

## 激光与光电子学进展

## 基于复合谐振腔的多波长窄线宽光纤激光器

郭哲灿, 谢芳\*, 郭晓蕾, 张孝源

北京交通大学理学院物理系光电信息科学与工程专业实验室, 北京 100044

**摘要** 研究了一种能同时发出多波长激光且每个波长都是单纵模的光纤激光器。该激光器包含多个由光纤及光纤器件构成的激光复合谐振腔, 每个激光复合谐振腔利用掺铒光纤作为增益介质, 利用光纤布拉格光栅作为波长选择元件, 使其能同时发出特定波长的激光, 且能通过改变激光复合谐振腔的数量调整发出的激光波长数目。每个激光复合谐振腔都由两个子谐振腔构成, 通过调整两个子谐振腔的腔长差使复合谐振腔的频率间隔接近增益线宽, 进而使复合谐振腔发出单纵模激光。

**关键词** 激光器; 单纵模; 多波长; 复合谐振腔

中图分类号 TN242

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1714008

## Multi-Wavelength and Narrow Linewidth Fiber Laser Based on Composite Resonator

Guo Zhecan, Xie Fang\*, Guo Xiaolei, Zhang Xiaoyuan

Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Engineering, Department of Physics,  
School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

**Abstract** A fiber laser that can emit multi-wavelength simultaneously and each wavelength is single longitudinal mode is studied in this paper. The laser contains multiple laser composite resonators composed of optical fiber and fiber devices, each laser composite resonator uses a length of erbium-doped fiber as the gain medium and a fiber Bragg grating as the wavelength selector, so that each laser composite resonator can emit a specific wavelength at the same time, and the number of laser wavelengths emitted from the laser can be changed by changing the number of laser composite resonators. Each laser composite resonator is composed of two sub-resonators, by adjusting the cavity length difference between the two sub-resonators, the frequency interval of the composite resonator can be equivalent to the gain linewidth, so that the composite resonator will emit single longitudinal mode laser.

**Key words** laser; single longitudinal mode; multi-wavelength; composite resonator

## 1 引言

光纤激光器由光纤及光纤器件构成, 具有泵浦效率高、阈值低、波长可调谐范围宽、耦合效率高、对振动等环境干扰不敏感等优点, 广泛应用于光纤通信<sup>[1]</sup>、光纤传感<sup>[2-3]</sup>、激光导航<sup>[4]</sup>、生物<sup>[5]</sup>等领域。在精密测量领域, 利用光纤激光器作为光源的光纤干涉测量技术引起了人们的重点关注。由于光纤干涉测量技术具有非接触测量、测量精度高、结构紧凑、质量轻以及抗振动等环境干扰能力强的优点, 被广泛应用于位移<sup>[6-8]</sup>、振动<sup>[9]</sup>、速度<sup>[10]</sup>、压力<sup>[11]</sup>、温度<sup>[12]</sup>等参量的测量。但单波

长干涉信号存在的相位模糊问题, 使激光干涉测量范围仅为半波长, 导致激光干涉测量技术难以对台阶高度和绝对距离进行测量。

随着各领域的发展, 台阶高度测量和绝对距离测量在工业生产、科学研究、航空航天等领域的需求越来越强烈, 而传统单波长激光干涉测量技术难以满足这些测量需求。为了解决这些难题, 人们逐渐提出了基于双波长激光和三波长激光的多波长干涉测量技术。多波长干涉测量技术需要光源能同时发出多个波长的激光, 且每个波长均可根据测量需求调节。Cowle 等<sup>[13]</sup>研究了基于掺铒光纤的线性增益效应和非

收稿日期: 2021-08-17; 修回日期: 2021-08-26; 录用日期: 2021-08-27

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2020JBZ118)

通信作者: \*fxie@bjtu.edu.cn

线性布里渊增益效应,使一个激光器能同时发出多波长激光。Lu 等<sup>[14]</sup>提出了一种基于啁啾莫尔光栅和半导体光放大器的多波长光纤激光器,可利用梳状滤波器挑选波长。目前,研制一个能同时发出多波长激光且每个波长都是单纵模模式<sup>[15-16]</sup>、每个波长值均可以根据测量需求调节的激光器还是一个有待解决的问题。

针对上述问题,本文提出了一种能同时发出多波长激光且每个波长都是单纵模的激光器。该光纤激光器包含多个激光复合谐振腔,每个复合谐振腔都有作为增益介质的掺铒光纤以及作为波长选择元件的光纤布拉格光栅(FBG)。复合谐振腔的数量决定了激光器能同时发出的波长数目,调节复合谐振腔的个数即可调节发出的激光波长数目。每个复合谐振腔都由两个子谐振腔构成,通过调节两个子谐振腔的腔长差可以使复合谐振腔的频率间隔接近复合谐振腔的增益线宽,进而使复合谐振腔发出单纵模激光。

## 2 多波长窄线宽光纤激光器的原理

### 2.1 双波长窄线宽光纤激光器的原理

双波长窄线宽光纤激光器的原理如图 1 所示。其中,FBG<sub>11</sub>和 FBG<sub>12</sub>的参数相同(布拉格波长相同,反射谱的 3 dB 带宽相同,反射率相同),FBG<sub>21</sub>、FBG<sub>22</sub>及 FBG<sub>23</sub>的布拉格波长相同。980 nm 泵浦光源发出的光经过 3 dB-耦合器 1(3 dB-coupler 1)后被分成两路光。一路光经过波分复用器 1(WDM 1)进入一个激光谐振腔,该激光谐振腔是由两个子谐振腔构成的复合谐振腔。其中一个子谐振腔的路径:来自 3 dB-耦合器 1 一个端口的光经过 WDM 1 到达掺铒光纤 1(EDF 1),激

