

文章编号: 1000-7032(2019)03-0357-09

级联光栅结合 Sagnac 环的可调谐光纤激光器

赵小丽¹, 张钰民¹, 庄 炜^{1,2}, 宋言明¹, 骆 飞^{1,3,4}, 孟凡勇^{1,3,4*}

(1. 北京信息科技大学 光电信息与仪器北京市工程研究中心, 北京 100016;

2. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;

3. 现代测控技术教育部重点实验室, 北京 100192;

4. 北京信息科技大学 光电测试技术北京市重点实验室, 北京 100192)

摘要: 提出并验证了一种单-双波长可调谐掺铒光纤激光器。利用级联光纤布拉格光栅(Cascaded Fiber Bragg gratings, Cascaded FBGs)结合 Sagnac 环结构所产生的复合滤波效应, 实现较高精细度滤波, 并通过调节环内偏振控制器(Polarization Controller, PC), 引入双折射效应, 得到波长可调谐的光纤激光器。基于耦合模理论并使用传输矩阵法对该结构的传输特性进行了分析, 在此基础上搭建实验系统, 验证了理论分析的正确性。实验结果表明: 通过调节 PC, 激光器输出激光的波长范围约为 1 555.644 ~ 1 556.112 nm, 双波长间隔的可调范围约为 0.108 ~ 0.452 nm, 单-双波长的边模抑制比(SMSR)均高于 40 dB; 在稳定性测试中, 输出单-双波长激光的波长最大漂移量小于 0.008 nm。该方法具有结构简单、调谐方便、易于实现且精细度较高的优点, 可应用于密集波分复用及全光通信系统等领域。

关键词: 级联光栅; Sagnac 环; 双折射效应; 波长可调谐; 光纤激光器

中图分类号: TN243

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20194003.0357

Tunable Fiber Laser Based on Cascaded Grating Combing with Sagnac Loop

ZHAO Xiao-li¹, ZHANG Yu-min¹, ZHUANG Wei^{1,2}, SONG Yan-ming¹, LUO Fei^{1,3,4}, MENG Fan-yong^{1,3,4*}

(1. Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments,

Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China;

2. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

3. Key Laboratory of Modern Measurement Control Technology, Ministry of Education, Beijing 100192, China;

4. Beijing Key Laboratory of Optoelectronics Measurement Technology,

Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

* Corresponding Author, E-mail: mengfanyong@bistu.edu.cn

Abstract: A tunable single-dual wavelength erbium-doped fiber laser is proposed and demonstrated. The finer filtering is generated by compound filtering effect which is produced by cascaded fiber Bragg gratings(Cascaded FBGs) combined with Sagnac loop, the birefringence effect is introduced by adjusting polarization controller(PC) in Sagnac loop, and then the tunable fiber laser is obtained. Based on the coupled mode theory and transmission matrix, the characteristics of the structure are analyzed, experimental system is established, and the correctness of theoretical analysis is verified. The experimental results show that, by adjusting PC, the adjustable laser range is about 1 555.644 ~ 1 556.112 nm, the wavelength spacing of dual-wavelength is about 0.108 ~ 0.452 nm, the side mode suppression ratio (SMSR) of single- and dual-wavelength is more than 40 dB. In the

收稿日期: 2018-05-21; 修订日期: 2018-09-07

基金项目: 教育部“长江学者与创新团队发展计划”(IRT_16R07); 北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划(IDHT20170510)资助项目

Supported by Project of “Changjiang Scholar and Innovation Team Development Plan” of Ministry of Education(IRT_16R07); Beijing Municipal High School Talent Introduction and Training Program(IDHT20170510)

stability test, the maximum wavelength drift of single- and dual-wavelength fiber laser is less than 0.008 nm. The proposed method has the advantages of simple structure, convenient tuning, easy implementation and high fineness, which can be applied in fields such as dense wavelength division multiplexing(DWDM) and all-optical communication systems.

Key words: cascaded FBGs; Sagnac loop; birefringence effect; tunable wavelength; erbium-doped fiber laser

1 引 言

多波长光纤激光器在遥感设备、光通信系统、微波以及 THz 波信号的产生、光纤传感、密集波分复用系统等方面具有巨大的应用潜力,吸引了许多国内外研究学者的目光^[1-3]。其中,可调谐多波长光纤激光器以其波长可调谐的突出优点,成为了近年来的研究热点^[4]。迄今为止,已经报道了多种方法实现多波长光纤激光器,如使用保偏光栅^[5]、相移光栅^[6]、啁啾光栅^[7]、饱和吸收体^[8]、光纤复合环滤波器结构^[9]、马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪结构^[10]、重叠光栅和啁啾光栅^[11]等。

2008年,CHEN等^[12]提出了一种基于线形腔结合光纤布拉格光栅(Fiber Bragg grating, FBG)对的单纵模双波长光纤激光器,其中两个FBG的所有参数一致,通过调节施加于另一个光栅上的应力,使该光栅波长与FBG对的两个透射峰波长相匹配,得到了对应于FBG对中心波长的双波长激光输出,调节输出波长间隔需要改变FBG对之间的距离和反射率。2013年,CAO等^[13]在环形腔掺铒光纤激光器的Sagnac环中插入中心波长不同的FBG对,调节偏振控制器(Polarization controller, PC),得到室温下可开关双波长激光输出,但输出双波长激光仅可在两个FBG的中心波长处进行互相切换。2013年,ZOU等^[14]使用双通M-Z干涉仪结合Sagnac环作为滤波器,调节PC实现了单-双波长可调谐光纤激光器。2015年,HUANG等^[15]基于DFB(Distributed feedback, DFB)激光注入法,调节DFB激光器的运行温度,实现了双波长间隔可调的光纤激光输出,在运行温度为25℃时得到了双波长激光的同时振荡。2017年,YAN等^[16]使用光纤拉锥法制作了基于声光效应的M-Z干涉仪,在环形腔光纤激光器中通过调节射频信号发生器的驱动功率,改变输出波长,实现了对双波长光纤激光器的快速调节。2018年,DING等^[17]使用Sagnac环结合两段以45°角熔接的保偏

