

文章编号 1004-924X(2019)09-2036-07

## 用于高精度测量位移等参量的光纤多波长激光器

王韵致, 谢芳\*, 陈龙辉, 李明佳, 徐海波

(北京交通大学理学院光电信息科学与工程专业实验室, 北京 100044)

**摘要:** 本文研究并实验了光纤单波长激光器、光纤双波长激光器、以及光纤三波长激光器, 分别发出单波长、双波长、以及三波长激光, 分别用于对位移、台阶高度、绝对距离等参量的高精度干涉测量。利用光纤光栅只反射布拉格波长的特性, 将光纤光栅作为光纤激光谐振腔的反射镜和波长选择元件, 可以使光纤激光器具有单个或者多个独立的但光程重叠的激光谐振腔, 每个激光谐振腔有掺铒光纤作为增益介质。980 nm 激光的泵浦下, 光纤多波长激光器分别发出单波长、双波长、以及三波长激光, 每个波长值可以根据需要确定, 两个波长之间的间隔也可以根据需要确定。光纤多波长激光器发出的多波长之间无模式竞争, 每个波长的功率和频率都稳定。每个波长的稳定度达  $10^{-7}$ , 能够满足对位移、台阶高度、绝对距离进行高精度干涉测量的要求。

**关键词:** 光纤激光器; 多波长激光; 波长稳定; 位移测量

**中图分类号:** TN242 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192709.2036

## Research on optical fiber multi-wavelength laser for measuring displacement precisely

WANG Yun-zhi, XIE Fang\*, CHEN Long-hui, LI Ming-jia, XU Hai-bo

(Laboratory of Optoelectronic Information Science and Engineering,  
School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

\* Corresponding author, E-mail: fxi@bjtu.edu.cn

**Abstract:** Three types of optical fiber lasers that can emit one, two, or three wavelengths simultaneously were researched and experimented on. The three types of lasers could be applied to measure displacement, step height, and absolute distance, respectively. By employing the characteristic that a fiber Bragg grating could only reflect a Bragg wavelength, fiber Bragg gratings have been used as the reflective mirrors of the laser resonant cavities and wavelength selectors. As such, a single laser resonant cavity and multiple independent laser resonant cavities with overlapped laser optical paths were constructed with a length of erbium-doped optical fiber in each cavity. Pumped by a 980-nm laser, the optical fiber lasers could emit a single wavelength and multiple wavelengths simultaneously; the value of each wavelength could be determined as needed. Furthermore, the wavelength interval between two adjacent wavelengths could be determined as needed. There is no laser mode competition between the wavelengths, as each wavelength has a stable power and frequency. Wavelength stability can reach up

收稿日期: 2019-05-26; 修订日期: 2019-06-17.

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目 (No. 3172024)

to  $10^{-7}$ , satisfying the precision requirements of measuring displacement, step height, and absolute distance through interferometric methods.

