

具有 32 GHz 频差的掺 Yb³⁺双频 DBR 光纤激光器

侯玉斌, 张 倩, 齐恕贤, 冯 宪, 王 璞

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124)

摘要: 基于自制的双波长低反射率光纤光栅(FBG)作为分布式布拉格反射激光器(DBR)的输出端, 实现了掺 Yb³⁺双频 DBR 光纤激光器。该 FBG 的双波长间隔为 0.12 nm, 对应的频差为 32 GHz。双频光纤激光器输出的两个波长分别为 1 063.09 nm 和 1 063.21 nm, 光谱信噪比大于 60 dB。每一个波长只包含一个纵模。两个纵模的拍频信号为 32.014 GHz, 频谱信噪比大于 35 dB。得益于光纤激光器本身具有结构紧凑, 抗干扰能力强等特点, 该型激光器有望作为高品质, 小型化的微波信号源, 用于微波传感和通信等领域。

关键词: 光纤激光器; 掺镱; 双频; 微波光子学

中图分类号: TN242 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1005005

Dual-frequency Yb³⁺-doped DBR fiber laser with 32 GHz frequency difference

Hou Yubin, Zhang Qian, Qi Shuxian, Feng Xian, Wang Pu

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: A dual-frequency Yb³⁺-doped distributed Bragg reflection (DBR) fiber laser was demonstrated, which used a home-made dual-wavelength low reflectivity FBG as the output port of the DBR fiber laser. The wavelength spacing of the FBG was about 0.12 nm, corresponding to 32 GHz frequency difference. The dual-wavelength of the laser output was 1 063.09 nm and 1 063.21 nm, respectively. The spectral signal noise ratio was more than 60 dB. Each of the wavelengths included only one longitudinal mode. The beat frequency of the dual-frequency was 32.014 GHz. The signal-noise ratio of the frequency spectrum was more than 35 dB. Benefitted from the compact structure and the strong anti-interference capability of the fiber laser, the dual-frequency fiber laser is promising as the candidate of high-quality microwave signal generator for the applications such as microwave sensing and communications.

Key words: fiber laser; Yb-doped; dual-frequency; microwave photonics

收稿日期: 2018-05-10; 修订日期: 2018-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(61527822, 61235010, 61378088, 61307054)

作者简介: 侯玉斌(1988-), 男, 博士生, 主要从事单频光纤激光器方面的研究。Email: houyubin@emails.bjut.edu.com

导师简介: 王璞(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事高功率光纤激光器方面的研究。Email: wangpuemail@bjut.edu.com

0 引言

作为一个微波和光学相交叉的学科,微波光子学凭借其在诸多领域的巨大应用前景而广受关注,例如,无线网络、传感、雷达等方面^[1-3]。作为微波光子学最重要的组成部分,微波的产生一直以来都是研究的热点。利用双频激光器中两个纵模的拍频产生微波信号,则是其中重要的途径之一。例如,法国的 Mehdi Alouini 课题组^[4],通过控制同一谐振腔中两路激光不同纵模的起振,实现对两路激光不同波长的调节,从而实现从 GHz 到 THz 拍频信号的调节。然而这一方案对于系统的控制精度和结构稳定性要求很高,很容易受外界环境的影响,同时腔内的两个光路不重合,这也会增加拍频信号的相位噪声。为了克服固体激光器中的这些问题,越来越多的课题组采用光纤激光器的方案实现双频激光输出。具有双波长选择的 FBG 则是实现全光纤化双频激光产生的重要元件,例如,相移光纤光栅^[5-6]、光纤光栅串^[7-9]、反高斯变迹光纤光栅(IGAFBG)^[10-11]以及保偏光纤光栅^[12-13]。然而,利用这些光纤光栅得到的双频光纤激光器多采用环形腔结构,腔长较长,结构复杂,易受环境影响,很难保证双频激光的长时间稳定运转而不跳模。

