

DBR 单纵模光纤激光器波长温度调谐

陈磊^{1,2}, 朱嘉婧³, 李磐^{2,4*}, 刘河山^{2,4}, 柯常军^{1,2}, 余锦^{1,2*}, 罗子人^{2,4}

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 北京航天控制仪器研究所, 北京 100039;
4. 中国科学院力学研究所 国家微重力实验室, 北京 100190)

摘要: 报道了采用 DBR 方式, 利用 8 mm 的高浓度掺 Yb³⁺ 单模光纤, 实现了波长为 1064 nm 的单纵模调谐激光稳定输出的实验结果。该 DBR 谐振腔有效腔长为 16 mm, 输出最大功率为 7.4 mW, 通过半导体制冷器温控改变谐振腔的温度, 实现了 0.824 nm 的单纵模无跳模调谐。采用光纤外差法, 并利用低损耗环形器和光纤反射镜倍增延迟线长度提升测量精度的方式, 测量得到激光最大线宽为 4.4 kHz。单纵模激光的弛豫震荡峰位于 900 kHz 处, 其相对强度噪声为 -110 dB/Hz, 当频率大于 1.5 MHz 时相对强度噪声为 -145 dB/Hz。

关键词: 光纤激光器; 单频; 温度调谐; 分布布拉格反射

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220570

0 引言

单纵模光纤激光具有线宽窄、相干性好、易于集成等特点, 在相干光通信、激光雷达、引力波探测等领域有大量的应用需求^[1-3]。随着单纵模光纤激光器的广泛使用, 尤其是在光谱合成、激光频率锁定、相干探测等领域^[4-6], 对单纵模激光除了线宽、噪声和相干性具有极高要求外, 还要求单纵模光纤激光器具有一定的波长调谐能力, 因此如何提升单纵模光纤激光的调谐性能引起研究人员极大兴趣。

近年来, 人们对单纵模光纤激光器的调谐特性进行了大量研究。2016 年, 华南理工大学提出了一种分布布拉格反射 (Distributed Bragg Reflector, DBR) 型单纵模光纤激光温度调谐模型, 并实现了 1064 nm 处 0.15 nm 的调谐^[7]; 2018 年, Pavel Honzatko 等人在环形腔内构建带有反馈电路装置的光纤环滤波器, 实现了范围为 1023~1107 nm 的单纵模激光调谐, 输出光线宽为 600 Hz^[8]; 2020 年, 加拿大渥太华大学研究者提

出了一种基于宇称时间对称的亚 kHz 线宽的波长可调谐单频光纤激光器, 连续单纵模调谐范围为 1555.135~1555.887 nm, 输出光线宽为 433 Hz^[9]; 2021 年, 华南理工大学设计了一种环形腔单纵模光纤激光器, 由法布里-珀罗 (F-P) 腔和掺铒光纤构成动态光栅实现可调谐窄带滤波, 单纵模调谐范围为 1535.5~1612.19 nm, 输出线宽为 310 Hz^[10]。

单纵模光纤激光器主要有环形腔、分布布拉格反射 (DBR) 和分布布拉格反馈 (Distributed Feedback, DFB) 三种实现形式。迄今为止进行的单纵模光纤激光器调谐研究主要集中于环形腔, 这是由环形腔滤波实现单纵模输出的机制所决定, 即可以通过多种方法改变腔内滤波器件的参数实现几十上百纳米量级的调谐范围。由于单纵模环形腔激光器元件多, 腔长通常在几米到数十米, 导致纵模间隔短、输出光的模式稳定性较差且易跳模, 集成性较差, 因此在实际应用中存在一定的局限性。

相比于环形腔, DBR 和 DFB 单纵模光纤激光器

收稿日期: 2022-08-15; 修订日期: 2022-09-14

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFC2201803); 国家自然科学基金 (61975205)

作者简介: 陈磊, 男, 硕士生, 主要从事光纤激光技术方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 余锦, 男, 研究员, 博士, 主要从事全固体激光与非线性光学频率变换技术方面的研究。