**Key words:** optical fiber laser; multiple wavelength laser; wavelength stability; displacement measurement

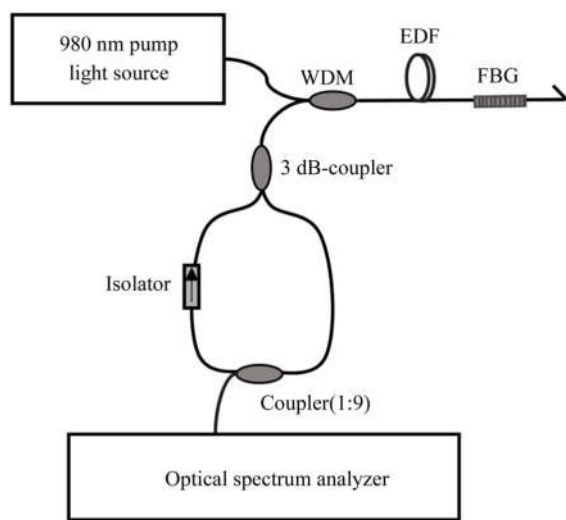
## 1 引 言

微米纳米技术等领域的发展,需要对位移、台阶高度、绝对距离进行高精度测量。激光器因具有能量高、方向性好、单色性好等优点被广泛应用于干涉测量系统中作为其光源,对位移<sup>[1-5]</sup>、角度<sup>[6]</sup>、振动<sup>[7]</sup>、速度<sup>[8]</sup>、应力<sup>[9]</sup>、压力<sup>[10]</sup>及温度<sup>[9,11]</sup>等参量进行高精度测量。为了对被测量进行高精度的干涉测量,要求激光器出射光波的相干长度足够长(大于被测量量值),光波的谱宽足够窄。作为测量的基准,要求激光器的出射光波波长有高的稳定性。对于单波长干涉测量系统,由于单波长干涉信号存在相位模糊问题,单波长干涉测量系统对位移测量的最大步长不大于半波长。因此,单波长干涉测量系统难以对大于半波长的台阶高度进行测量,也难以对绝对距离进行测量。为了对台阶高度进行高精度干涉测量,需要在干涉系统中引入两个不同波长的激光,使测量步长扩大为这两个波长的半合成波波长,实现对台阶高度的高精度测量。两个波长的间隔决定了可测量台阶的高度,对不同的台阶高度的测量需要不同的波长间隔,这在实践中难以满足。为了对绝对距离进行测量,需要利用 3 个不同波长的激光对被测量进行测量,要得到 3 个确定波长的激光,这在实践中也难以满足。

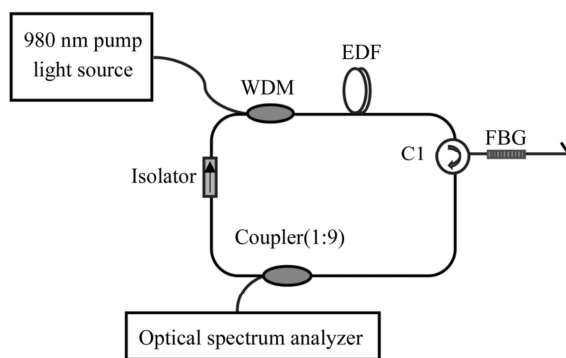
本文提出并实验了新型的光纤多波长激光器,能同时发出无模式竞争的多波长激光。利用光纤光栅只反射布拉格波长的特性,将光纤光栅作为光纤激光谐振腔的反射镜和波长选择元件,使激光器有多个独立的但光程重叠的激光谐振腔,每个激光谐振腔采用掺铒光纤作为增益介质。980 nm 激光的泵浦下,激光器同时发出多波长激光,每个波长值可以根据需要确定。各波长之间无模式竞争,且功率和频率稳定;每个波长的稳定度达到  $10^{-7}$  量级。

## 2 光纤多波长激光器原理

分别研究了臂型和环型两种结构的光纤单波长长激光器、光纤双波长激光器、以及光纤三波长激光器。研究的臂型和环型两种光纤激光器有相同的功能。



(a) 臂型光纤单波长激光器  
(a) Branch type of single-wavelength optical fiber laser



(b) 环型光纤单波长激光器  
(b) Loop type of single-wavelength optical fiber laser

图 1 光纤单波长激光器原理图

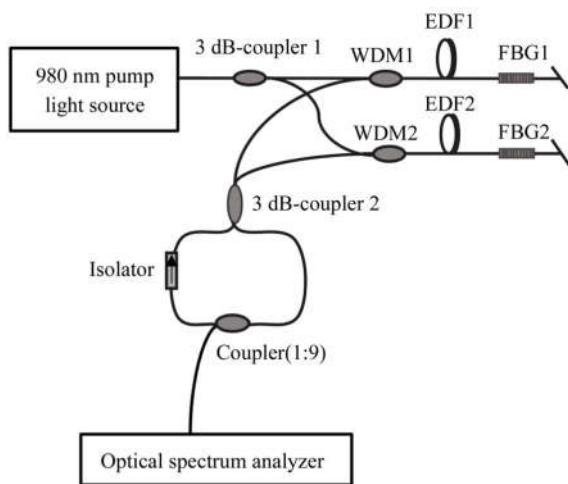
Fig. 1 Schematic diagram of single-wavelength optical fiber laser

图 1(a)是臂型光纤单波长激光器。系统中的 FBG 作为激光谐振腔的反射镜和波长选择元件。980 nm 泵浦光源发出的光经过波分复用器 WDM 耦合进光纤激光谐振腔,经过掺铒光纤 EDF,激发出 1 550 nm 波段的荧光。此荧光到达光纤光栅 FBG,满足光纤光栅 FBG 布拉格条件的波长被光纤光栅 FBG 反射,反射光再次经过掺铒光纤 EDF,波分复用器 WDM,3 dB 耦合器,光纤耦合器(1:9),隔离器,3 dB 耦合器,波分复用器 WDM,掺铒光纤 EDF,到达光纤光栅 FBG 并被光纤光栅 FBG 反射。如此循环往复,当增益大于损耗时,从光纤耦合器(1:9)的一个端口出射 FBG 布拉格波长的激光,被光谱仪探测。

