

窄线宽全光纤环形滤波器特性研究

秦晓琼^{1,2}, 方祖捷¹, 应康^{1**}, 魏芳¹, 王照勇¹, 叶青¹, 潘政清¹, 蔡海文^{1*}, 瞿荣辉¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全国态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 设计了两种用于单纵模光纤激光器的窄线宽全光纤环滤波器, 其由超低反光栅和 1 个(或 2 个)2×2 光纤耦合器构成。从理论上推导出两种滤波器的反射率表达式, 并且对其反射率、窄线宽和群时延特性进行了详细的数值分析和实验验证。研究表明: 由超低反光栅和光纤耦合器构成的单环滤波器具有高反射率、超窄线宽和大群时延特性, 表现出良好的慢光效应。双环滤波器除了保持了以上良好特性, 还因游标效应, 共振幅度可调, 相对单环滤波器, 具有更大的有效自由光谱范围(FSR)、更大的边模抑制比(SMSR)以及不易跳模等特点。所研究的光纤环滤波器具有窄线宽、结构紧凑和低成本等优点, 可用作光纤激光器的反射腔镜来进一步压窄激光器线宽, 尤其是当双环滤波器用作腔镜时, 激光器的线宽更窄, 模式更稳定。

关键词 光纤光学; 光纤滤波器; 光纤环; 光纤光栅; 单纵模激光器

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1006001

Narrow Linewidth All-Fiber Ring Filters

Qin Xiaoqiong^{1,2}, Fang Zujie¹, Ying Kang^{1**}, Wei Fang¹, Wang Zhaoyong¹,
Ye Qing¹, Pan Zhengqing¹, Cai Haiwen^{1*}, Qu Ronghui¹

¹Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

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

Abstract Two narrow-linewidth filters, consisting of an ultra-low-reflectivity fiber Bragg grating (LRFBG) and one (or two) 2×2 fiber couplers, are designed for single-longitudinal-mode fiber lasers. The reflectivity expressions of the two filters are deduced theoretically. The characteristics of the two filters, such as reflectivity, narrow linewidth and group delay, are numerically analyzed and experimentally verified. The two fiber filters have the characteristics of high reflectivity, ultra-narrow linewidth, large group delay and good slow-light effect. What's more, in the case of the double-ring filter, the amplitudes of resonant peaks are modulated because of the Vernier effect. Therefore, the effective free spectral range (FSR) and side mode suppression ratio (SMSR) of the double-ring filter are larger than those of the single-ring filter, which means the double-ring filter is hardly mode hopping. Because of the advantages of narrow linewidth, compact structure and low cost, both of the designed filters can be used for fiber laser as the cavity mirror to narrow the linewidth of laser further. And the results show the linewidth of the laser with double-ring filter is narrower than that of the laser with single-ring filter.

Key words fiber optics; optical fiber filter; fiber ring; fiber Bragg grating; single longitudinal mode laser

OCIS codes 060.2310; 230.7408; 140.3560; 060.3735; 140.3570

1 引 言

低噪声单纵模光纤激光器因其具有线宽窄、光束质量好、噪声低等突出优点, 被广泛应用于微波光

子学、激光雷达和高灵敏度光纤传感等相干激光通信领域^[1-8]。根据肖洛-汤斯理论^[9], 单纵模激光的线宽与激光腔内光子寿命的平方成反比。因此, 对于窄线宽激光器, 长腔长有利于降低其频率噪声。

收稿日期: 2018-04-04; 修回日期: 2018-05-02; 录用日期: 2018-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(61535014, 61775225, 61475165)、“十三五”航天领域预研专用技术项目(30501020107HT02)、国家重点研发计划重点专项(2017YFB0405501)、中国科学院实验室创新基金(CXJJ-17S010)、上海市优秀技术带头人(15XD1524500)、上海市青年科技英才扬帆计划(18YF1426100)、上海市自然科学基金(18ZR1444300)

* E-mail: hwcai@siom.ac.cn; ** E-mail: yingk0917@siom.ac.cn

然而,较长的激光腔长会引起多纵模和模式不稳定等问题,为此多种抑制模式竞争和压窄线宽的方法被相继提出^[10-13]。Chang 等^[10]采用扭模非相干技术,将腔内相遇光波的偏振状态控制为非相干态,使腔内光波无法发生干涉,最后得到小于 10 kHz 线宽的激光输出,但是此方案需要多个偏振控制器,结构复杂,不利于工程化。Cheng 等^[11]将掺杂光纤饱和吸收体用于环形腔结构中,避免空间烧孔效应,最终输出 7.5 kHz 线宽的激光,但饱和吸收体极大地增加了激光器的损耗,使得输出激光功率偏低。Zhao 等^[12]利用相移光纤光栅作为窄带滤波器,利用 π 相移光纤光栅和环形腔结构相结合,获得线宽为 900 Hz 的单纵模激光输出,但 π 相移光纤光栅易受环境影响且具有光热效应,不利于实现高效率激光输出。Shevy 等^[13]利用慢光振荡器及多级滤波器有效地延长了腔体和激光腔内光子寿命,得到了超窄线宽激光输出。

