

文章编号: 0253-2239(2009)06-1467-04

光栅辅助的光纤谐振环反射特性研究

李卫彬^{1,2} 孙军强¹

(¹华中科技大学光电子科学与工程学院, 武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)
(²河南理工大学物理化学学院, 河南 焦作 454000)

摘要 针对成品相移光栅反射谱中透射窗口位置的不可调谐性,提出了一种由单模光纤谐振环和普通布拉格光栅组成的新型器件。利用信号流程图的方法,详细分析了该器件的工作原理,给出了该器件的反射输出表达式,并推导了该器件的精细度和半峰全宽的表达式,利用 Matlab 进行了数值模拟。结果发现光栅辅助的光纤谐振环的反射谱具有相移光栅反射谱的特点,并且该器件反射谱中透射窗口的深度和位置还具有可调谐性。最后,分析了光纤谐振环参数对该器件反射谱的半峰全宽和精细度的影响,为进一步提高该器件作为窄线宽单频光纤激光器选频元件的性能提供了理论依据。

关键词 光通信; 光栅; 信号流程图; 光纤谐振环

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092906.1467

Reflection Characteristics of Grating-Assisted Fiber Resonator

Li Weibin^{1,2} Sun Junqiang¹

(¹ Wuhan National Laboratory for Opto-Electronics, School of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)
(² School of Physics and Chemistry, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China)

Abstract The transmission window of reflection spectrum for phase-shift grating products is not tunable. To solve this problem, a device with Bragg grating-assisted single-mode fiber resonator is proposed. Using the signal flow graph method, the mechanism of the device is analyzed in detail. Meanwhile, analytical expressions of reflectivity and its finesse, full width at half maximum (FWHM) are derived. Matlab computation results show that reflection spectrum of the proposed device is similar to that of phase-shift grating. Location and depth of transmission window are tunable in its reflection spectrum. Influences on its finesse and FWHM by the parameters of the fiber resonator are also discussed, which provides the theoretical basis for improving its performance as frequency selection element for a narrow line width of single-frequency fiber laser.

Key words optical communication; grating; signal flow graph (SFG); fiber resonator

1 引 言

光纤光栅因其体积小、成本低和插入损耗低等优点在光通信^[1,2]和传感领域中有重要的应用^[3~7]。尤其是光栅中的相移光纤光栅,它能在普通光栅反射谱的阻带中打开一个或多个线宽极窄的透射窗口,实现透射型滤波。而且,还可以根据需要进行相

移量、相移位置、相移点数量以及加入切趾等方式来得到不同线宽、滚降特性的透射峰^[8]。基于这些优良特性,使得相移光栅在窄带滤波、波分复用/解复用、掺铒光纤增益平坦以及单频光纤激光器等领域有着广阔的应用前景^[9~11]。虽然如此,成品的相移光栅不具有可调谐性,在多信道解复用中,需要增

收稿日期: 2008-07-08; 收到修改稿日期: 2008-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(60678020)资助项目。

作者简介: 李卫彬(1975—),男,博士研究生,主要从事光通信中光有源、无源器件方面的研究。

E-mail: lwbliweib@126.com

导师简介: 孙军强(1965—),男,教授,博士生导师,目前主要从事非线性光学、光通信技术以及激光技术与器件方面的研究。E-mail: jqsun@mail.hust.edu.cn

加不同相移光栅的数量,来满足不同的信道要求,这在很大程度上增加了系统的成本和损耗。本文提出了一种由单模光纤谐振环和普通布拉格光栅组成的新型器件,该器件可以在布拉格光栅的反射谱中实现一个或多个线宽极窄的透射窗口,并且还可以通过调节光纤环的长度,来实现反射谱中透射窗口的位置,实现可调谐“相移光栅”的功能。采用信号流程图的方法^[12],对该器件的反射谱进行了模拟,分析了光纤环参数对器件反射谱的细度,信道宽度的影响,为进一步提高该器件的性能提供了理论依据。