图 1(b)是环型光纤单波长激光器。与图 1(a)所示系统相同,系统中的 FBG 作为激光谐振腔的反射镜和波长选择元件。在 980 nm 激光的泵浦下,当激光谐振腔的增益大于损耗时,从光纤耦合器(1:9)的一个端口出射 FBG 布拉格波长的激光,被光谱仪探测。

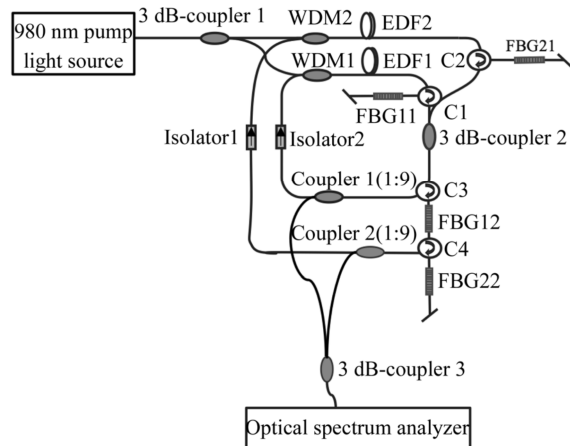
图 2(a)是臂型光纤双波长激光器。系统中的 FBG1 和 FBG2 分别作为两个激光谐振腔的反射镜和波长选择元件。980 nm 泵浦光源发出的光经过 3 dB 耦合器 1 被分为两路光,分别耦合进两个光纤激光谐振腔,经过掺铒光纤 EDF1 和 EDF2,激发出 1 550 nm 波段的荧光。当每个激光谐振腔的增益大于损耗时,从光纤耦合器(1:9)的一个端口出射 FBG1 和 FBG2 的布拉格波长的激光,被光谱仪探测。

图 2(b)是环型光纤双波长激光器。系统中的 FBG11 和 FBG21 分别作为两个激光谐振腔的反射镜和波长选择元件。FBG12 的布拉格波长与 FBG11 的布拉格波长相同,FBG22 的布拉格波长与 FBG21 的布拉格波长相同。在 980 nm 激光的泵浦下,当每个激光谐振腔增益大于损耗时,光纤耦合器 1(1:9)的一个端口将出射 FBG11 的布拉格波长的激光,光纤耦合器 2(1:9)的一个端口出射 FBG21 的布拉格波长的激光。两束激光经过 3 dB 耦合器 3 后同时被光谱仪探测。



(a) 臂型光纤双波长激光器

(a) Branch type of double-wavelength optical fiber laser



(b) 环型光纤双波长激光器

(b) Loop type of double-wavelength optical fiber laser

图 2 光纤双波长激光器原理图

Fig. 2 Schematic diagram of two-wavelength optical fiber laser

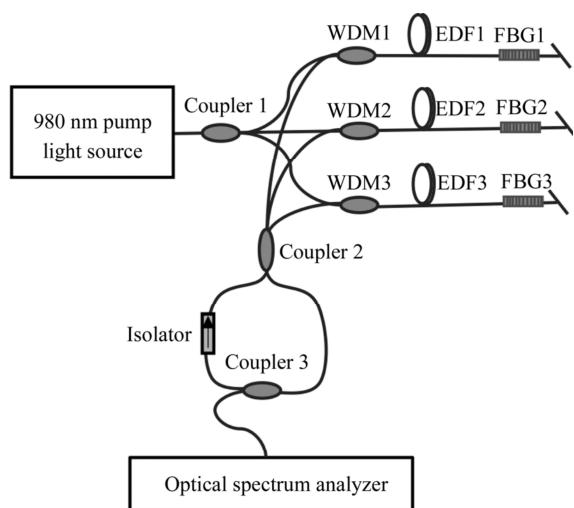
图 3(a)是臂型光纤三波长激光器。系统中的 FBG1,FBG2 和 FBG3 分别作为 3 个激光谐振腔的反射镜和波长选择元件。980 nm 泵浦光源发出的光经过光纤耦合器 1 被分为三路光,分别耦合进 3 个激光谐振腔。与图 2(a)所示系统相同,当每个激光谐振腔的增益大于损耗时,从光纤耦合器(1:9)的一个端口出射 FBG1,FBG2 和