光纤,形成干涉环,调节PC,实现了波长可调谐。然而这些方法存在结构复杂、成本较高或双波长间隔不可调以及调谐困难等问题。

本文提出了一种简单的线形腔结构,得到了单-双波长及波长间隔均可调谐的掺铒光纤激光器。基于Sagnac环结合级联FBG结构作为梳状滤波器,在谐振腔内形成干涉滤波和激光振荡。使用传输矩阵法研究了该结构的实验原理,仿真分析了Sagnac环臂长差以及PC旋转角度对输出光谱的影响,并通过实验验证了该结构的合理性和可行性。通过调节PC,在室温下得到了单-双波长可调谐的激光输出,输出单-双波长激光的波长范围约为1555.644~1556.112 nm,双波长间隔约为0.108~0.452 nm。和其他同类方法相比,具有结构简单、调谐方便,易于实现且滤波精细度较高的优点,可应用于密集波分复用以及全光通信系统等领域。

2 实验装置及原理

2.1 实验结构及原理分析

单-双波长可调谐的线形腔掺铒光纤激光器的实验结构如图1所示。使用峰值波长为976 nm的激光二极管(Laser diode, LD)作为泵浦光源,泵浦功率设置为110 mW,泵浦光通过980/1550 nm的波分复用器(Wavelength division multiplexer, WDM)一端进入激光谐振腔,WDM另一端连接光纤全反镜作为谐振腔的高反射端。由一段5 m长的掺铒光纤(Erbium-doped fiber, EDF)提供增益,泵浦光在经过EDF放大后产生的自发辐射光通过3 dB耦合器进入Sagnac环结构,经过Sagnac环及级联FBG的复合干涉滤波作用以及PC对腔内双折射状态的调节后,通过耦合器一端输出光谱,并使用分辨率为0.02 nm的光谱仪(Optical spectrum analyzer, OSA)测量输出信号。

其中,Sagnac环结构是由一个2×2的3 dB耦合器(分光比为50:50)、一个用于调节腔内增

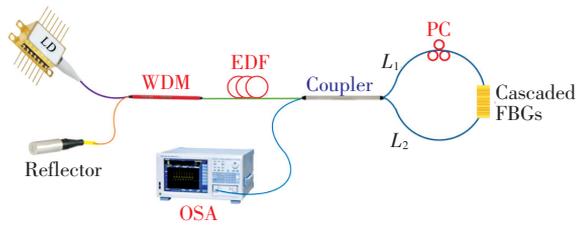


图 1 基于 Sagnac 环结构光纤激光器的实验原理图

Fig. 1 Experimental schematic of fiber laser based on Sagnac loop structure

益和损耗的 PC 以及一个用于滤波的级联 FBG 组成。使用 ASE 光源对该 Sagnac 环结构的输出光谱进行测试, 测试装置如图 2 所示。ASE 光源发出的光通过耦合器进入 Sagnac 环, 分别经过环内 PC 和级联 FBG 后由耦合器的一端输出, 并使用 OSA 测量输出信号。其中, Sagnac 环的两臂长度差 $\Delta L = L_1 - L_2 = 2 \text{ mm}$ 。级联 FBG 是由栅区长度相同 ($L_{g1} = L_{g2} = L_{g3} = 5 \text{ mm}$) 且间隔相等 ($L_0 = 2.15 \text{ mm}$) 的 3 个 FBG 组成, 每个 FBG 刻制的参数相同, 均由标准单模光纤 (康宁 SMF-28e) 载氢后, 再通过 244 nm 的氩离子激光器曝光均匀相位掩模板制作而成, 掩模板的周期为 1 075.860 nm, 栅区长度为 25 mm。为提高级联 FBG 的稳定性, 将其置于温度为 90 °C 的恒温箱内退火 24 h, 退火后级联 FBG 的光谱如图 3 所示。输出光谱由

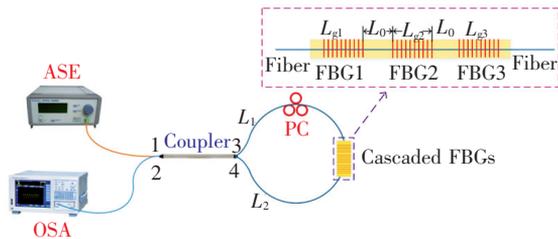


图 2 以 ASE 为光源的实验原理图

Fig. 2 Experimental schematic under the source of ASE

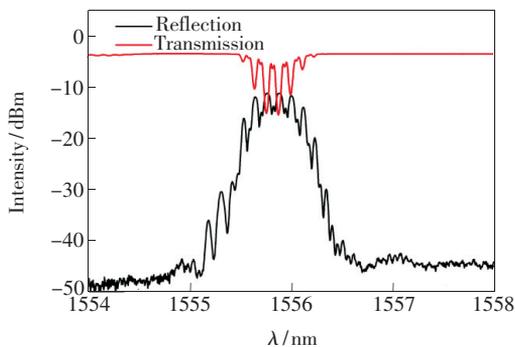


图 3 级联 FBG 退火后的光谱图

Fig. 3 Annealed spectrum of cascaded FBGs

OSA (YOKOGAWA, AQ6370D) 进行测量。

对该激光器的工作原理进行分析: LD 通过 WDM 注入抽运光抽运 EDF, 使 EDF 产生自发辐射, 自发辐射光经过 3 dB 耦合器进入 Sagnac 环, 满足级联 FBG 反射波长的光通过级联 FBG 后, 由于臂长差的存在, 返回到耦合器发生干涉, 一部分光直接输出到 OSA 中, 另一部分光作为正反馈继续在谐振腔内振荡, 如此循环往复, 当谐振腔内获得的增益大于损耗时, 发射激光。