随着应用领域对激光质量更高需求的推动,为了进一步压窄线宽,本文提出了两种新型的全光纤环形滤波器,其基本结构由超低反射率光纤布拉格光栅(LRFBG)插入单(双)光纤环中构成。从理论和实验上分析了在不同结构参数下两种窄线宽全光纤滤波器的特性。两种滤波器均具有梳状滤波作用,可压窄线宽、提高反射率和延长光子寿命。此外,由于游标效应,双环滤波器的反射谐振峰幅度被

调制,自由光谱范围(FSR)和边模抑制比(SMSR)进一步增大,利于模式的稳定,不易跳模。两种滤波器均适合作为窄线宽光纤激光器的反射腔镜。实验表明,对比本课题组以往关于线性腔激光器^[14]的研究,由光纤布拉格光栅(FBG)构成谐振腔的激光器(线宽为 4.1 kHz),在加入单环滤波器后,其线宽可被进一步压窄到 150 Hz。

2 基本原理

2.1 单环全光纤滤波器

单环全光纤滤波器^[5,15]结构,如图 1(a)所示,由一个光纤耦合器和一个 LRFBG 构成。耦合器的光场透过率和反射率分别为 t 和 r ,则耦合器的耦合比为 $\kappa:(1-\kappa)=t^2:r^2$,两个端口之间的 $\pi/2$ 相移由虚部表示,LRFBG 的光场反射率和透射率分别为 r_g 和 t_g , L_2 为光纤环的总长度, E_0 、 E_B 、 E_T 分别表示输入光场幅度、反射光场幅度、透射光场幅度。因 LRFBG 具有反射特性,光纤环内存在顺时针和逆时针传播波,则理想状态下,单环全光纤滤波器的光场反射率表示为

$$r_{\text{effl}} = \frac{E_B}{E_0} = \frac{-jt^2 r_g \exp(2j\beta L_2)}{1 - 2t_g r \exp(2j\beta L_2) + r^2 \exp(2j\beta L_2)}, \quad (1)$$

式中: β 为光纤传播常数。由此,功率反射率和相移分别为

$$R_{\text{effl}} = \frac{I_B}{I_0} = \frac{r_g^2 \kappa^2}{1 + 4|t_g|^2(1-\kappa) + (1-\kappa)^2 - 4t_g \sqrt{1-\kappa}(2-\kappa)\cos(\beta L_2) + 2(1-\kappa)\cos(2\beta L_2)}, \quad (2)$$

$$\varphi_{\text{effl}} = \arctan \frac{2t_g r \sin(\beta L_2) - r^2 \sin(2\beta L_2)}{1 - 2t_g r \cos(\beta L_2) + r^2 \cos(2\beta L_2)}, \quad (3)$$

式中: I_0 、 I_B 分别表示输入光强、反射光强。

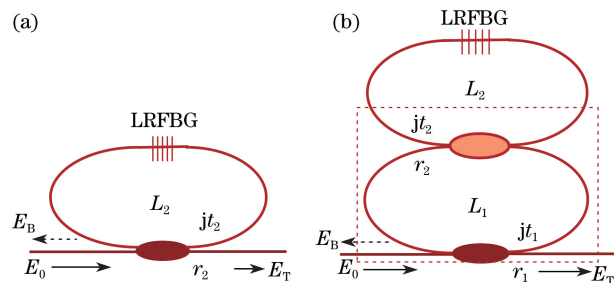


图 1 滤波器示意图。(a)单环光纤滤波器;

(b)双环光纤滤波器

Fig. 1 Schematic of filters. (a) Single-ring fiber filter;

(b) double-ring fiber filter

在 κ 非常小,且超低反射率光纤光栅的反射率

$R_g = |r_g|^2 \ll 1$ 时,(2)式可以近似为 $R_{\text{effl}}^{\text{res}} \approx \kappa^2 R_g / (1 - \sqrt{1-\kappa})^4 \approx 16R_g / \kappa^4$ 。这表示单环光纤滤波器的反射率比低反光纤光栅的反射率提高了 $(16/\kappa^4)$ 倍,充分体现了慢光振荡特性,使单环光纤滤波器用作单频激光器的窄线宽滤波器时具有极大的优势。

