

耦合谐振器光波导旋转传感的相位灵敏度*

田赫^{1)†} 孙伟民¹⁾ 掌蕴东²⁾

1) (哈尔滨工程大学理学院, 纤维集成光学教育部重点实验室, 哈尔滨 150001)

2) (哈尔滨工业大学光电子技术研究所与可调谐激光技术国家级重点实验室, 哈尔滨 150080)

(2013年3月24日收到; 2013年6月20日收到修改稿)

利用光学谐振器结构的色散可提高旋转传感的灵敏度, 耦合谐振器光波导可实现强色散, 本文利用传输矩阵理论, 研究耦合谐振器光波导旋转传感的相位灵敏度, 讨论谐振器布局和波导参数对相位灵敏度的影响, 结果表明波导的相位曲线和相位灵敏度依赖于波导中谐振器的布局, 谐振器数量和耦合系数不仅会影响波导旋转传感相位灵敏度曲线峰值的数量和带宽, 还会影响相位灵敏度的大小, 而损耗会降低波导的相位灵敏度, 本文的结果可用于利用谐振器布局和波导参数设计耦合谐振器光波导的相位灵敏度, 对其在旋转传感方面的应用有重要意义.

关键词: 谐振器, 旋转传感, 光波导

PACS: 42.60.Da, 42.81.Pa, 42.79.Gn

DOI: 10.7498/aps.62.194204

1 引言

旋转传感器可实现旋转速度或角度的测量, 在军事和国民经济各个领域有着广泛的应用, 如卫星、航天飞机、汽车、甚至手机等的定位及遥感系统, 随着这些领域相关技术的迅速发展, 对旋转传感器灵敏度的要求也越来越高. 近年来, 利用光学谐振器结构进行旋转传感、提高旋转传感灵敏度受到越来越多的关注^[1-6], 其原理是: 利用旋转改变谐振器结构的色散关系, 对在结构中两相向传输的光波, 会产生依赖于旋转速度的相位差, 相位差的大小取决于结构色散的强弱^[2,7,8], 简言之, 就是通过结构的色散, 将旋转引起的谐振器内光相位变化量放大为结构输出光相位变化量, 相位变化量放大的倍数即为相位灵敏度. 由于光学谐振器结构中容易获得强色散, 且随着光波导技术的发展, 结构的集成化程度越来越高, 因此, 利用光学谐振器结构有可能实现高灵敏度或小型化的旋转传感器. 随后, 我们首次在实验上利用谐振器结构提高了旋转传感灵敏度^[8,9].

耦合谐振器光波导由多个光学谐振器依次排

列、相邻谐振器相互耦合构成^[10], 其显著特点是, 可形成很强的色散^[11-13], Scheuer 等人首先研究了耦合谐振器光波导中的 Sagnac 效应^[14], 获得了灵敏度的表达式. 但由于耦合谐振器光波导中相位灵敏度的提高是基于波导的色散, 且旋转具有特定的方向, 对波导中两相向传输光波色散关系的影响是不同的, 导致波导旋转传感的相位灵敏度必然强烈依赖于谐振器的布局, 而谐振器的布局对波导旋转传感相位灵敏度的影响并没有被研究; 同时, 实际的耦合谐振器光波导是由有限的谐振器相互耦合构成, 其色散由各个谐振器参数及相互耦合情况决定, 特别要考虑到旋转传感是一个动态的过程, 因此, 旋转传感过程中, 波导参数如谐振器数量、耦合系数、损耗等对波导旋转传感相位灵敏度的影响也有待研究. 本文利用传输矩阵理论, 研究耦合谐振器光波导旋转传感的相位灵敏度, 讨论谐振器布局和波导参数对波导旋转传感相位灵敏度的影响.

