

引用格式: CUI Wenxiang, ZHOU Xuefang, HU Miao, et al. Frequency-selecting Property of Fiber Laser Based on the Triple-ring Passive Resonators[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(2):0214001

崔文翔,周雪芳,胡森,等.三环无源谐振腔在光纤激光器中的选频特性[J].光子学报,2021,50(2):0214001

# 三环无源谐振腔在光纤激光器中的选频特性

崔文翔<sup>1</sup>,周雪芳<sup>1</sup>,胡森<sup>1</sup>,毕美华<sup>1</sup>,杨国伟<sup>1</sup>,王天枢<sup>2</sup>

(1 杭州电子科技大学 通信工程学院, 杭州 310018)

(2 长春理工大学 空间光电技术研究所, 长春 130022)

**摘 要:**利用琼斯矩阵对一种三环嵌套的无源谐振腔的选频特性进行了分析,并根据无源谐振腔选频的原理,设计了一种基于三环嵌套无源谐振腔的掺铒光纤激光器。实验结果表明:三环嵌套的无源谐振腔具有良好的选频特性,当泵浦功率为 159 mW 时,得到了稳定的单纵模激光信号输出;输出功率的最大波动为 0.04 dB,输出中心波长最大漂移为 0.016 nm;耦合器的耦合比减小时,激光器会处于多纵模振荡状态。

**关键词:**光纤激光器;单纵模;琼斯矩阵;无源谐振腔;耦合比

中图分类号:TN929.11

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215002.0214001

## Frequency-selecting Property of Fiber Laser Based on the Triple-ring Passive Resonators

CUI Wenxiang<sup>1</sup>, ZHOU Xuefang<sup>1</sup>, HU Miao<sup>1</sup>, BI Meihua<sup>1</sup>, YANG Guowei<sup>1</sup>, WANG Tianshu<sup>2</sup>

(1 School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

(2 Institute of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** The frequency-selecting characteristics of a triple-ring passive resonator are analyzed by Jones matrix, and an erbium-doped fiber laser based on the triple-ring passive resonator is designed according to the frequency-selecting theory of the passive resonators. The experimental results show that the triple-ring passive resonator has a good frequency-selection characteristic. When the pump power is 159 mW, the stable single-longitudinal-mode lasing signal is obtained. The maximum fluctuation of output power is 0.04 dB and the maximum variation of output wavelength is 0.016 nm. The coupling ratios of the optical couplers decrease, the laser will be in multi-longitudinal mode oscillation.

**Key words:** Fiber laser; Single-longitudinal-mode; Jones matrix; Passive resonator; Coupler ratio

**OCIS Codes:** 140.3410; 060.2340; 140.3570; 060.3510

## 0 引言

单纵模光纤激光器在光纤传感、激光雷达、微波光子学、光学原子钟等领域具有广阔的应用前景。实现单纵模的常用方法有短腔法<sup>[1-2]</sup>、饱和吸收体法<sup>[3-4]</sup>以及无源谐振腔法<sup>[5-9]</sup>等。短腔法简单、实用,但是对于光纤激光器来说,腔长过短实现困难;饱和吸收体法对饱和吸收体掺杂光纤的长度要求较高,长度足够长才能

基金项目:国家自然科学基金(No.61705055),2020年度浙江省重点研发计划项目(No.2019C01G1121168),浙江省科技厅公益基础项目(No. LGG19F050001)

第一作者:崔文翔(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤激光器技术。Email: 2960219001@qq.com。

导师(通讯作者):周雪芳(1976—),女,副教授,博士,主要研究方向为光纤激光器和光纤传感技术。Email: zhouxif@hdu.edu.cn。

收稿日期:2020-08-05;录用日期:2020-10-18

<http://www.photon.ac.cn>

保证饱和吸收体的选频效果,但是同时会影响激光器的稳定性;无源谐振腔法中使用单模光纤和耦合器,成本很低,但是受温度和振动的影响较大。结合复合腔和模式限制元件能够使激光器得到窄线宽、单纵模(Single-Longitudinal Mode, SLM)输出,其中复合腔是由一个有源主腔和一个或多个无源子腔构成,无源谐振腔经常被用来作为单纵模光纤激光器选频结构。

