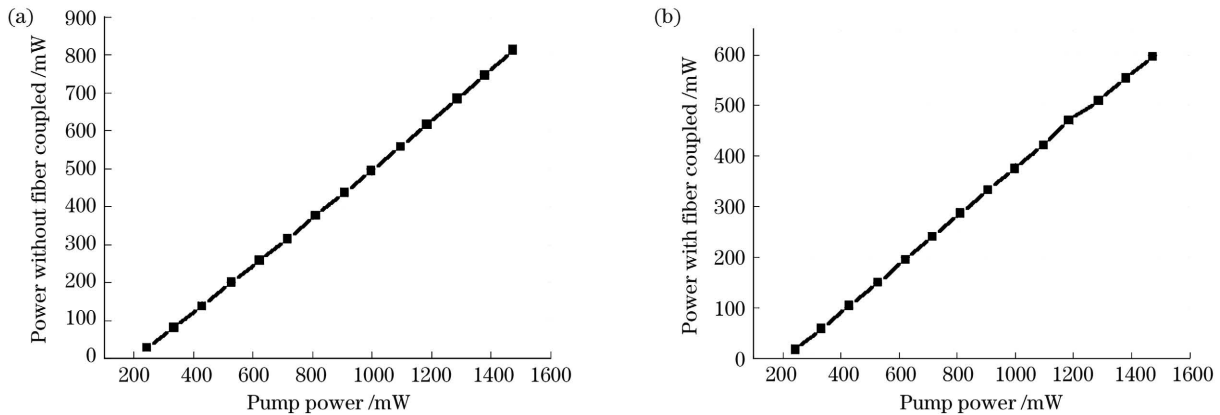


图 4 激光器输出功率。(a)单模保偏光纤耦合前;(b)单模保偏光纤耦合后

Fig. 4 Output powers of laser. (a) Before coupling of single mode polarization maintaining fiber; (b) after coupling of single mode polarization maintaining fiber

用 NOVAII PD300 功率计对输出功率的稳定性进行了测试,在泵浦功率约为 620 mW 的条件下,刚开始加电输出功率为 179.8 mW,随后逐渐上升,约 20 min

功率为 187.4 mW,随后输出功率稳定为 187.3 ~ 187.6 mW。激光器在无主动反馈、无稳频、自由运转的情况下,输出功率的稳定性为 0.16%@2 h,如图 5 所示。