发出 1550 nm 波段的荧光。该荧光经过环形器 1(circulator 1)及 3 dB-coupler 2 后又被分成两路光,一路光经过路径 L<sub>11</sub>后到达 FBG<sub>11</sub>,满足 FBG<sub>11</sub>布拉格条件波长的光被 FBG<sub>11</sub>反射,反射光经过 3 dB-coupler 2、circulator 1、3 dB-coupler 4、1:9 coupler、隔离器(Isolator)、circulator 3、FBG<sub>23</sub>后,再次经过 WDM 1 和 EDF 1,光强被放大的光经过 circulator 1、3 dB-coupler 2、光纤 L<sub>11</sub>到达 FBG<sub>11</sub>再次被反射,光沿上述路径重复传输,形成一个激光环形子谐振腔。另一个子谐振腔的路径:来自 3 dB-coupler 1 同一个端口的光经过 WDM 1 到达 EDF1,激发 1550 nm 波段的荧光。该荧光经过 circulator 1 以及 3 dB-coupler 2 分光后,经过路径 L<sub>12</sub>到达 FBG<sub>12</sub>,满足 FBG<sub>12</sub>布拉格条件波长的光被 FBG<sub>12</sub>反射,反射光经过 3 dB-coupler 2、circulator 1、3 dB-coupler 4、1:9 coupler、隔离器、circulator 3、FBG<sub>23</sub>后,再次经过 WDM 1 和 EDF 1,光强被放大的光经过 circulator 1、3 dB-coupler 2、光纤 L<sub>12</sub>到达 FBG<sub>12</sub>再次被反射,光沿着上述路径重复传输,形成另一个激光环形子谐振腔。两个子谐振腔除了光纤 L<sub>11</sub>和 L<sub>12</sub>这两段光路不同外,其余部分完全重合。

设两个子谐振腔重合部分的光路长度为 L<sub>1</sub>,则第一个子谐振腔的腔长为 L<sub>1</sub> + 2L<sub>11</sub>,其谐振频率可表示为

$$\nu_1 = \frac{c}{n(L_1 + 2L_{11})} m_1, \quad (1)$$

式中,c为光速,n为光纤的折射率,m<sub>1</sub>为任意整数。第二个子谐振腔的腔长为 L<sub>1</sub> + 2L<sub>12</sub>,其谐振频率可表示为

$$\nu_2 = \frac{c}{n(L_1 + 2L_{12})} m_2, \quad (2)$$

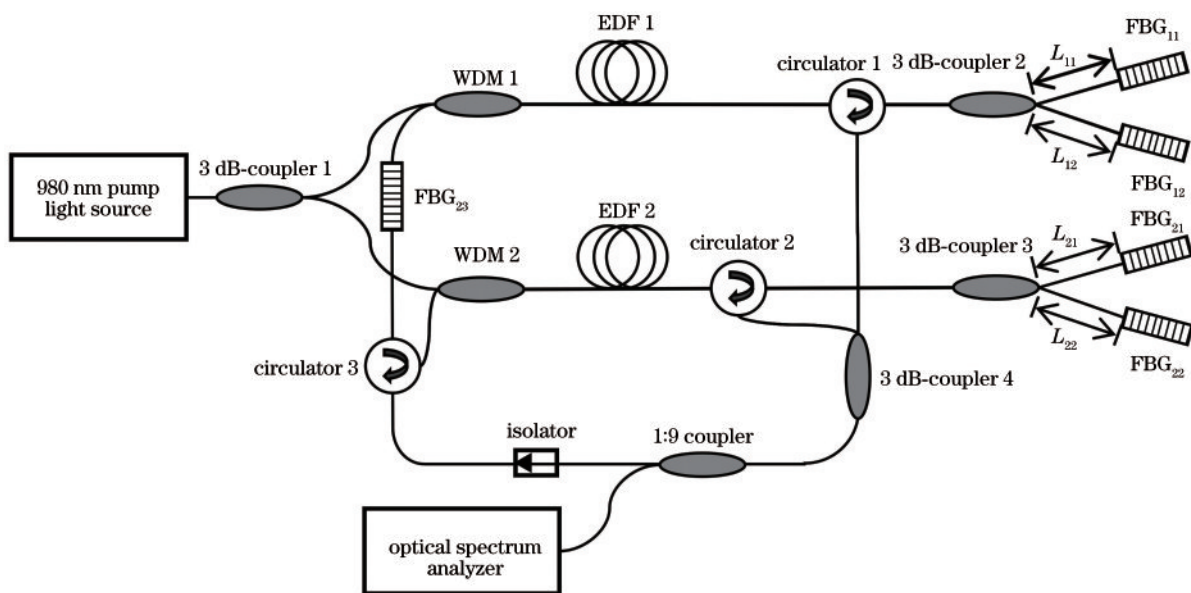


图 1 双波长窄线宽光纤激光器的原理

Fig. 1 Principle of dual-wavelength narrow linewidth fiber laser

式中,  $m_2$  为任意整数。复合谐振腔的谐振频率必须同时满足式(1)和式(2), 可表示为

$$\frac{c}{n(L_1 + 2L_{11})} m_1 = \frac{c}{n(L_1 + 2L_{12})} m_2 \quad (3)$$

设  $\text{FBG}_{11}$  和  $\text{FBG}_{12}$  反射谱的 3 dB 带宽为  $\Delta d$ , 则复合谐振腔的增益线宽为  $\Delta d$ 。复合谐振腔的增益线宽和两个子腔的纵模间隔如图 2 所示。