该结构实现输出激光单-双波长可调谐的原理为: 调节 Sagnac 环内 PC, 将在该段光纤中引入应力双折射效应, 有助于分开 EDF 中不同模式对应的偏振态, 增强偏振烧孔效应, 进而抑制了 EDF 增益的均匀展宽现象, 使非均匀展宽明显增强, 从而减小了不同模式之间的竞争, 当仅有某一个模式获得的增益大于腔内损耗时, 在该模式所对应的波长处出射激光; 继续调节 PC, 当某两个模式获得的增益几乎相同且均大于腔内损耗时, 在这两个模式对应的波长处同时获得双波长激光输出。并且通过仔细调节 PC, 还可实现双波长的等幅值输出。

以 ASE 为光源对该 Sagnac 环结构的传输特性进行分析, 如图 4 所示。假设 ASE 光从耦合器端口 1 输入 (端口 2 输入为 0), 通过耦合器耦合后分别从端口 3 和 4 输出两束强度相同、传输方向相反的光, 出射光分别经过 PC 和级联 FBG 传输一周后返回耦合器发生干涉, 实现相干传输。从端口 2 输出的透射光谱进入 OSA 进行测量。

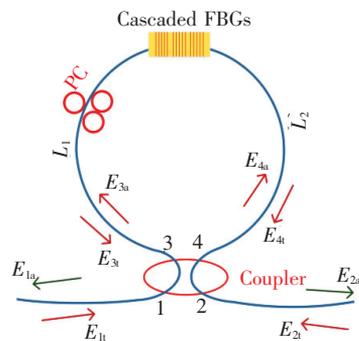


图 4 Sagnac 环结构示意图

Fig. 4 Schematic of Sagnac loop structure

基于耦合模理论^[18], 使用传输矩阵法对上述 Sagnac 干涉仪结构的传输特性进行分析。分别将耦合器输出端口 3 和 4 到光栅之间的光纤长度表示为 L_1 和 L_2 。为简化分析, 假设不考虑额外损

耗,光在光纤中的传输模式为基模,且与光的偏振态无关。将光波通过耦合器端口 i ($i=1,2,3,4$) 的光场表示为 \mathbf{E}_{it} 和 \mathbf{E}_{ia} , 下标 t 和 a 分别表示基于耦合器的入射光场和出射光场的方向。由于端口 1 为输入端,因此有

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_{1t} \\ \mathbf{E}_{2t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

在 Sagnac 环中,当光通过耦合器时的传输矩阵为

$$\mathbf{T}_c = \begin{bmatrix} \sqrt{1-k} & j\sqrt{k} \\ j\sqrt{k} & \sqrt{1-k} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中 k 为耦合器的耦合系数,当使用 3 dB 耦合器时 $k=0.5$,则光波正向经过耦合器时的传输矩阵为

$$\mathbf{T}_c = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

光波在环内传输一周后,反向经过耦合器输出时

$$\mathbf{T}_g = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma L_g) - j \frac{\sigma}{\gamma} \sinh(\gamma L_g) & -j \frac{\kappa}{\gamma} \sinh(\gamma L_g) \\ j \frac{\kappa}{\gamma} \sinh(\gamma L_g) & \cosh(\gamma L_g) + j \frac{\sigma}{\gamma} \sinh(\gamma L_g) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中, L_g 表示 FBG 的栅区长度且已知 3 个 FBG 的栅区长度相等, $\gamma = \sqrt{\kappa^2 - \sigma^2}$ 是波长处的虚数, κ 和 σ 称为这段光栅上的交流和总的直流耦合系数。其中 $\kappa = \pi \Delta n_{\text{eff}} / \lambda$, $\Delta n_{\text{eff}} = 9 \times 10^{-5}$ 是光栅的有效折射率变化, λ 为入射光波长。 $\sigma = \delta_d + \sigma' - \frac{1}{2} \frac{d\varphi}{dz}$, $\delta_d = 2\pi n_{\text{eff}} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_d} \right)$ 是模式间的失谐参量, $\sigma' = 2\pi \Delta n_{\text{eff}} / \Lambda$ 为 FBG 的直流耦合系数, Λ 是光栅的周期, $\lambda_d = 2n_{\text{eff}} \Lambda$ 是 FBG 的中心波长, n_{eff} 是光纤的有效折射率。对于均匀光栅,有 $\frac{1}{2} \frac{d\varphi}{dz} = 0$ [21-24]。

光在长度为 L_i 的标准单模光纤中传输时,其传输矩阵可表示为

$$\mathbf{T}_{L_i} = \begin{bmatrix} \exp(j\beta L_i) & 0 \\ 0 & \exp(-j\beta L_i) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中, L_i ($i=0,1,2$) 表示光纤的长度,其中 L_0 表示 FBG 之间的间隔, $L_{1(2)}$ 表示 Sagnac 环两臂上光纤的长度, $\beta = 2\pi n_{\text{eff}} / \lambda$ 为光波在光纤中的模式传播常数, λ 是光纤中所传输的光波波长 [25-26]。

通过以上分析可知,输入信号光通过耦合器耦合之后,在两臂上传输的光场可表示为

的传输矩阵是正向传输矩阵的逆矩阵 \mathbf{T}_c^{-1} 。

$$\mathbf{T}_c^{-1} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

当传输光经过 PC 时,由于其在光纤中引入的应力双折射效应,使传输光波的偏振方向随 PC 状态的变化而改变,假设 PC 的旋转角度为 θ ,则正向传输的光(顺时针方向)经过 PC 的传输矩阵为

$$\mathbf{T}_{\text{PC}} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}, \quad (5)$$

反向传输的光(逆时针方向)经过 PC 时的传输矩阵为 $\mathbf{T}_{\text{PC}}^{-1}$:

$$\mathbf{T}_{\text{PC}}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}, \quad (6)$$

实验中所使用的级联光栅为 3 个均匀 Bragg 光栅相级联而成,因此,每个 FBG 的传输矩阵相同且均可表示为 [19-20]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_{3a} \\ \mathbf{E}_{4a} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_c \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{1t} \\ \mathbf{E}_{2t} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{1t} \\ \mathbf{E}_{2t} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

