



应用于单纵模光纤激光器的复合环腔 滤波器的理论仿真*

程 丹¹, 张 昆¹, 房一涛¹, 张浩彬¹, 程昭晨¹, 吴 佟¹, 余 洋¹, 孙儒峰¹,
李 尧¹, 宋奎岩¹, 张利明¹, 张大勇¹, 赵 鸿¹, 冯 亭²

(1. 中国电子科技集团 第十一研究所, 固体激光技术重点实验室, 北京 100016; 2. 河北大学 物理科学与
技术学院 光信息技术创新中心, 河北 保定 071002)

摘 要: 提出了一种用于单纵模激光器选模的基于光纤耦合器的光纤复合环腔(CRC)滤波器的仿真方法, 利用该方法对两种新型双耦合器双环CRC(DCDR-CRC)滤波器及三耦合器双环CRC(TCDR-CRC)滤波器进行了理论仿真, 通过引入游标原理, 分析了两种滤波器在不同环长差下的滤波特性, 并通过调整DCDR-CRC及TCDR-CRC的耦合比、环长及环长差, 对有效自由光谱范围(FSR)、抑制比(SR)及主透射峰带宽进行优化, 计算结果表明优化后环腔的有效FSR可有效抑制波长选择器传输通带内的增益竞争, 较低的SR可以抑制CRC滤波器相邻透射峰之间的增益竞争, 较窄的主透射峰可以保证仅有一个激光器的纵模被选择。

关键词: 滤波器; 单纵模; 双耦合器双环腔; 三耦合器双环腔; 游标原理

中图分类号: TN248

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230145

Theoretical simulation of compound ring cavity filter for single longitudinal mode fiber laser

Cheng Dan¹, Zhang Kun¹, Fang Yitao¹, Zhang Haobin¹, Cheng Zhaochen¹, Wu Tong¹,
Yu Yang¹, Sun Rufeng¹, Li Yao¹, Song Kuiyan¹, Zhang Liming¹,
Zhang Dayong¹, Zhao Hong¹, Feng Ting²

(1. *Science and Technology on Solid-State Laser Laboratory, No. 11th Research Institute of China Electronics
Technology Group Corporation, Beijing 100016, China;*

2. *Photonics Information Innovation Center, College of Physics Science & Technology, HeBei University, Baoding 071002, China)*

Abstract: A method for simulating the optical-coupler-based fiber compound ring cavity (CRC) filter for mode selection of the single longitudinal mode fiber laser is proposed. With this method, we theoretically simulated two types of novel dual-coupler double ring CRC (DCDR-CRC) filter and tri-coupler double ring CRC (TCDR-CRC) filter. By introducing the Vernier effect, the transmittance characteristics of the proposed two filters under different cavity length differences are analyzed. The effective free spectral range (FSR), suppression ratio (SR) and bandwidth of the main transmission peak of CRC filters are optimized by adjusting the coupling ratios, cavity length and cavity length difference of the DCDR-CRC and TCDR-CRC filters. The simulated results show that the optimized effective FSR of the ring cavity can effectively suppress the gain competition in the transmission passband of the wavelength selector. Furthermore the lower SR can suppress the gain competition between the adjacent transmission peaks of the CRC filter, and the narrower bandwidth of the main transmission peak can ensure that only one longitudinal mode of the laser can be selected.

Key words: filter, single longitudinal mode, dual-coupler double ring, tri-coupler double ring, Vernier effect

* 收稿日期: 2023-05-25; 修订日期: 2023-10-23

基金项目: 国防科技重点实验室基金项目

联系方式: 程 丹, dcheng@bjtu.edu.cn。

通信作者: 张 昆, nukzhang@163.com;

冯 亭, wlxylt@hbu.edu.cn。

光纤激光器具有方向性好、光束质量优秀、效率高、抗干扰能力强、体积小、散热性好等优点,在医疗、工业加工、国防领域都有很好的应用前景。单纵模光纤激光器(SLM-FL)除了包含光纤激光器所有优点之外,还具有非常好的相干特性及功率稳定性,被广泛应用于测距、激光雷达、相干光通信等方向。目前,SLM-FL实现方案已经相对成熟,根据激光器的总腔体长度可以将实现方案划分为两类:一类是超短腔结构激光器,包括分布反馈(DFB)激光器和分布布拉格反射(DBR)激光器,它们通过缩短激光器的腔长来增大腔内纵模间隔,使有效增益带宽内仅有一个纵模可以振荡输出,该类激光器结构紧凑,功率稳定,但输出功率及效率较为有限;另一类SLM-FL为长腔结构,该方案没有腔体长度限制,可以容纳足够长的有源光纤以获得所需的增益,并且腔内允许各种可调器件的加入,更具有灵活性。但是,长腔结构导致了更小的纵模间隔,需要可靠的机制来抑制多纵模振荡,比如,引入可饱和吸收体的自追踪窄带滤波器实现多纵模抑制,但这种方案存在功率限制,单纵模输出不稳定;也可以在腔内引入超窄带滤波器,如相移光纤光栅等,但这类光栅也存在不易写制的情况。采用复合腔结构并搭配适当的选波器件是实现激光器单纵模输出的有效手段^[1],这种类型腔结构的激光器通常由一个提供增益的主腔结合一个或多个无源子环腔组成。其中无源子环一般由一个或多个光纤耦合器构成,作为滤波器在主腔中进行纵模选择。该结构的优势在于价格较低廉、灵活性高,通过优化各子腔长度及耦合器的耦合比可以实现不同的滤波效果,尤其适用于关键器件相对缺乏的波段的光纤激光器的单纵模滤波。