近年来,三个光纤耦合器构成的三环嵌套结构由于其良好的纵模抑制特性,被大量应用在光纤激光器的选频结构中。2016年,FENG T等<sup>[10]</sup>利用两个80:20的光纤耦合器和一个50:50的光纤耦合器构成的三环嵌套结构以及一个叠加光纤布拉格光栅(Superimposed Fiber Bragg Gratings, SI-FBG)实现了可调谐的双波长单纵模掺铒光纤激光器,并对其选频原理进行了分析,但是没有对该结构进行理论分析。2018年,HSU Y等<sup>[11]</sup>利用三个50:50的光纤耦合器构成的三环嵌套结构以及一个硅微环谐振器(Silicon-Micro-Ring-Resonator, SMRR),实现稳定、可调谐的单纵模掺铒光纤激光器,提出三环嵌套无源谐振腔可以扩大自由光谱范围(Free Spectral Range, FSR),从而压制多纵模运转,但是未深入讨论具体的选频原理。2019年,FENG T等<sup>[12]</sup>利用两个95:5的光纤耦合器和一个50:50的光纤耦合器构成的三环嵌套结构以及一个高双折射光纤布拉格光栅(High-birefringence Fiber Bragg Grating, HB-FBG),实现可调谐的双波长单纵模掺铒光纤激光器,并对选频原理进行了分析,但是在计算三环无源谐振腔的3 dB带宽的时候没有给出具体的计算方法和过程。截至目前,关于三环嵌套结构的无源谐振腔选频的研究多以实验为主,相关理论分析以及三环嵌套无源谐振腔中光纤耦合器的耦合比变化对选频特性影响的实验研究鲜有报道。

基于三环嵌套结构的光纤耦合器具有较好的选频特性,本文理论分析了三环嵌套结构的无源谐振腔的选模特性,通过实验验证该结构良好的纵模抑制特性,并研究了三环嵌套无源谐振腔中光纤耦合器的耦合比变化对选频特性的影响。

## 1 理论分析

三环嵌套结构的无源谐振腔如图1所示,它由3个四端口的光纤耦合器(Optical Coupler, OC)构成,其中OC-1和OC-2的耦合比分别为 $\alpha_1$ 和 $\alpha_2$ ,OC-3的耦合比 $\beta$ 。OC-1的输出端3和OC-2的输入端5相连,OC-1的输出端4和OC3的输入端11相连,OC-2的输出端8和OC-3的输入端12相连,OC-3的输出端9和OC-2的输入端6相连,OC-3的输出端10和OC-1的输入端2相连。3个光纤耦合器分别构成3个相互嵌套的环,Ring-1(3-5-8-12-10-2-3)长度为 $L_1$ ,Ring-2(8-12-9-6-8)长度为 $L_2$ ,Ring-3(4-11-10-2-4)长度为 $L_3(L_1 > L_2, L_1 > L_3)$ 。根据 $FSR = \frac{C}{nL}$ ,其中 $c$ 为光速, $n$ 为单模光纤的折射率,可以得到3个环的自由光谱范围分别为 $FSR_1 = \frac{C}{nL_1}$ 、 $FSR_2 = \frac{C}{nL_2}$ 和 $FSR_3 = \frac{C}{nL_3}$ 。根据游标效应,无源子腔的FSR被显著扩大为 $FSR_1$ 、 $FSR_2$ 和 $FSR_3$ 的最小公倍数。 $FSR = mFSR_1 = nFSR_2 = qFSR_3$ ,其中 $m, n, q$ 均为整数。只要无源子腔FSR的范围大于模式限制元件的3 dB带宽,就可以保证模式限制元件中只有一个通带<sup>[13-14]</sup>。