\mathbf{E}_{3a} 和 \mathbf{E}_{4a} 两束传输方向相反的光在 Sagnac 干涉仪内传输一周后,再次进入耦合器时的光场可分别表示为 \mathbf{E}_{3t} 和 \mathbf{E}_{4t} ,由各处的传输关系可知 [27]

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_{4t} \\ \mathbf{E}_{3t} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{L_2} \mathbf{T}_g \mathbf{T}_{L_0} \mathbf{T}_g \mathbf{T}_{L_0} \mathbf{T}_g \mathbf{T}_{\text{PC}} \mathbf{T}_{L_1} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{3a} \\ \mathbf{E}_{4a} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

根据以上分析,光波在 Sagnac 环中传输一周后再次通过耦合器耦合输出,根据传输矩阵,最终得到光在耦合器端口 1 和 2 的输出光场为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_{1a} \\ \mathbf{E}_{2a} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_c^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{3t} \\ \mathbf{E}_{4t} \end{bmatrix} \quad (11)$$

端口 1 的入射光功率为 $I_{1t} = |\mathbf{E}_{1t}|^2$, 端口 1 的反射光功率为 $I_{1a} = |\mathbf{E}_{1a}|^2$, 端口 2 的透射光功率为 $I_{2a} = |\mathbf{E}_{2a}|^2$, 反射率为 $R = I_{1a} / I_{1t}$, 透射率为 $T = I_{2a} / I_{1t}$; 当 $\Delta L = 0$ 时,透射率正好是 FBG 的反射谱 [28]; 当 $\Delta L \neq 0$ 时, Sagnac 环的输出光谱受 ΔL 的影响,级联 FBG 的干涉光谱将被分为许多窄带通光谱,增加滤波波精细度,在系统中起到梳状滤波器的作用。PC 的引入使光纤内部产生双折射效应,可使级联 FBG 形成的干涉光谱上各波长对应的增益和损耗发生变化,从而对 Sagnac 环输出的干涉光谱产生影响。

2.2 仿真分析

在 ASE 光源下, 仿真分析了 Sagnac 环臂长差的大小以及 PC 旋转角度对输出光谱的影响。

(1) ΔL 对输出光谱的影响

固定 PC 的旋转角度 $\theta = \pi/2$, 仿真分析 Sagnac 环结构中臂长差 ΔL 对输出光谱的影响。取

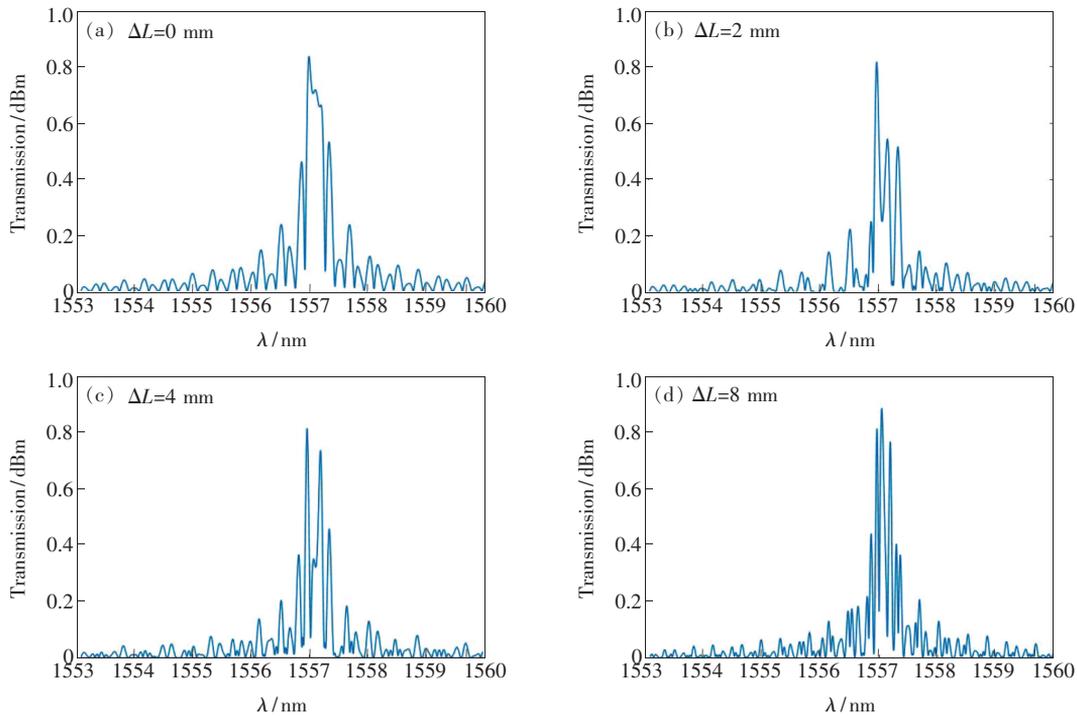


图 5 对于固定 PC 的旋转角度, ΔL 大小的变化对输出谱的影响。(a) ~ (d) 表示不同的 ΔL 值。

Fig. 5 For a fixed value of the PC rotation angle, the effect of ΔL on the output spectrum. (a) - (d) denote the different values of ΔL .