复合环腔(CRC)滤波器最基础的环腔结构由一个输入臂与输出臂相连的 2×2 光学腔(OC)所形成的闭合环路构成^[2-3],应用于光纤激光器中的该种CRC的腔长根据实际需要通常可以为十几厘米到几米。CRC在光纤激光器中不仅可以拓展激光器的有效纵模间隔,合理设计CRC的结构参数还可以达到超窄带滤波的效果对激光器进行纵模选择及进一步的线宽压窄^[4-6]。目前所提出的基于CRC结构的SLM光纤激光器中,除了利用游标原理定量的对实现SLM输出所需子环的数量及长度进行分析之外^[7],一些更为完整及系统的方法也被提出用于分析设计针对SLM选择的CRC滤波器^[8],并对其滤波性能进行了表征。这些分析仿真方法可以分析几种较为简单的级联结构或嵌套结构的CRC滤波器。随后,一种信号流图方法也被提出来分析求解交叉结构复合谐振腔滤波器,这种信号流图最初由Mason提出^[9],可得到电路中信号变换和传输的因果关系。与传统方法相比^[3],这种方法通过图形重新表示复合环腔更加有助于对其的理解,并最终得到复合环腔滤波器透射谱的解析表达式。但是基于OC的CRC滤波器的结构会随着OC使用数量的增加而变得更加复杂,其输出解析表达式以及对表达式的推导也将更为复杂及困难。本文将采用循环方法模拟光在环路里的振荡过程,直到最终循环得到CRC滤波器的稳态输出谱。采用这种方法的优势在于可以避免对复杂解析解的推导过程,从而极大的降低了对CRC滤波器的分析与计算的复杂性,并且利用这种方法可以轻松分析任何已知光走向的复杂结构的CRC滤波器。

本文给出了使用CRC滤波器在光纤激光腔内进行选模的原理,建立了CRC滤波器数值仿真模型,分别对双耦合器双环腔及三耦合器双环腔两种新型结构CRC滤波器进行仿真。分析了不同耦合比、环长差下两种新型结构CRC滤波器输出特性,并根据选模要求,不断优化滤波器输出通带的有效纵模间隔及边带的抑制比,得到可实现激光器单纵模输出的CRC滤波器结构参数。

1 复合环腔滤波器选模工作原理

长腔激光器纵模间隔很窄,一般在几十兆赫兹量级,而普遍用于腔内选波的FBG的带宽一般在吉赫兹量级,使用单一FBG等窄带滤波器很难达到SLM滤波效果,滤波通带内通常存在不止一个纵模,因此需要配合其他更窄带宽的滤波器,复合子环腔及复合多环子腔滤波器结构简单灵活性强,是较为理想的滤波方式,图1给出了光纤光栅滤波器结合复合子环腔的选模过程。图1(a)为光纤激光器的增益曲线,图1(b)为主腔内纵模,其纵模间隔为 $\Delta\nu$ 。图1(c)为腔内加入的FBG,带宽(BW)由光栅结构及其写制参数决定,多通道FBG则有 $\Delta\lambda$ 的通道间隔。可以看出在FBG滤波通道内仍存在较多的纵模,无法实现单纵模输出,此时需要结合CRC来进行进一步的选模。图1(d)为复合多环腔滤波器内各主谐振峰示意图,由上述分析可知,复合多环腔滤波器输出的是带有有效自由光谱范围(FSR)包络结构的周期性超窄带梳状滤波器,其包络周期即为复合环腔的有效FSR,图中表示为 FSR_c ,此时需要保证在复合多环腔的FSR是FBG滤波带宽的 $0.5\sim 1$ 倍,即: $R_{FSR_c} > W_B/2$,这样可以保证在任意FBG的滤波通带的位置,都有且只有一个复合环腔的有效滤波通带以及该有效滤波通带内的主谐振峰占优势。当复合多子环腔有效滤波通带主谐振峰带宽为 $1\sim 2$ 倍的主腔纵模间隔时,即 $\Delta\nu_c > \Delta\nu/2$ 时,可以保证有且仅有一个纵模被复合多子环腔滤出实现激光器的单纵模振荡。也就是说当以上要求被满足后,可以保证无论FBG滤波通道的位置如何,理论上

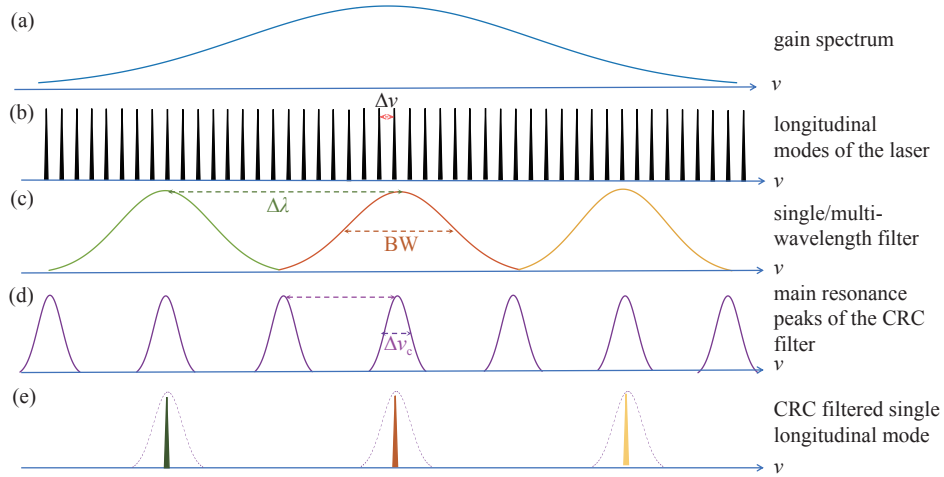


Fig. 1 Schematic diagram of the process of mode-selecting by the FBG and the subring compound cavity filter