2 旋转传感模型

耦合谐振器光波导旋转传感的基本框架如图 1

* 国家自然科学基金(批准号: 61307076, 11078009, 61078006, 61275066)、教育部 111 引智基地项目(批准号: B13015)、黑龙江省博士后资助经费(批准号: LBH-Z12060)和中国科学院天文光学技术重点实验室开放课题基金资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: tianhe176176@163.com

所示,波导由 N (N 为奇数) 个谐振器构成, a_1, b_1, a'_1, b'_1 等为光场振幅。

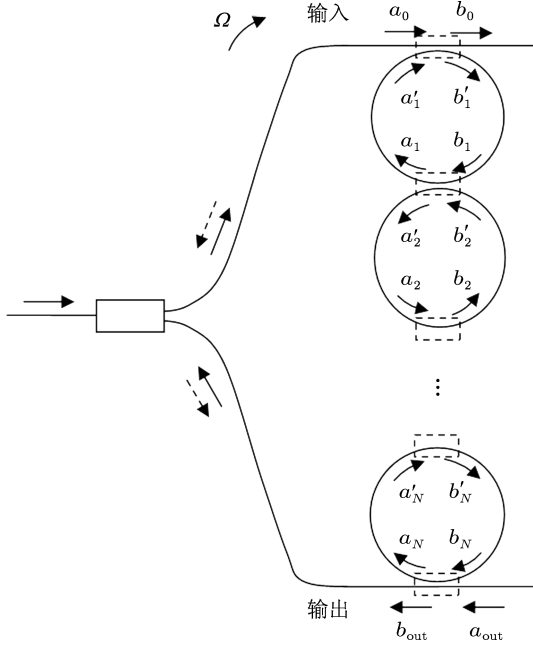


图1 耦合谐振器光波导旋转传感基本框架

谐振器与输入/输出波导间光场的耦合(令耦合条件相同)、相邻两谐振器间光场的耦合可分别描述为^[15,16]

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} a'_1 \\ b'_1 \end{bmatrix} &= \frac{1}{ik_i} \begin{bmatrix} -t_i & 1 \\ -k_i^2 - t_i^2 & t_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \end{bmatrix} \\ &= C_i \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} a_{out} \\ b_{out} \end{bmatrix} = C_i \begin{bmatrix} a_N \\ b_N \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} a'_{n+1} \\ b'_{n+1} \end{bmatrix} &= \frac{1}{ik} \begin{bmatrix} -t & 1 \\ -k^2 - t^2 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_n \\ b_n \end{bmatrix} \\ &= C \begin{bmatrix} a_n \\ b_n \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中, k_i, k 为振幅耦合系数, t_i, t 为振幅透射系数, 满足 $k_i^2 + t_i^2 = 1, k^2 + t^2 = 1, n = 1, 2, \dots, N-1$ 。

静止时,光波在谐振器内的传输可描述为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} a_n \\ b_n \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & \alpha \exp(i\varphi/2) \\ \frac{1}{\alpha} \exp(-i\varphi/2) & 0 \end{bmatrix} \\ &\times \begin{bmatrix} a'_n \\ b'_n \end{bmatrix} = Q \begin{bmatrix} a'_n \\ b'_n \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\varphi = \omega n_c L/c$, ω 为光波角频率, n_c 为介质的有效折射率, L 为谐振器长度, c 为真空中光速, α 为光波在谐振器内传输 $L/2$ 时的损耗。

对于在图1中顺时针(实线所示,与旋转速度方向相同)和逆时针(虚线所示,与旋转速度方向相反)传输的光波,二者在耦合谐振器光波导中传输过程相同,可用透射矩阵 M 描述:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} a_{out} \\ b_{out} \end{bmatrix} &= C_i Q (CQ)^{N-1} C_i \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \end{bmatrix} \\ &= M \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (5)$$

因此,由上式可得静止时顺、逆时针传输光波的透射系数与相位分别为

$$T = \frac{b_{out}}{a_0}, \quad (6)$$

$$\Phi = \arg(T), \quad (7)$$

耦合谐振器光波导旋转时,引起的谐振器内光波相位变化为^[17]

$$\varphi_\Omega = \Gamma \frac{2\omega A}{c^2} \Omega, \quad (8)$$

其中, Ω 为旋转角速率, A 为谐振器所包围的面积, Γ 为匝数。

当第 n 个谐振器内光波传输方向与旋转方向相同时,光波的传输可描述为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} a_n \\ b_n \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & \alpha \exp(i\varphi_{cw}/2) \\ \frac{1}{\alpha} \exp(-i\varphi_{cw}/2) & 0 \end{bmatrix} \\ &\times \begin{bmatrix} a'_n \\ b'_n \end{bmatrix} = Q_{cw} \begin{bmatrix} a'_n \\ b'_n \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $\varphi_{cw} = \varphi + \varphi_\Omega$ 。