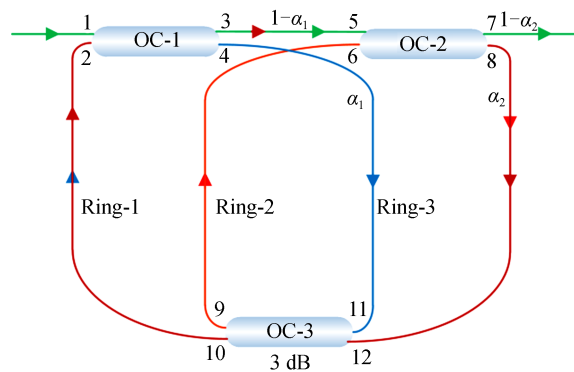


图1 三环无源谐振腔的结构  
Fig.1 Schematic of triple-ring passive resonator

此外,还需要知道 Ring-1 的 3 dB 带宽,当 Ring-1 的 3 dB 带宽小于有源主腔的纵模间隔时就可以保证只有一个纵模通过三环嵌套无源谐振腔<sup>[15]</sup>。考虑  $\alpha_1=\alpha_2=\alpha, \beta=0.5$  的情况。为了得到 Ring-1 的 3 dB 带宽,需要知道 Ring-1 的传递函数,即  $T = \left| \frac{E_o}{E_i} \right|^2$ ,  $E_i$  和  $E_o$  分别为三环嵌套无源谐振腔的输入光场和输出光场。根据文献[14],可以简化 Ring-1 的传输模型,从得到近似的传递函数  $T$ 。简化结果如图 2 所示。

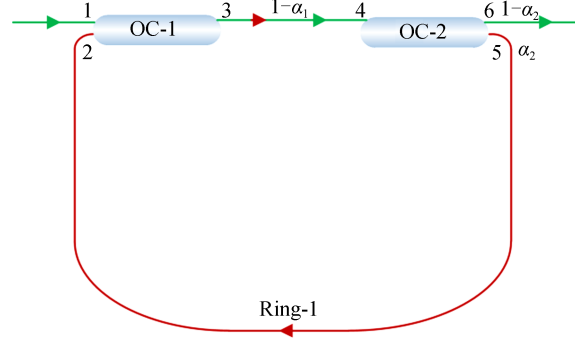


图 2 Ring-1 的传输模型  
Fig.2 Transmission model of Ring-1

假设 OC-1 的 3 个输入输出端口光场分别为  $E_1$ 、 $E_2$  和  $E_3$ , 对于 OC-2 来说, 输入光场为  $E_4$ , 输出光场分别为  $E_5$  和  $E_6$ 。根据耦合器的琼斯矩阵理论<sup>[16]</sup>, 可得

$$E_3 = \sqrt{1-\gamma}(\sqrt{1-\alpha} E_1 + j\sqrt{\alpha} E_2) \quad (1)$$

$$E_6 = \sqrt{1-\gamma} \sqrt{1-\alpha} E_4 \quad (2)$$

$$E_5 = \sqrt{1-\gamma} \sqrt{\alpha} j E_4 \quad (3)$$

$$E_2 = e^{j\omega\tau_2} E_5 \quad (4)$$

$$E_4 = e^{j\omega\tau_1} E_3 \quad (5)$$

式中,  $\alpha$  为耦合器的耦合因子,  $\gamma$  为耦合器的附加损耗,  $\omega$  为光的角频率,  $\tau_1$  和  $\tau_2$  分别表示光从 3 端口到 4 端口和 5 端口到 2 端口时产生的延时,  $\tau = \tau_1 + \tau_2$  表示光通过 Ring-1 产生的总延时。

联立式(1)~(5), 可知 Ring-1 的传输函数为

$$T = \frac{(1-\gamma)^2 (1-\alpha)^2}{1 + (1-\gamma)\alpha \cos \omega\tau + (1-\gamma)^2 \alpha^2} \quad (6)$$