图1 光纤光栅结合复合子环腔滤波器选模过程图

都可以保证有且仅有一个纵模被滤出。

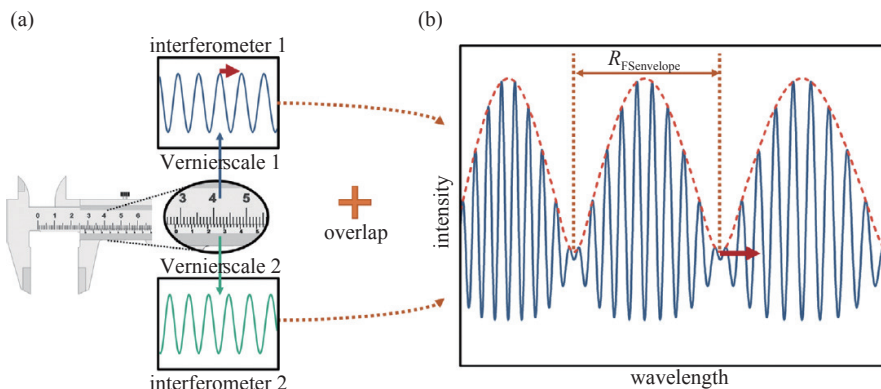
2 无源双耦合器双环复合谐振腔滤波器理论仿真

单耦合器单环 (SCR) 和双耦合器单环 (DCR) 是 CRC 的基本结构, 已常用于环形腔 SLM 激光器中。SCR 的传输谱在不同耦合比及环长下, 透射率均比较高且透射峰带宽较宽, 尽管增加环长可以压窄各透射峰的带宽, 但两相邻透射峰的间隔较窄, 因此对于腔长较长纵模间隔较密的光纤激光器来说, 仅用一个 SCR 进行多纵模的抑制将很难达到理想的 SLM 输出效果。与 SCR 相比, DCR 滤波器的滤波能力更加优异, 其具有更窄的滤波带宽, 且 FSR 要宽于各透射峰滤波带宽。尽管对于 DCR 来说, 当其应用于光纤激光器中时, 由于其具有与 SCR 相比较窄的透射通带带宽以及更宽的 FSR, 其透射通带内的相邻主腔模式之间的增益竞争效应可以被一定程度地消除, 但 DCR 形成的各透射峰峰值相同, 因此相邻透射峰之间仍然存在着一定的增益竞争, 这种情况下有必要严格控制激光器的主腔长度及波长选择器传输通带的带宽, 以达到稳定的 SLM 输出或可调谐 SLM 输出。

为了提升 CRC 滤波器的选模能力, 复合单环腔结构可以进一步调整为复合双环腔结构。当 CRC 采用双环结构时, 利用光学游标效应, 在双环之间引入微小的腔长差, 这使得双环之中的光信号存在轻微偏移的干涉频率, 也就是存在微小的失谐, 这样当两个信号叠加时将产生一个包络调制, 该包络调制也称为游标包络调制, 图 2 为光学游标效应原理图, (a) 为两个存在微小失谐的干涉信号, (b) 为叠加后带有游标包络调制的光信号, 该包络表现为一个频率依赖于两干涉信号失谐量的正弦特性, 包络的 FSR 为

$$R_{\text{FSR}_{\text{envelope}}} = \left| \frac{R_{\text{FS2}} R_{\text{FS1}}}{R_{\text{FS2}} - R_{\text{FS1}}} \right| \quad (1)$$

式中: R_{FS1} 与 R_{FS2} 分别为两干涉光信号的 FSR, 对于复合环型腔来说有 $R_{\text{FS1}} = c/nL_1$, $R_{\text{FS2}} = c/nL_2$, 因此由游标效应形成的有效 FSR 为 $R_{\text{FS}_{\text{envelope}}} = c/n\Delta L$ 。可见, 利用游标效应, 复合双环腔的有效 FSR 可以被极大拓展。这可以使得激

Fig. 2 Schematic diagram of the optical Vernier effect principle^[10-11]图2 光学游标效应原理图^[10-11]

光器的波长选择器件的有效传输通带内只有一个 CRC 滤波器所形成的有效 FSR 透射通带占优势。除此之外,该效应还起到抑制边模的作用,由于有效 FSR 包络成正弦特性,因此在包络内各谐振峰的透射率不同,即存在一个振幅最高的主谐振峰及一系列振幅递减的边带,这里定义与主透射峰相邻的振幅最高的边模与主透射峰之间振幅之比为边模的抑制比(SR),即 $R_S = I_{\text{side}}/I_{\text{main}}$,当 SR 越小,边模抑制效果越好,降低了包络内各谐振峰之间的增益竞争效果,极大地提高了选模效果。

图 3 为利用两个对称型 3×3 OC 搭建的双耦合器复合双环腔(DCDR-CRC)滤波器,该结构的优势在于,与普通 2×2 OC 相比,对称型 3×3 OC 多出的两臂使其更加具有灵活性,可以仅用两个耦合器构成有效 FSR 可调节的窄透射峰输出的双环结构,结构简单紧凑。由于光纤耦合器的传输矩阵是已知的,在仿真过程中只需要将整个复合环腔结构拆分为传递矩阵容易计算的基本节点,根据传输矩阵得到每个耦合器(基本节点)各端口路径的增益系数,并根据光传输方向与各端口连接类型确定各端口之间的线性传输方程,将整个传输流程循环迭代直到得到稳态输出。仿真具体过程如下:根据光传输方向将耦合器的各输入输出端口由数字 1、2、3、4 等表示,并定义 E_{in} 、 $E_i(i=2、3、4\cdots)$ 、 E_{out} 为各端口频域电场振幅,根据对称型 3×3 OC 的传输矩阵,其路径的增益系数可以定义为^[12]

$$A_1 = \sqrt{1-\gamma_i}(1/\sqrt{3}), A_2 = \sqrt{1-\gamma_i}(1/\sqrt{3})\exp(j2\pi/3) \quad (2)$$

光纤的传输路径增益系数为^[8]

$$D_i = \sqrt{1-\delta}\exp[(-\alpha+j\beta)L_i], \beta = 2\pi n_{\text{eff}}/\lambda \quad (3)$$

式中: γ_i 为每个 OC 的插入损耗, j 为虚部, δ 与 α 分别为光纤的熔接损耗及传输损耗, β 为传输常数, L_i 为各环路长度, n_{eff} 和 λ 分别为有效折射率及波长。