同理,当谐振器内光波传输方向与旋转方向相反时,光波的传输可描述为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} a_n \\ b_n \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & \alpha \exp(i\varphi_{ccw}/2) \\ \frac{1}{\alpha} \exp(-i\varphi_{ccw}/2) & 0 \end{bmatrix} \\ &\times \begin{bmatrix} a'_n \\ b'_n \end{bmatrix} = Q_{ccw} \begin{bmatrix} a'_n \\ b'_n \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $\varphi_{ccw} = \varphi - \varphi_\Omega$ 。

因此,旋转时耦合谐振器光波导中顺、逆时针传输光波的透射矩阵分别为 M_{cw}, M_{ccw} :

$$M_{cw} = C_i Q_{cw} (CQ_{ccw} CQ_{cw})^{(N-1)/2} C_i, \quad (11)$$

$$M_{ccw} = C_i Q_{ccw} (CQ_{cw} CQ_{ccw})^{(N-1)/2} C_i, \quad (12)$$

透射系数 T_{cw} , T_{ccw} 与相位 Φ_{cw} , Φ_{ccw} 分别仿照 (6), (7) 两式容易得出.

由 (11), (12) 式可知, 由于旋转具有特定的方向, 因此旋转对耦合谐振器光波导中两相向传输光波的影响不同, 光波的色散关系和 Sagnac 效应 (由相位 Φ_{cw} , Φ_{ccw} 体现) 依赖于谐振器的布局. 对于任一束光波, 在波导中传输时, 在某些谐振器中传输方向与旋转方向相同, 而在其余谐振器中传输方向与旋转方向相反, 这样, 光波的色散关系和 Sagnac 效应相对复杂, 甚至会减弱波导的色散和 Sagnac 效应. 相反地, 如果改变波导中谐振器的布局, 使任一束光波在所有谐振器中传输方向相同, 则有可能增强波导的色散和 Sagnac 效应.

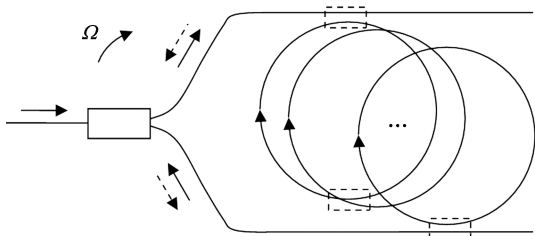


图 2 谐振器层叠的耦合谐振器光波导旋转传感基本框架

如图 2 所示的耦合谐振器光波导, 在谐振器耦合处将谐振器反转, 使谐振器实现层叠, 采用光纤构造环形谐振器容易实现, 这样, 可使任一束光波在所有谐振器中传输方向相同, 此时, 顺、逆时针传输光波的透射矩阵分别变为

$$M_{cw} = C_i Q_{cw} (C Q_{cw})^{N-1} C_i, \quad (13)$$

$$M_{ccw} = C_i Q_{ccw} (C Q_{ccw})^{N-1} C_i. \quad (14)$$

可定义旋转传感相位灵敏度为

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta\varphi_\Omega} = \frac{|\Phi_{cw} - \Phi_{ccw}|}{2\varphi_\Omega}, \quad (15)$$

因此, $\Delta\Phi$ 越大, 旋转传感相位灵敏度越高.