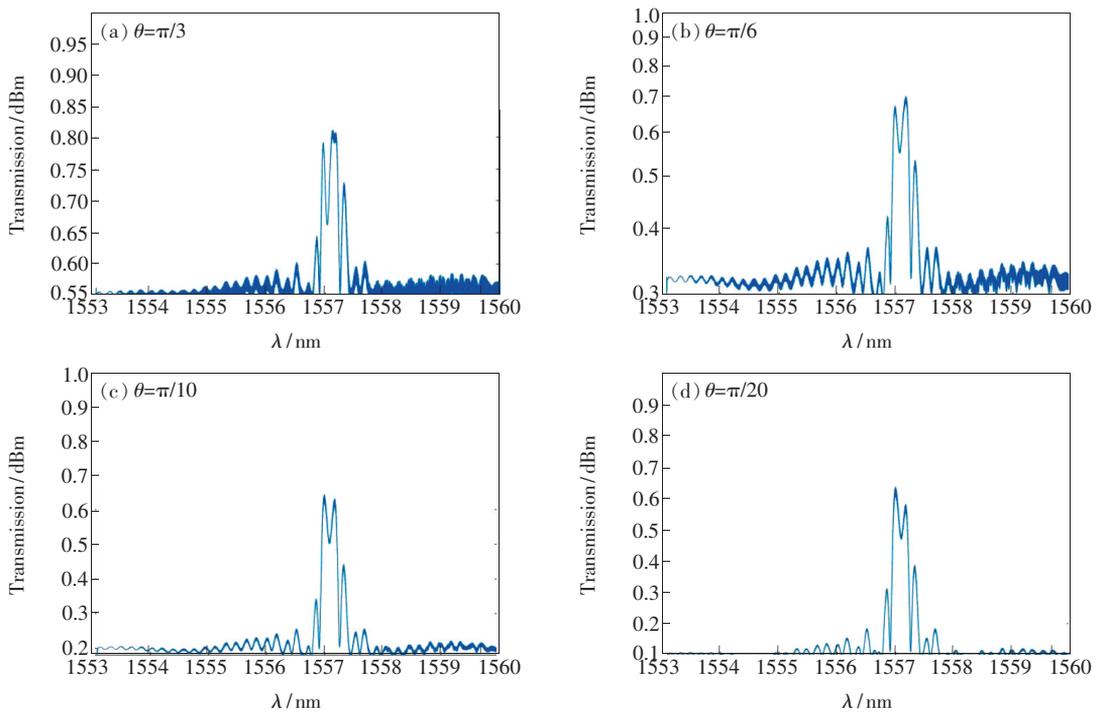


图 6 对于固定的 ΔL 值, PC 旋转角度 θ 对输出光谱的影响。(a) ~ (d) 为 PC 的不同旋转角度。

Fig. 6 For a fixed value of ΔL , the effect of the PC rotation angle on the output spectrum. (a) - (d) are the different rotation angles of PC.

$\Delta L = 0 \text{ mm}$ 、 $\Delta L = 2 \text{ mm}$ 、 $\Delta L = 4 \text{ mm}$ 和 $\Delta L = 8 \text{ mm}$ ，得到仿真结果如图 5 所示。由图 5 可知， ΔL 的变化可改变输出光谱的通带密度，在一定的带宽范围内， ΔL 越大，通带越窄，光谱越密，滤波精度越高。但实际应用中考虑到检测系统分辨率的影响，不能通过对 ΔL 无限增加的方法来提高滤波精度。

(2) PC 对输出光谱的影响

设置 $\Delta L = 2 \text{ mm}$ 时，改变 PC 旋转角度 θ ，观察其对输出光谱的影响，取 $\theta = \pi/3$ 、 $\theta = \pi/6$ 、 $\theta = \pi/10$ 以及 $\theta = \pi/20$ 进行分析。图 6 所示仿真结果为不同 PC 旋转角度对输出光谱的影响，当保持 ΔL 值不变时，调节 PC，即改变 PC 的旋转角度 θ ，导致光纤中的双折射效应发生变化，改变了级联 FBG 反射谱中各波长的增益和损耗，使不同波长的光增益发生变化，改变输出光谱。

3 实验结果与讨论

在 ASE 光源下，测试级联 FBG 结合 Sagnac 环结构的可行性。实验中，调节 PC 至某一状态时，使用 OSA 每隔 3 s 采集一次数据，连续采集 30 min，从中选取 4 组数据，绘制如图 7(a) 所示的输出光谱；继续调节 PC，以相同的处理方式，得

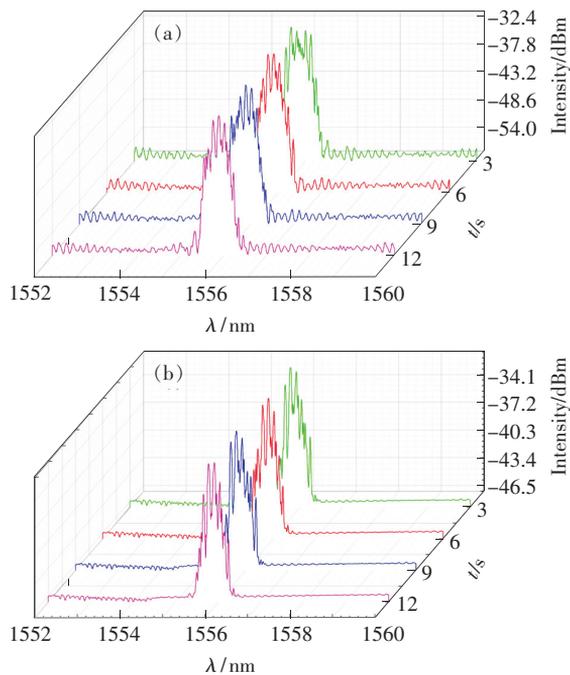


图 7 调节 PC 时得到的输出光谱。(a) PC 为某一状态；(b) PC 为另一状态。

Fig. 7 Output spectra by adjusting the states of PC. (a) At one state of PC. (b) At another state of PC.