为此,提出了一种基于双波长 FBG 的 DBR 结构双频光纤激光器,该光纤激光器采用超短的 DBR 结构,包括增益介质和 FBG 在内,整个激光器只有 60 mm。并且整个腔被固定在一个热沉上,进行恒温隔振的控制,这样可以很好地保证双频长时间稳定的运转而不发生跳模。双频光纤激光器输出的两个波长分别为 1 063.09 nm 和 1 063.21 nm,光谱信噪比大于 60 dB,并且每一个波长只包含一个纵模。由于两个纵模均来自相同的谐振腔,这样可以保证两个纵模具有很高的相干性,减小两者拍频信号的相位噪声和频率漂移。两个纵模的拍频信号为 32.014 GHz,频谱信噪比大于 35 dB。因此,这一结构紧凑、稳定性高的双频光纤激光器将在微波光子学领域具有十分重要的应用价值。

1 实验装置

实验装置如图 1(a)所示,图中的 DBR 光纤激光

器由高反的 FBG 和自制的双波长 FBG 组成。其中的增益光纤为一段 10 mm 长的高掺 Yb³⁺石英光纤(Coractive, DCF-YB-7/128-FA),其吸收系数为 ~18 dB/cm @ 974 nm,因此该段增益光纤可以为整个激光器提供足够的增益。包含 FBG 在内,整个激光器的长度仅为 60 mm,其对应的等效腔长约为 20 mm,自由光谱范围(FSR)约为 5 GHz,对应 0.02 nm,双波长 FBG 的每个反射峰的带宽约为 0.05 nm,则其反射带宽中最多只能存在三个模式,经过模式竞争最终每个波长只能存在一个纵模运转。因此可以保证每个波长都在单纵模状态下,而不发生跳模。通过熔接的方式,将两个 FBG 分别与增益光纤的两端进行熔接。熔接后的 DBR 光纤激光器被固定在一个热沉上,通过 TEC 对其进行恒温控制,保证其长时间稳定运转。采用 974 nm 单模半导体激光器作为泵浦源,经 WDM 与 DBR 光纤激光器连接后对其进行反向泵浦。半导体激光器的最大输出功率为 500 mW。在 120 mW 泵浦情况下可以实现稳定的两个波长强度接近的双频激光输出,输出功率为 2.3 mW。为了防止端面反射,高反 FBG 的另一端被切割成 8°。产生的双频激光经隔离器后直接

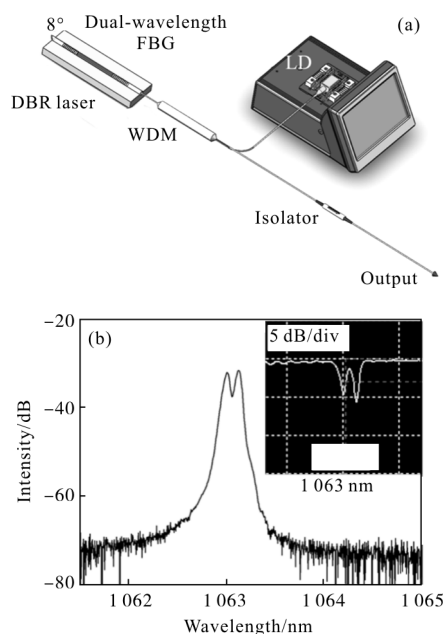


图 1 (a) 双频 DBR 光纤激光器装置图,
(b) 双波长 FBG 的反射谱

Fig.1 (a) Schematic of the dual-frequency DBR fiber laser,
(b) reflective spectrum of the dual-wavelength FBG

输出。双波长 FBG 的反射图如图 1(b)所示,FBG 中的两个波长分别为 1 063.09 nm 和 1 063.21 nm。边模抑制比大于 40 dB。图 1(b)的插图为双波长 FBG 的透射谱,两个反射波长对应的反射率分别为 68% 和 75%。高反FBG 的反射率为 99%。

2 实验结果

通过一台光谱仪(AQ6373, Yokogawa),可以测得双频 DBR 光纤激光器的输出光谱图,如图 2 所示。该图为输出光谱的线性图,激光输出的波长分别为 1 063.09、1 063.21 nm。两个波长的光谱强度相差大概 20%左右。并且两个波长可以长时间稳定存在,没有出现竞争现象。插图为对数坐标系下的光谱图,由图可知光谱信噪比大于 60 dB。