3 数值计算结果及讨论

图 1 所示的耦合谐振器光波导, 由三个、五个谐振器构成时, 顺逆时针传输两光波的相位、旋转传感的相位灵敏度结果如图 3 所示, 波导参数为: $n_c = 1.5$, $L = 5$ m, $M = 16$, $\Omega = 2\pi$ rad/s, $k_i = 0.1$, $\alpha = 1$. 可见, 谐振器数量及耦合系数对相位及相位灵敏度影响较大, 谐振器数量越多, 相位变化较强位置 (强色散区) 越多, 相应地相位灵敏度峰值也就越多; 而耦合系数主要决定波导的色散带宽及强色散区间的多少, 在这种波导结构中, 旋转对相位曲

线形状的影响没有明显规律, 由图 3(a) 和 (c) 可见, 旋转时, 顺逆时针传输两光波相位曲线相互交叉, 且曲线重叠部分较多, 导致相位灵敏度较小, 特别当谐振器数量较多时, 相位灵敏度曲线存在较多峰值, 但曲线中部的峰值较大, 相位灵敏度较高.

图 2 所示的耦合谐振器光波导, 由三个、五个谐振器构成时, 顺逆时针传输两光波的相位、旋转传感的相位灵敏度结果如图 4 所示, 波导参数不变. 可见, 谐振器数量越多, 相位灵敏度峰值越多, 耦合系数仍决定波导的色散带宽及强色散区间的多少, 但在这种层叠式的耦合谐振器光波导中, 旋转对相位曲线的影响具有明显的规律, 仅使相位曲线产生平移, 曲线形状没有任何变化, 因此, 相位灵敏度曲线比较简单, 峰值数与强色散区间数量相同, 当相位灵敏度曲线存在多个峰值时, 中部的峰值还会小于其他峰值.

耦合谐振器光波导中, 损耗的存在不利于相位灵敏度的提高, 因为损耗可削弱相干效应, 降低波导的色散强度. 图 1 和图 2 所示的耦合谐振器光波导, 由三个谐振器构成时, 损耗对旋转传感的相位灵敏度的影响如图 5 所示, 波导参数为: $n_c = 1.5$, $L = 5$ m, $M = 16$, $\Omega = 2\pi$ rad/s, $k_i = 0.1$, $k = 0.9$. 图 5 中, 随着损耗的增加, 相位灵敏度逐渐下降, 同时, 为明显地表明损耗对相位灵敏度带宽的影响, 选取波导的参数使相位灵敏度曲线只有一个峰值, 因此, 在图 5 中可看出, 相位灵敏度带宽随损耗的增加而增大.

由以上结果可知, 由于旋转具有特定的方向, 对波导中顺逆时针传输两光波色散关系的影响不同, 在如图 1 所示的波导中, 顺逆时针传输两光波在任意相邻的谐振器中均经历不同的传输过程, 因此, 旋转使两光波的相位曲线变化相对复杂, 且相位灵敏度较小, 而在如图 2 所示的波导中, 顺逆时针传输两光波在谐振器中分别经历相同的传输过程, 这样旋转仅使两光波的相位曲线平移, 曲线形状没有任何变化, 且相位灵敏度相对较大. 波导参数对相位灵敏度峰值带宽的影响可基于波导的色散带宽进行进一步的分析, 波导的色散带宽近似为 $2\text{FSR} \sin^{-1}[k/(1-\alpha)]/\pi$ (其中 $\text{FSR} = c/n_c L$)^[16], 损耗越大, 波导的色散带宽越大, 而损耗不会改变旋转时相位灵敏度曲线峰值数量, 因此, 相位灵敏度曲线峰值的带宽也会相应地增大; 而谐振器数量的增大, 会增加相位灵敏度曲线峰值数量, 相应地会减小相位灵敏度曲线各峰值的带宽.