通讯作者: 李磐, 男, 副研究员, 博士, 主要从事激光技术及应用与激光非线性变频方面的研究。

腔长短两个量级,结构简单,易于集成等优点,但DFB型光纤激光器需要在掺杂光纤上刻写相移光栅,制作较为困难,且相移光栅的极窄透过峰导致DFB激光器选模稳定性较差,难以实现波长大范围调谐。相比DFB,DBR型调谐范围只与构成腔的光栅中心波长改变速率相关,因此理论上具有极宽的调谐范围,但目前DBR调谐研究较少,因此有必要开展相关研究。

文中基于高浓度镱掺杂增益光纤制作DBR型单纵模光纤激光器,从理论上研究了谐振腔腔长对激光器无跳模调谐范围的影响并进行了实验验证。经优化后,得到有效腔长为16 mm,最大输出功率为7.4 mW的DBR型单模光纤激光器。利用低损耗环形器和光纤反射镜倍增外差法延迟线长度方式,测量得到激光线宽为4.4 kHz。通过对激光器谐振腔实施温度控制,进行了单纵模温度调谐实验,实现了1063.892~1064.768 nm的连续单纵模无跳模调谐。

1 DBR 光纤激光单模调谐原理

DBR型光纤激光器由厘米长度的高掺杂光纤和布拉格光栅对构成,这个长度的有效腔长可以增大纵模间隔,结合光栅的滤波效应,实现单纵模输出。当对谐振腔整体施加温度影响时,谐振腔内纵模的位置和布拉格光栅的透过谱位置会发生改变,由于纵模的温漂速率 S_f 和增益谱的温漂速率 S_q 不一致,两者在光谱上的相对位置会发生改变,因此,当温度连续变化时,DBR型光纤激光器可能会出现一个由单纵模变为多纵模后再变回单纵模的过程,如图1所示。

在上述过程中,DBR光纤激光器输出光保持单纵模调谐的温度范围大小取决 S_q 和 S_f 的差值 ΔS , ΔS 的值越小,DBR光纤激光器在单纵模调谐范围就越大。此外,在 ΔS 的值和布拉格光栅的反射光谱确定的情况下,减小谐振腔的腔长以增大纵模间隔同样可以增加激光器单纵模调谐的范围。但腔长的减小往往也意味着掺杂光纤的长度变短,这会导致激光器输出功率的下降。因此,为了在保证较大的单纵模温度调谐范围的同时获得一定功率的激光输出,需要合理选择掺杂光纤的长度。

DBR光纤激光器纵模间隔可表示为:

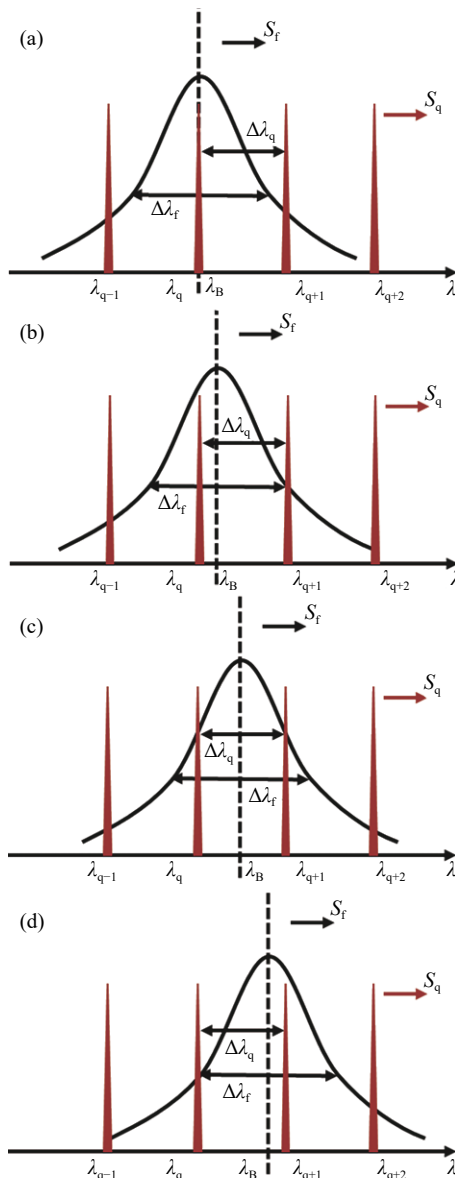


图1 温度连续变化下DBR光纤激光器的输出纵模变化示意图。(a)初始单纵模状态;(b)即将进入多纵模的状态;(c)多纵模状态;(d)即将变回单纵模的状态

Fig.1 Output longitudinal mode variation of DBR fiber laser under continuous temperature change. (a) Initial single longitudinal mode state; (b) About to enter the state of multi-longitudinal mode; (c) Multi-longitudinal mode state; (d) About to change back to the state of single longitudinal mode