根据  $\omega = 2\pi f$ ,  $\tau = \frac{1}{\text{FSR}} = \frac{n_{\text{eff}} L_1}{c}$ , 可得

$$T = \frac{(1-\gamma)^2 (1-\alpha)^2}{1 + (1-\gamma)\alpha \cos \frac{2\pi f n_{\text{eff}} L_1}{c} + (1-\gamma)^2 \alpha^2} \quad (7)$$

式中,  $f$  是光纤中光的频率,  $n_{\text{eff}}$  是光纤的有效折射率,  $c$  是光速。

根据式(7)可以看出 Ring-1 的 3 dB 带宽大小与耦合器的耦合比、Ring-1 的长度有关。根据传输函数  $T$ , 对 Ring-1 的传输特性进行仿真, 其传输谱函数如图 3 所示。因此, Ring-1 的 3 dB 带宽为 4.7 MHz, 小于有源主腔纵模间隔, 可以实现单纵模的选取。

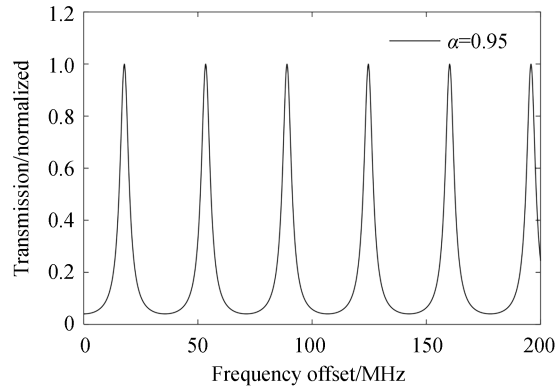


图3 Ring-1的传输谱

Fig.3 Transmission spectra of Ring-1

## 2 实验结构

图4为验证三环嵌套结构谐振腔所设计的掺铒光纤激光器结构示意图,980 nm的泵浦光经过980 nm/1 550 nm波分复用器(Wavelength Division Multiplexer, WDM)在5 m长的掺铒光纤(Erbium-Doped Fiber, EDF)中放大,产生自发辐射光,环形器(Circulator)保证光在主谐振腔中单向振荡。布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)的中心波长是1 550 nm,3 dB带宽是0.016 nm,FBG在1 550 nm对应的频带宽度为1.997 GHz,反射率为85%,其反射谱如图5所示。作为限模元件,具有初步滤波的效果。产生的激光90%的能量进入主腔中继续循环,10%的能量进入光谱仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA)Yokogawa AQ6370B和带有光电探测器(Photodetector, PD)的频谱仪(Electrical Spectrum Analyzer, ESA)R&S FPC1500中进行观察。三环嵌套结构的无源谐振腔的OC-1的输入端与OC-4 90%的输出端相连,OC-2的输出端与EDF相连,OC-1、OC-2和OC-3的耦合比分别为0.95、0.95、0.5, Ring-1长度为5.74 m, Ring-2的长度为3.86 m, Ring-3的长度为4.81 m,相应的FSR分别为36 MHz、52 MHz和42 MHz。