FBG3 的布拉格波长的激光,被光谱仪探测。

图 3(b)是环型光纤三波长激光器。系统中的 FBG11,FBG21 和 FBG31 分别作为 3 个激光谐振腔的反射镜和波长选择元件。FBG12 的布拉格波长与 FBG11 的布拉格波长相同,FBG22 的布拉格波长与 FBG21 的布拉格波长相同,FBG32 的布拉格波长与 FBG31 的布拉格波长相

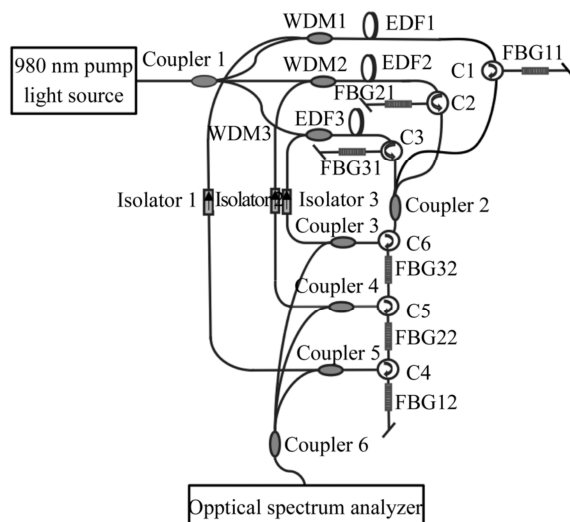
同。与图 2(b)所示系统相同,在 980 nm 激光的泵浦下,当每个激光谐振腔增益大于损耗时,光纤耦合器 3(1 : 9)的一个端口将出射 FBG11 的布拉格波长的激光,光纤耦合器 4(1 : 9)的一个端

口出射 FBG21 的布拉格波长的激光,光纤耦合器 5(1 : 9)的一个端口出射 FBG31 的布拉格波长的激光。三束激光经过光纤耦合器 6 后同时被光谱仪探测。



(a) 臂型光纤三波长激光器

(a) Branch type of three-wavelength optical fiber laser



(b) 环型光纤三波长激光器

(b) Loop type of three-wavelength optical fiber laser

图 3 光纤三波长激光器原理图

Fig. 3 Schematic diagram of three-wavelength optical fiber laser

同理,可以设计光纤四波长激光器,以及能发出更多波长的光纤多波长激光器,满足不同的测量的需求。

### 3 光纤多波长激光器实验

在实验中,光纤激光器中每个激光谐振腔内的掺铒光纤长度约 4 m,作为激光谐振腔反射镜的光纤光栅反射谱 3 dB 带宽均约为 0.04 nm。在 980 nm 激光的泵浦下,掺铒光纤的发出的荧光谱如图 4 所示。

光纤单波长激光器的出射光谱如图 5 所示。出射波长可以根据需要选择光纤光栅的布拉格波长满足。

对光纤单波长激光器的出射波长的稳定性测试结果如图 6 所示。在连续 4 h 的观察时间内,波长的最大漂移量不大于 0.002 nm,波长稳定度达  $10^{-7}$ 。

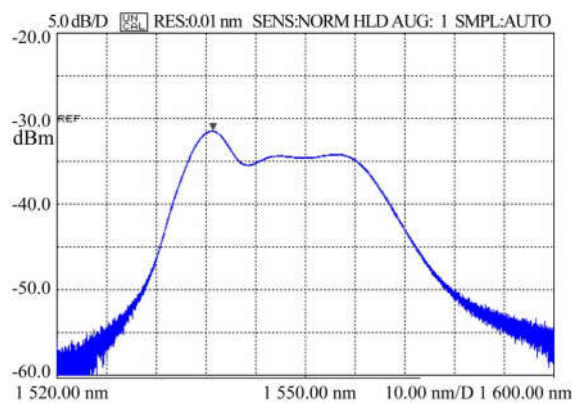


图 4 掺铒光纤发出的荧光谱

Fig. 4 Spectrum of fluorescence emitted from EDF

光纤双波长激光器的出射光谱如图 7 所示。两个波长值可以根据需要任意确定,两个波长之间的间隔也可以根据需要确定。两个波长之间无模式竞争,无论两个波长之间的间隔大小如何,两个波长都有稳定的功率和频率,如图 7(a),图 7(b),图 7(c)所示。在图 7(c)中,两个