到图 7(b)。从图 7 可以看出，调节 PC 可使输出光谱谱形发生改变，验证了仿真结果的正确性。这是因为 Sagnac 环中 ΔL 的存在，3 dB 耦合器分出的强度相同的两束光以相反方向通过两臂时，由于两臂上的两段光纤存在长度差，产生了不同的相位延时，导致输出的干涉光谱发生变化。而当调节 PC 时，在 PC 中的这部分光纤受力不均匀，由该应力变化引入了光的应力双折射效应，使光波在该段光纤中传输时由单一入射光被分成两束线偏振的折射光，这两束线偏振的光在通过级联 FBG 时，对级联 FBG 中的干涉谱谱形产生影响，同样会使输出干涉谱发生变化。因此， ΔL 与 PC 的共同作用，是导致输出光谱发生变化的主要原因。对比于退火后级联 FBG 的光谱可知，这些通带恰好位于级联 FBG 干涉谱的包络范围内，且光谱带宽变窄。

LD 的泵浦功率为 110 mW，调节 PC 偏振态，得到单波长激光输出，图 8 是对 PC 进行连续调节时得到的不同波长的单波长激光光谱。由图 8 可知，调节 PC，得到输出单波长激光的波长范围为 1 555.644 ~ 1 555.992 nm，SMSR 高于 45 dB。

继续调节 PC，得到双波长可调谐激光输出，如图 9 所示。输出双波长激光的波长范围约为 1 555.66 ~ 1 556.112 nm，双波长间隔范围约为 0.108 ~ 0.452 nm，SMSR 高于 40 dB。

通过调节 PC 可以改变传输光的偏振态，增强偏振烧孔效应，从而抑制 EDF 增益的均匀展宽现象，使得不同偏振态的两束光在谐振腔内获得了不同的增益，降低了这两束光之间的模式竞争，使得在干涉光谱的带宽范围内一部分光没有达到激射阈值，因此输出激光的波长数量及位置主要取决于 PC 的状态。当且仅当某一个模式所对应的增益大于腔内损耗时，得到该模式所对应的单波长激光输出，如图 8 所示。当调节 PC 使两个模式处于相互正交的偏振状态时，两束光之间的模式竞争最小，此时若仅有两个模式对应的增益大于损耗，则可以同时得到这两个模式所对应的双波长激光输出，如图 9 所示。

为验证输出单波长激光的稳定性，选取波长为 1 555.764 nm 处的激光，测得 SMSR 为 53 dB，在 18 min 内每隔 3 min 测试一次，如图 10 所示。实验测得单波长激光的波长漂移量约为 0.008 nm。

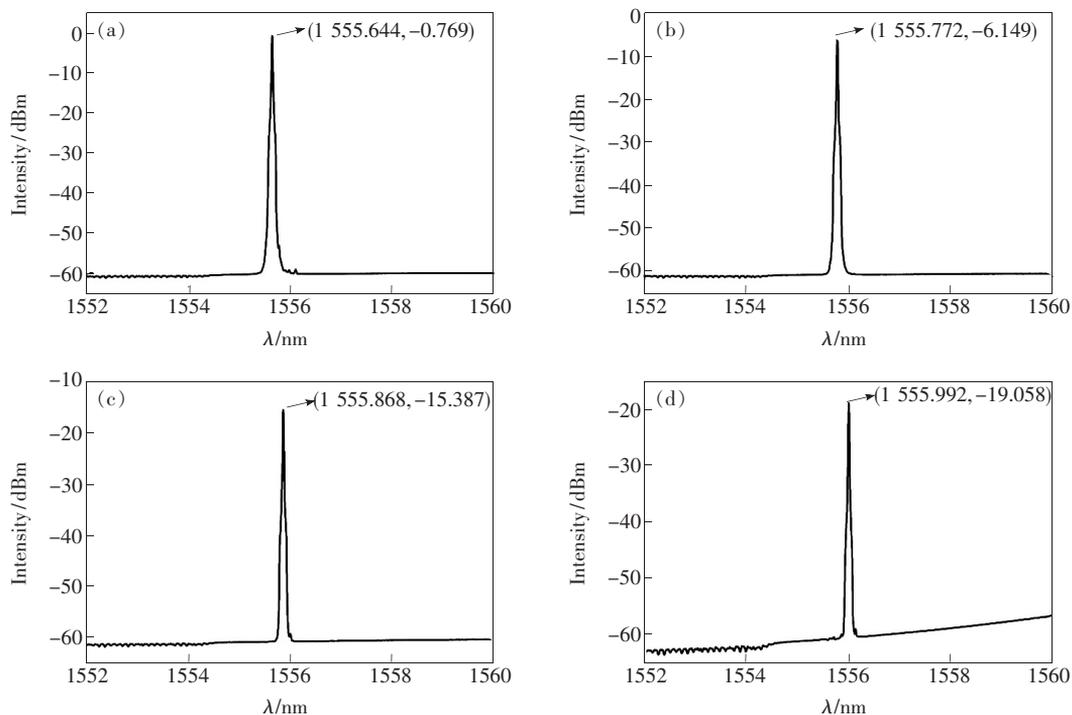


图 8 不同中心波长的单波长激光输出光谱。(a) 1555.644 nm; (b) 1555.772 nm; (c) 1555.868 nm; (d) 1555.992 nm。

Fig. 8 Single-wavelength laser output spectrum with different center wavelengths. (a) 1555.644 nm. (b) 1555.772 nm. (c) 1555.868 nm. (d) 1555.992 nm