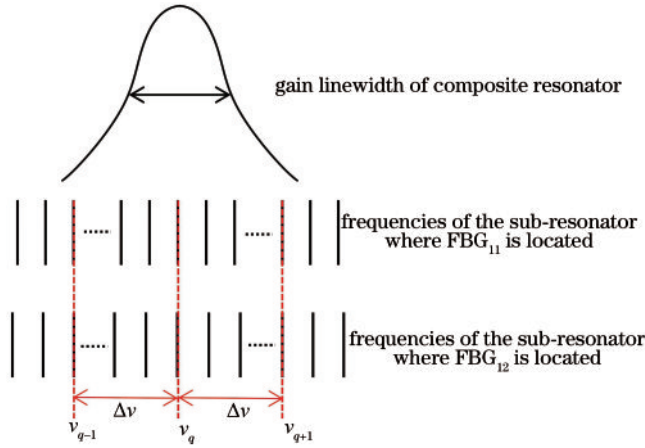


图 2 复合谐振腔的选频原理

Fig. 2 Principle of the frequency selection of composite resonator

两个子谐振腔的频率在某一个频率  $\nu_q$  处相等后, 第一个子谐振腔的光束经过  $N+1$  个频率间隔的频率正好与第二个子谐振腔的光束经过  $N$  个频率间隔后的频率相等 ( $\nu_{q+1} = \nu_{q-1}$ )。则复合谐振腔的频率间隔可

表示为

$$\Delta \nu = \frac{c}{2n(L_{11} - L_{12})} \quad (4)$$

由式(4)可知, 适当选择  $L_{11}$  和  $L_{12}$  可以使复合谐振腔的频率间隔足够大。当复合谐振腔的频率间隔大到与复合谐振腔增益线宽 ( $\text{FBG}_{11}$  和  $\text{FBG}_{12}$  的反射谱宽) 相当时, 复合谐振腔可实现单纵模运转。当增益大于损耗时, 复合谐振腔在 1:9 coupler 一端口出射波长为  $\text{FBG}_{11}$  ( $\text{FBG}_{12}$ ) 布拉格波长的单纵模激光。同理, 来自 3 dB-coupler 1 的另一路光经过 WDM 2, 进入另一个由两个子谐振腔构成的复合谐振腔。该复合谐振腔用  $\text{FBG}_{21}$ 、 $\text{FBG}_{22}$  和  $\text{FBG}_{23}$  作为反射镜, 工作原理与第一个复合谐振腔相同。两个子谐振腔除了光纤  $L_{21}$  和  $L_{22}$  这两段光路不同以外, 其余部分完全重合。设两个子谐振腔重合部分的光路长度为  $L_2$ , 则第一个子谐振腔的腔长为  $L_2 + 2L_{21}$ , 第二个子谐振腔的腔长为  $L_2 + 2L_{22}$ 。适当选择  $L_{21}$  和  $L_{22}$ , 就能使复合谐振腔的频率间隔与复合谐振腔增益线宽 ( $\text{FBG}_{21}$  和  $\text{FBG}_{22}$  的反射谱宽) 接近, 进而实现单纵模运转。当增益大于损耗时, 复合谐振腔在 1:9 coupler 一端口出射波长为  $\text{FBG}_{21}$  ( $\text{FBG}_{22}$ ) 布拉格波长的单纵模激光。

### 2.2 三波长窄线宽光纤激光器的原理

在图 1 所示的双波长窄线宽光纤激光器基础上再增加一个复合谐振腔就能得到三波长窄线宽光纤激光器, 如图 3 所示。其中,  $\text{FBG}_{31}$ 、 $\text{FBG}_{32}$  及  $\text{FBG}_{33}$  的布拉格波长相同, 以这三个 FBG 作为反射镜构成第三个复合谐振腔。与双波长窄线宽光纤激光器的工作原