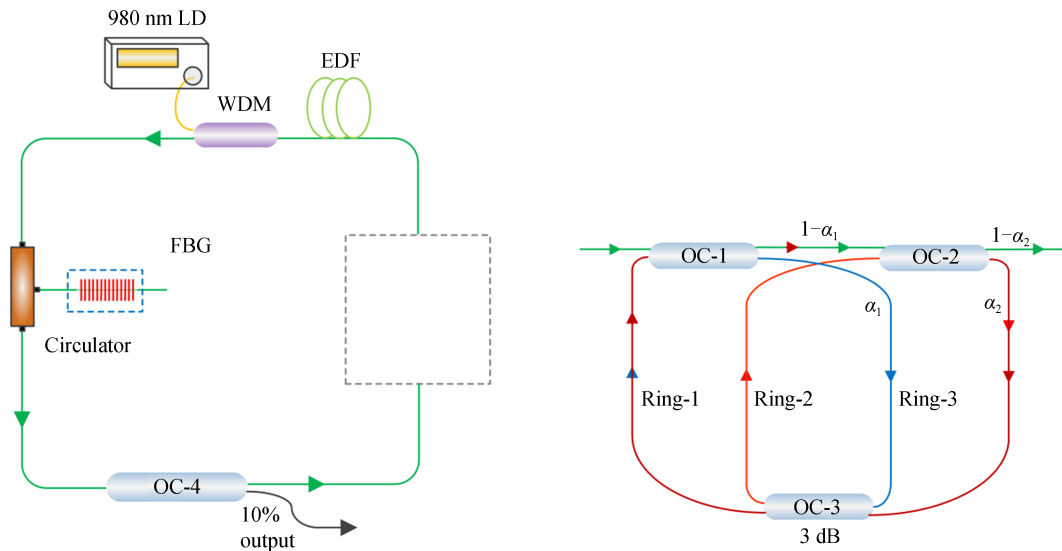


图4 单纵模掺铒光纤激光器的实验结构

Fig.4 Experiment setup of SLM erbium-doped fiber laser

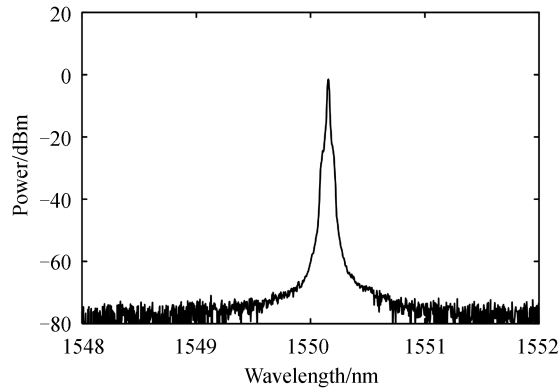


图5 FBG的反射谱  
Fig.5 Reflection spectrum of FBG

### 3 实验结果及分析

当泵浦功率为 159 mW 时,输出的光谱如图 6(a)所示,用光谱仪观察图中光谱的中心波长为 1 550.1 nm,与FBG的中心波长相对应。为了观察单纵模输出的稳定性,每隔 10 min用光谱仪进行一次数据采集,共观察了 100 min,波长稳定性测量结果如图 6(b)所示。为了探究中心波长的稳定性和输出功率的波动,绘制了中心波长变化和输出功率的波动变化折线图。如图 7 所示,输出功率的最大波动和输出波长的最大变化分别为 0.04 dB 和 0.016 nm,可以看出三环嵌套谐振腔产生的输出单纵模激光是非常稳定的。