波长间隔仅约 0.1 nm,两个波长仍然有稳定的功率和频率。

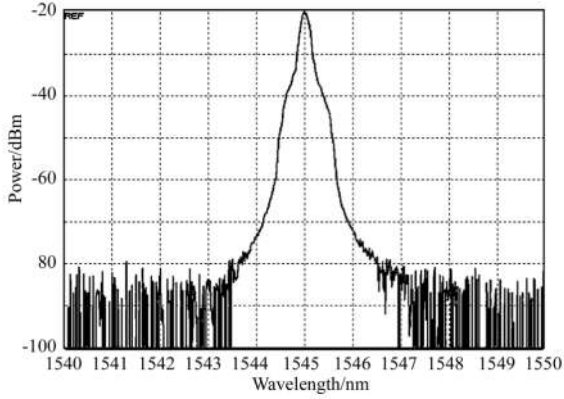


图 5 光纤单波长激光器的输出光谱  
Fig. 5 Spectrum of single-wavelength optical fiber laser

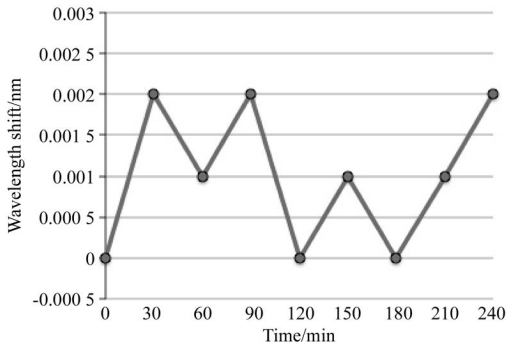
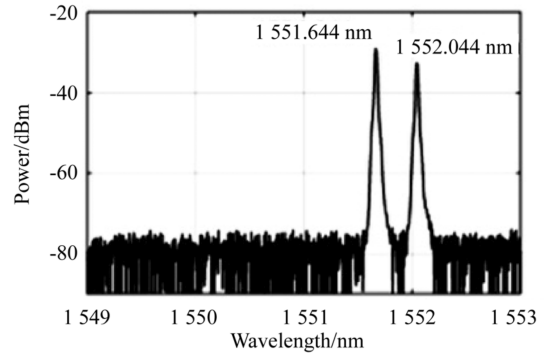
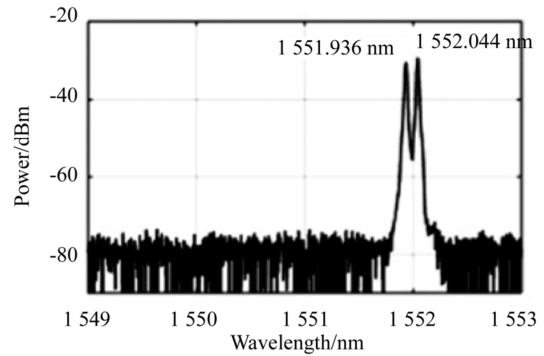


图 6 光纤单波长激光器的波长漂移  
Fig. 6 Fluctuation of wavelength emitted from the single-wavelength



(b) 两个波长间隔较小时激光器的光谱  
(b) Spectrum of fiber laser with small wavelength spacing

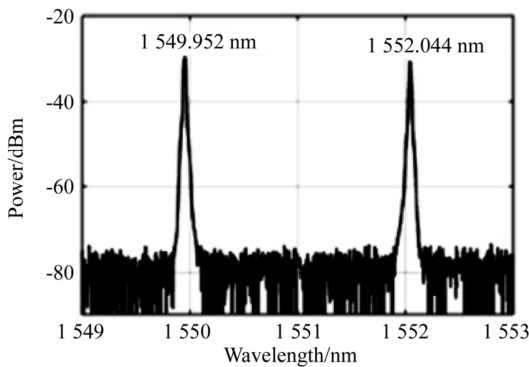


(c) 两个波长间隔非常小时激光器的光谱  
(c) Spectrum of fiber laser with very small wavelength spacing