在仿真过程中,将每个 OC 均视为带有输入及输出的节点,各节点之间的光信号的流入与流出均有其固定的传输关系,当光信号刚注入双环腔的输入端口时,即第一个耦合器 1 端口而未注入至双环腔内时,双环腔内除注入 1 端口以外的各输入端口光信号均为 0,因此定义初值为 $E_{\text{in},1} = 1$ 、 $E_2 = 0$ 、 $E_3 = 0$ 、 $E_8 = 0$ 、 $E_9 = 0$ 。当光信号从 1 端口注入至 3×3 OC1 后,将从 OC1 的 5 端口输出并注入至 3×3 OC2 的 7 端口,通过 OC2 的光信号将分别从 11 端口及 10 端口传输回 3×3 OC1 的 2 端口及 3 端口,并再次注入回 OC1 形成环路 1 与环路 2,其中环路 1 环长 $R_1 = L_1 + L_3$,环路 2 环长 $R_2 = L_2 + L_3$ 。综上环路中各输入输出节点的线性传输函数表示为

$$\begin{cases} E_4 = A_1 E_2 + A_2 E_{\text{in},1} + A_2 E_3, & E_5 = A_2 E_2 + A_1 E_{\text{in},1} + A_2 E_3, & E_6 = A_2 E_2 + A_2 E_{\text{in},1} + A_1 E_3 \\ E_7 = D_2 E_5 \\ E_{10} = A_1 E_8 + A_2 E_7 + A_2 E_9, & E_{11} = A_2 E_8 + A_1 E_7 + A_2 E_9, & E_{12} = A_2 E_8 + A_2 E_7 + A_1 E_9 \\ E_2 = D_1 E_{10}, & E_3 = D_3 E_{11} \end{cases} \quad (4)$$

端口 12 的光信号为复合环腔的输出光信号,端口 10 与 11 的光信号将通过环路 2 与环路 1 传输回到端口 3 与 2,并将作为输入再一次注入回 OC1 内进行下一轮的传输,即将本次传输得到的 E_2 与 E_3 的结果作为下一次循环的输出值给入到 E_4 、 E_5 与 E_6 中,不断循环这一过程直到得到端口 12 的稳态输出,也就是说通过遍历所有节点输入与输出所构成网络拓扑结构,将整个拓扑结构利用 Matlab 的 for 循环将流程循环足够多的次数直到求得稳态解,即可得到 DCDR 滤波器的最终输出透射谱^[7],DCDR 滤波器得输出为 $T_{\text{out}} = E_{12} E_{12}^*$ 。

图 4 为仿真所得的固定环路 R_1 为 0.8 m,通过不断缩短环路 R_2 的长度来引入腔长差 (a) $\Delta L=0.01$ m, (b) $\Delta L=0.03$ m, (c) $\Delta L=0.06$ m, (d) $\Delta L=0.09$ m 时 DCDR 滤波器的传输谱,各图中的内插图为放大到一个 FSR 包络内 DCDR 滤波器的传输谱。根据频率与波长的关系 $\Delta f = (c/\lambda^2)\Delta\lambda$,有 $R_{\text{FSRenvlope},\lambda} = \lambda^2/n\Delta L$ 。当 ΔL 分别为 0.01、0.03、0.06 及 0.09 m 时,计算所得 FSR 分别为 0.261 4(20.83 GHz)、0.871(6.94 GHz)、0.436(3.47 GHz)及 0.029 nm(2.31 GHz)。与仿真结果相符,即在一定腔长差范围内,随着腔长差的增大,有效 FSR 变小。从内插图来看,在一定腔长差范围内,SR 随着腔长差的增大而变小,边模抑制效果提高。由仿真结果来看基于双对称型 3×3 OC 的 DCDR 滤波器的效果要比

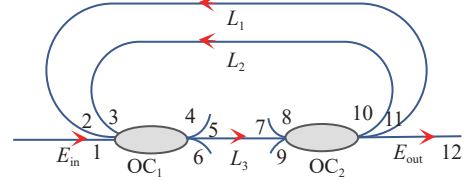


Fig. 3 Schematic diagram of the DCDR-CRC based on two symmetric 3×3 optical couplers