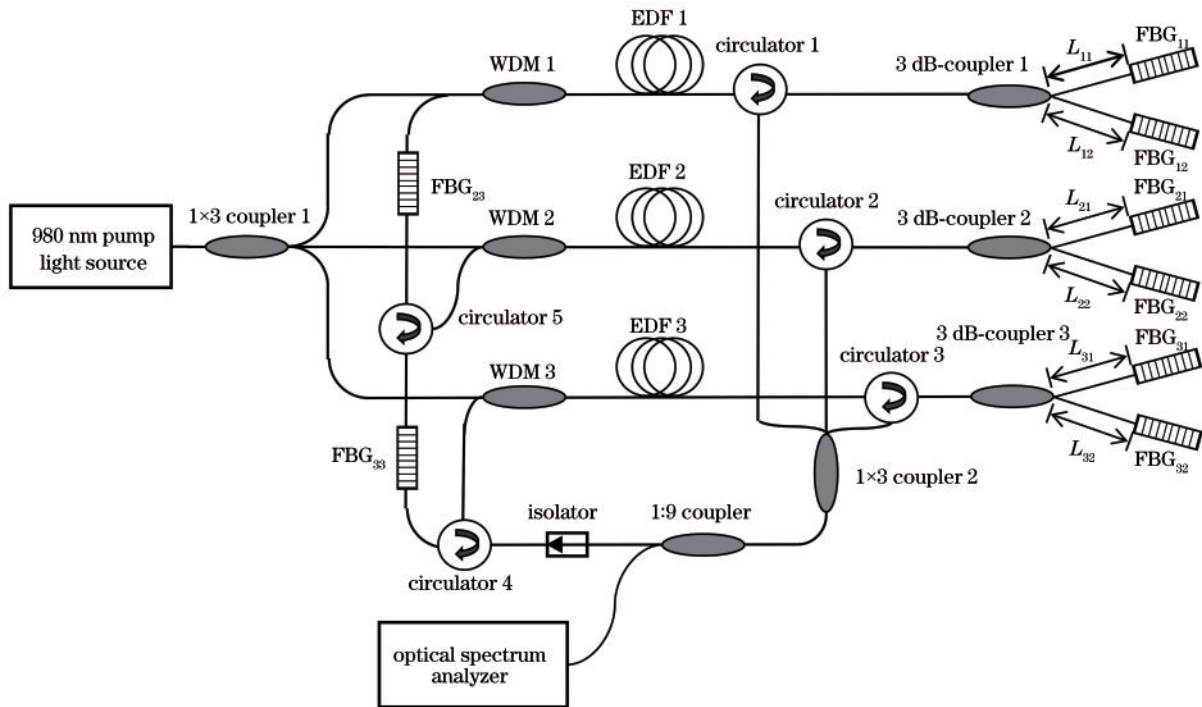


图 3 三波长窄线宽光纤激光器的原理

Fig. 3 Principle of three-wavelength narrow linewidth fiber laser

理相同,只要选择适当的  $L_{31}$  和  $L_{32}$ ,就能使该复合谐振腔的频率间隔与其增益线宽(FBG<sub>31</sub>和FBG<sub>32</sub>的反射谱宽)接近,进而实现单纵模运转。当增益大于损耗时,该复合谐振腔在 1:9 coupler 一端口出射波长为 FBG<sub>31</sub> 布拉格波长的单纵模激光。

### 3 多波长窄线宽光纤激光器的实验

#### 3.1 双波长窄线宽光纤激光器的实验

在双波长窄线宽光纤激光器的实验中,每个谐振腔的掺铒光纤长度约为 2.5 m,各个光纤布拉格光栅的参数如表 1 所示,其中,  $\lambda_B$  为布拉格波长。  $L_{11} \sim L_{22}$  的长度如表 2 所示。由于  $L_{i1} - L_{i2} = 4$  mm,每个谐振腔的频率间隔为

$$\Delta\nu = \frac{c}{2n(L_{i1} - L_{i2})} = 25.5 \text{ GHz}。 \quad (5)$$

式中,  $n = 1.4682, i = 1, 2$ 。

25.5 GHz 的频率间隔约为 0.2 nm 的波长间隔。由于 FBG<sub>11</sub>~FBG<sub>22</sub> 反射谱的 3 dB 带宽约为 0.1 nm,则两个复合谐振腔增益介质的 3 dB 线宽约为 0.1 nm,相对于 0.2 nm 的波长间隔,两个复合谐振腔能实现单纵模运转。当泵谱功率为 200 mW 时,光谱仪探测到该系统输出光的光谱如图 4 所示。可以发现,该系统能同时输出两个波长和功率都稳定的双波长激光。双波长窄线宽光纤激光器中一个波长的泵浦/激光功率曲线如图 5 所示。其中,激光输出阈值的泵浦光功率为 12 mW,斜率效率为 0.47%。

表 1 双波长窄线宽光纤激光器的光栅参数

Table 1 Grating parameters of dual-wavelength narrow linewidth fiber laser

Fiber grating	$\lambda_B$ /nm	3 dB bandwidth of reflection spectrum $d$ /nm	Reflectivity /%
FBG <sub>11</sub>	1529.85	0.1	65
FBG <sub>12</sub>	1529.85	0.1	65
FBG <sub>21</sub>	1542.65	0.1	65
FBG <sub>22</sub>	1542.65	0.1	65
FBG <sub>23</sub>	1542.65	0.6	99

表 2 双波长窄线宽光纤激光器中  $L_{11} \sim L_{22}$  的长度

Table 2 Length of  $L_{11} - L_{22}$  in dual-wavelength narrow linewidth fiber laser unit: mm

Fiber	Fiber length $L$
$L_{11}$	104
$L_{12}$	100
$L_{21}$	104
$L_{22}$	100

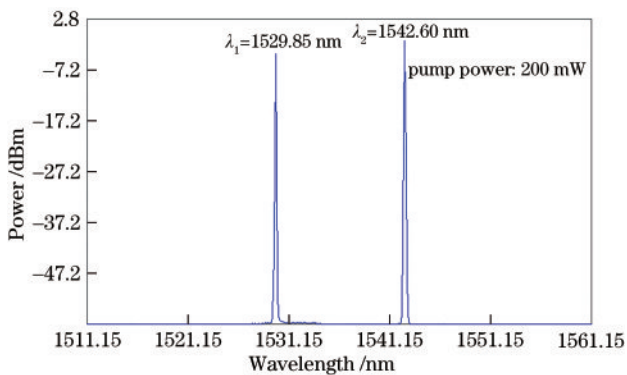


图 4 双波长窄线宽激光器的输出光谱

Fig. 4 Spectrum of dual-wavelength narrow linewidth laser

为了检测各个波长的功率稳定性以及模式等参数,在图 1 中 1:9 coupler 的输出端接 circulator 4 和 FBG<sub>24</sub>,FBG<sub>24</sub> 与 FBG<sub>21</sub> 和 FBG<sub>22</sub> 的布拉格波长相同,如图 6 所示。系统输出的两个波长中,波长为 FBG<sub>21</sub> 布拉格波长的光被 FBG<sub>24</sub> 反射,另一个波长的光透过 FBG<sub>24</sub>,此时,两个波长的光分别从两个端口输出,在