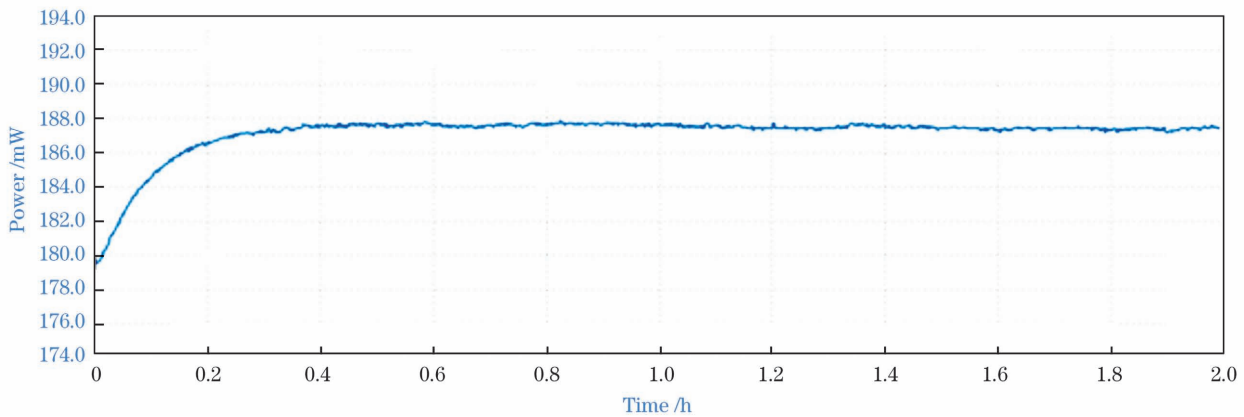


图 5 输出功率的稳定性测试

Fig. 5 Stability test of output power

3.2 激光线宽及频率稳定性

采用基于 3×3 耦合器的非平衡迈克耳孙干涉仪的噪声测试技术,分别对激光器的频率噪声及线宽进行了测试^[17-18]。所用的非平衡迈克耳孙干涉仪的臂长差时延为 244 ns,所对应的带宽为 4.1 MHz,干涉信号由高速采集卡采集后被用于对待测激光的差分相位进行解调,处理后得到傅里叶频率 1 MHz 范围内的归一化 1 m 瞬时频率波动功率谱密度(PSD),对晶体工作温度为 24 °C 时的频率噪声进行了测试,结果如图 6 所示。频率噪声谱的低频段为 $1/f$ 噪声,高频段为白噪声,分别决定了激光器的积分线宽及极限线宽。基于频率噪声谱,利用 β -算法可以计算得到不同测量时间(即不同积分带宽)下的积分线宽,线宽随着积分带宽下限的减小而增大,在积分时间为 1 ms 时所对应的积分线宽为 3.304 kHz,频率噪

声的白噪声极限为 $S_w = 58.21 \text{ Hz}^2/\text{Hz}$,所对应的极限线宽为 $\Delta\nu = \pi S_w \approx 182.87 \text{ Hz}$ 。

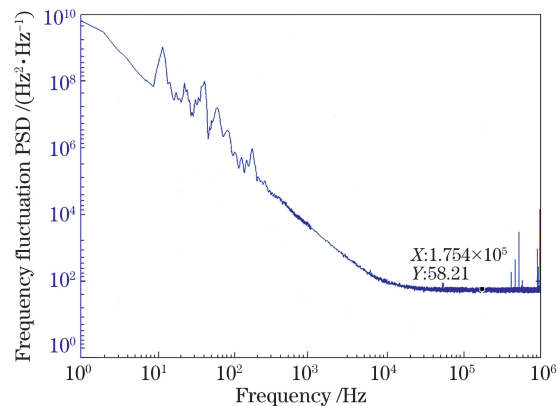


图 6 线宽测量结果

Fig. 6 Measurement result of linewidth

采用 WS-71R 波长计直接对输出激光的频率稳定性进行了测试,激光器内部半导体制冷器(TEC)的温度设定为 24 °C,对激光输出功率约为 590 mW 时的频率

稳定性进行了测量,测试结果如图 7 所示,在刚开始加电时有 5 min 的下降过程,随后频率趋于稳定,在无反馈激光器自由运转时,激光频率稳定性为±10 MHz@3 h。