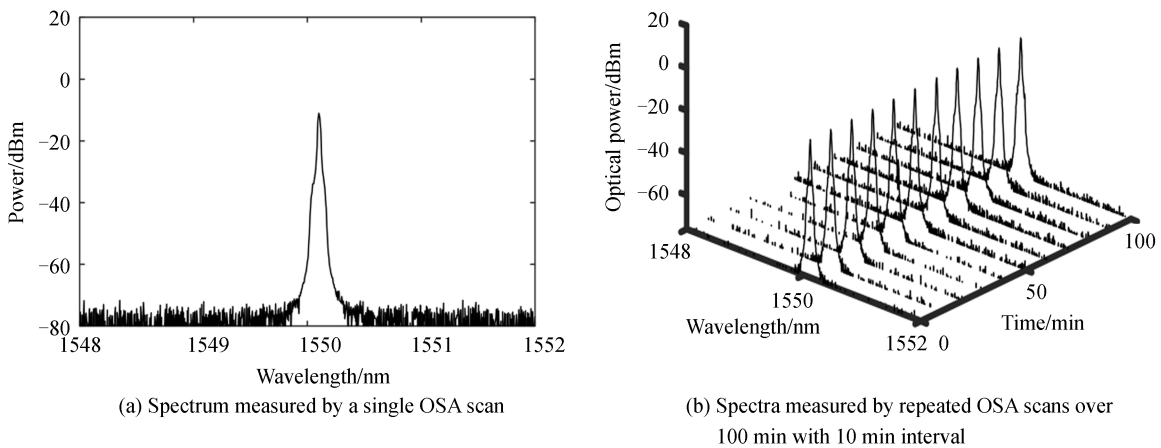


图6 泵浦功率 159 mW 时输出的光谱  
Fig.6 Optical spectra at a pump power of 159 mW

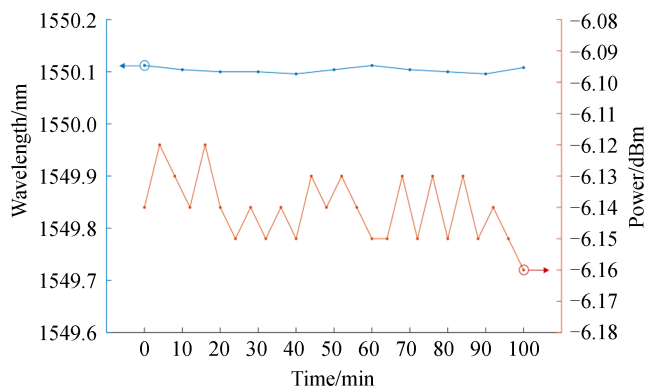


图7 输出SLM激光中心波长和输出光功率稳定性  
Fig.7 Stability of output power and the SLM lasing centre wavelength

为了证明三环嵌套无源谐振腔的选模特性,将输出端接到光电探测器中,将光信号转化为电信号,然后接到频谱仪中进行观察。使用分辨率为 30 kHz,频率范围为 0~500 MHz 的频谱仪所得的射频(Radio Frequency, RF)拍频信号如图 8(a)所示,由于频谱仪测量的范围远大于纵模间隔,且并没有观察到非常明显

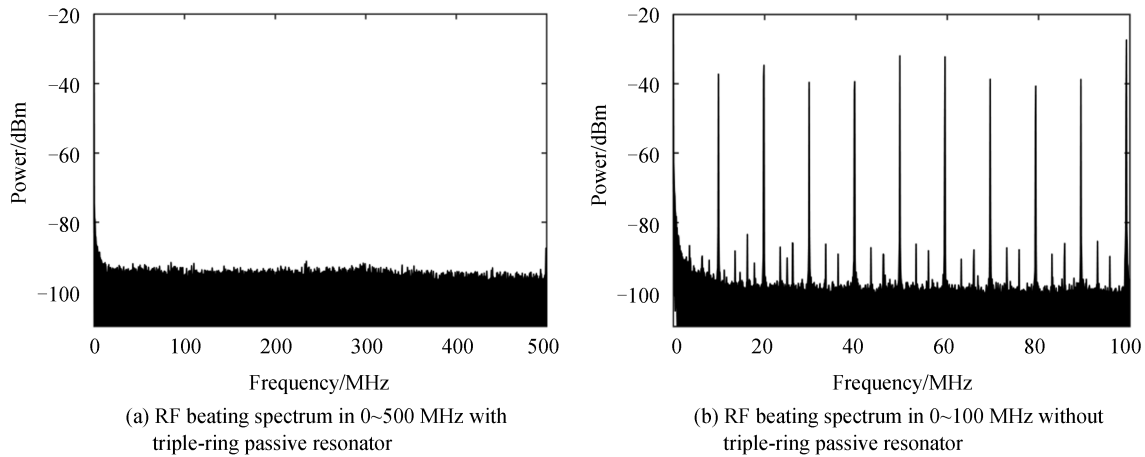


图8 OC-1和OC-2的耦合比同为0.95时RF拍频频谱  
Fig.8 RF beating spectra when the coupling ratios of OC-1 and OC-2 are 0.95