图 3 基于双 3×3 对称型 OC 的 DCDR-CRC 结构示意图

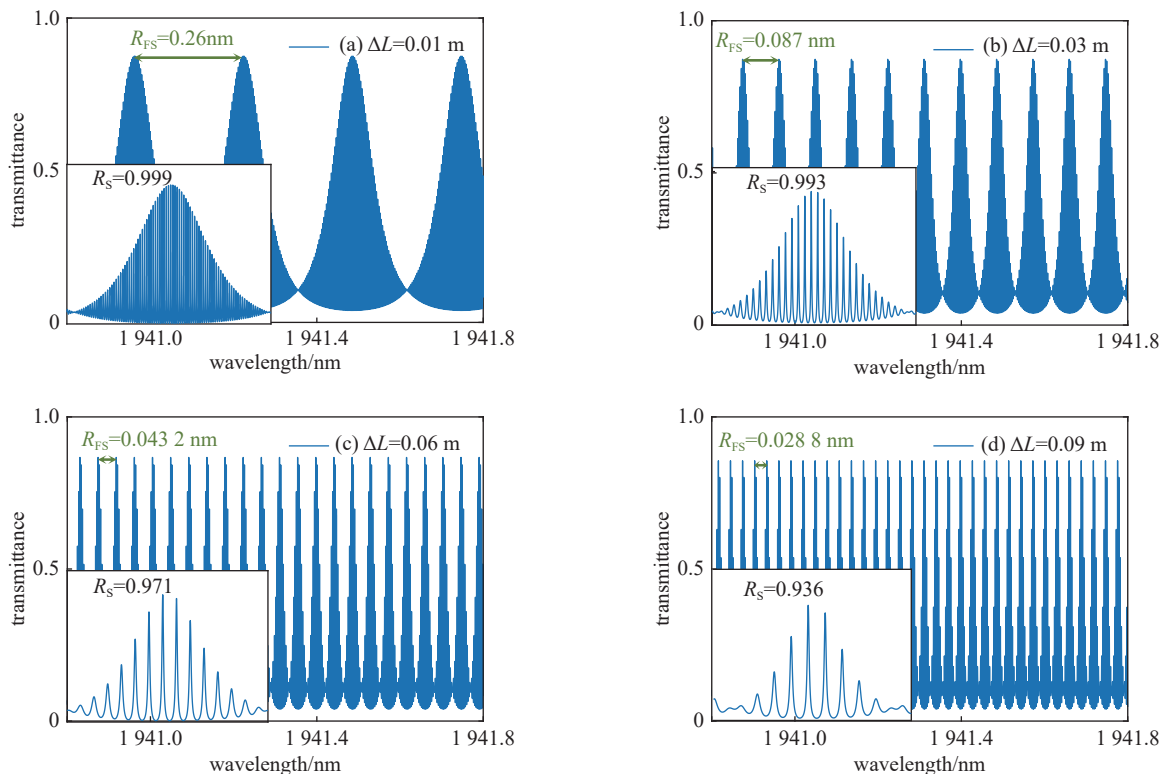


Fig. 4 Transmission spectra of the dual-coupler double ring compound cavity at various cavity length differences, where the insets are the zoomed-in transmission spectra over one FSR of the simulated DCDR

图4 不同环长差下双耦合器复合双环腔(DCDR)传输谱,内插图为一个FSR内DCDR传输谱的放大图

SCR与DCR选模效果好,该DCDR滤波器结构已应用于实际工作中^[13],通过优化复合环腔滤波器的FSR并结合使用取样布拉格光纤光栅(SFBG),使SFBG各个传输通带内有且仅有一个DCDR滤波器的有效FSR透射通带占优势,并通过优化滤波器腔长使得有效FSR透射通带内主透射峰带宽约等于为激光器纵模间隔的一倍,使得有且仅有一个纵模被滤出,最终实现了六波长可切换单纵模激光输出。然而对称型3×3 OC的耦合比不可调,在本文的仿真结果及文献^[13]中可见,基于双对称型3×3 OC的DCDR滤波器的SR仍比较高,使得该结构应用于激光器时,滤波通带内相邻透射峰之间存在增益竞争的可能,因此,仍需要进一步调整复合环腔结构以达到理想的SR及选模效果。

3 无源三耦合器双环复合谐振腔滤波器理论仿真

图5为利用三个2×2 OC组合搭建的TCDR-CRC滤波器,该结构的优势在于其可调性更强,可以实现对输出滤波通带的带宽、有效FSR、SR及透射率的全方位调节,选模能力得到了进一步的提升。

定义结构中2×2 OC路径的增益系数为

$$\begin{cases} C_i = \sqrt{1-\gamma_i} \sqrt{\kappa_i} \\ Y_i = j\sqrt{1-\gamma_i} \sqrt{1-\kappa_i} \end{cases}, \quad i=1,2,3 \dots \quad (5)$$

式中: κ_i 与 γ_i 分别为每个OC的耦合比及插入损耗,当光信号

未注入到TCDR内时,TCDR内各OC输入端口光信号为0,设定初值 $E_{in,1}=1, E_2=0, E_6=0, E_{10}=0$ 。并设定环腔R1由OC1及OC2构成,环长 $R_1=L_1+L_2$,环腔R2由OC2及OC3构成,环长 $R_2=L_3+L_4$ 。

当光信号由OC1的1端口注入进环腔中后将由4端口传输到OC2的输入5端口,从OC2输出的光将分为两路,一路由7端口传输回OC1的2端口形成环腔R1,一路将由8端口继续注入到OC3,经OC3输出的光将再次分为两路,一路由端口11传输回OC2的输入端口6形成环腔R2,一路将作为TCDR的输出。因此光信号在环路内的整个传输关系可以写为

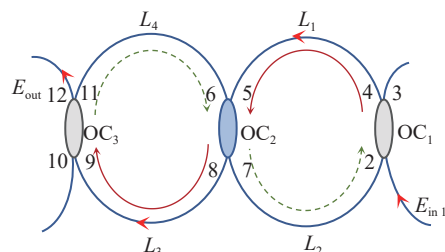


Fig. 5 Schematic diagram of the TCDCR-CRC

图5 TCDCR-CRC结构示意图

$$\begin{cases} E_3 = C_1 E_{in,1} + Y_1 E_2, & E_4 = Y_1 E_{in,1} + C_1 E_2 \\ E_5 = D_1 E_4 \\ E_7 = C_2 E_5 + Y_2 E_6, & E_8 = Y_2 E_5 + C_2 E_6 \\ E_2 = D_2 E_7, & E_9 = D_3 E_8 \\ E_7 = C_3 E_9 + Y_3 E_{10}, & E_{12} = Y_3 E_9 + C_3 E_{10} \\ E_6 = D_4 E_{11} \end{cases} \quad (6)$$

将上述关系循环至求得稳态解, TCDR 的输出为 $T_{out} = E_{12} E_{12}^*$ 。

首先, 固定三个 OC 的耦合比, 分析不同环长差下 TCDR 的滤波特性。固定耦合比 $R_{OC1}=R_{OC2}=R_{OC3}=0.9$, 环长 R_1 为 0.6 m, 在不改变环长 R_1 的情况下, 不断缩短环长 R_2 来引入两环之间的环长差。图 6 为环长差 $\Delta L=0.02$ 、0.04、0.06、0.1 m 时仿真所得 TCDR 滤波器的传输谱, 各图中的内插图分别为放大到一个 FSR 包络内 TCDR 滤波器的传输谱, 以及各 FSR 包络内最高透射峰的传输谱。可以看出, 在所选择的环长差范围内, 随着环长差的增大, 有效 FSR 逐渐变小, 传输谱的最高透射率基本保持不变, 并且在该耦合比下, 透射峰为双峰结构, 不随环长差的改变而改变。但 SR 随着环腔差的增大而变小, 说明在一定范围内增大环长差可以提高边模抑制效果。