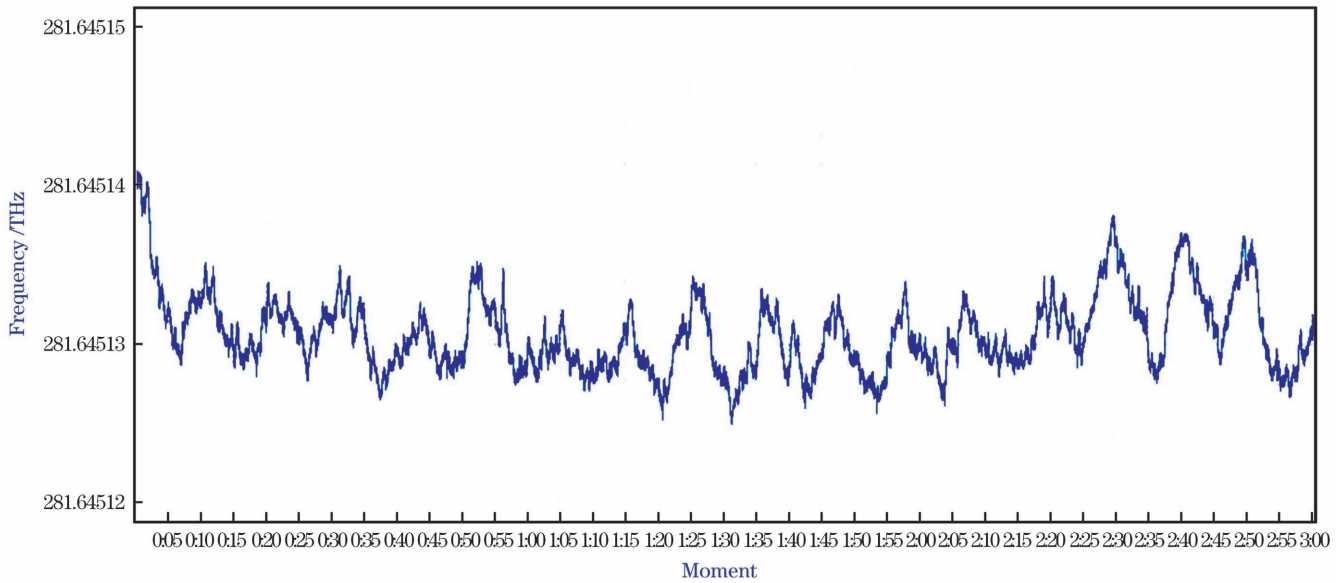


图 7 输出频率的稳定性测试
Fig. 7 Stability test of output frequency

3.3 频率调谐性能

对激光器频率的温度调谐、PZT 机械调谐、泵浦功率调谐性能进行了测试,以期为该器件的主动稳频提供试验数据。

3.3.1 频率的温度调谐

通过激光器内部半导体制冷器改变激光晶体温度,当温度为 19~28 °C 时激光频率变化超过 14 GHz,而在无跳模的连续调谐情况下,调谐系数约为 -2.8 GHz/°C,可以实现 9 GHz 的无跳模调谐,温度调谐曲线如图 8 所示。

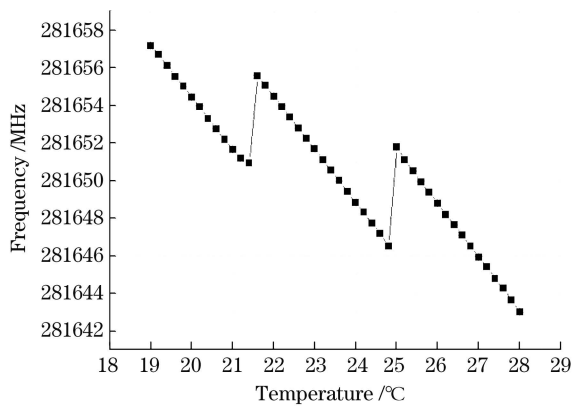


图 8 激光频率随晶体温度的变化
Fig. 8 Laser frequency versus crystal temperature

3.3.2 PZT 机械调谐

通过给 PZT 施加电压改变 NPRO 激光器腔长从而改变激光频率,测得的激光频率变化与压电陶瓷电压的关系如图 9 所示,调谐系数为 2.7 MHz/V,调谐范围超过±220 MHz。