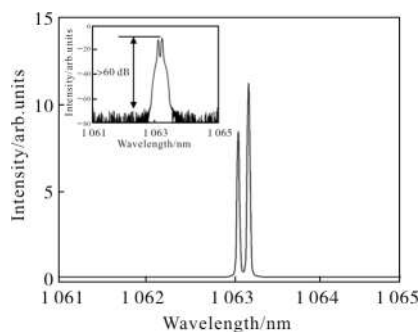


图 2 双频光纤激光器输出的光谱图

Fig.2 Spectrum of the dual-frequency fiber laser output

图 3 为扫描干涉仪(Thorlabs, Model SA210-8B)测得的纵模的图像。该扫描干涉仪的自由光谱范围和分辨率分别为 10 GHz 和 67 MHz。通过图 3 可以观察到在一个扫描周期(10 GHz)内,图中只出现两个峰,每个峰代表一个纵模。由于两个纵模的频率

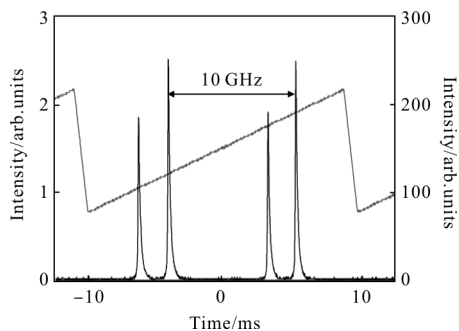


图 3 双频输出的扫描干涉仪图像

Fig.3 Scanning FPI image of the dual-frequency laser output

间隔约为 32 GHz,扫描干涉仪的自由光谱范围为 10 GHz,所以两个纵模在扫描干涉仪中的间隔应该约为 2 GHz,这与图 3 中的情况相符。由此可以确定该激光器只输出两个纵模,并且纵模强度与光谱的强度相对应。

凭借高速的铟镓砷探测器将两个纵模的拍频信号转换为微波信号,该探测器的型号为 ALPHALAS 公司的 UPD-15-IR2-FC,带宽 25 GHz。探测器产生的微波信号被输入到频谱分析仪中,频谱分析仪的型号为安捷伦公司的 N9030A PXA,其支持的最高频率为 44 GHz。因此可以在频谱分析仪中观测到一个由两个纵模拍频产生的 32.014 GHz 的微波信号,如图 4 所示。测得的微波信号的信噪比大于 35 dB。由于探测器的带宽小于拍频信号的频率,探测器会对微波信号有一定的衰减,所以实际的微波信号的强度和信噪比应该更大。拍频过程与纵模的偏振相关,该激光器产生的是随机偏振的激光,这也会对微波信号的强度和信噪比产生不利影响。

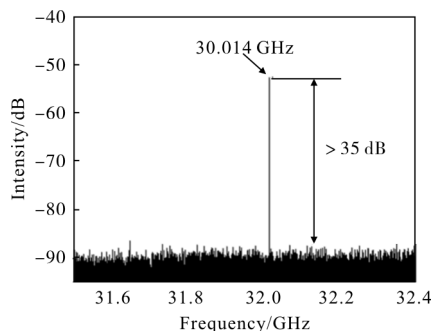


图 4 两个纵模拍频得到的频谱图

Fig.4 Frequency spectrum of the beating signal of the dual-frequency

图 5 为通过双频拍频产生的微波信号与信号发

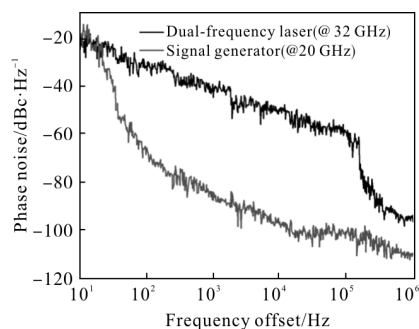


图 5 拍频信号与信号发生器产生的微波信号的相位噪声

Fig.5 Phase noise of the beating signal and the microwave signal generated by a signal generator