对(2)式分母中的变量 (βL_2) 求导,则可得到 $[t_g(2-\kappa) - 2\sqrt{1-\kappa}\cos(\beta L_2)]\sin(\beta L_2)$ 。当 $[t_g(2-\kappa) - 2\sqrt{1-\kappa}\cos(\beta L_2)]\sin(\beta L_2) = 0$,即 $\sin(\beta L_2) = 0$ 或 $\cos(\beta L_2) = \frac{t_g(2-\kappa)}{2\sqrt{1-\kappa}}$ 时,可得到反射率的极值。

为了使其有且只有一个实根,则要求 $\frac{t_g(2-\kappa)}{2\sqrt{1-\kappa}} > 1$,

即超低反光纤光栅的反射率

$$R_g < R_{\text{critical}} = \kappa^2 / (2 - \kappa)^2. \quad (4)$$

2.2 双环光纤滤波器

图 1(b)为双环光纤滤波器^[16-17],其中两个环的长度分别是 L_1 和 L_2 ,两个光纤耦合器耦合比 $\kappa_{1,2} : (1 - \kappa_{1,2}) = t_{1,2}^2 : r_{1,2}^2$ 。类比单环全光纤滤波器,引入复合光纤耦合器概念。复合耦合器由两个耦合器组成,如图 1(b)中的虚线方块所示,复合耦合器的耦合比为复数,通过传输矩阵理论^[18],其值和相位分别为

$$\begin{cases} |r_c|^2 = \frac{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2\cos(\beta L_1)}{1 + r_1^2r_2^2 - 2r_1r_2\cos(\beta L_1)} \\ \tan \varphi_r = \frac{-r_2(1 - r_1^2)\sin(\beta L_1)}{r_1(1 + r_2^2) - r_2(1 + r_1^2)\cos(\beta L_1)} \end{cases}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} |t_c|^2 = \frac{t_1^2t_2^2}{1 + r_1^2r_2^2 - 2r_1r_2\cos(\beta L_1)} \\ \tan \varphi_t = \frac{r_1r_2 - \cos(\beta L_1)}{\sin(\beta L_1)} \end{cases}. \quad (6)$$

在(1)式中用(5)式和(6)式代替光纤耦合器的参数,则双环光纤滤波器的有效光场反射率和功率反射率分别为

$$r^{\text{eff}} = \frac{-j|t_c|^2r_g\exp[j(\beta L_2 + 2\varphi_r)]}{1 - 2t_g|r_c|\exp[j(\beta L_2 + \varphi_r)] + |r_c|^2\exp[2j(\beta L_2 + \varphi_r)]}, \quad (7)$$

$$R^{\text{eff}} = \frac{|t_c|^4r_g^2}{1 + 4t_g^2|r_c|^2 + |r_c|^4 - 4t_g|r_c|(1 + |r_c|^2)\cos[(\beta L_2) + \varphi_r]} + 2|r_c|^2\cos[(2\beta L_2) + 2\varphi_r] \approx \frac{|t_c|^4r_g^2}{[1 + |r_c|^2 - 2|r_c|\cos(\beta L_2 + \varphi_r)]^2}. \quad (8)$$

(8)式中第二式是当 $t_g \approx 1$ 时的近似值,其中 t_c 、 r_c 和 φ_r 都是 βL_1 的正弦函数,但幅度不为常数,可被 L_1 、 L_2 、 $t_{1,2}$ 和 $r_{1,2}$ 调制。

3 数值仿真结果与讨论

3.1 反射光谱特性

根据(3)式和(8)式,对单环和双环滤波器的反射光谱进行仿真模拟,同时也根据(4)式计算双环滤波器的复合耦合器的耦合比。图 2 为在特定参数条件下,两种滤波器的反射光谱特性和双环滤波器复合耦合器耦合比特性。若 $R_g = 0$,则两种全光纤环滤波器均为全通滤波器,无反射特性,更没有慢光效应。

从图 2(a)可知,单环滤波器的反射峰为梳状型,谐振峰幅度相同且反射率接近于 1,远大于光纤光栅的反射率 ($R_g = 0.01$)。FSR 相同,数值约为 110 MHz。双环滤波器的复合耦合比 $\kappa_c = |t_c|^2$ 在 $\kappa_{\text{max}} = \kappa_1\kappa_2/(1 - r_1r_2)^2$ 和 $\kappa_{\text{min}} = \kappa_1\kappa_2/(1 + r_1r_2)^2$ 之间周期性变化,当 $(r_1 - r_2)$ 越小,振荡幅度变化范围越大。从图 2(b)可知,在所给的器件参数下,复合耦合器的耦合比 κ_c 在 0.2 和 0.6 之间周期性变化。双环滤波器的反射谐振峰幅度被周期性调制,和 κ_c 成反比。当 κ_c 值最小时,谐振峰值最大; κ_c 最大时,谐振峰值最小。双环滤波器的谐振峰的最大值间隔为 550 MHz,为单环滤波器的 4 倍,这和