$$\Delta \nu_q = \frac{c}{2nL_{eff}} \tag{1}$$

式中: c 为真空中光速; n 表示光纤纤芯折射率; L_{eff} 表示谐振腔的有效腔长,由两部分组成。

$$L_{eff} = L + L' \tag{2}$$

式中: L 为掺杂光纤的长度; L' 为根据文献[11]换算后

光栅对有效腔长贡献的部分。根据文献 [7], 为保证激光器的单纵模输出, $\Delta\nu_q$ 应满足:

$$\Delta\nu_q > \frac{1}{2} \Delta\nu_f \quad (3)$$

式中: $\Delta\nu_f$ 为由窄带光栅所决定的增益谱宽度。当公式 (3) 成立时, 增益谱内只存在一个纵模, 可以轻易实现单纵模输出, 但此时纵模间隔太大, 限制了谐振腔内掺杂光纤的长度, 会导致腔内增益太弱, 输出功率极低。而实验研究表明, 当纵模温漂速率和增益谱温漂速率之差 ΔS 很小时, 为保证较大的单纵模调谐范围, $\Delta\nu_q$ 只需满足:

$$\Delta\nu_q > \frac{1}{3} \Delta\nu_f \quad (4)$$

当公式 (4) 成立时, 增益谱内虽然存在 2 个纵模, 但通过模式竞争仍然可以较为容易地实现单纵模输出; 而当公式 (4) 不成立时, 增益谱内存在 2 个以上的纵模, 即使存在模式竞争也很难保证单纵模输出。联立公式 (1)、(2) 和 (4), 可知掺杂光纤长度应满足:

$$L < \frac{3c}{2n\Delta\nu_f} - L' \quad (5)$$

2 实验装置

文中实验所用 DBR 型光纤激光器结构如图 2 所示。采用 974 nm 单模激光二极管作为泵浦源, 采用后向泵浦的方式由 980/1 064 nm 波分复用器 (WDM) 将泵浦光耦合进 DBR 光纤激光器的谐振腔中。该谐振腔由一段高浓度 Yb³⁺ 掺杂光纤 (在 976 nm 处增益吸收系数大于 1 000 dB/m) 和一对布拉格光栅组成。两个布拉格光栅的中心波长都为 1 064 nm, 其中宽带宽光栅 (Wide Band Fiber Bragg Grating, WB-FBG) 反射率大于 99%, 长度为 10 mm, 反射带宽为 0.23 nm, 刻写在单模光纤上; 窄带宽光栅 (Narrow Band Fiber Bragg Grating, NB-FBG) 反射率为 75%, 长度为 20 mm, 反射带宽 0.06 nm, 刻写在单模保偏光纤上。整个谐振腔都固定在黄铜片上, 黄铜片由半导体制冷器 (Thermo Electric Cooler, TEC) 进行控温。