的拍频信号,因此激光器实现了单纵模输出。之后去掉三环嵌套无源谐振腔后,主环长为 20.3 m,对应的纵模间隔为 10.1 MHz,利用频谱仪所测得的射频拍频信号如图 8(b)所示,在 0~100 MHz 内可以观察到大量的纵模激射,纵模间隔为 9.9 MHz,与理论计算得到的纵模间隔非常接近。因此这种三环嵌套无源谐振腔具有优秀的选模特性,可以使主腔中的纵模被大量抑制。

为了探究三环嵌套无源谐振腔中光纤耦合器对选模特性的影响,将三环无源谐振腔中的 OC-1 和 OC-2 的耦合比分别同时换成 0.5 和 0.05,在频谱仪中观察输出信号。图 9(a)为 OC-1 和 OC-2 的耦合比均为 0.5 时输出信号拍频的频谱,可以看出纵模几乎被完全抑制,但是仍存在少量纵模,并且存在跳模现象。图 9(b)为 OC-1 和 OC-2 的耦合比均为 0.05 时输出信号拍频的频谱,可以看出只有一小部分的纵模被抑制,激光器处于多纵模状态,并且出现了非常严重的跳模现象。这与仿真结果所得出的结论一致,当 OC-1 和 OC-2 的耦合比很大时,所输出的激光单纵模特性更好;当 OC-1 和 OC-2 的耦合比很小,三环嵌套谐振腔的选模特性变差,导致输出的激光存在多纵模以及跳模。

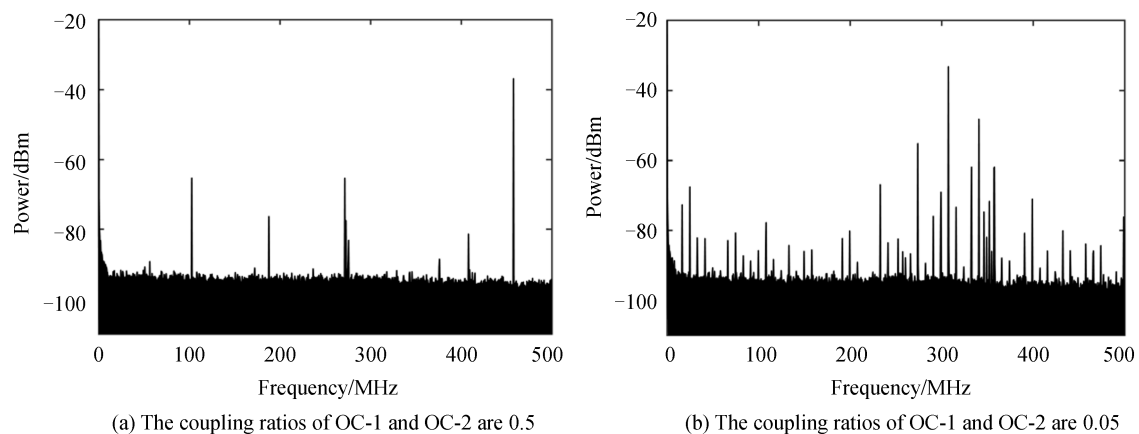


图9 OC-1和OC-2的耦合比同为0.5或0.05时RF拍频频谱  
Fig.9 RF beating spectra when the coupling ratios of OC-1 and OC-2 are 0.5 or 0.05

## 4 结论

基于耦合器的琼斯传输矩阵对三环嵌套无源谐振腔进行了理论分析,并用实验验证了其良好的选频特

性。研究表明,泵浦功率为159 mW时,实现了单纵模激射,输出的单纵模激光稳定性好,当三环嵌套谐振腔中的OC-1和OC-2的耦合比减小时,选模特性越来越差,输出的激光出现大量的纵模,并出现了严重的跳模现象。该三环嵌套无源谐振腔可为单纵模激光器的实现提供参考。