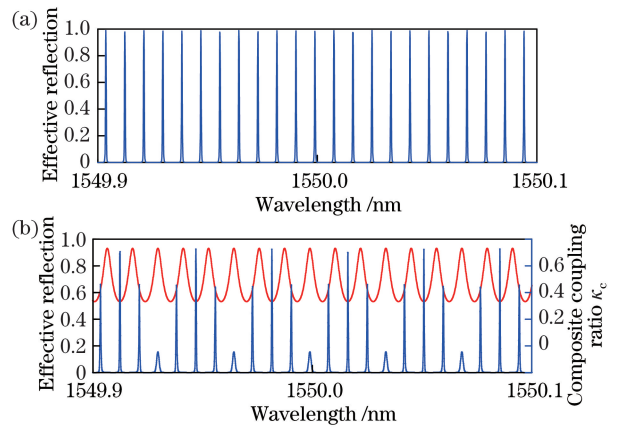


图 2 反射光谱。(a)单环全光纤滤波器 ($R_g = 0.01, \kappa_2 = 0.2, L_2 = 48$ cm);(b)双环滤波器 ($R_g = 0.01, \kappa_1 = 0.4, L_1 = 36$ cm, $\kappa_2 = 0.9, L_2 = 48$ cm)

Fig. 2 Reflection spectra. (a) Single-ring filter ($R_g = 0.01, \kappa_2 = 0.2, L_2 = 48$ cm); (b) double-ring filter ($R_g = 0.01, \kappa_1 = 0.4, L_1 = 36$ cm, $\kappa_2 = 0.9, L_2 = 48$ cm)

文献[13]所描述的游标卡尺效应一致,可以通过 $\Delta\lambda_{\text{FSR}} \propto L_1L_2/(L_2 - L_1)$ 来定性判断调制周期。双环滤波器的 SMSR 为 1.3 dB,相邻模式之间竞争增强,有利于选出幅值较高的模式。此外,从图 2 还可知,两种滤波器的谐振峰半峰全宽(FWHM)相同。

对比单环和双环滤波器的反射光谱可知,选取合适的器件参数,双环滤波器的 FSR 和 SMSR 均远大于单环滤波器,这使得双环滤波器选出的模式更

稳定,不易跳模。

3.2 双峰特性

通过(4)式可知,为了确保单环滤波器的谐振峰为单峰,需要满足 $R_g < \kappa^2 / (2 - \kappa)^2$, 根据此绘制图 3。由图 3 可知,单环光纤滤波器应尽可能选择较低的耦合比 κ 和光栅反射率 R_g , 否则谐振峰非常容易出现双峰特性。在耦合器的耦合比 $\kappa = 0.2$ 时,光栅反射率需要满足 $R_g < 0.013$, 才能保持单峰特性。同理可知,双环滤波器的复合耦合比 κ_c 和光栅反射率 R_g 也应尽可能小。由(5)式和(6)式可知, κ_c 由 L_1 、 κ_1 和 κ_2 三个参量来调制并呈周期性变化,在图 2(b)中,当 κ_c 最大值为 0.6 时也没有出现双峰特性。因此,双环滤波器并不要求 L_1 、 κ_1 和 κ_2 参数都尽可能小,其器件参数的选择范围比单环滤波器的选择范围大。

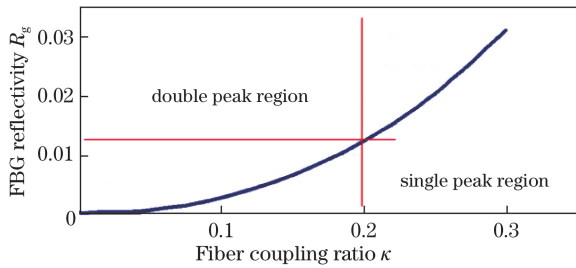


图 3 单环滤波器的器件参数要求

Fig. 3 Parameter requirements of single-ring filter

根据(2)式和(8)式,计算单环和双环滤波器的反射光谱。为了观察到双峰特性,特意选取光纤光栅反射率 $R_g = 0.03$ 。由图 4(a)可知,单环滤波器的谐振峰幅值相同,均出现双峰特性,FSR 相同,数值约为 41.7 MHz。由图 4(b)可知,双环滤波器的谐振峰幅值被周期性调制,最大值为 1,并没有出现双峰特性。最高峰的 FSR 为 167 MHz,是单环滤波器的 4 倍,SMSR 为 0.46 dB。两种滤波器的性能均比图 2 条件下的滤波器性能差,由此可见双峰特性不仅影响单纵模输出,也影响滤波器的性能。此外光纤光栅反射率 R_g 进一步增大时,双环滤波器也会出现双峰效应。