2 模型结构分析

目前光纤光学中主要的分析方法包括耦合模方程、傅里叶变换、谐振理论、传输矩阵法、以及信号流程图(SFG)等方法,其中,信号流程图方法是一种广泛应用于微波理论,但很少用于光谱谐振环结构的方法。SFG是控制系统中信号传递和变换关系的一种图解描述,它实质上是描述系统变量间关系的数学方程的图形表示。任何线性的数学方程都可以用信号流程图来表示。利用梅森增益公式^[12]可以直接从信号流程图定出系统的传递函数,在很大程度上减少了繁琐的数学推导,展现出信号传递过程中清晰的因果关系。因此,应用该方法来研究光栅辅助的光纤谐振环滤波器的反射谱特性。

光栅辅助的光纤谐振环的结构如图1所示,它由一个光纤谐振环和一个均匀布拉格光栅组成。当信号光 E_t^1 由输入端口1进入谐振环之后,经过多光束干涉,在3端口输出(E_a^3),随后沿光纤进入布拉格光栅,经过布拉格光栅的反射之后,沿光纤重新由3端口(E_t^3)进入谐振环中,经过多光束干涉,最后由1端口输出(E_a^1)。相应的信号流程图如图2所示,图中 $x = a \cdot j \sqrt{k}$, $y = a \sqrt{1-k}$, $a = \sqrt{1-\gamma_0}$,其中 k 为耦合器的耦合系数, γ_0 为耦合器的损耗。 $t_1 = \exp(-\alpha L_1)$ 表示光纤谐振环的吸收损耗, $t_2 = \exp(-\alpha L_2)$ 表示光栅和耦合器之间光

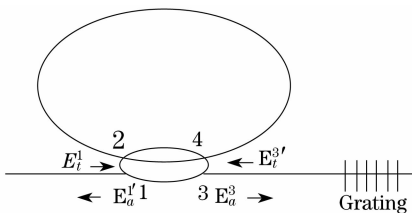


图1 光栅辅助的光纤谐振环的结构图

Fig.1 Configuration of grating-assisted fiber resonator

纤的吸收损耗。 L_1 表示光纤谐振环的长度, L_2 表示光栅到耦合器之间的光纤长度。 β 为光纤中基模的传输常数, r 为布拉格光栅的反射率。 $1'$ 、 $2'$ 、 $3'$ 、 $4'$ 和 $5'$ 分别表示光场由光栅反射之后,由右向左,经历光纤谐振环过程中所途经的各个端口位置。

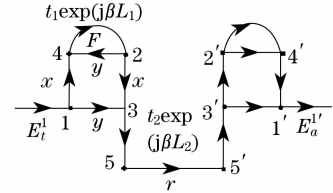


图2 光栅辅助的光纤谐振环的信号流程图

Fig.2 Signal flow chart of grating-assisted fiber resonator

从图2中可以看出,光场从端口1到3和从3'到1'是完全等价的,因此,可以只求出光场从端口1到端口3的传递函数,以及连接光栅和耦合器的光纤贡献,以及光栅的反射贡献,就可以得出整个器件的传递函数。端口1到3的前向路径有两条:一条是 $P_1(1 \rightarrow 3)$,一条是 $P_2(1 \rightarrow 4 \rightarrow F \rightarrow 2 \rightarrow 3)$ 。他们的贡献分别是: y 和 $x^2 t_1 \exp(j\beta L_1)$ 。闭环只有一个 $\Delta_1(2 \rightarrow 4 \rightarrow F \rightarrow 2)$,其贡献为 $yt_1 \exp(j\beta L_1)$ 。根据梅森增益公式,可得 $\frac{E_a^3}{E_t^1}$ 为

$$\frac{E_a^3}{E_t^1} = \frac{P_1 \cdot (1 - \Delta_1) + P_2}{1 - \Delta_1} = \frac{a \sqrt{1-k} - a^2 t_1 \exp(j\beta L_1)}{1 - at_1 \sqrt{1-k} \exp(j\beta L_1)}, \quad (1)$$

此式即为直接耦合的光纤谐振环的振幅输出表达式,当光纤环长度和耦合系数分别满足 $\beta L_1 = 2m\pi$, $k_r = 1 - a^2 t_1^2$ 时,光纤环处于谐振状态。