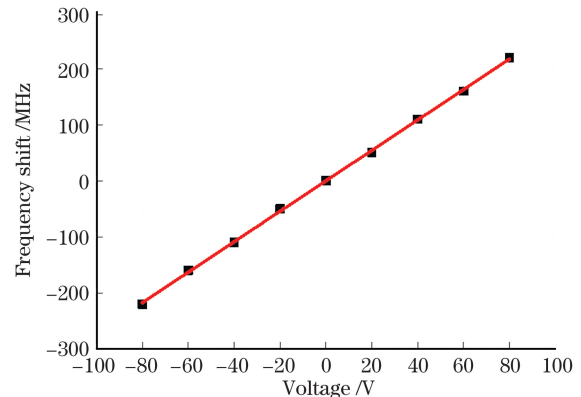


图 9 调谐频率随驱动电压的变化
Fig. 9 Tunable frequency versus driving voltage

3.3.3 功率调谐

通过改变泵浦功率,可以改变晶体内部的热分布,从而使腔长发生改变,实现频率调谐,但是该调谐同时会改变输出功率,图 10 给出了输出功率变化带来的频

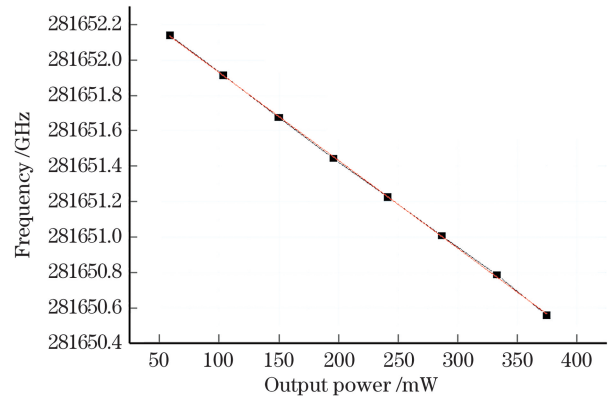


图 10 激光频率随输出功率的变化
Fig. 10 Laser frequency versus output power

率变化, 频率随输出功率的变化系数为 -4.96 kHz/mW , 调谐系数介于 PZT 机械调谐系数和温度调谐系数之间, 可以用于实际稳频过程中。

3.4 力学振动试验

对该激光器进行机械冲击和随机振动试验, 试验条件如表 1、2 所示。

表 1 机械冲击试验条件

Table 1 Mechanical shock test conditions

| Parameter | 100-400 Hz | 400-5000 Hz |
|------------------------|-------------------------------|-------------|
| Power spectral density | +8 dB per octave | 450g |
| Test direction | X, Y, Z | |
| Test time | Three times in each direction | |

表 2 随机振动试验条件

Table 2 Random vibration test conditions

| Parameter | Power spectral density |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Power spectral density | +3 dB per octave@10-100 Hz, 0.36g ² /Hz@100-800 Hz, -9 dB per octave@800-2000 Hz |
| Total root mean square value | 19.8g |
| Loading direction | X, Y, Z |
| Test duration | 2 min in each direction |

力学试验前、后的输出功率曲线如图 11 所示, 输出功率变化小于 0.7%。

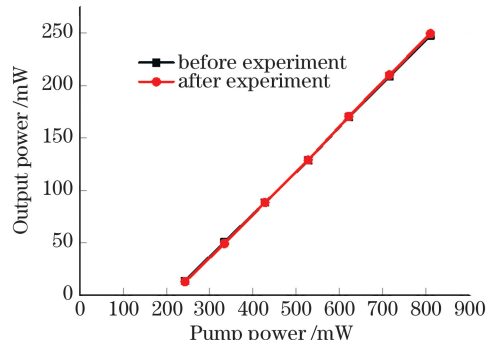


图 11 力学试验前后输出功率的变化

Fig. 11 Change of output power before and after mechanical vibration test

3.5 温度试验

高温存储温度为 $+65 \text{ }^\circ\text{C}$, 存储时间为 48 h; 低温存储温度为 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$, 存储时间为 24 h; 输出功率由试验前的 181.3 mW 降低到了 179 mW, 变化率为 1.3%。

温度循环范围为 $-20 \sim +65 \text{ }^\circ\text{C}$, 极限温度停留时间 30 min, 12.5 次循环, 温变速率为 $5 \text{ }^\circ\text{C/min}$; 输出功率由试验前的 179 mW 增加到了 180 mW, 变化率为 0.6%。

在 $+10 \sim +30 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度循环下 (极限温度停留时间为 60 min, 4 次循环, 温度系数为 $5 \text{ }^\circ\text{C/min}$), 用功率计在线监测输出功率, 整个监测过程中平均功率为 175.3 mW, 最小值为 168.5 mW, 最大值为 183.6 mW, 功率变化量为 $\pm 4.3\%$, 如图 12 所示。

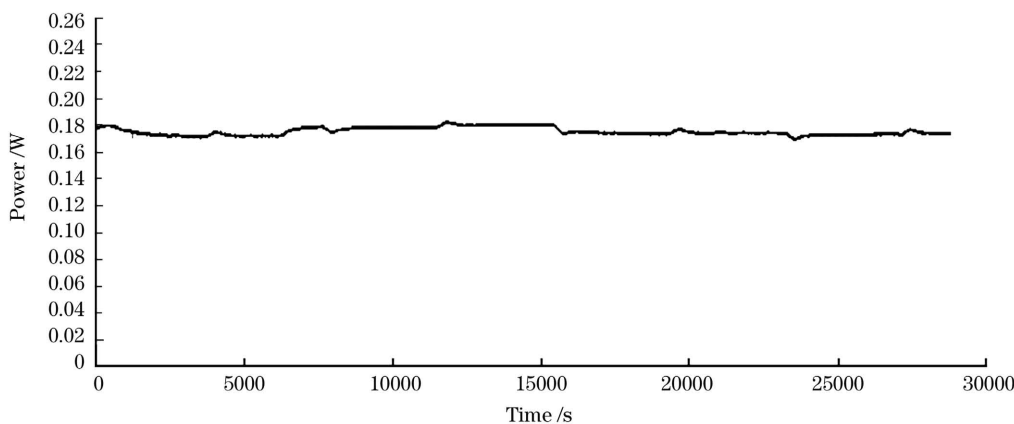


图 12 输出功率的在线监测结果

Fig. 12 Online monitoring result of output power

进一步增加工作环境温度, 从低温 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 到高温 $+40 \text{ }^\circ\text{C}$, 每升高 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 记录数据 (每个温度点停留 30 min), 输出功率的变化情况如图 13 所示, 在 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 变化范围内, 输出功率变化约为 8%, 而在 $35 \text{ }^\circ\text{C}$ 以前输出功率是非常稳定的, 功率变化仅为 2.3%。