3.3 群时延特性

通过(1)式计算出单环滤波器的相位 φ_{eff} , (7)式得到双环滤波器的相位 φ_{eff} , 并分别求导 $\tau = \partial\varphi / \partial\omega$, 得到两种滤波器的群时延 τ_{eff} 和 $\tau_{\text{eff}2}$ 。器件参数选用与图 2 相同的参数,通过反射光谱最终得到两种滤波器的群时延,如图 5 所示。由图 5(a)可知,单环滤波器在谐振峰处的群时延数值相等且为 24 ns, L_2 单次光纤直线传播对应的群时延为 1.6 ns,

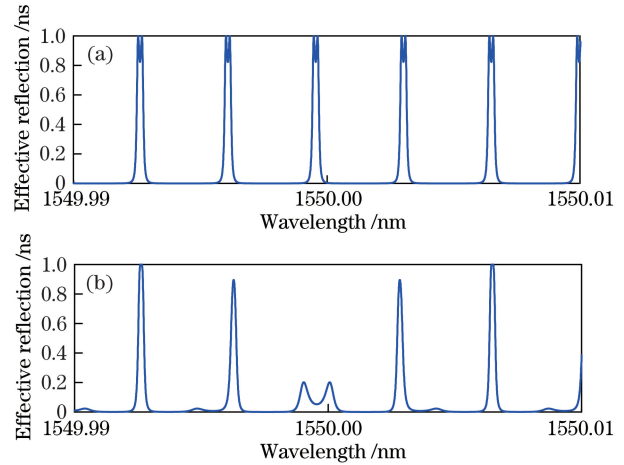


图 4 反射光谱。(a)单环全光纤滤波器($R_g = 0.03$, $\kappa_2 = 0.2$, $L_2 = 48$ cm);(b)双环滤波器($R_g = 0.03$, $\kappa_1 = 0.4$, $L_1 = 36$ cm, $\kappa_2 = 0.9$, $L_2 = 48$ cm)

Fig. 4 Reflection spectra. (a) Single-ring filter ($R_g = 0.03$, $\kappa_2 = 0.2$, $L_2 = 48$ cm); (b) double-ring filter ($R_g = 0.03$, $\kappa_1 = 0.64$, $L_1 = 36$ cm, $\kappa_2 = 0.75$, $L_2 = 48$ cm)

单环滤波器的群时延增大到 15 倍。由图 5(b)可知,双环滤波器不同谐振峰处的群时延数值不等,对比图 2(b)可知,当谐振峰数值最大时,其对应的群时延也为 26 ns,谐振峰数值最小时,对应的群时延为 12 ns。谐振峰群时延越大,说明光子寿命越长,激光器的输出线宽越窄。由此可知,两个滤波器均具有较大群时延,即慢光效应的特性,这有利于压窄激光器输出光的线宽。

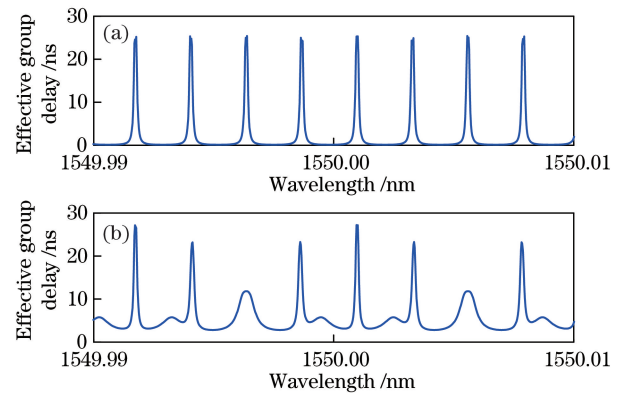


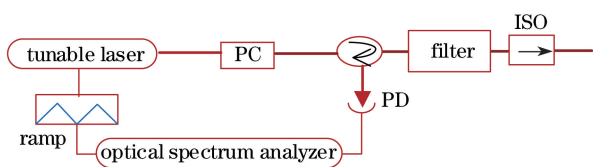
图 5 有效群时延。(a)单环滤波器;
(b)双环滤波器

Fig. 5 Effective group delay. (a) Sing-ring filter;
(b) double-ring filter

4 实验与讨论

为了验证两种滤波器的理论特性,采用图 6 所示的实验系统对其进行实验研究。在该实验系统

中,可调谐激光器的线宽为 500 kHz。扫频激光通过环形器进入滤波器,滤波器的反射光再次通过环形器,利用 APEX 公司提供的光谱分析仪(型号: AP2041B)观测并记录滤波器的反射光谱。