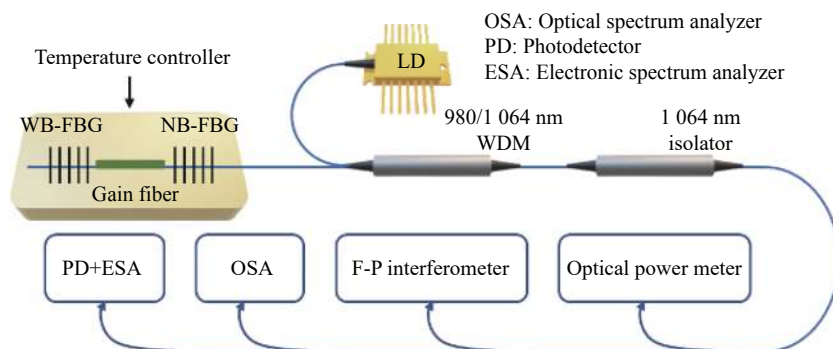


图 2 单频 DBR 光纤激光器结构

Fig.2 Structure of single frequency DBR fiber lase

为测试激光器的单纵模特性, 将激光器的输出进行多路分光, 其中一路接入由扫描 F-P 干涉仪 (Thorlabs, SA210)、锯齿波信号发生器和示波器 (Tektronix, DPO2024) 组成的 F-P 干涉仪中进行单纵模测试, 该 F-P 干涉仪的分辨率为 67 MHz, 自由光谱范围 (Free Spectral Range, FSR) 为 10 GHz, 同时, 将另一路输出光经衰减后接入光谱分析仪 (Yokogawa, AQ6370D) 中, 观测输出光谱。此外, 采用光电探测器 (Thorlabs, PDA10CS2) 和频谱分析仪 (Agilent Technologies, N90 20A) 分析输出激光的强度噪声^[12]。

3 实验结果及分析

根据 DBR 激光器单模调谐的原理, 结合实验中所用光栅的参数, 由公式 (4) 可以计算得出: 只有当掺杂光纤的长度低于 11.4 mm 时才可以实现稳定的单纵模调谐。考虑到 DBR 制作误差, 实验中分别采用掺杂光纤为 8 mm 和掺杂光纤为 15 mm 的 DBR 光纤激光器在温度连续变化时的纵模变化情况进行了测试, 结果如表 1 所示。由表 1 可知, 15 mm 掺杂光纤 DBR 激光器在温度变化时出现了由单纵模 (Single Longitudinal Model, SLM) 变化到多纵模 (Multi-long-

itudinal Mode, MLM) 再变回单纵模的现象, 而 8 mm 掺杂光纤 DBR 光纤激光器则可以维持稳定的单纵模输出, 图 3 为温控 20 °C 的条件下 8 mm 掺杂光纤和 15 mm 掺杂光纤 DBR 光纤激光器的纵模测试结果。由表 1 可知, 纵模测试测试结果与理论计算预测相符合。

表 1 不同温度下激光器的纵模特性

Tab.1 Single longitudinal model characteristics of lasers at different temperatures

Cavity temperature/°C	DBR with 15 mm Yb ³⁺ doped fiber	DBR with 8 mm Yb ³⁺ doped fiber
0	SLM	SLM
5	MLM	SLM
10	SLM	SLM
15	MLM	SLM
20	MLM	SLM
25	SLM	SLM
30	MLM	SLM
35	MLM	SLM
40	MLM	SLM
45	MLM	SLM
50	SLM	SLM

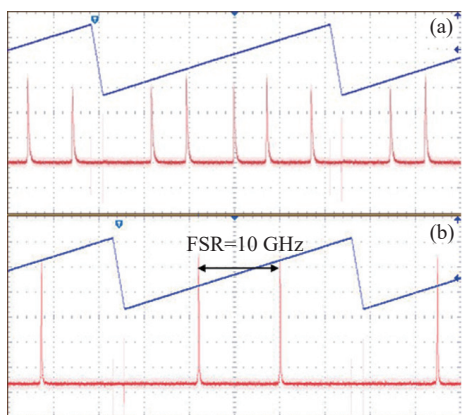


图 3 20 °C 温控下 DBR 光纤激光器纵模特性。(a) 掺杂光纤 15 mm DBR; (b) 掺杂光纤 8 mm DBR

Fig.3 Longitudinal model characteristics of DBR fiber laser at 20 °C.