4 可靠性分析

空间激光器最大的特殊性在于其研制过程中的环境考验和运行环境的特殊性。激光器在发射过程中不仅要经历振动和冲击的作用, 还要经历大气压力和温度的急剧变化, 所以研制的空间激光器必须能够适应空间极端环境, 保证在轨运行时能够正常运转。本器

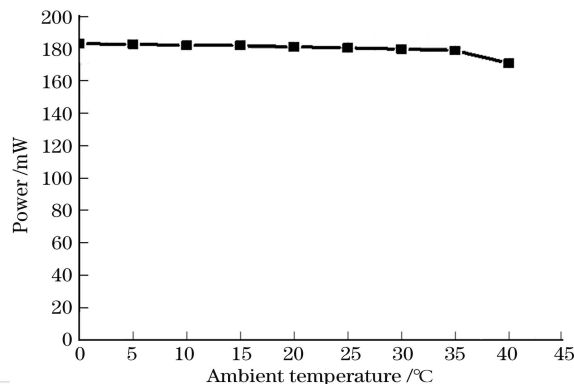


图 13 输出功率随环境温度的变化

Fig. 13 Output power versus ambient temperature

件在研制工程中,对元件质量严格把关,每种元件都需要在 20~200 倍率的显微镜下检查,然后进行筛选试验,剔除不合格产品;对光腔结构进行仿真设计和评审;对研制工艺进行评审。

传统激光器采用胶粘接元器件,胶固定的散热效果远远不如金属固定方法,而且胶的厚度也会带来较大的应力,在真空环境或者高功率下使用时,胶还会挥发,对光学件造成污染,这些都会严重影响可靠性。本器件内部的关键组部件采用无胶焊接封装技术,解决了在激光晶体等关键元件使用过程中胶造成的应力、污染和散热问题。激光器内部气氛对其寿命影响很大,一般情况下要求寿命末期内部压力不能下降到初始值的 50% 以下,因此要求外壳具有较高的密封性。本器件采用无胶金属焊接光学窗口和密封盖板,减小了在真空使用过程中光学件污染的可能性,极大提高了器件的工作寿命和可靠性。在激光器中,光纤耦合的对准精度要求很高,在微米量级,调整后光纤的固定一般采用胶固定或螺丝固定方式,这种方式力学性能较差,而且由于胶的膨胀系数较大,在经过温度循环后,光纤耦合效率会明显下降,降低激光器的寿命和可靠性。本器件采用同种材料激光焊接固定光纤工艺,提高了光纤耦合器件的温度稳定性和力学稳定性。综上,通过对光学设计、元器件质量、研制工艺等进行严格控制和把关,激光器能够可靠、安全及长寿命运行,预期寿命为 8 年。

5 结 论

研制了一种高集成度的全光纤耦合非平面环形腔固体激光器,该激光器具有百 Hz 的线宽,温度调谐系数约为 $-2.8 \text{ GHz}/^\circ\text{C}$ (可实现 9 GHz 的无跳模调谐),PZT 机械调谐系数为 $2.7 \text{ MHz}/\text{V}$,输出功率调谐系数为 $-4.96 \text{ kHz}/\text{mW}$ 。经过了严格的力学振动和温度试验等,试验前后功率变化小于 5%,非常适用于对激光器温度和力学环境要求较高的场合。该固体激光器线宽窄、噪声低、体积小,且制造工艺成熟,在引力波探测、激光雷达、频率转换等高精度激光应用领域中具有巨大的应用潜力。