图 7 光纤双波长激光器的输出光谱

Fig. 7 Spectrum of the two-wavelength optical fiber laser

对光纤双波长激光器的出射波长的稳定性测试结果如图 8 所示。在连续 4 h 的观察时间内,每个波长的最大漂移量不大于 0.002 nm,波长稳定度均达  $10^{-7}$ 。



(a) 两个波长间隔较大时激光器的光谱  
(a) Spectrum of the fiber laser with large wavelength spacing

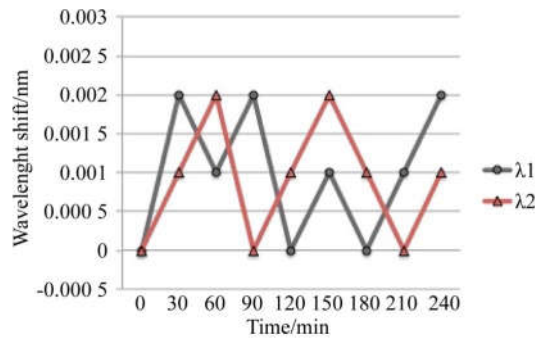
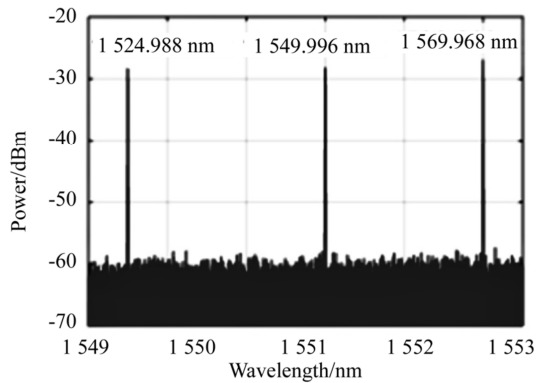
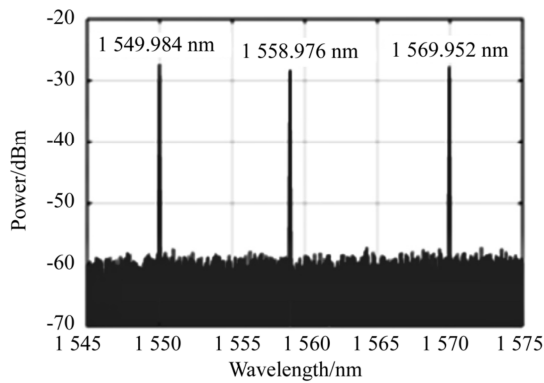


图 8 光纤双波长激光器的波长漂移

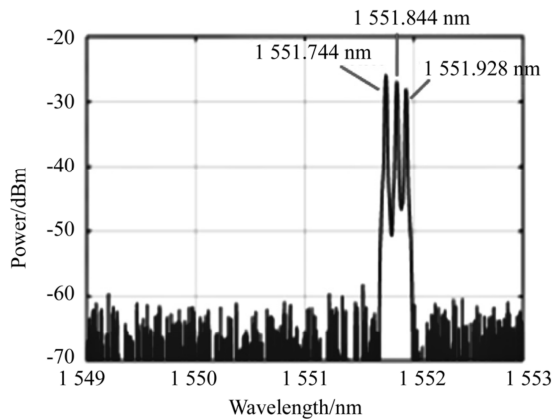
Fig. 8 Fluctuation of the wavelength emitted from the two-wavelength optical fiber laser



(a) 3 个波长间隔较大时激光器的光谱  
(a) Spectrum of fiber laser with large wavelength spacing



(b) 3 个波长间隔较小时激光器的光谱  
(b) Spectrum of fiber laser with small wavelength spacing



(c) 3 个波长间隔非常小时激光器的光谱  
(c) Spectrum of three-wavelength optical fiber laser

图 9 光纤三波长激光器的输出光谱

Fig. 9 Spectrum of three-wavelength optical fiber laser

间隔也可以根据需要确定。3 个波长之间无模竞争,无论两两波长之间的间隔大小如何,三波长都有稳定的功率和频率,如图 9(a),图 9(b),图 9(c)所示。

对光纤三波长激光器的出射波长的稳定性测试结果如图 10 所示。在连续 4 h 的观察时间内,每个波长的最大漂移量不大于 0.002 nm,波长稳定度均达  $10^{-7}$ 。