PC: polarization controller; PD: photodetector; ISO: isolator

图 6 滤波器反射光谱的测量装置

Fig. 6 Measurement setup of filter's reflection spectra

4.1 反射率增强和边模抑制比

使用自发放大辐射(ASE)光源和频谱分析仪测量 1 cm 长的 FBG 透射光谱,计算得到其反射率为 0.04 dB,即 $R_g=0.9\%$,中心波长为 $\lambda=1549.13$ nm。并把此 FBG 插入环内,构成单环(双环)滤波器。图 7 为测量的单环滤波器和双环滤波器的实际反射光谱特性。由图 7 可知,对比 FBG 反射率,两个滤波器反射光的强度均增强,反射光谱特性与模拟结果相一致。图 7(a)可知,单环滤波器的谐振峰等幅度,FWHM 为 500 MHz,FSR 为 1.9 pm。图 7(b)可知,由于游标效应,双环滤波器的谐振峰幅度被调制,FWHM 为 22 MHz,SMSR 为 3 dB,FSR 为 28 pm。滤波器的 FWHM 决定激光器输出光的线宽,双环滤波器的 FWHM 比单环滤波器压窄了近 23 倍,更有利于超窄线宽激光的输出。滤波器的 FSR 和 SMSR 越大,越有利于模式稳定。双环滤波器的 FSR 提高了近 15 倍,且边模抑制比为 3 dB,更有利于激光稳定输出,不易跳模。

4.2 双峰特性

为了观察到双峰效应,替换滤波器中的 FBG,单环滤波器中 FBG 反射率为 92%,双环滤波器中 FBG 反射率为 0.9%。图 8 为重新实验得到的结果。单环滤波器的反射光谱双峰效应非常明显,双峰分离 0.04 pm。弯折光纤后,双峰的频率位置和反射率依然不会改变。此单环滤波器可作为双波长激光器中的窄线宽滤波器,使得激光器输出稳定的双波长激光^[19]。由图 8(b)可知,在双环滤波器反射光谱中,幅值最大的谐振峰有双峰特性,与理论结论一致,随着光纤光栅 R_g 的增大,可能会有更多的谐振峰增大到 1,甚至出现双峰特性。双环滤波器的反射光谱特性与光纤光栅反射率 R_g 和复合耦合比 κ_c 密切相关,避免双峰出现的参数选择余地比单环滤波器大很多。

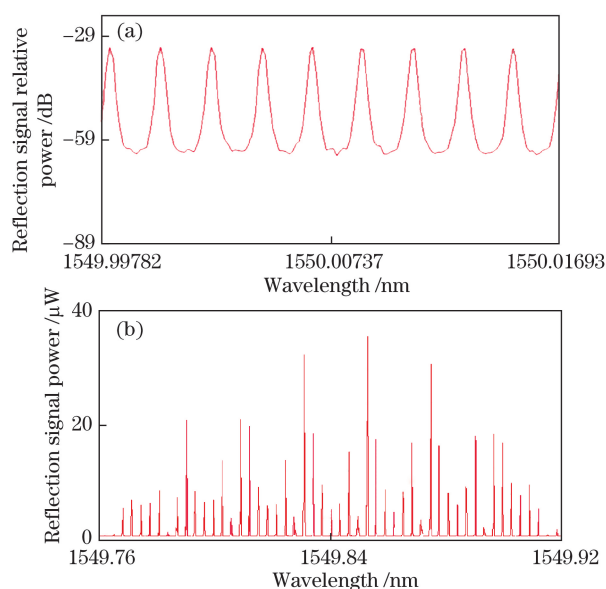


图 7 反射光谱。(a)单环滤波器($\kappa_2=0.15, L_2=51$ cm);(b)双环滤波器($\kappa_1=0.2, L_1=60$ cm, $\kappa_2=0.15, L_2=51$ cm)

Fig. 7 Reflection spectra. (a) Single-ring filter ($\kappa_2=0.15, L_2=51$ cm); (b) double-ring filter ($\kappa_1=0.2, L_1=60$ cm, $\kappa_2=0.15, L_2=51$ cm)