参 考 文 献

- [1] 李梦龙,高龙,史文宗,等. 全固态单频激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 080003.
Li M L, Gao L, Shi W Z, et al. Progress in all-solid-state single-frequency lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 080003.
- [2] 徐俊杰,卜令兵,刘继桥,等. 机载高光谱分辨率激光雷达探测大气气溶胶的研究[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0710003.
Xu J J, Bu L B, Liu J Q, et al. Airborne high-spectral-resolution lidar for atmospheric aerosol detection[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0710003.
- [3] McNamara P W, Ward H, Hough J, et al. Laser frequency stabilization for spaceborne gravitational wave detectors[J]. Classical and Quantum Gravity, 1997, 14(6): 1543-1547.
- [4] Mavalvala N, McClelland D E, Mueller G, et al. Lasers and optics: looking towards third generation gravitational wave detectors[J]. General Relativity and Gravitation, 2011, 43(2): 569-592.
- [5] Peng J K, Li L F, Chen L S, et al. A spaceborne neodymium-doped yttrium aluminum garnet laser with nonplanar-ring-oscillator configuration[J]. International Journal of Modern Physics A, 2021, 36(11/12): 2140007.
- [6] 张强,郭玉彬,陈嘉轲,等. 基于相位调制-相干检测的模式复用通信实验[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0306001.
Zhang Q, Guo Y B, Chen J K, et al. A communication experiment using mode division multiplexing with phase modulation-coherent detection[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0306001.
- [7] Kane T J, Byer R L. Monolithic, unidirectional single-mode Nd:YAG ring laser[J]. Optics Letters, 1985, 10(2): 65-67.
- [8] Trutna W R, Donald D K, Nazarathy M. Unidirectional diode-laser-pumped Nd:YAG ring laser with a small magnetic field[J]. Optics Letters, 1987, 12(4): 248-250.
- [9] Willke B, Brozek S, Danzmann K, et al. Frequency stabilization of a monolithic Nd:YAG ring laser by controlling the power of the laser-diode pump source[J]. Optics Letters, 2000, 25(14): 1019-1021.
- [10] Izumi K, Arai K, Barr B, et al. Multicolor cavity metrology[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2012, 29(10): 2092-2103.
- [11] 朱初,周军,刘继桥,等. 可调谐单频非平面环形腔固体激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1102011.
Zhu R, Zhou J, Liu J Q, et al. Solid state tunable single-frequency laser based on non-planar ring oscillator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(11): 1102011.
- [12] 邓珠峰,王云祥,邱琪,等. 非平面环形激光器的大范围调谐技术研究[J]. 激光技术, 2013, 37(3): 281-283.
Deng Z F, Wang Y X, Qiu Q, et al. Study on high-range frequency tuning technology for nonplanar ring laser[J]. Laser Technology, 2013, 37(3): 281-283.
- [13] 冯浩,张雪洁,任志远,等. 频率稳定的非平面环形腔激光器[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1014001.
Feng T, Zhang X J, Ren Z Y, et al. Frequency stabilization laser based on non-planar ring oscillator[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1014001.
- [14] 梁旭,王云祥,邱琪,等. 非平面环形腔激光器的强度噪声及其抑制[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1202006.
Liang X, Wang Y X, Qiu Q, et al. Intensity noise properties and suppression of nonplanar ring oscillator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(12): 1202006.
- [15] Deng W P, Yang T, Cao J P, et al. High-efficiency 1064 nm nonplanar ring oscillator Nd:YAG laser with diode pumping at 885 nm[J]. Optics Letters, 2018, 43(7): 1562-1565.
- [16] Nilsson A C, Gustafson E K, Byer R L. Eigenpolarization theory of monolithic nonplanar ring oscillators[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1989, 25(4): 767-790.
- [17] Xu D, Yang F, Chen D J, et al. Laser phase and frequency noise measurement by Michelson interferometer composed of a 3×3 optical fiber coupler[J]. Optics Express, 2015, 23(17): 22386-22393.
- [18] Xu D, Yang F, Chen D J, et al. Laser phase noise measurement by using an adjustment-free Michelson interferometer based on 3×3 optical coupler[C]//Asia Communications and Photonics Conference 2015, November 19-23, 2015, Hong Kong, China. Washington, D.C.: OSA, 2015: Asu3C.4.