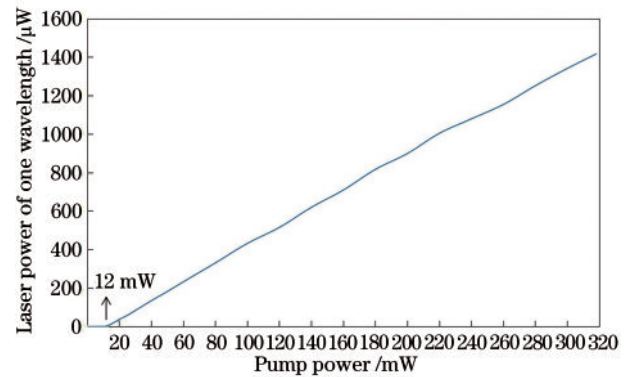


图 5 双波长窄线宽光纤激光器中一个波长的泵浦/激光功率  
Fig. 5 Pump/laser power of one wavelength of dual-wavelength narrow linewidth fiber laser

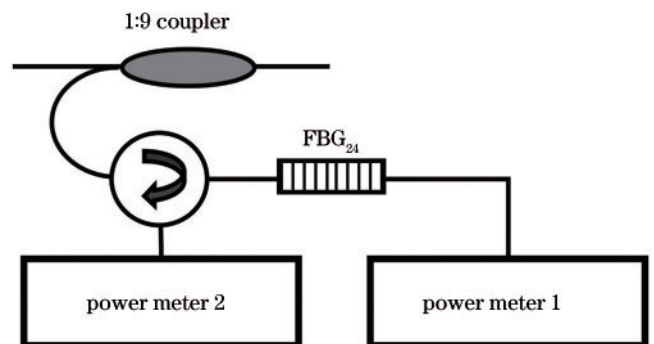


图 6 双波长窄线宽光纤激光器输出功率测量原理  
Fig. 6 Measurement principle of output power of dual-wavelength narrow linewidth fiber laser

两个端口分别用光功率计测量每个波长的输出功率, 测试时间内两个波长的功率变化如图 7 所示。可以发现, 两个波长的输出功率波动最大幅度约为  $0.2 \mu\text{W}$ 。

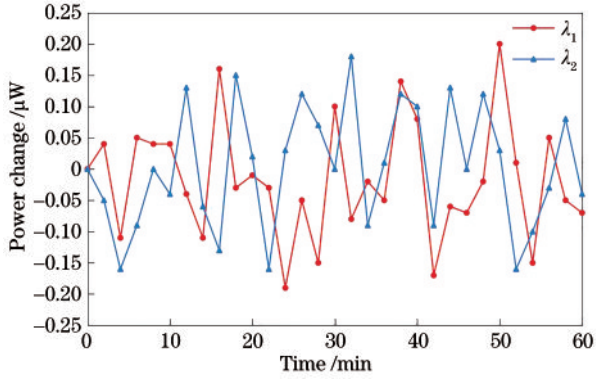


图 7 两个波长的输出功率  
Fig. 7 Output power of two wavelengths

为了检测每个波长的光是否为单纵模激光, 将图 6 所示的双波长激光器作为光源, 两个波长的激光分别工作在一个光纤外差马赫-曾德尔干涉仪中, 如图 8 所示。图 8(a) 为干涉系统示意图, 图 8(b) 为干

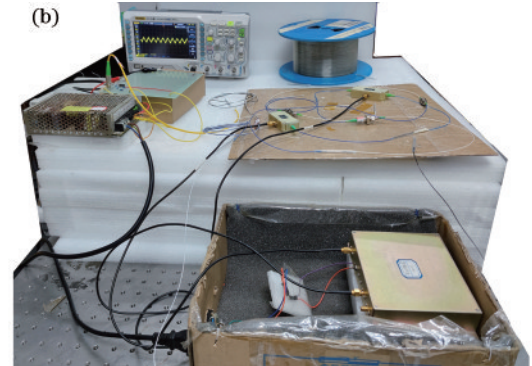
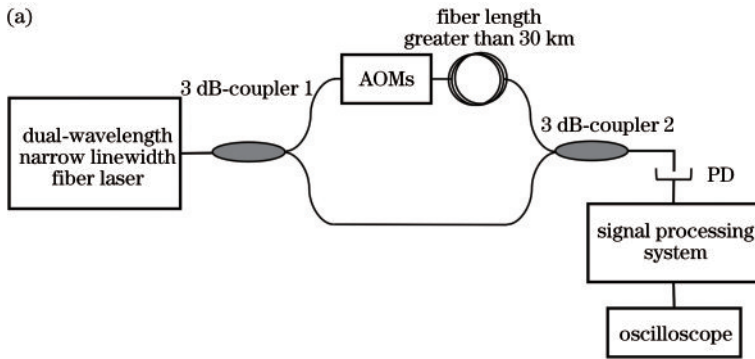