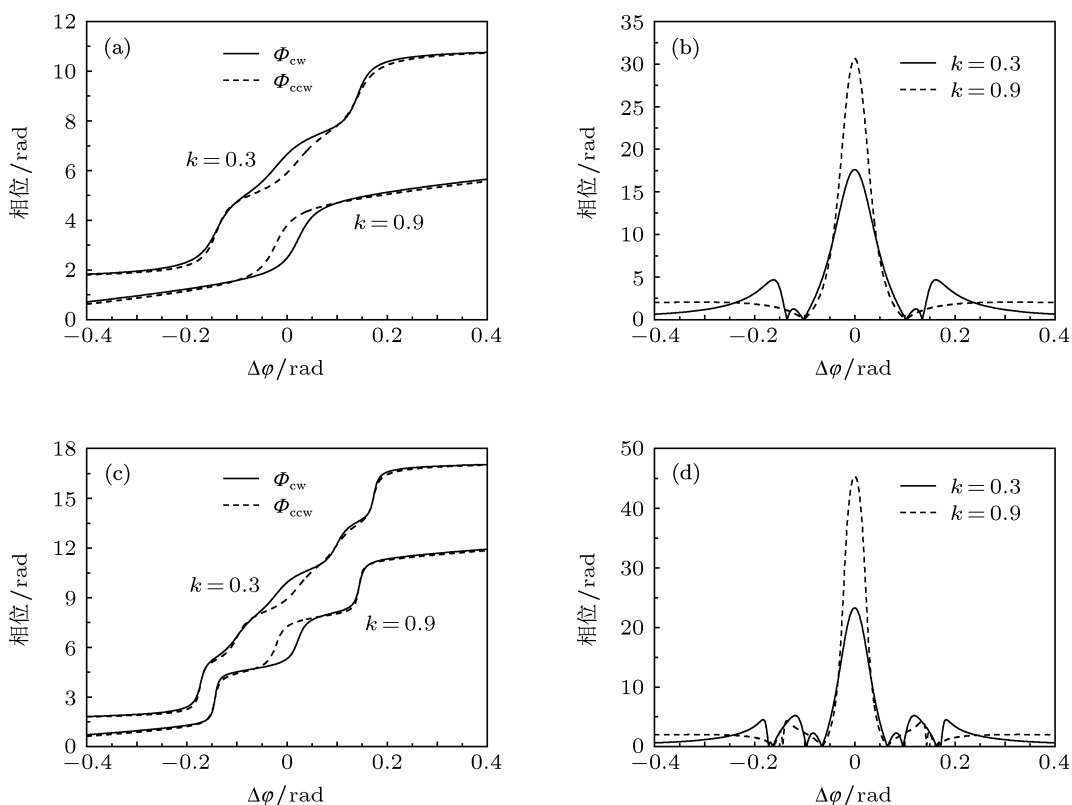


图3 图1所示波导结构,由三个谐振器构成时 (a) 顺时针传输两光波的相位和 (b) 相位灵敏度;由五个谐振器构成时 (c) 顺时针传输两光波的相位和 (d) 相位灵敏度