由上面的分析和(1)式,可以求得整个器件的反射输出振幅和反射系数分别为

$$\begin{aligned} \frac{E_a^1}{E_t^1} &= \frac{E_a^1}{E_t^1} \cdot \frac{E_t^3}{E_a^3} \cdot \frac{E_a^3}{E_t^1} = \frac{E_t^3}{E_a^3} \cdot \left(\frac{E_a^3}{E_t^1} \right)^2 = \\ &= r t_2^2 \cdot \exp(j \cdot 2\beta L_2) \cdot \\ &= \left[\frac{a \sqrt{1-k} - a^2 t_1 \exp(j\beta L_1)}{1 - at_1 \sqrt{1-k} \exp(j\beta L_1)} \right]^2, \quad (2) \\ R_1 &= \left| \frac{E_a^1}{E_t^1} \right|^2 = R_2^2 \cdot \\ &= \left\{ \frac{a^2 [1 - k + a^2 t_1^2 - 2at_1 \sqrt{1-k} \cdot \cos(\beta L_1)]}{1 + a^2 t_1^2 \cdot (1 - k) - 2at_1 \sqrt{1-k} \cdot \cos(\beta L_1)} \right\}^2, \quad (3) \end{aligned}$$

其中 $R = |r|^2$, $r = \frac{k_g \sinh^2(\sqrt{k_g^2 - \sigma^2} L_g)}{k_g \cosh^2(\sqrt{k_g^2 - \sigma^2} L_g) - \sigma^2}$ 分

别为布拉格光栅的反射系数和反射率。 $k_g, \hat{\sigma}$ 表示光栅的“交流”和“直流”耦合系数, L_g 为光栅的长度。从(3)式可以看出光栅辅助的光纤谐振环的反射性质同耦合器的损耗, 耦合系数, 光纤长度以及光栅的反射系数有关, 下面就讨论这些参数对光栅辅助的光纤谐振环反射谱的影响。

3 光栅辅助的光纤谐振环反射谱性质

取布拉格波长 $\lambda_D = 1550$ nm, 光栅长度 L_g 为 1 cm, 有效折射率 $n_{\text{eff}} = 1.45$, 光栅折变 $\Delta n = 1 \times 10^{-4}$, 耦合器损耗 $\gamma_0 = 0.1\%$, 光纤损耗 $\alpha = 1$ dB/km, 光纤长度 $L_2 = 1$ m, 利用(3)式对光纤环反射端进行仿真分析, 结果如图 3 所示。其中图 3(a)中的 $L_1 = 1$ mm, 图 3(b)中的 $L_1 = 2$ cm。

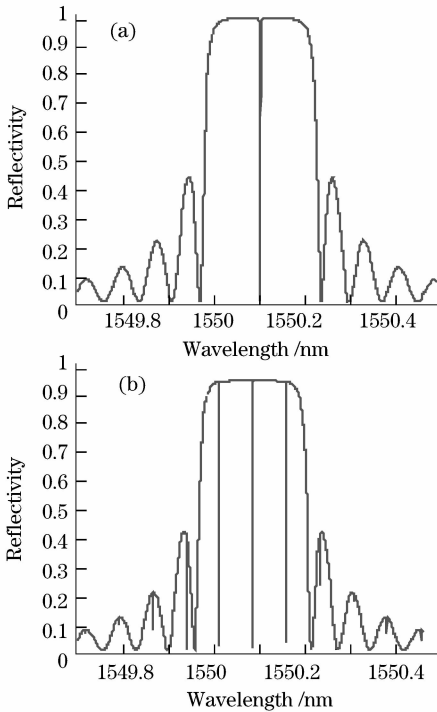


图 3 光栅辅助的光纤谐振环在不同环长时的反射谱。(a) 1 mm; (b) 2 cm

Fig. 3 Reflectivity of grating-assisted fiber resonator for different ring lengths (a) 1 mm and (b) 2 cm

从图中可以看出, 一个原本单一的、较宽的光纤光栅反射谱中间出现了一个或者多个窄通带光谱, 获得了一种梳状滤波效果。器件的反射谱形状完全类似相移光栅的反射谱。图 3(a)相当于在相移光栅中加入了一个 $\pi/2$ 的相移量; 图 3(b)相当于在相移光栅中加入了 $\pi/4, \pi/2, 3\pi/4$ 三个不同的相移量。相移光栅反射谱中透射窗口是由于光场在光栅中传播的时候, 遇到相移突变产生的。其透射窗口的位置和深度由光栅中