图 8 外差干涉实验的原理。(a)干涉实验系统示意图;(b)干涉实验系统实物照片

Fig. 8 Principle of the heterodyne interferometric experiments. (a) Schematic diagram of the interference experiment system; (b) actual photo of the interference experiment system

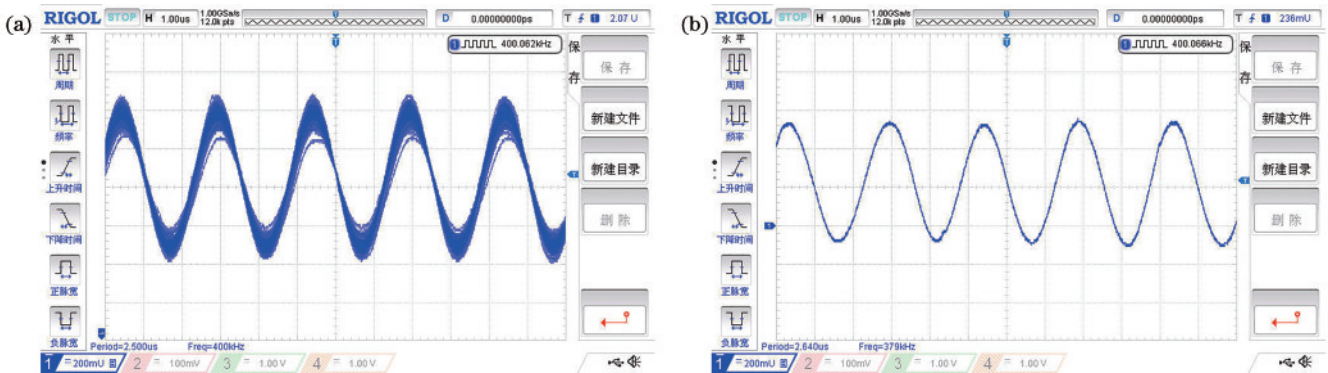


图 9 光源为多纵模激光以及单纵模激光时的外差干涉信号。(a)多纵模外差干涉信号;(b)单纵模外差干涉信号

Fig. 9 Heterodyne interferometric signal when the light source is multi-longitudinal mode and single-longitudinal mode laser. (a) Multi-longitudinal mode heterodyne interference signal; (b) single longitudinal mode heterodyne interference signal

涉系统实物图。马赫-曾德尔干涉仪的一个臂长约为 1 m, 另一个臂嵌入声光调制器 (AOM) 和一个长度大于 30 km 的光纤, 声光调制器的移频设置为 400 kHz。

如果光源发出的光是多纵模激光, 则经过外差马赫-曾德尔干涉仪后的干涉信号是每个模式光外差干涉信号的简单叠加, 即多个频率相同 (频率为 400 kHz) 但相位不同余弦波的简单叠加。激光器腔长的变化会使每个模式的频率发生变化, 进而导致每个模式光外差干涉信号的相位发生变化。多个相位随机变化的同频率余弦波叠加的结果如图 9(a) 所示, 这是利用一个已知为多模输出的激光器作为光源的外差干涉信号, 从而得到不易分辨的余弦波。如果激光器发出的光是单纵模激光, 则经过外差马赫-曾德尔干涉仪后的干涉信号是同一模式光的外差干涉信号, 即一个余弦波, 如图 9(b) 所示, 这是利用一个已知为单模输出的激光器作为光源的外差干涉信号。当双波长激光器中的任意一个波长工作在该外差马赫-曾德尔干涉仪中时, 探测器 (PD) 探测到的信号如图 10 所示。可以发现, 该外差干涉信号是一个频率为 400 kHz 的余弦波, 这表明双波长激光器的任意一个波长均为单纵模激光。

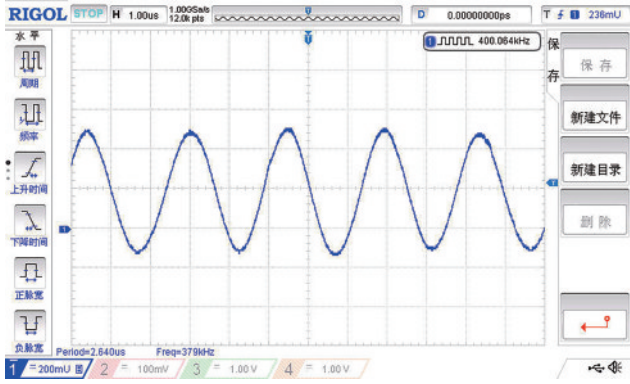


图 10 双波长激光器任意一个波长的外差干涉信号

Fig. 10 Heterodyne interferometric signal of any wavelength of dual-wavelength laser

### 3.2 三波长窄线宽光纤激光器的实验

在三波长窄线宽光纤激光器实验中,每个谐振腔的掺铒光纤长度约为 2.5 m,各个光纤布拉格光栅的参数如表 3 所示,  $L_{11} \sim L_{32}$  的长度如表 4 所示。每个谐振腔的频率间隔为 25.5 GHz,相当于 0.2 nm 的波长间隔。由于  $FBG_{11} \sim FBG_{32}$  反射谱的 3 dB 带宽约为 0.1 nm,则三个谐振腔的增益介质 3 dB 线宽约为 0.1 nm,相对于 0.2 nm 的波长间隔,可实现单纵模运转。