(a) Doped fiber 15 mm DBR; (b) Doped fiber 8 mm DBR

将泵浦光功率设置为 300 mW, 利用 TEC 温控系统对激光器的整个谐振腔施加温度影响, 温度缓慢从 0 °C 变化至 100 °C, 记录下激光器调谐情况如图 4 所示。可以看出, 当谐振腔温度由 0 °C 缓慢变化到 100 °C 的过程中, 激光的中心波长由 1 063.8 nm 变化为

1 064.624 nm, 即实现了 0.824 nm 的调谐, 在调谐过程中激光始终保持单纵模输出状态。

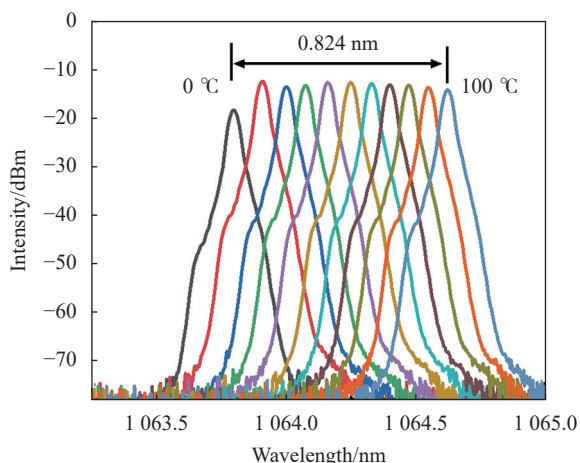


图 4 不同温度下输出激光的光谱

Fig.4 Spectra of output laser at different temperatures

观测不同调谐温度下激光器输出光中心波长稳定性, 将谐振腔所附着的黄铜片温度分别设置为 10 °C、30 °C 和 60 °C, 记录其 30 min 内中心波长的变化情况。结果表明在 10 °C、30 °C 和 60 °C 时信号光的中心波长分别为 1 063.908 nm、1 064.076 nm 和 1 064.328 nm, 在 30 min 内三者的最大中心波长漂移均不超过 20 pm, 如图 5 所示。

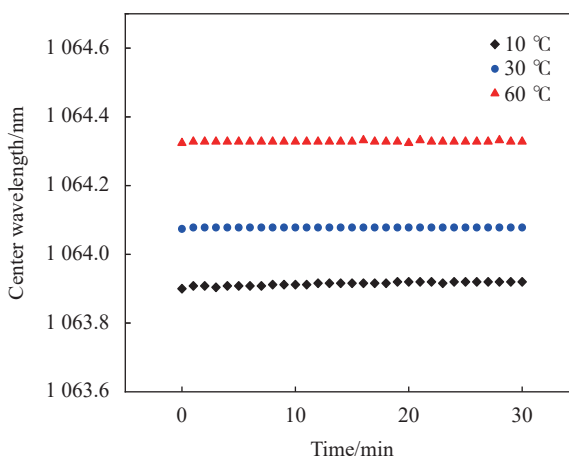


图 5 30 min 内信号光中心波长变化

Fig.5 Change of central wavelength of signal light within 30 minutes

测试了激光器的泵浦效率以及泵浦功率变化时的单纵模情况, 在谐振腔温度分别为 10 °C、30 °C 和 60 °C 的条件下进行测试, 测试结果如图 6 所示。测试结果表明: 当谐振腔温度为 10 °C、30 °C 和 60 °C 时

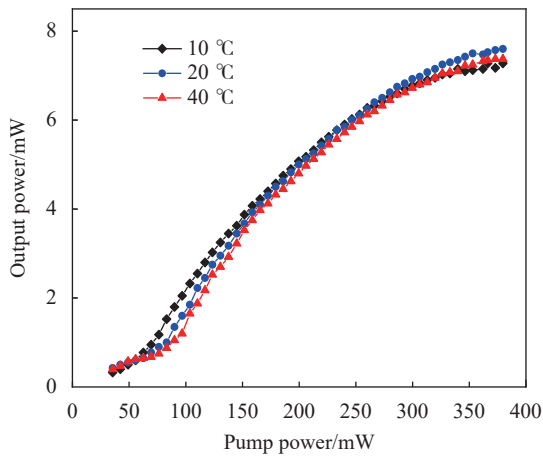


图 6 激光器泵浦-输出关系曲线

Fig.6 Laser pump-output relationship curve

激光器的起振阈值均为 25 mW 左右,当泵浦功率为 380 mW 时激光器输出功率约为 7.4 mW,接近饱和输

出状态,此时的泵浦效率为 2%。不同温度下激光器的泵浦效率曲线基本一致,且从起振到饱和输出的过程中输出光始终保持单纵模状态。

在保持谐振腔温度为 20 °C,情况下测试了 30 min 内激光器输出功率的变化情况,结果表明 30 min 内信号光的平均功率为 6.95 mW,功率最大波动小于 1%。在相同的条件下令激光通过一偏振片后再通过一偏振分光棱镜后接入功率计中,通过旋转偏振片测试输出光的偏振特性。测试结果表明激光器输出光为线偏振光,偏振消光比大于 24 dB。