Compact All Fiber Coupled Nonplanar Ring Oscillator Solid-State Laser

Sun Guangwei^{1,2}, Xin Guofeng^{1*}, Zhu Ren¹, Chen Dijun^{1,3}, Feng Pan¹,
Hou Xia¹, Cai Haiwen^{1,2**}, Chen Weibiao^{1,3}

¹Spaceborne Laser Engineering Department, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³College of Physics and Optoelectronic Engineering, Hangzhou Institute for Advanced Study,
UCAS, Hangzhou 310024, Zhejiang, China

Abstract

Objective Since the advent of lasers, a single-frequency laser has always been a key research direction of lasers. A single-frequency all-solid-state laser has the advantages of narrow linewidth and stable frequency, which is widely used in lidar, gravity wave detection, coherent communication, and so on. Many research institutions and enterprises have studied the tunable performance, frequency performance, and noise characteristics of nonplanar ring oscillator (NPRO) single-frequency lasers. However, most researches are based on the cavity structure to develop a desktop test system. And commercial products are difficult to meet the requirements of narrow linewidth, small volume, and high reliability, and thus difficult to meet the requirements of space field. The greatest particularity of space laser is the particularities of test environment and operation environment. The laser has to experience not only vibration and shock, but also the rapid changes of atmospheric pressure and temperature in the process of laser emission. These raise high requirements for the performance and reliability of the laser. Therefore, it is necessary to develop a laser with characteristics of miniaturization, high performance, and high reliability, which can adapt to the extreme space environment and ensure the normal operation in orbit.

Methods In this study, we design a new structure of an NPRO crystal with a dimension of 12 mm (length) × 8 mm (width) × 3 mm (height). First, to achieve a single frequency output and high slope efficiency, the transmission of the coupling coating is optimized to 97% for s-polarization and 85% for p-polarization. Then we develop a small all fiber coupled nonplanar ring cavity solid-state laser. The device is mainly composed of pump fiber assembly, Nd:YAG NPRO crystal, and coupled fiber assembly. The beam from the pump fiber is first focused by lens and then injected into the NPRO crystal. The beam from the NPRO crystal is focused into the coupled fiber. The core diameter of the pump fiber is 105 μm with a numerical aperture of NA = 0.22. The coupling fiber is a panda polarization maintaining fiber and its core diameter is 6 μm with a numerical aperture of NA = 0.12. Semiconductor cooler, thermistor, and laser crystal are integrated in the laser housing by metal welding. The pump optical fiber assembly and the coupling optical fiber assembly are fixed outside the laser housing by laser welding. The permanent magnet is fixed on the cover plate by adhesive. Finally, the cover plate is welded on the laser housing by the parallel seam welding technology.

Results and Discussions To satisfy the needs of high reliability, miniaturization, and air tightness in the space field, a compact all fiber coupled NPRO solid-state laser is developed. The output power of the single-mode polarization maintaining fiber is nearly 600 mW under a 1.5 W pump power (Fig. 4). The power stability and frequency stability of the laser are tested. The power stability is 0.16% @ 2 h (Fig. 5) and the frequency drift is less than 20 MHz @ 3 h (Fig. 7). The linewidth is about 182.87 Hz (Fig. 6), and the polarization contrast is better than 20 dB. The temperature tuning coefficient is about -2.8 GHz/°C, and the 9 GHz mode hopping free tuning is obtained (Fig. 8). The PZT mechanical tuning coefficient is 2.7 MHz/V (Fig. 9). The output power tuning coefficient is -4.96 kHz/mW (Fig. 10). The tuning coefficient is between PZT mechanical tuning coefficient and temperature tuning coefficient, which can be used in the actual frequency stabilization process. The laser passes the mechanical test (the root mean square accelerated speed of random vibration is 19.8g, where g is the accelerated speed of gravity) and the temperature test (-20~65 °C), and the output power change is less than 5% before and after the test (Fig. 11).

Conclusions A compact all fiber coupled NPRO solid-state laser is developed. The laser has a linewidth of around 100 Hz. The temperature tuning coefficient is about -2.8 GHz/°C, and 9 GHz mode hopping free tuning is obtained. The PZT mechanical tuning coefficient is 2.7 MHz/V. The output power tuning coefficient is -4.96 kHz/mW. The laser passes various environmental routine tests, and the output power change is less than 5% before and after the tests. The solid-state laser is very suitable for high working temperature and mechanical environment. It has the advantages of narrow linewidth, low noise, small volume, low cost, and mature manufacturing. It has a great application potential in high-precision gravitational wave detection, lidar, frequency conversion and others.

Key words lasers; nonplanar ring oscillator; narrow linewidth; stability; mechanical test; temperature test