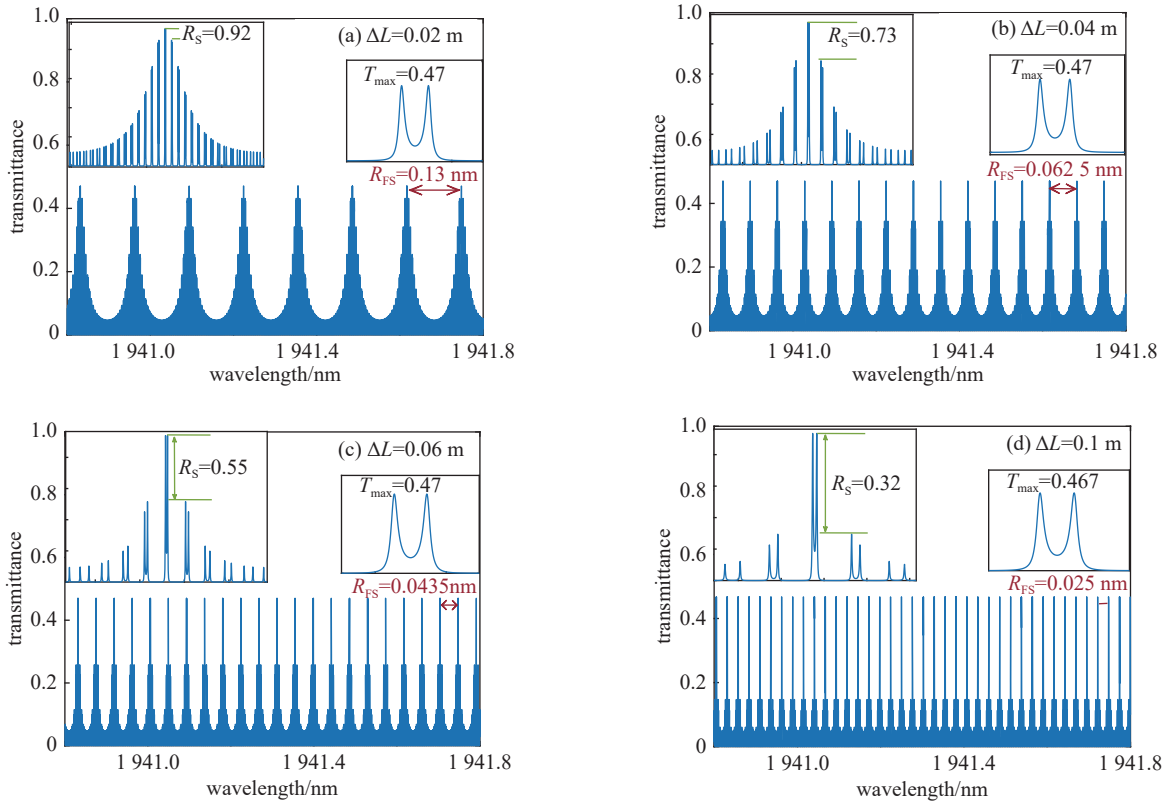


Fig. 6 Transmission spectra of the TCDR-CRC at various cavity length differences, where the insets are the zoomed-in transmission spectra over one FSR and the highest transmission peak of the simulated TCDR, respectively

图 6 不同环长差下 TCDR-CRC 传输谱, 内插图分别为一个 FSR 内 TCDR 传输谱的放大图及最高透射峰传输谱放大图

保持上述两环的环长不变且固定环长差为 0.06 m, 进一步分析不同耦合比下, TCDR 传输谱的特性。仿真过程中, 保持 OC2 耦合比为 0.9 不变, 同时改变 OC1 及 OC3 的耦合比, 即令耦合比 $R_{OC1}=R_{OC3}=0.7$ 、0.5、0.3、0.1, 图 7 为不同耦合比下 TCDR 的传输谱。根据图 6(c) 及图 7 可见, 随着 OC1 及 OC3 耦合比的降低, TCDR 传输谱的有效 FSR 保持不变, 其透射率呈先升高后降低的趋势, 即当耦合比从 0.9 降至 0.5 时, 透射率由 0.47 提升至 0.84, 有效 FSR 内滤波通带 SR 基本保持不变, 但主透射峰由双峰结构变为单峰结构。当耦合比从 0.5 降至 0.1 时, 透射率从 0.84 降低到 0.29, 且 SR 从 0.54 提高到 0.89, 虽然主透射峰仍然保持着单峰结构, 但选模效果逐渐变差, 耦合比在 0.5 时, 选模效果最优。

最后, 考虑环长对 TCDR 滤波器的滤波特性带来的影响, 并结合上述仿真结果, 设定 OC 耦合比分别为 $R_{OC1}=R_{OC3}=0.5$, $R_{OC2}=0.9$, 双环之间环长差为 0.02 m。在固定耦合比及环长差的条件下, 同时缩短两环腔的环长至 (a) $R_1=0.6$ m, $R_2=0.58$ m; (b) $R_1=0.4$ m, $R_2=0.38$ m; (c) $R_1=0.3$ m, $R_2=0.28$ m; (d) $R_1=0.14$ m, $R_2=0.12$ m。由图 8 可以看出, 固