加入的相移量、相移量的位置以及个数决定的。本文器件反射谱中的透射窗口是由于光场在光纤环中传播时, 在输出端口发生多光束干涉, 引起附加的相位产生的。由于谐振环输出谱的宽度和深度同耦合器的耦合系数、光纤的参数有关, 其自由谱宽和环长度成反比, 因此可以通过调节这些参数, 来调节光栅反射谱中透射窗口的位置和深度, 如图 3(b)所示。

4 精细度和半峰全宽特性

由(2)式, 当环长度满足 $\beta L_1 = (2m+1)\pi$, 耦合系数满足 $k_r = 1 - a^2 t_1^2$ 时, 该器件有最大值 $R'_{1\text{max}} = 16Rt_1^2 \frac{a^4(1-k_r)^2}{(2-k_r)^4}$ 。由 $R'_1 = \frac{1}{2}R'_{1\text{max}}$, 可以得出该器件反射谱的半峰全宽(FWHM, Δf)和精细度(Finesse, F)分别为

$$\Delta f = \frac{c}{n_{\text{eff}} L_1} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \arccos A, \quad (4)$$

$$F = \left(\frac{1}{\pi} \cdot \arccos A \right)^{-1}, \quad (5)$$

其中 c 为光在真空中的速度, $A = \frac{\sqrt{2} + \sqrt{2}(1-k_r)^2 - (2-k_r)^2}{2\sqrt{2}(1-k_r) - (2-k_r)^2}$ 。由(4)、(5)两式可以

看出该器件的半峰全宽和谱线精细度同光纤谐振环耦合器的耦合系数密切相关。图 4 是根据(4)式画出的器件的半峰全宽随共振耦合系数变化的曲线图, 其中 $\frac{c}{n_{\text{eff}} L_1}$ 取为 2 GHz。图中可以看出, 随着耦合系数的增加, 谱线的半峰全宽变大。在光纤谐振环处于共振状态的时候, 由于耦合系数 $k_r = 1 - a^2 t_1^2$ 很小, 一般不会超过 0.05^[13]。因此从图 4 可以看出, 带光栅的光纤谐振环的半峰全宽只有几十兆赫兹, 完全适用于分布反馈(DFB)半导体激光的窄带滤波。图 5 是根据(5)式计算的器件的精细度随共振耦合系