搭建了基于自外差拍频检测原理的线宽检测系统^[13],其结构如图 7 所示。在延时臂采用单端损耗低于 0.2 dB 的环形器 (Circulator) 和 1064 nm 反射镜将 18 km 延迟光纤 (Hi1060) 倍增至 36 km,以提升最小测量线宽。

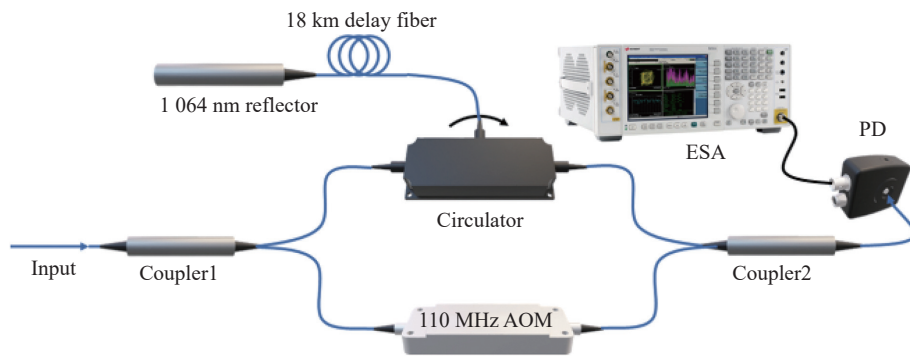


图 7 线宽检测系统结构

Fig.7 Structure of linewidth test system

为验证此线宽检测系统的有效性,将窄线宽种子源 (NKT Photonics, Koheras Adjustik Y10) 接入此系统

中,测得其线宽为 3.85 kHz,与其标称线宽相吻合,测试结果如图 8(a) 所示。将信号光接入线宽检测系统,

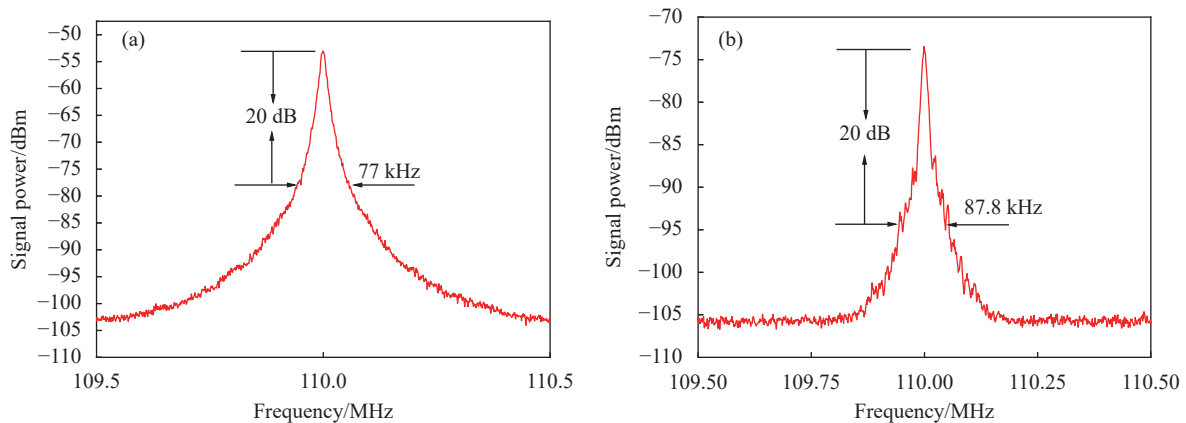


图 8 线宽测试结果。(a) 标准种子源线宽;(b) DBR 光纤激光器线宽

Fig.8 Result of linewidth test. (a) Linewidth of standard seed source; (b) Linewidth of DBR fiber laser