当泵谱功率为 200 mW 时,光谱仪检测到该系统的输出光谱如图 11 所示。可以发现,该系统能同时输出三个波长和功率都稳定的三波长激光。三波长窄线宽光纤激光器中一个波长的泵浦/激光功率曲线如图 12 所示。可以发现,激光输出阈值的泵浦光功率为 12 mW,斜率效率为 0.32%。

表 3 三波长窄线宽光纤激光器的参数

Table 3 Parameters of three-wavelength narrow linewidth fiber laser

Fiber grating	$\lambda_B$ / nm	3 dB bandwidth of reflection spectrum $d$ / nm	Reflectivity / %
FBG <sub>11</sub>	1529.85	0.1	65
FBG <sub>12</sub>	1529.85	0.1	65
FBG <sub>21</sub>	1542.65	0.1	65
FBG <sub>22</sub>	1542.65	0.1	65
FBG <sub>23</sub>	1542.65	0.6	99
FBG <sub>31</sub>	1558.00	0.1	65
FBG <sub>32</sub>	1558.00	0.1	65
FBG <sub>33</sub>	1558.00	0.6	99

表 4 三波长窄线宽光纤激光器中  $L_{11} \sim L_{32}$  的长度

Table 4 Length of  $L_{11} \sim L_{32}$  in three-wavelength narrow linewidth fiber laser unit: nm

Fiber	Fiber length $L$
$L_{11}$	104
$L_{12}$	100
$L_{21}$	104
$L_{22}$	100
$L_{31}$	104
$L_{32}$	100

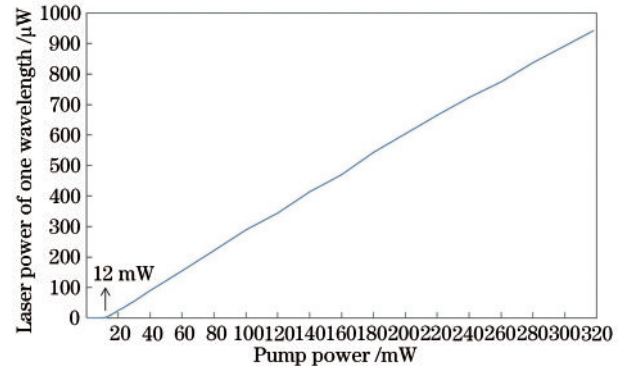


图 12 三波长窄线宽光纤激光器中一个波长的泵浦/激光功率  
Fig. 12 Pump/laser power of one wavelength of three-wavelength narrow linewidth fiber laser

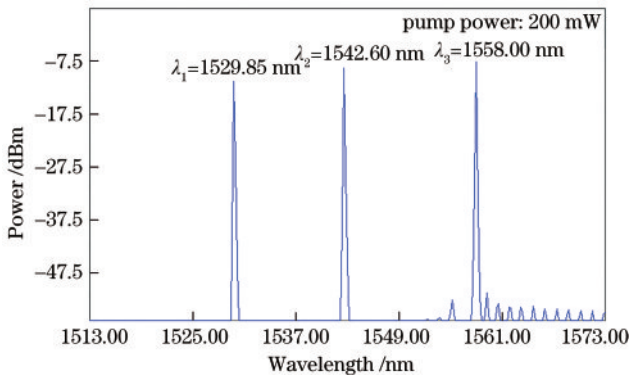


图 11 三波长窄线宽激光器的输出光谱

Fig. 11 Spectrum of three-wavelength narrow linewidth laser

与双波长窄线宽光纤激光器检测每个波长的功率的方法相似,使三个波长的光分别由三个端口输出,如图 13 所示。三个波长的光用环形器和 FBG 分开,在 1:9 coupler 的输出端接 circulator 6、FBG<sub>24</sub>、circulator 7 以及 FBG<sub>34</sub>。FBG<sub>24</sub> 与 FBG<sub>21</sub> 和 FBG<sub>22</sub> 的布拉格波长相同,FBG<sub>34</sub> 与 FBG<sub>31</sub> 和 FBG<sub>32</sub> 的布拉格波长相同。分别检测每个波长的功率,得到测试时间内三个波长的功率变化如图 14 所示。可以发现,三个波长输出功率波动的最大幅度约为 0.2  $\mu$ W。