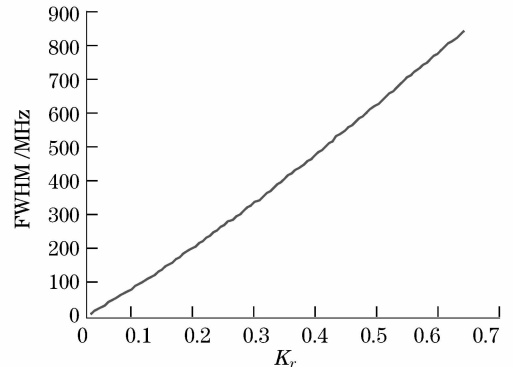


图 4 耦合系数对半峰全宽的影响

Fig. 4 Influence of coupling coefficient on FWHM

数变化的曲线图。从图中可以看出,器件的精细度随 k_r 的增加迅速的减小。当 k_r 小于 0.05 的时候,光栅辅助的光纤谐振环的精细度能达到 50 以上。

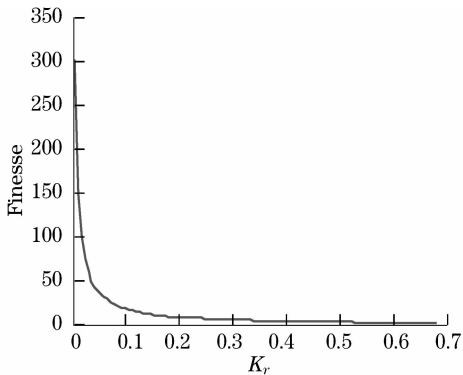


图 5 耦合系数对精细度的影响

Fig.5 Influence of coupling coefficient on finesse

5 结 论

针对成品相移光栅反射谱中透射窗口位置的不可调谐性,提出了一种均匀光栅辅助的光纤谐振环结构。利用信号流程图的方法,得到了该器件的反射输出表达式。经过模拟计算该器件的反射谱,发现其反射谱具有相移光栅反射谱的特点。该器件反射谱中透射窗口的产生机制和相移光栅是不同的,相移光栅是光场在光栅中传播的时候,遇到相位突变产生的,其透射窗口的位置和深度与加入光栅中相移量大小、位置以及个数有关。光栅辅助的光纤谐振环反射谱中的透射窗口是由于光场在光纤谐振环中传播时,发生多光束干涉,产生附加的相位产生的。光纤谐振环的自由谱宽和信道宽度分别与光纤长度,耦合器耦合系数有关。调节这些参数,可以引起谐振环中光束干涉的相位变化,从而可以改变均匀光栅反射谱中透射窗口的位置和深度。最后,分析了耦合系数对该器件的半峰全宽和精细度的影响,在谐振环共振状态下,该器件的半峰全宽在几十兆赫兹的量级上,精细度可以达到 50 以上,可用于窄线宽单频光纤激光器的选频元件。

参 考 文 献

- Zhu Yingxun, Wang Rong, Chen Peng *et al.*. Orthogonal quaternary phase OCDMA En/Decoder based on super structured fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4):653~658
- 朱英勋,王 荣,陈 鹏 等. 基于超结构光纤光栅的正交四相光码分址编/解码器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4):653~658
- Chen Xiaogang, Huang Dexiu, Yuan Xiuhua *et al.*. Wavelength division multiplexing /optical code division multiplexing system based on supercontinuum and superstructured fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1):77~81
- 陈小刚,黄德修,元秀华 等. 基于超连续谱和超结构光纤光栅的波分复用/光码复用系统[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1):77~81
- Zhang Jinlong, Yu Chongxiu, Wang Kuiru *et al.*. Displacement sensor with temperature compensation based on chirp fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4):779~782
- 张锦龙,余重秀,王葵如 等. 基于啁啾光纤光栅的温度自补偿位移传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4):779~782
- Yang Jian, Zhao Yong, Ni Xingjie. Development of novel fiber Bragg grating underwater acoustic sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **27**(9):1575~1579
- 杨 剑,赵 勇,倪行洁. 新型光纤光栅水声传感器的研究[J]. *光学学报*, 2008, **27**(9):1575~1579
- Wentao Zhang, Lihui Liu, Fang Li *et al.*. Fiber Bragg grating pressure sensor with enhanced sensitivity[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(9):507~508
- Xiaoyan Yang, Deming Liu. Sensitivity enhancement of surface Plasmon resonance sensors through planar metallic film closely coupled to nanogratings[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(10):563~565
- Xiao Hao, Li Fang, Wang Yongjie *et al.*. High-resolution fiber laser sensor system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1):87~91
- 肖 浩,李 芳,王永杰 等. 高分辨率光纤激光传感系统[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1):87~91
- Lu Shaohua, Xu Ou, Dong Xiaowei *et al.*. Analysis for the reflective spectrum characteristics of chirped phase-shifted fiber gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4):577~581
- 鲁韶华,许 鸥,董小伟 等. 啁啾相移光纤光栅的反射谱特性 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(4):577~581
- Y. T. Dai, X. F. Chen, X. M. Xu *et al.*. High channel-count comb filter based on chirped sampled fiber Bragg grating and phase shift[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(5):1040~1042
- J Sun, Y. T. Dai, Y. J. Zhang *et al.*. Dual-Wavelength DFB fiber laser based on unequalized phase shifts [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(23):2493~2495
- G. P. Agrawal, S. Radic. Phase-shifted fiber Bragg gratings and their application for wavelength demultiplexing [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(8):995~997
- S. J. Mason. Feedback theory-further properties of signal flow graphs[J]. *Proc. IRE*, 1956, **44**:920~926
- F. Zhang, J. W. Y. Lit. Direct-coupling single-mode fiber ring resonator[J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1988, **5**(8):1347~1355