#### 参考文献

- [1] ZHANG Y, LI C, XU S, et al. A broad continuous temperature tunable DBR single-frequency fiber laser at 1064 nm[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(2): 1501107.
- [2] HUANG Jin, SUN Bo, JIA Jing, et al. 1064 nm ultrashort cavity single-frequency distributed Bragg reflector Yb-doped silica fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(8): 0814003.  
黄金, 孙博, 贾静, 等. 1064 nm超短腔DBR单频掺镱硅酸盐光纤激光器[J]. *光子学报*, 2017, 46(8): 0814003.
- [3] YIN F, YANG S, CHEN H, et al. Tunable single-longitudinal-mode Ytterbium all fiber laser with saturable-absorber-based auto-tracking filter[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(10-11): 2702-2706.
- [4] CHEN Guojie, HUANG Dexiu, ZHANG Xinliang, et al. Single-longitudinal-mode dual-wavelength fiber ring laser by cascading two filters and using a saturable absorber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(3): 499-502.  
陈国杰, 黄德修, 张新亮, 等. 基于两滤波器级联和饱和吸收体的单纵模双波长光纤激光器[J]. *光子学报*, 2009, 38(3): 499-502.
- [5] PAN S L, ZHAO X F, LOU C Y. Switchable single-longitudinal-mode dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser incorporating a semiconductor optical amplifier[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(8): 764-6.
- [6] FENG S, MAO Q, TIAN Y, et al. Widely tunable single longitudinal mode fiber laser with cascaded fiber-ring secondary cavity[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(4): 323-326.
- [7] LIAW S K, WANG S, SHIN C S, et al. Single-longitudinal-mode linear-cavity fiber laser using multiple subring-cavities [J]. *Laser Physics*, 2010, 20(7): 1608-1611.
- [8] FENG T, YAN F, LIU S, et al. Switchable and tunable dual-wavelength single-longitudinal-mode erbium-doped fiber laser with special subring-cavity and superimposed fiber Bragg gratings[J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11(12): 125106.
- [9] WANG Xue, YAN Fenping, HAN Wenguo. Single longitudinal mode narrow linewidth thulium-doped fiber laser with special subring cavity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(9): 0901001.  
王雪, 延凤平, 韩文国. 基于特殊子环腔单纵模窄线宽掺铥光纤激光器[J]. *中国激光*, 2019, 46(9): 0901001.
- [10] FENG T, DING D, ZHAO Z W, 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.
- [11] HSU Y. Based on silicon-micro-ring-resonator and triple-ring cavity for stable and tunable erbium fiber laser [C]. Toyama; Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018: 1399-1404.
- [12] FENG T, WANG M, WANG X, et al. Switchable 0.612 nm-spaced dual-wavelength fiber laser with sub-kHz linewidth, ultra-high OSNR, ultra-low RIN and orthogonal polarization outputs[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(13): 3173-3182.
- [13] FENG T, DING D L, LIU P, et al. Widely tunable/wavelength-swept SLM fiber laser with ultra-narrow linewidth and ultra-high OSNR[J]. *Optoelectronics Letters*, 2016, 12(6): 433 - 436.
- [14] WANG Z, SHANG J, MU K, et al. Single-longitudinal-mode fiber laser with an ultra-narrow linewidth and extremely high stability obtained by utilizing a triple-ring passive subring resonator[J]. *Optics and Laser Technology*, 2020, 130: 106329.
- [15] SVELTO O. Principles of lasers[M]. New York: Plenum Press, 1982.
- [16] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics, fourth edition & application of nonlinear fiber optics [M]. Second Edition. JIA Dongfang, YU Zhenhong, transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 425.  
阿戈沃 G P. 非线性光纤光学原理及应用(第二版) [M]. 贾东方, 余震虹, 译. 北京: 电子工业出版社, 2010: 425.