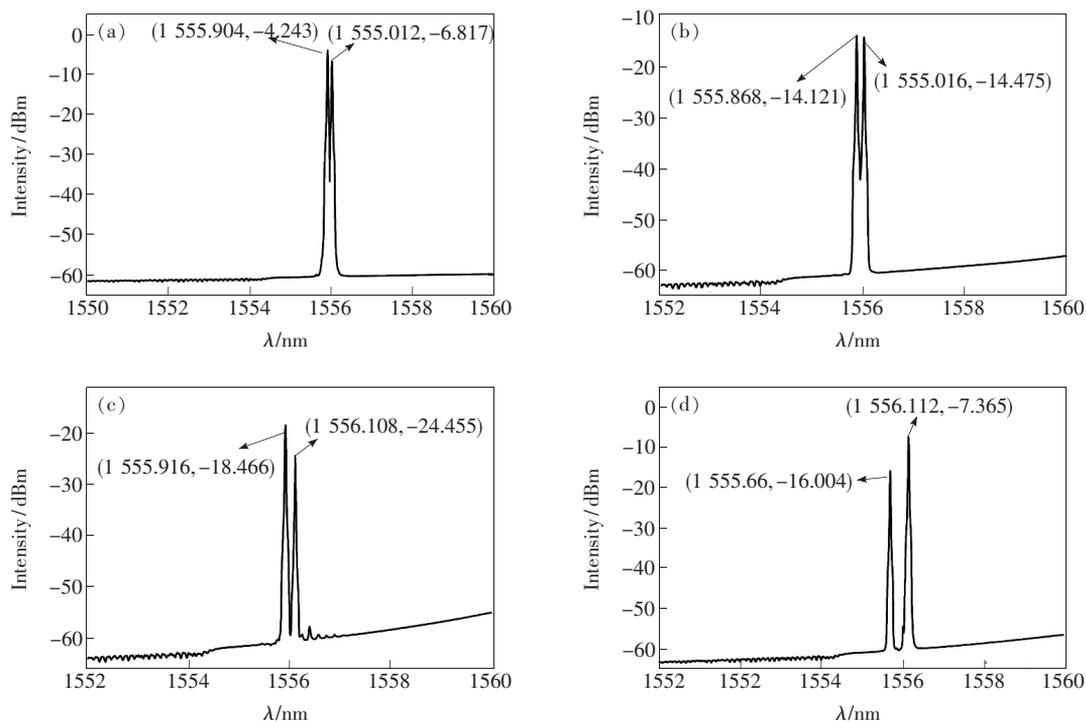


图 9 不同波长间隔的双波长光纤激光器的输出光谱。(a) 0.108 nm; (b) 0.148 nm; (c) 0.192 nm; (d) 0.452 nm。

Fig. 9 Output spectrum of dual-wavelength fiber lasers with different wavelength spacing. (a) 0.108 nm. (b) 0.148 nm. (c) 0.192 nm. (d) 0.452 nm.

在相同时间内对输出双波长激光的稳定性进行测试, 选取输出波长 1555.868 nm 和 1556.016 nm,

测得输出双波长的 SMSR 大于 40 dB, 且双波长激光的中心波长漂移量均小于 0.004 nm。

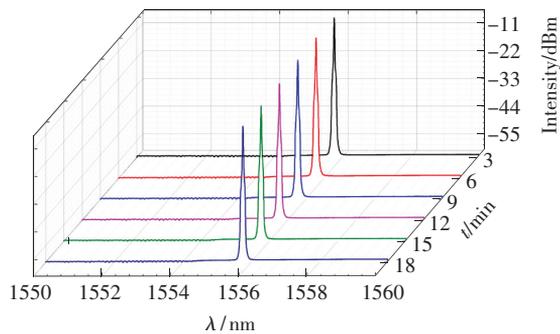


图 10 单波长输出激光的稳定性测试

Fig. 10 Stability test of output spectra with single wavelength fiber laser

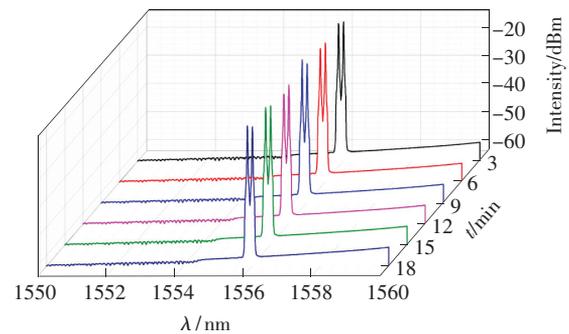


图 11 输出双波长激光的稳定性测试

Fig. 11 Stability test of dual-wavelength fiber laser

4 结 论

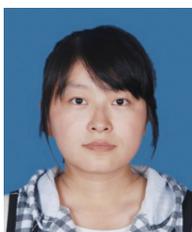
本文提出了一种结合级联 FBG 与 Sagnac 环结构实现单-双波长可调谐的掺铒光纤激光器。在室温下调节 PC, 改变了环内双折射效应, 抑制了 EDF 的均匀加宽现象, 从而降低模式竞争, 实现波长可调谐。本文从理论研究、仿真分析和实验测试三方面分别验证了该 Sa-

gnac 环结构的可行性。实验结果表明, 调节 PC, 得到输出激光的波长范围约为 1 555. 644 ~ 1 556. 112 nm, 双波长间隔范围约为 0. 108 ~ 0. 452 nm, SMSR 均高于 40 dB。在稳定性测试中, 得到单-双波长激光的波长最大漂移量小于 0. 008 nm。相比于类似结构的光纤激光器, 该激光器具有结构简单、单-双波长可调谐、调谐方便且滤波精度较高等优点。

参 考 文 献:

- [1] LUO Y Y, XIA L, SUN Q Z, *et al.*. Multi-wavelength fiber laser based on self-seed light amplification and wavelength-dependent gain [J]. *Opt. Commun.*, 2015, 338:336-339.
 - [2] SUN H W, WANG T S, JIA Q S, *et al.*. A dual-wavelength erbium-doped fiber laser based on fiber grating pair [C]. *Proceedings Volume 9294, International Symposium on Optoelectronic Technology and Application 2014: Development and Application of High Power Lasers, Beijing*, 2014, 9294:929407-1-6.
 - [3] LIU Z M, LI J, LIU P, *et al.*. Switchable dual-wavelength polarization-maintaining erbium-doped fiber laser using an optical circulator as the all-reflecting mirror [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2010, 42(8):1261-1265.
 - [4] HAN Y G, VAN ANH TRAN T, LEE S B. Wavelength-spacing tunable multiwavelength erbium-doped fiber laser based on four-wave mixing of dispersion-shifted fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2006, 31(6):697-699.
 - [5] FENG S C, XU O, LU S H, *et al.*. Switchable dual-wavelength erbium-doped fiber-ring laser based on one polarization maintaining fiber Bragg grating in a Sagnac loop interferometer [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2009, 41(3):264-267.
 - [6] ROTA-RODRIGO S, RODRÍGUEZ-COBO L, QUINTELA M Á, *et al.*. Dual-wavelength single-longitudinal mode fiber laser using phase-shift Bragg gratings [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2014, 20(5):161-165.
 - [7] HE X Y, LIAO C R, LI Y H, *et al.*. Tunable dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser with chirped fiber Bragg grating sagnacloop [C]. *Proceedings of The OECC 2010 Technical Digest, Sapporo, Japan*, 2010:310-311.
 - [8] FENG S C, XU O, LU S H, *et al.*. Switchable single-longitudinal-mode dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser based on one polarization-maintaining fiber Bragg grating incorporating saturable absorber and feedback fiber loop [J]. *Opt. Commun.*, 2009, 282(11):2165-2168.
 - [9] YE H C, SHIH F Y, CHEN C T, *et al.*. Triple-wavelength erbium fiber ring laser based on compound-ring scheme [J]. *Opt. Express*, 2007, 15(26):17980-17984.
 - [10] 曹晔, 陈磊, 鹿楠, 等. 基于 Sagnac 环和 M-Z 级联的可调谐掺铒光纤激光器 [J]. *光电子·激光*, 2015, 26(1):9-14.
- CAO Y, CHEN L, LU N, *et al.*. A tunable erbium-doped fiber laser based on cascaded filtering of Sagnac loop and M-Z