测试结果如图 8(b) 所示。由图可知, 拍频信号峰值 20 dB 处的线宽为 87.8 kHz, 根据文献 [13], 该数值约为实际线宽的 20 倍, 因此, 激光器输出光的实际线宽为 4.4 kHz。

最后, 测试了激光器输出光的相对强度噪声, 为了更加准确地描述激光器输出光的相对强度噪声, 测试了未接收信号时光电探测器的噪声基底以及未接光电探测器时的频谱仪的噪声基底, 测试结果如图 9 所示。可以看出激光器输出光的弛豫震荡峰值位于 900 kHz 处, 且其峰值幅度为 -110 dB/Hz, 在频率大于 1.5 MHz 以后, 激光器的相对强度噪声会稳定在 -145 dB/Hz 附近。

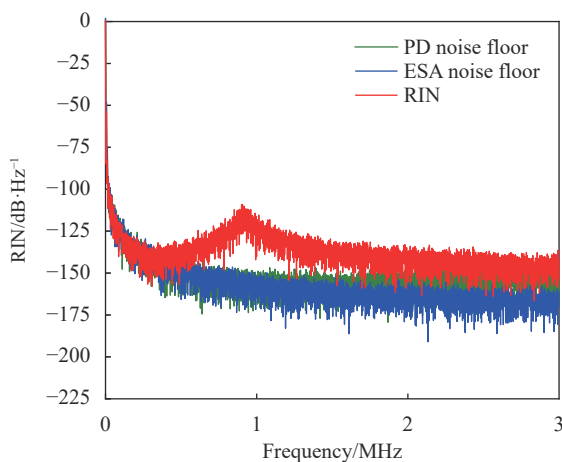


图 9 激光的相对强度噪声

Fig.9 Relative intensity noise of laser

4 结 论

报道了采用 8 mm 高浓度 Yb³⁺掺杂光纤, 制作出 DBR 结构的单纵模光纤激光器的实验结果。经过测试, 该光纤激光器的振荡阈值约为 25 mW, 饱和输出功率为 7.4 mW 左右。对其进行了温度调谐实验, 在对激光器谐振腔施加 0~100 °C 温度影响的情况下实现了 0.824 nm 的温度调谐, 且调谐过程中激光器始终保持单纵模输出。在设置泵浦光功率为 300 mW 的情况下, 激光的线宽为 4.4 kHz, 在频率大于 1.5 MHz 时测得激光的相对强度噪声为 -145 dB/Hz。

参考文献:

[1] Shi Wei, Fu Shijie, Sheng Quan, et al. Research progress on

high-performance single-frequency fiber lasers: 2017-2021 (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(1): 20210905. (in Chinese)

[2] Shi Wei, Fang Qiang, Li Jinhui, et al. High-performance fiber lasers for LIDARs [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(8): 0802001. (in Chinese)

[3] Luo Ziren, Wang Yan, Wu Yueliang, et al. The Taiji program: A concise overview [J]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2021, 5: 05A108.

[4] Dang Wenjia, Gao Qi, Li Zhe, et al. Research progress of tunable fiber light sources with wavelength near 1 μm [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(5): 1220-1132. (in Chinese)

[5] Xie Jiandong, Yan Liping, Chen Benyong, et al. Automatic offset-frequency locking of external cavity diode laser in wide wavelength range [J]. *Opt Precision Eng*, 2021, 29(2): 211-219. (in Chinese)

[6] Wang Yunzhi, Xie Fang, Chen Longhui, et al. Research on optical fiber multi-wavelength laser for measuring displacement [J]. *Opt Precision Eng*, 2019, 27(9): 2036-2042. (in Chinese)

[7] Zhang Yuning, Li Can, Xu Shanhuai, et al. A broad continuous temperature tunable DBR single-frequency fiber laser at 1064 nm [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(2): 2539826.

[8] Honzatko P, Baravets Y, Myakalwar A K. Single-frequency fiber laser based on a fiber ring resonator filter tunable in a broad range from 1023 nm to 1107 nm [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(6): 1339-1342.

[9] Fan Zhiqiang, Zhang Weifang, Qiu Qi, et al. Observation of PT-symmetry in a fiber ring laser [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(4): 1027-1030.