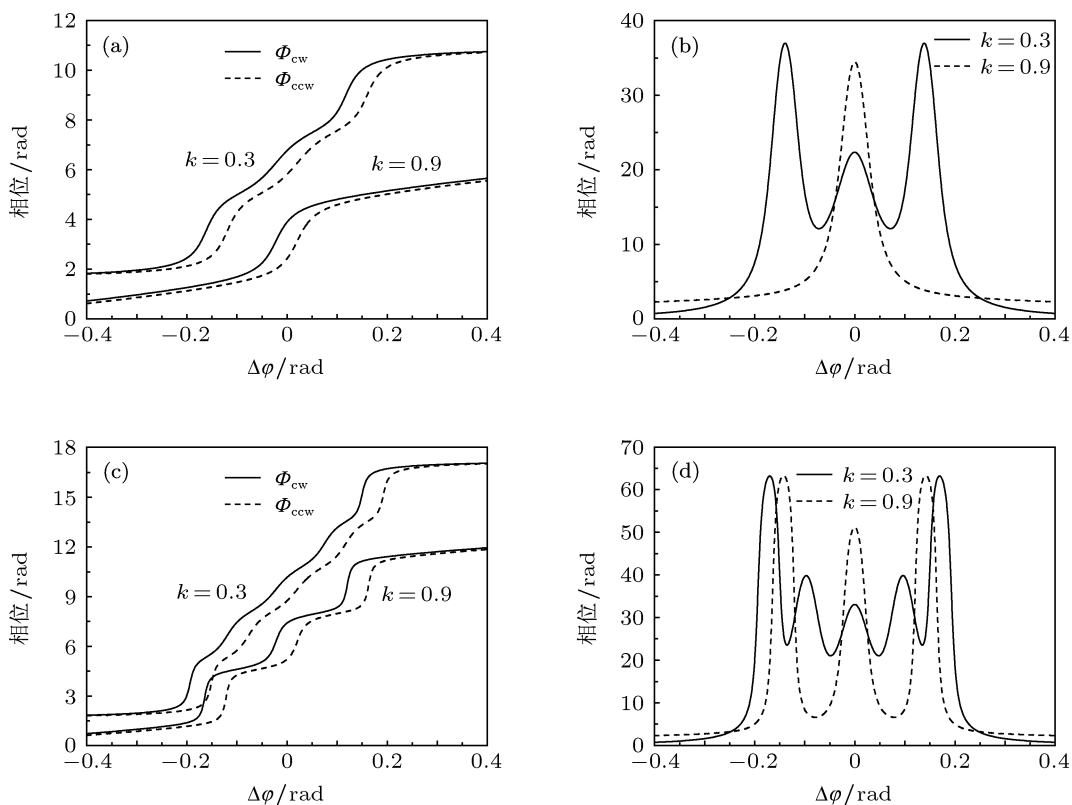


图4 图2所示波导结构,由三个谐振器构成时 (a) 顺时针传输两光波的相位和 (b) 相位灵敏度;由五个谐振器构成时 (c) 顺时针传输两光波的相位和 (d) 相位灵敏度

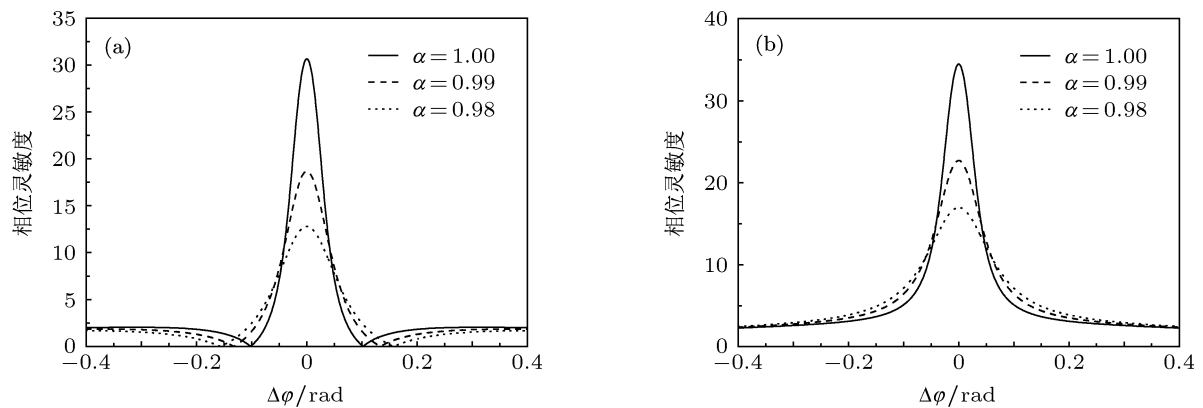


图5 (a) 图1所示的耦合谐振器光波导和(b)图2所示的耦合谐振器光波导,由三个谐振器构成时,损耗对旋转传感相位灵敏度的影响

4 结论

由本文的结果可知,由于旋转具有特定的方向,对波导中两相向传输光波相位曲线的影响不同,相位曲线和相位灵敏度依赖于波导中谐振器的布局,在如图1所示的波导中,旋转使两光波的相位曲线变化相对复杂,相位灵敏度较小,而在如图2所示的波导中,旋转仅使两光波的相位曲线平移,不改变相位曲线形状,易于设计相位曲线和相位灵敏度,且相位灵敏度较大.同时,相位曲线形状和相位

灵敏度主要由波导参数如谐振器数量、耦合系数、损耗等决定,谐振器数量越多,强色散区间和相位灵敏度峰值越多,但相位灵敏度曲线峰值的带宽越小,耦合系数决定了波导的色散带宽,也影响相位灵敏度峰值的数量,损耗会降低相位灵敏度,但会增大相位灵敏度曲线峰值的带宽.在实际应用中,可依据所要获得的相位灵敏度提高倍数、相位灵敏度峰值分布、激光波长及线宽等,合理选择波导谐振器布局、波导参数,以满足应用需求.