- filter [J]. *J. Optoelectron. · Laser*, 2015,26(1):9-14. (in Chinese)
- [11] 王枫,毕卫红,江鹏,等. 基于重叠光栅和啁啾光栅的双波长光纤激光器 [J]. *光电子·激光*, 2015,26(8):1435-1440.
WANG F, BI W H, JIANG P, et al. Dual-wavelength fiber laser based on the superimposed fiber grating and chirped grating [J]. *J. Optoelectron. · Laser*, 2015,26(8):1435-1440. (in Chinese)
- [12] CHEN D, FU H, LIU W, et al. Dual-wavelength single-longitudinal-mode erbium-doped fiber laser based on fiber Bragg grating pair and its application in microwave signal generation [J]. *Electron. Lett.*, 2008,44(7):459-461.
- [13] CAO Y, LU N, TONG Z R. A switchable dual-wavelength erbium-doped fiber laser based on Sagnac loop inserted with two FBGs [J]. *Optoelectron. Lett.*, 2013,9(6):434-437.
- [14] ZOU H, LOU S Q, YIN G L, et al. Switchable dual-wavelength PM-EDF ring laser based on a novel filter [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2013,25(11):1003-1006.
- [15] HUANG K Q, WANG Y, LI Q, et al. A tunable dual-wavelength fiber Bragg grating laser using an external-injected DFB laser [J]. *Optoelectron. Lett.*, 2015,11(3):184-186.
- [16] YAN N, HAN X F, CHANG P F, et al. Tunable dual-wavelength fiber laser with unique gain system based on in-fiber acousto-optic Mach-Zehnder interferometer [J]. *Opt. Express*, 2017,25(22):27609-27615.
- [17] DING Z, WANG Z, ZHAO C, et al. Tunable erbium-doped fiber laser based on optical fiber Sagnac interference loop with angle shift spliced polarization maintaining fibers [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2018,42:1-5.
- [18] 吴重庆. 光波导理论 [M]. 2 版. 北京:清华大学出版社, 2005.
WU C Q. *Theory of Optical Waveguide* [M]. 2nd ed. Beijing:Publishing House of Tsinghua University, 2005. (in Chinese)
- [19] WANG Y, PEI L, LI J, et al. All optical multi-wavelength single-sideband modulated WDM radio-over-fiber systems by introducing a Sagnac loop filter [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2016,32:36-42.
- [20] SHU X W, JIANG S, HUANG D X. Fiber grating Sagnac loop and its multiwavelength-laser application [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000,12(8):980-982.
- [21] 王巍,杨铿,安友伟,等. 光纤光栅 Sagnac 环级联特性 [J]. *红外与激光工程*, 2013,42(2):465-469.
WANG W, YANG K, AN Y W, et al. Characteristics of fiber grating's Sagnac loop cascade [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2013,42(2):465-469. (in Chinese)
- [22] HE X Y, WANG D N, LIAO C R. Tunable and switchable dual-wavelength single-longitudinal-mode erbium-doped fiber lasers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2011,29(6):842-849.
- [23] KIM C S, HAN Y G, LEE S B, et al. Individual switching of multi-wavelength lasing outputs based on switchable FBG filters [J]. *Opt. Express*, 2007,15(7):3702-3707.
- [24] WANG X, ZHU Y D, ZHOU P, et al. Tunable, multiwavelength Tm-doped fiber laser based on polarization rotation and four-wave-mixing effect [J]. *Opt. Express*, 2013,21(22):25977-25984.
- [25] 张雪霞,葛廷武,丁星,等. 分布式抽运连续光纤激光器研究 [J]. *发光学报*, 2016,37(9):1071-1075.
ZHANG X X, GE T W, DING X, et al. Study of continuous fiber laser with distributed pump structure [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2016,37(9):1071-1075. (in Chinese)
- [26] 况庆强,桑明煌,梁培斯,等. 光纤中超连续谱的产生及多波长输出 [J]. *发光学报*, 2010,31(1):137-140.
KAUNG Q Q, SANG M H, LIANG P S, et al. Supercontinuum generation and multi-wavelength output in fiber [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2010,31(1):137-140. (in Chinese)
- [27] SHU X W, YU L Z, ZHAO D H, et al. Transmission characteristics of Sagnac interferometers based on fiber Bragg gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002,19(11):2770-2780.
- [28] ERDOGAN T. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997,15(8):1277-1294.



赵小丽(1989-),女,山西大同人,硕士研究生,2015年于华北科技学院获得学士学位,主要从事光纤激光器及传感器方面的研究。

E-mail: zhaoxiaoli8906@163.com



孟凡勇(1980-),男,河北秦皇岛人,博士,讲师,2011年于河北工业大学获得博士学位,主要从事光纤传感方面的研究。

E-mail: mengfanrong@bistu.edu.cn