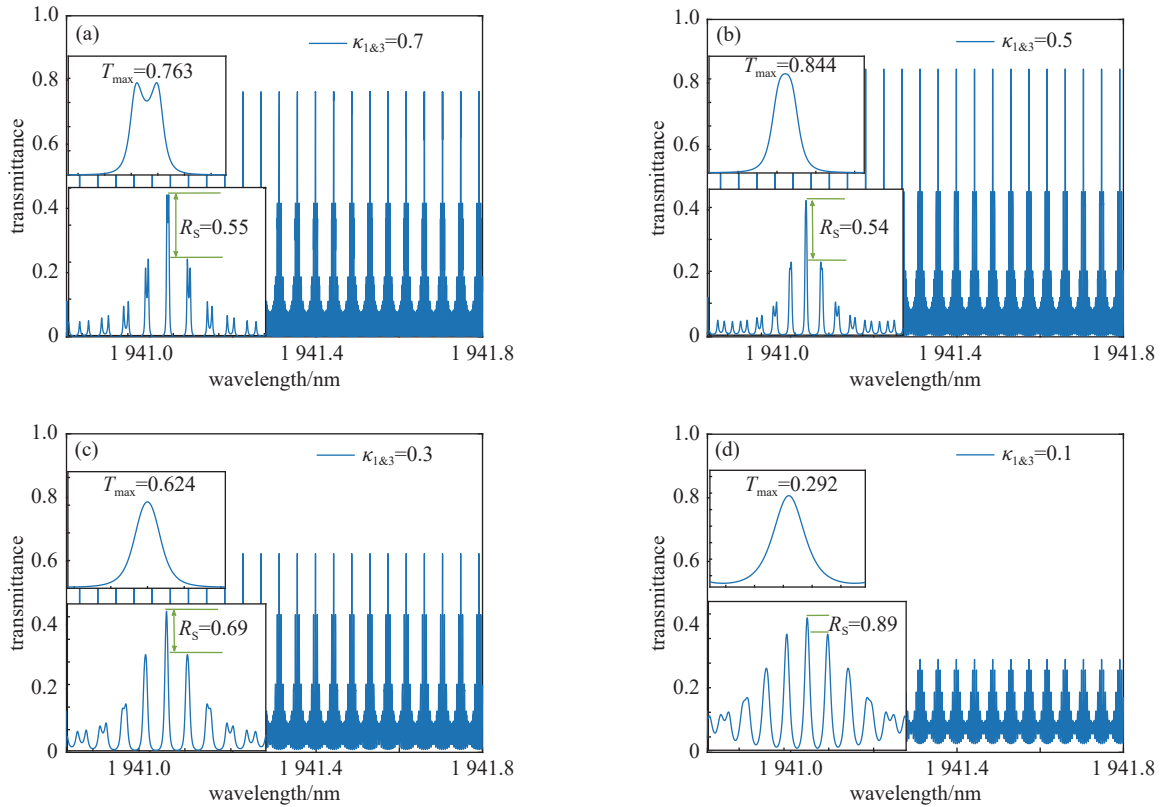


Fig. 7 Transmission spectra of the TCDR compound cavity at different coupling ratios with certain cavity length and cavity length difference, where the insets are the zoomed-in transmission spectra over one FSR and the highest transmission peak of the simulated TCDR, respectively

图 7 环长及环长差固定, 不同耦合比下仿真所得 TCDR 的传输谱, 内插图分别为一个 FSR 内 TCDR 传输谱的放大图及最高透射峰传输谱放大图

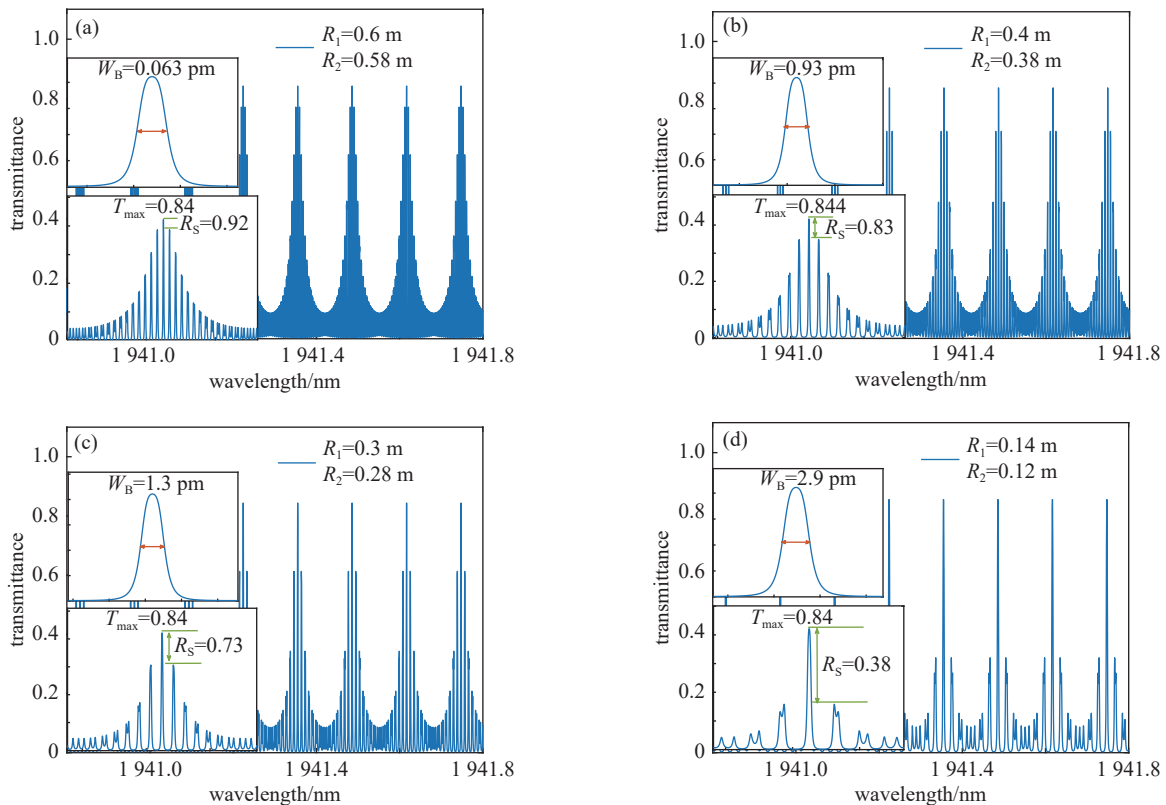


Fig. 8 Transmission spectra of the TCDR compound cavity at different cavity lengths and certain coupling ratio and cavity length difference, where the insets are the zoomed-in transmission spectra over one FSR and the highest transmission peak of the simulated TCDR, respectively