与双波长窄线宽光纤激光器检测每个波长是否为

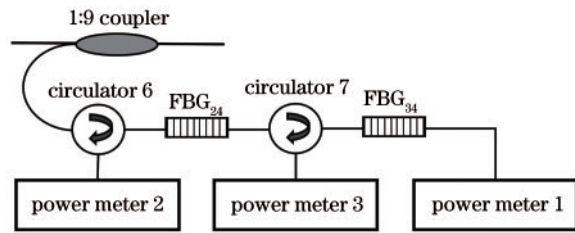


图 13 三个波长的功率测量原理

Fig. 13 Principle of power measurement for three wavelengths

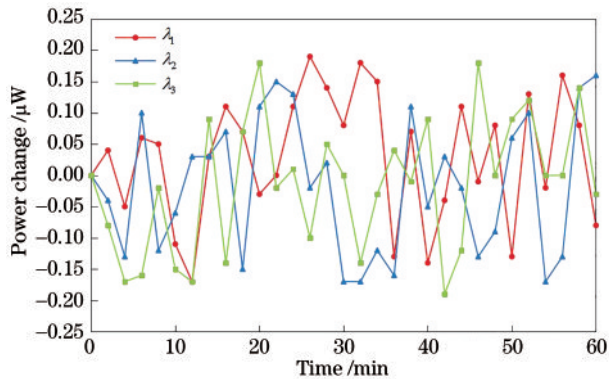


图 14 三个波长的输出功率

Fig. 14 Output power of three wavelengths

单纵模的方法相似,将三波长激光器作为光源,使每个波长工作在光纤外差马赫-曾德尔干涉仪中,探测器探测到的信号如图 15 所示。可以发现,该外差干涉信号是一个频率为 400 kHz 的正弦波,这表明三波长激光器的任意一个波长均为单纵模激光。

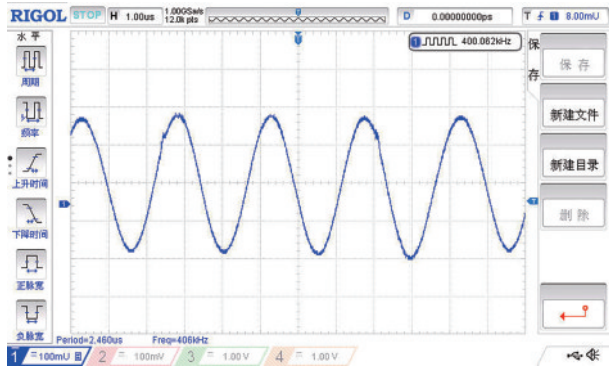


图 15 三波长激光器任意一个波长的外差干涉信号

Fig. 15 Heterodyne interference signal of any wavelength of three-wavelength laser

## 4 结 论

研究了一种能同时发出多波长窄线宽的光纤激光器。该激光器包含多个由光纤及光纤器件构成的激光谐振腔,每个激光谐振腔都有各自作为增益介质的掺铒光纤以及作为波长选择元件的 FBG。通过调节激光谐振腔的数目即可调节激光器输出波长的数目。每个激光谐振腔都是由两个子谐振腔构成的复合谐振

腔,各复合谐振腔均可输出单纵模激光。实验结果表明,该光纤激光器能同时发出功率稳定的多波长激光,且每个波长的光都是单纵模激光。

## 参 考 文 献

- [1] Shaker L M, Osamah S, Al-Amiery A A. Single-mode optical fibers coupling: study of the field of view[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1045(1): 012009.
- [2] Kumar S, Singh R. Recent optical sensing technologies for the detection of various biomolecules: review[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 134: 106620.
- [3] 游关红, 彭万敬, 邹辉. 基于光学滤波器的扫频光纤激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(1): 0100006.  
You G H, Peng W J, Zou H. Research progress of frequency-swept fiber lasers based on optical filter[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(1): 0100006.
- [4] Yang L H, Liao R Y, Lin J R, et al. Enhanced 6D measurement by integrating an inertial measurement unit (IMU) with a 6D sensor unit of a laser tracker[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 126: 105902.
- [5] Tunc B, Gulsoy M. Stereotaxic laser brain surgery with 1940-nm Tm: fiber laser: an *in vivo* study[J]. Lasers in Surgery and Medicine, 2019, 51(7): 643-652.
- [6] 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.
- [7] 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 and Lasers in Engineering, 2016, 86: 125-131.
- [8] Guan K S, Li Y H, Chen Y X, et al. A novel optical fiber displacement measurement system[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 599/600/601: 684-688.
- [9] Manojlovic L M. A novel common path interferometric technique for vibration measurement based on two fiber-optic couplers[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(7): 1541-1547.
- [10] Seat H C, Ouisse E, Morteau E, et al. Vibration displacement measurements based on a polarimetric extrinsic fibre Fabry Perot interferometer[J]. Measurement Science and Technology, 2003, 14(6): 710-716.
- [11] Wang W H, Wu N, Tian Y, et al. Miniature all-silica optical fiber pressure sensor with an ultrathin uniform diaphragm[J]. Optics Express, 2010, 18(9): 9006-9014.
- [12] Ohta T, Koshimizu C, Kawasaki K, et al. Simultaneous measurement of substrate temperature and thin-film thickness on SiO<sub>2</sub>/Si wafer using optical-fiber-type low-coherence interferometry[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105(1): 013110.
- [13] Cowle G J, Stepanov D Y. Multiple wavelength generation with Brillouin/erbium fiber lasers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996, 8(11): 1465-1467.
- [14] Lu S H, Xu O, Feng S C, et al. Multi-wavelength fiber ring laser based on a chirped Moiré fiber grating and a

- semiconductor optical amplifier[J]. Chinese Optics Letters, 2009, 7(6): 469-471.
- [15] 刘昊炜, 张骥, 魏珊珊, 等. 稳定单纵模运转的低噪声环形复合腔光纤激光器[J]. 中国激光, 2021, 48(5): 0501017. Liu H W, Zhang J, Wei S S, et al. Low-noise compound ring cavity fiber laser with stable single-longitudinal-mode operation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(5): 0501017.
- [16] 丁建一, 陈浩伟, 白晋涛. 基于环形滤波器可调谐单频光纤激光器的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(13): 1314003. Ding J Y, Chen H W, Bai J T. Research of tunable single-frequency fiber laser based on fiber ring filter[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(13): 1314003.