生器产生的微波信号的相位噪声的对比。该信号发生器为 Rohde & Schwarz 公司的 SMB 100。其产生的微波频率为 20 GHz。通过图 5 可以发现,在几十 Hz 和几百 kHz 的位置,两者的相位噪声差别不大,其主要差异还是来自于中间频率部分。造成这一问题的原因可能是外界振动,泵浦功率波动等因素引起两个纵模的抖动,从而升高了拍频信号的相位噪声。

3 结 论

采用自制的一款双波长 FBG,在实验上实现了掺 Yb³⁺的双频 DBR 光纤激光器。两个波长分别为 1063.09 nm 和 1063.21 nm。光谱信噪比大于 60 dB。通过扫描干涉仪可以确定每个波长只包含一个纵模,由此确定该激光器为双频运转。通过高速探测器,可以在频谱仪中观测到两个纵模拍频产生的 32.014 GHz 信号。拍频信号的信噪比大于 35 dB。总而言之,这一简单可靠的方案可以用于高品质的微波源的产生,并且在通信、遥感以及激光雷达等领域具有广阔的应用前景。考虑到偏振对于两个纵模拍频的影响,目前笔者还在尝试全保偏结构的双频 DBR 光纤激光器,这一结构将有利于提高拍频信号的强度和稳定性。未来还可以通过自定义双波长 FBG 的波长间隔来实现频差从 MHz 到 THz 的变化。将拍频信号的工作波段扩展到 THz 频段,用于 THz 的产生和探测。

参考文献:

- [1] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(6): 319-330.
- [2] Williamson R C, Esman R D. RF photonics [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(9): 1145-1153.
- [3] Ghelfi P, Laghezza F, Scotti F, et al. A fully photonics-based coherent radar system [J]. *Nature*, 2014, 507(7492): 341-345.
- [4] Gwennaël Danion, Cyril Hamel, Ludovic Frein, et al. Dual frequency laser with two continuously and widely tunable frequencies for optical referencing of GHz to THz beat notes [J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 17673-17678.
- [5] Xia L, Shum P, Cheng T H. Photonic generation of microwave signals using a dual-transmission-band FBG filter with controllable wavelength spacing [J]. *Applied Physics B*, 2006, 86(1): 61-64.
- [6] Chen X, Yao J, Deng Z. Ultranarrow dual-transmission band fiber Bragg grating filter and its application in a dual-wavelength single-longitudinal-mode fiber ring laser [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(16): 2068-2070.
- [7] Wang Feng, Bi Weihong, Fu Xinghu, et al. Dual-wavelength Er³⁺-doped photonic crystal fiber laser based on superimposed fiber gratings [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0822001. (in Chinese)
- [8] Wei Y, Ping L, Shun W, et al. A novel switchable and tunable dual-wavelength single-longitudinal-mode fiber laser at 2 μm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(11): 1161-1164.
- [9] Feng T, Ding D, Zhao Z, et al. Switchable 10 nm-spaced dual-wavelength SLM fiber laser with sub-kHz linewidth and high OSNR using a novel multiple-ring configuration [J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 13(10): 105104.
- [10] Lin B, Tjin S, Zhang H, et al. Switchable dual-wavelength single-longitudinal-mode erbium-doped fiber laser using an inverse-Gaussian apodized fiber Bragg grating filter and a low-gain semiconductor optical amplifier [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(36): 6855-6860.
- [11] Lin B, Tjin S, Zhang H, et al. Dual-wavelength single-longitudinal-mode erbium doped fiber laser based on inverse-Gaussian apodized fiber Bragg grating and its application in microwave generation [J]. *Optical Fiber Technology*, 2011, 17(2): 120-123.
- [12] Liu S, Yan F, Liu P, et al. Switchable single-polarization dual-wavelength TDFL using PM Fabry-Perot filter [J]. *Optical Fiber Technology*, 2016, 29: 1-5.
- [13] Liu G, Feng D. Single- and dual-wavelength switchable linear polarized Yb³⁺-doped double-clad fiber laser [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(14): 4309-4312.