图 8 耦合比及环长差固定, 不同腔长下仿真所得 TCDR 传输谱, 内插图分别为一个 FSR 内 TCDR 传输谱的放大图及最高透射峰传输谱放大图

定腔长差及耦合比下,随着两环腔长度的缩短,TCDR透射率不变,有效FSR不变,有效FSR包络内谐振峰数量变少,各谐振峰之间间隔变大,SR逐渐变小,边模抑制效果提升,主谐振峰的带宽随着腔长的缩短而逐渐变宽。

综上所述可以看出,TCDR-CRC滤波器的滤波选模能力更具有优势。通过调节TCDR中各个OC的耦合比,双环腔的腔长及腔长差,可以对最终输出的有效FSR、SR、主谐振峰带宽及透射率进行控制,以达到想要的选模效果。在实际工作中,通过级联TCDR-CRC及DCR滤波器,对光纤光栅透射通带内纵模进行选择,实现了稳定的五波长可切换单纵模激光输出^[14]。该工作还给出了TCDR-CRC的解析解,解析解的仿真结果与本文所提出方法的仿真结果相比具有很好的一致性。

对于用于纵模选择的CRC滤波器,其输出的有效FSR、SR、主谐振峰的带宽及透射率对激光器能否实现稳定的SLM起着决定性的作用。一般来说,合适的有效FSR可以有效降低光纤激光器内波长选择器传输通带内的增益竞争,较低的SR也可以抑制CRC滤波器相邻透射峰之间的增益竞争,较窄的主透射峰可以保证仅有一个激光器的纵模被选择。通过不断优化有效FSR、SR、主谐振峰的带宽及透射率可以达到理想的选模性能,实现光纤激光器高信噪比,高稳定性的单纵模运行。

4 结 论

本文给出了两种复合环腔结构滤波器的滤波特性,可以看出随着游标原理的引入,采用双环结构可以极大提升滤波器的有效FSR,进一步调整OC的数量及耦合比可以进一步的提升复合环腔滤波器的选模能力。但这不代表越复杂的CRC滤波器结构就会有越好的滤波效果,一般来说,由双耦合器或三耦合器组成的复合双环或三环腔滤波器均已基本具有稳定的纵模选择的能力,复合四环或更多耦合器的加入会增加系统的复杂性,而且较多环的引入造成的腔长的增加也会引起激光器的不稳定。复合单环腔虽然有时会出现滤波效果不稳定的情况,但SCR与DCR的单环结构输出谱较为简单且固定,特别是DCR结构具有窄带滤波效果,非常适用于配合其他环腔结构来优化输出效果。通过配合使用这种基本结构的CRC滤波器与所设计的复合环腔结构也可以进一步优化输出特性以达到不同激光器的特定的选模要求。

参考文献:

- [1] Bai Yan, Yan Fengping, Feng Ting, et al. Demonstration of linewidth measurement based on phase noise analysis for a single frequency fiber laser in the 2 μm band[J]. *Laser Physics*, 2019, 29: 075102.
- [2] Ja Y H. Generalized theory of optical fiber loop and ring resonators with multiple couplers. 1: circulating and output fields[J]. *Applied Optics*, 1990, 29(24): 3517-3523.
- [3] Seraji F E, Asgahri F. Comparative analysis of optical ring resonators with cross- and direct-coupled configurations[J]. *International Journal of Optics and Applications*, 2012, 2(3): 15-19.
- [4] Zhang Jianluo, Yue Chaoyu, Schinn G W, et al. Stable single-mode compound-ring erbium-doped fiber laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1996, 14(1): 104-109.
- [5] Feng Ting, Jiang Meili, Wei Da, et al. Four-wavelength-switchable SLM fiber laser with sub-kHz linewidth using superimposed high-birefringence FBG and dual-coupler ring based compound-cavity filter[J]. *Optics Express*, 2019, 27(25): 36662-36679.
- [6] Feng Ting, Ding Dongliang, Yan Fengping, et al. Widely tunable single-/dual-wavelength fiber lasers with ultra-narrow linewidth and high OSNR using high quality passive subring cavity and novel tuning method[J]. *Optics Express*, 2016, 24(17): 19760-19768.
- [7] Feng Sujuan, Mao Qinghe, Tian Yunyun, 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.
- [8] Feng Ting, Wang Mingming, Wang Xichen, 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.
- [9] Mason S J. Feedback theory-some properties of signal flow graphs[J]. *Proceedings of the IRE*, 1953, 41(9): 1144-1156.
- [10] Gomes A D, Bartelt H, Frazão O. Optical Vernier effect: recent advances and developments[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15: 2000588.
- [11] Gomes A D, Ferreira M S, Bierlich J, et al. Optical harmonic Vernier effect: a new tool for high performance interferometric fiber sensors[J]. *Sensors*, 2019, 19: 5431.
- [12] Yang Fei, Xu Dan, Cai Haiwen, et al. 120° phase difference interference technology based on 3 \times 3 coupler and its application in laser noise measurement[M]//Banishev A A, Bhowmick M, Wang Jue. *Optical Interferometry*. IntechOpen, 2017: 233-249.
- [13] Cheng Dan, Yan Fengping, Feng Ting, et al. Six-wavelength-switchable SLM thulium-doped fiber laser enabled by sampled FBGs and 3 \times 3 coupler based dual-ring compound cavity filter[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14: 1515908.
- [14] Cheng Dan, Yan Fengping, Feng Ting, et al. Five-wavelength-switchable single-longitudinal-mode thulium-doped fiber laser based on a passive cascaded triple-ring cavity filter[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14: 1503608.