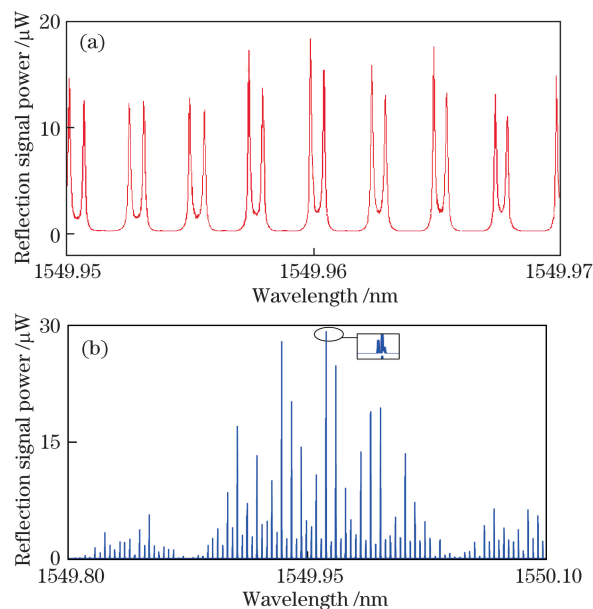


图 8 反射光谱。(a)单环滤波器($R_g=92\%, \kappa=0.15, L=50$ cm);(b)双环滤波器($R_g=0.9\%, \kappa_1=0.2, L_1=84$ cm, $\kappa_2=0.15, L_2=50$ cm)的反射光谱

Fig. 8 Reflection spectra. (a) Single-ring filter ($R_g=92\%, \kappa=0.15, L=50$ cm); (b) double-ring filter ($R_g=0.9\%, \kappa_1=0.2, L_1=84$ cm, $\kappa_2=0.15, L_2=50$ cm)

4.3 单环滤波器的应用

为了进一步验证光纤环形滤波器具有窄线宽、

慢光效应等特性,将单环滤波器用作单频光纤激光器的窄线宽滤波器。具体光纤激光器的实验装置如图 9 所示,其中高增益光纤 (high gain EDF) 由 980 nm 激光二极管抽运,反射率大于 99% 的高反光栅和单环滤波器 ($R_g = 0.9\%$, $\kappa = 0.2$, $L = 50$ cm) 构成激光器的腔镜,激光由单环滤波器的另一端输出。测量并记录实验装置的输出特性,当抽运功率大于 9 mW 时,有激光输出,光谱仪测得激光波长为 1548.06 nm,通过自延时外差法测得激光线宽为 150 Hz,如图 10 所示。对比本课题组以往关于线性腔激光器^[16]的研究,两个 FBG 构成谐振腔的激光器线宽为 4.1 kHz,本文基于单环滤波器的激光器线宽压窄了 27 倍。由此,在实验上证明了单环滤波器具有慢光效应,且有效压窄激光输出线宽。

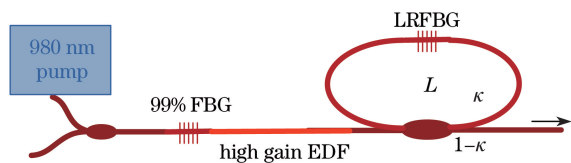


图 9 用单环滤波器做腔镜的窄线宽光纤激光器

Fig. 9 Narrow linewidth fiber laser with sing-ring filter

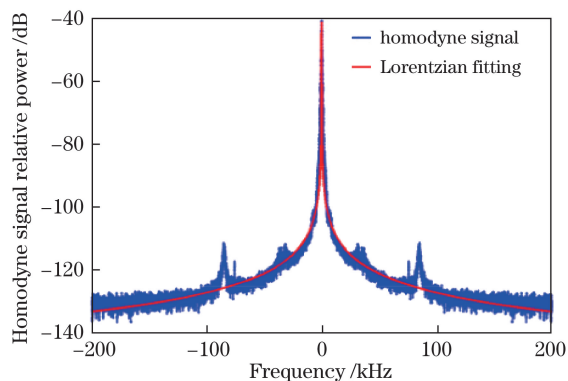


图 10 零差拍频信号

Fig. 10 Homodyne beat signals

5 结 论

提出了两种由 LRFBG 插入单环(双环)构成的光纤环滤波器。理论和实验分析了单环滤波器的反射光谱,其具有梳状滤波作用,相比于单个 FBG,进一步提高了反射率、压窄了线宽和增大了群时延。当插入的 FBG 反射率为 11.6 dB 时,单环滤波器反射光谱具有稳定的双峰特性。相对于单环滤波器,双环滤波器反射光谱的 FSR 和 SMSR 得到进一步提高,增强了模式竞争,有利于模式稳定输出,不易跳模。此外,实验结果显示基于单环滤波器的全光纤激光器线宽被压窄至 150 Hz。相关研究结果表