- [1] Matsko A B, Savchenkov A A, Ilchenko V S, Maleki L 2006 *Opt. Commun.* **259** 393
- [2] Steinberg B Z 2005 *Phys. Rev. E* **71** 056621
- [3] Steinberg B Z, Scheuer J, Boag A 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 1216
- [4] Peng C, Li Z B, Xu A S 2007 *Appl. Opt.* **46** 4125
- [5] Yan L, Xiao Z S, Guo X Q, Huang A P 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 141104
- [6] Zhang Y D, Wang N, Tian H, Wang H, Qiu W, Wang J F, Yuan P 2008 *Phys. Lett. A* **372** 5848
- [7] Zhang X N, Zhang Y D, Tian H, Wu H, Li G, Zhu R D, Yuan P 2011 *Phys. Rev. A* **84** 063823
- [8] Zhang Y D, Tian H, Zhang X N, Wang N, Zhang J, Wu H, Yuan P 2010 *Opt. Lett.* **35** 691
- [9] Tian H, Zhang Y D, Zhang X N, Wu H, Yuan P 2011 *Opt. Express* **19**

9185

- [10] Yariv A, Xu Y, Lee R K, Scherer A 1999 *Opt. Lett.* **24** 711
- [11] Poon J K S, Scheuer J, Xu Y, Yariv A 2004 *J. Opt. Soc. Am. B* **21** 1665
- [12] Mookherjee S 2006 *Opt. Lett.* **30** 2406
- [13] Poon J K S, Zhu L, Derosé G A 2006 *Opt. Lett.* **31** 456
- [14] Scheuer J, Yariv A 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 53901
- [15] Tian H, Zhang Y D, Wang H, Qiu W, Wang N, Yuan P 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6400 (in Chinese) [田赫, 掌蕴东, 王号, 邱薇, 王楠, 袁萍 2008 物理学报 **57** 6400]
- [16] Tian H, Zhang Y D, Wang H, Qiu W, Wang N, Yuan P 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7012 (in Chinese) [田赫, 掌蕴东, 王号, 邱薇, 王楠, 袁萍 2008 物理学报 **57** 7012]
- [17] Post E J 1967 *Rev. Mod. Phys.* **39** 475

Phase sensitivity of rotation sensing in coupled resonator waveguides*

Tian He^{1)†} Sun Wei-Min¹⁾ Zhang Yun-Dong²⁾

1) (Key Lab of In-fiber Integrated Optics, Ministry Education of China, Science of College, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

2) (Institute of Opto-Electronics and National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

(Received 24 March 2013; revised manuscript received 20 June 2013)

Abstract

The dispersion of optical resonator structures can be used to increase the sensitivity of rotation sensing. Using coupled resonator waveguides can realize strong dispersion. In this paper, the transfer matrix method is used to analyze the phase sensitivity of rotation sensing in coupled resonator waveguides, and investigate the influences of resonator arrangement and waveguide parameters on the phase sensitivity. Results show that phase curves and phase sensitivity are dependent on resonator arrangement. The number of resonator and coupling coefficients can influence not only the number and bandwidths of peaks for phase sensitivity of rotation sensing but also the variation of phase sensitivity. However, loss can reduce the phase sensitivity. The results can be used to design the phase sensitivity of coupled resonator waveguides using the resonator arrangement and waveguide parameters, and are beneficial for applications of coupled resonator waveguides in rotation sensing.

Keywords: resonator, rotation sensing, optical waveguide

PACS: 42.60.Da, 42.81.Pa, 42.79.Gn

DOI: 10.7498/aps.62.194204

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61307076, 11078009, 61078006, 61275066), the 111 project to the Harbin Engineering University, China (Grant No. B13015), the Heilongjiang Postdoctoral Fund, China (Grant No. LBH-Z12060), and the Opening Project of Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences.

† Corresponding author. E-mail: tianhe176176@163.com