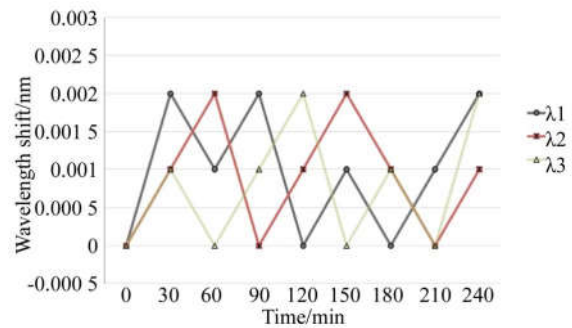


图 10 光纤三波长激光器的波长漂移

Fig. 10 Fluctuation of wavelength emitted from three-wavelength optical fiber laser

## 4 结 论

本文研究并实验了光纤多波长激光器,能同时发出多波长激光。利用光纤光栅只反射布拉格波长的特性,使得激光器有多个独立的但光程重叠的激光谐振腔,每个激光谐振腔有掺铒光纤作为增益介质。在 980 nm 激光的泵浦下,激光器同时发出多波长激光,每个波长值可以根据需要确定。波长之间无模式竞争,每个波长的功率和频率都稳定。每个波长的稳定度达  $10^{-7}$ 。

## 参考文献:

[1] CHANG C P, TUNG P C, SHYU L H, et al.,

Fabry-Perot displacement interferometer for the measuring range up to 100 mm[J]. *Measurement*, 2013, 46(10): 4094-4099.

- [2] WANG C, XU L L, ZHU J, *et al.*. A novel integrated fiber-optic interferometer model and its application in micro-displacement measurement[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2016, 86: 125-131.
- [3] GUAN K S, LI Y H, CHEN Y X, *et al.*. A novel optical fiber displacement measurement system[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 599-601: 684-688.
- [4] 金涛, 刘景林, 杨卫, 等. 线性位移台直线度高精密外差干涉测量装置[J]. *光学 精密工程*, 2018, 26(7): 1570-1577.  
JIN T, LIU J L, YANG W, *et al.*. High-precision straightness interferometer for linear moving stage [J]. *Opti. Precision Eng.*, 2018, 26(7): 1570-1577. (in Chinese)
- [5] 倪畅, 张鸣, 朱煜. 采用相位调制方法的光纤干涉仪[J]. *光学 精密工程*, 2017, 25(4): 820-826.  
NI CH, ZHANG M, ZHU Y. Fiber interferometer based on phase generated carrier method[J]. *Opti. Precision Eng.*, 2017, 25(4): 820-826. (in Chinese)
- [6] 钟金钢, 梁智强, 李仕萍. 激光自混合干涉角度测量参数优化及旋转方向判别[J]. *光学 精密工程*, 2016, 24(5):1001-1008.  
ZHONG J G, LIANG ZH Q, LI SH P. Parameter optimization and direction recognition in angle measurement by laser self-mixing interference[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(5):1001-1008. (in Chinese)
- [7] JIANG C L, LI C W, YIN S X, *et al.*. Multiple self-mixing interferometry algorithm based on phase modulation for vibration measurement[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2017, 49(3): 111.
- [8] ALEXANDROVA A S, TZOGANIS V, WELSCH C P. Laser diode self-mixing interferometry for velocity measurements [J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(3):034104.
- [9] ZHOU J, LIAO C, WANG Y, *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature by employing fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optics Express*, 2014, 22(2): 1680.
- [10] WANG W, WU N, TIAN Y, *et al.*. Miniature all-silica optical fiber pressure sensor with an ultrathin uniform diaphragm[J]. *Optics Express*, 2010, 18(9): 9006-90014.
- [11] LUKIN O V, MAGUNOV A N. Temperature measurement of glass and quartz plates by laser interferometry [J]. *Optics & Spectroscopy*, 1993, 74:377-379.

#### 作者简介:



王韵致(1990—),女,安徽芜湖人,博士研究生。2013年于北京交通大学获得本科学位。主要从事光电检测、光纤传感方面的研究。E-mail: 13118420@bjtu.edu.cn

#### 导师简介:



谢芳(1966—),女,重庆人,教授,博士生导师。2002年于清华大学获得博士学位。主要从事光学干涉精密测量及光纤传感方面的研究。E-mail: fxie@bjtu.edu.cn