明两种全光纤环滤波器有望应用于单频激光器噪声抑制、精密光谱学等领域中。

参 考 文 献

- [1] Li W C, Liu H W, Zhang J, *et al.* Mode-hopping-free single-longitudinal-mode actively Q-switched ring cavity fiber laser with an injection seeding technique[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(1): 1-7.
- [2] Kumar G, Vijaya R. Dynamical bistability of a loss modulated erbium doped fiber ring laser[J]. Applied Physics B, 2017, 123(5): 1-10.
- [3] Zhang L, Xu Y P, Gao S, *et al.* Multiwavelength coherent Brillouin random fiber laser with ultrahigh optical signal-to-noise ratio[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(3): 1-8.
- [4] Xu D, Lu B, Yang F, *et al.* Narrow linewidth single-frequency laser noise measurement based on a 3×3 fiber coupler[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(1): 0102004.
徐丹, 卢斌, 杨飞, 等. 基于 3×3 耦合器的窄线宽单频激光器噪声测量技术[J]. 中国激光, 2016, 43(1): 0102004.
- [5] Pan Z Q, Ye Q, Cai H W, *et al.* Fiber ring with long delay used as a cavity mirror for narrowing fiber laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(16): 1621-1624.
- [6] Ye Q, Pan Z Q, Wang Z Y, *et al.* Progress of research and applications of phase-sensitive optical time domain reflectometry[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0600001.
叶青, 潘政清, 王照勇, 等. 相位敏感光时域反射仪研究和应用进展[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0600001.
- [7] Yang C S, Chen D, Zhao Q L, *et al.* Research progress of $2.0 \mu\text{m}$ -band tm-doped continuous wave single-frequency fiber lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0201006.
杨昌盛, 陈丹, 赵齐来, 等. $2.0 \mu\text{m}$ 波段掺铥连续单频光纤激光器的研究进展[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0201006.
- [8] Yang J, Qu R H, Sun G Y, *et al.* A novel single longitudinal mode fiber laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(4): 441-444.
杨敬, 瞿荣辉, 孙国勇, 等. 一种新型结构的单纵模光纤激光器[J]. 中国激光, 2005, 32(4): 441-444.
- [9] Schawlow A L, Townes C H. Infrared and optical masers[J]. Physical Review, 1958, 112(6): 1940-1949.
- [10] Chang D I, Guy M J, Chernikov S V, *et al.* Single-

- frequency erbium fiber laser using the twisted-mode technique[J]. Electronics Letters, 1996, 32(19): 1786-1787.
- [11] Cheng Y, Kringlebotn J T, Loh W H, *et al.* Stable single-frequency traveling-wave fiber loop laser with integral saturable-absorber-based tracking narrow-band filter[J]. Optics Letters, 1995, 20(8): 875-877.
- [12] Zhao Y, Chang J, Wang Q, *et al.* Research on a novel composite structure Er^{3+} -doped DBR fiber laser with a π -phase shifted FBG[J]. Optics Express, 2013, 21(19): 22515-22522.
- [13] Shevy Y, Shevy D, Lee R, *et al.* Slow light laser oscillator[C]//2010 Conference on Optical Fiber Communication (OFC/NFOEC), Collocated National Fiber Optic Engineers Conference, March 21-25, 2010, San Diego, CA, USA. New York: IEEE, 2010: 1-3.
- [14] Yang F, Ye Q, Pan Z Q, *et al.* 100-mW linear polarization single-frequency all-fiber seed laser for coherent Doppler lidar application[J]. Optics Communications, 2012, 285(2): 149-152.
- [15] Ye Q, Pan Z, Wang Z, *et al.* Novel slow-light reflector composed of a fiber ring resonator and low-reflectivity fiber Bragg grating[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(14): 3016-3022.
- [16] Qin X Q, Fang Z J, Ding Z D, *et al.* Characteristics of double fiber ring incorporated with a fiber Bragg grating[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, July 31-August 4, 2017, Singapore. New York: IEEE, 2017: 1-3.
- [17] Yang F, Ye Q, Pan Z Q, *et al.* 100-mW linear polarization single-frequency all-fiber seed laser for coherent Doppler lidar application[J]. Optics Communications, 2012, 285(2): 149-152.
- [18] Fang Z, Chin K K, Qu R, *et al.* Fundamentals of optical fiber sensors[J]. Physics Today, 2012, 49(2): 10-75.
- [19] Yao X Q, Sun W, Wang X B. Dual-wavelength single frequency fiber laser based on ring filter[J]. Laser Technology, 2017, 41(1): 98-100.
姚晓琼, 孙薇, 王喜斌. 基于环形滤波器的双波长单频光纤激光器[J]. 激光技术, 2017, 41(1): 98-100.