[10] Huang Linhua, Yang Changsheng, Tan Tianyi, et al. Sub-kHz-linewidth wavelength-tunable single-frequency ring-cavity fiber laser for C- and L-band operation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(14): 4794-4799.

[11] Yuri O Barmenkov, Dobryna Zalvidea, Salvador Torres-Peiró, et al. Effective length of short fabry-perot cavity formed by uniform fiber bragg gratings [J]. *Optics Express*, 2006, 14(14): 6394.

[12] Zhang Ji, Wei Shanshan, Liu Haowei, et al. Measurement technique for broadband frequency and intensity noise of single-frequency lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 58(3): 0301002. (in Chinese)

[13] Cui Mingbin, Huang Jungang, Yang Xiulun. Review on method for laser linewidth measurement [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(9): 0900005. (in Chinese)

Wavelength tuning with temperature in single longitudinal mode DBR fiber laser

Chen Lei^{1,2}, Zhu Jiajing³, Li Pan^{2,4*}, Liu Heshan^{2,4}, Ke Changjun^{1,2}, Yu Jin^{1,2*}, Luo Ziren^{2,4}

(1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

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

3. Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100039, China;

4. National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract:

Objective Distributed Bragg reflection (DBR) single longitudinal mode fiber lasers have been widely studied and applied due to their simple resonant cavity structure and good stability. However, the narrow tuning range of current DBR lasers limit their applications in many important fields such as spectral synthesis, laser frequency locking, and coherent detection, etc. Therefore, how to improve its tuning range is of greater research value. And improving the mode-free hopping tuning range of DBR fiber lasers has become the research objective in this study.

Methods First of all, according to the principle that the center wavelength of fiber grating drifts is caused by resonant cavity temperature change, the equivalent length theory of the fiber grating, the longitudinal mode spacing theory, and the relationship between the gain spectrum of the doped fiber and the intracavity mode competition, the mechanism of DBR single longitudinal mode fiber laser to achieve single longitudinal mode output and the variation of the longitudinal mode in the resonant cavity during the temperature tuning process are theoretically analyzed. Secondly, DBR single longitudinal mode fiber lasers were built based on the theoretical analysis, and two DBR lasers with different equivalent cavity lengths were constructed by using two different lengths of doped fibers. A temperature controller built with a Thermoelectric Cooler (TEC) and a brass sheet was used to control the temperature of the resonant cavity, and the variation of the center wavelength of the output laser and the longitudinal mode of the output laser during the change of the resonant cavity temperature from 0 °C to 100 °C were tested.

Results and Discussions As a result, the conditions that the cavity length of the resonant cavity of DBR single longitudinal mode fiber laser needs to meet in order to realize the temperature tuning without hopping mode are deduced. Besides, different single and multiple longitudinal mode output results during temperature tuning of lasers with different equivalent cavity lengths verify the correctness of the analytical result of cavity length constraint condition for DBR single longitudinal mode laser (Fig.3, Tab.1). And then, 8 mm high-concentration Yb³⁺ doped single mode fiber is used to achieve a stable single-longitudinal-mode laser at the wavelength of 1064 nm with the distributed Bragg reflection method. The effective cavity length of the DBR resonator is 16 mm and the maximum laser output power is 7.4 mW. The single longitudinal mode tuning of 0.824 nm without mode hopping is achieved by varying the resonant cavity temperature (Fig.4). With the low loss circulator and the fiber mirror to multiply delay fiber length of the heterodyne method to improve measurement accuracy (Fig.7),

the measured maximum linewidth of the laser is 4.4 kHz. The relative intensity noise of the laser was tested using a photodetector. The relaxation oscillation peak of the output laser is located at 900 kHz with a relative intensity noise of -110 dB/Hz. The relative intensity noise is -145 dB/Hz when the frequency is greater than 1.5 MHz.

Conclusions In summary, through theoretical and experimental studies, a 1064 nm, mode-hopping-free tuning range of 0.8 nm distributed Bragg reflective single longitudinal mode fiber laser was proposed, and a series of its key parameters were tested, which has certain application value.

Key words: fiber laser; single frequency; temperature tuning; distributed Bragg reflection

Funding projects: National Key Research and Development Program of China (2021YFC2201803); National Natural Science Foundation of China (61975205)