

平面环形谐振腔微光学陀螺结构设计与优化

刘俊 张天恩 张伟 雷龙海 薛晨阳 张文栋 唐军

Design and optimization of integrated micro optical gyroscope based on a planar ring resonator

Liu Jun Zhang Tian-En Zhang Wei Lei Long-Hai Xue Chen-Yang Zhang Wen-Dong Tang Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 107802 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.107802

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.107802>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I10>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

晶圆键合和激光剥离工艺对 GaN 基垂直结构发光二极管芯片残余应力的影响

Effect of wafer bonding and laser liftoff process on residual stress of GaN-based vertical light emitting diode chips

物理学报.2015, 64(2): 028501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.028501>

光致电化学法提高垂直结构发光二极管出光效率的研究

Increase in light extraction efficiency of vertical light emitting diodes by a photo-electro-chemical etching method

物理学报.2015, 64(1): 018501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.018501>

无序光子晶体提高 GaN 基蓝光发光二极管光提取效率的研究

Improvement of light extraction efficiency of GaN-based blue light-emitting diode by disorder photonic crystal

物理学报.2013, 62(1): 017805 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.017805>

分子束外延生长 InGaN/AlN 量子点的组分研究

Studies on the composition of InGaN/AlN quantum dots grown by molecular beam epitaxy

物理学报.2012, 61(23): 237804 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.237804>

基于缺陷光子晶体结构的 GaN 基发光二极管光提取效率的有关研究

Study on the light extraction efficiency of GaN-based light emitting diode by using the defects of the photonic crystals

物理学报.2012, 61(20): 208502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.208502>

# 平面环形谐振腔微光学陀螺结构与优化\*

刘俊 张天恩 张伟 雷龙海 薛晨阳 张文栋 唐军†

(中北大学, 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 电子测试技术重点实验室, 太原 030051)

(2014年11月25日收到; 2015年1月26日收到修改稿)

提出具有高群有效折射率的双环级联作为核心元件的谐振式平面光波导陀螺结构, 基于光学 Sagnac 原理得到了双微环耦合谐振式光学陀螺理论灵敏度与群有效折射率的一般表达式和双环与单环陀螺系统的灵敏度关系, 并由耦合模理论方法得到了双环系统耦合器的两个透射系数对应的群有效折射率变化情况. 在环腔半径  $R_1 = R_2 = 100 \mu\text{m}$ 、环腔传输损耗系数  $t_1 = t_2 = 0.95$  的情况下, 针对环与环之间耦合器和环与波导之间耦合器透射系数对群有效折射率的不同影响, 得到了最大群有效折射率的产生条件. 采用文中参数 ( $R = 100 \mu\text{m}$ ,  $t = 0.95$ ) 计算的单环谐振式陀螺灵敏度为  $(10^4\text{—}10^5)^\circ/\text{h}$ , 而双环级联谐振系统理论灵敏度能够达到  $10^\circ/\text{h}$ . 该研究对微环耦合谐振腔在角速度检测上的应用有重要的意义.

**关键词:** 谐振式光学陀螺, 群有效折射率, 双环耦合, 透射系数

**PACS:** 78.20.-e, 42.81.Pa, 42.87.-d

**DOI:** 10.7498/aps.64.107802

## 1 引言

随着集成光学技术和微纳加工技术的发展, 以微谐振腔为核心单元的谐振式微光学陀螺相比光纤陀螺和激光陀螺具有小型化、微型化的特点, 越来越受到人们的关注<sup>[1-3]</sup>. 目前, 能够应用于谐振式光学陀螺的光学微谐振腔主要有球形微谐振腔<sup>[4]</sup>、盘形微谐振腔<sup>[5]</sup>和平面环形谐振腔<sup>[6]</sup>, 平面环形谐振腔是在前两者的基础上发展而来的, 其加工受机电系统批量制造支持, 并且在平面集成化方面具有明显的优势<sup>[7,8]</sup>. 作为谐振式光学陀螺的核心单元, 谐振腔的性能直接影响着光学陀螺的系统性能, 根据 Sagnac 角速度检测原理, 谐振式光学陀螺所要实现的灵敏度主要取决于谐振腔的尺寸和品质因数  $Q$  值<sup>[9,10]</sup>. 而为了满足微纳集成系统对小型化光学陀螺器件的需求, 光学谐振腔这一核心器件的尺寸受到限制, 不能做大. 因此, 要提高陀螺精度和灵敏度, 实现高  $Q$  值的光学微谐振腔是

必经之路. 目前有报道的直径  $9 \mu\text{m}$  环形谐振腔最高  $Q$  值达到  $9.2 \times 10^5$ <sup>[11]</sup>, 其理论灵敏度为  $10^4^\circ/\text{h}$ , 这远远不能满足工程化需要. 因此, 目前通过不断提高平面环形谐振腔品质因数和增加直径来提升陀螺性能的空间非常有限.

Scheuer 和 Yariv<sup>[12]</sup> 提出了多环耦合的包层光波导谐振腔结构, 提出通过增加微环的数量来提高陀螺的旋转灵敏度, 并在理论上分析了多环结构应用于光学陀螺的可行性. 2012 年, Christopher 等<sup>[13]</sup> 利用 21—100 个直径  $50 \mu\text{m}$  的微环谐振腔之间的相互耦合设计了一种新型集成光波导陀螺结构, 通过周期性微环间耦合系数调控, 理论分析该种结构旋转灵敏度可以达到  $0.001^\circ/\text{h}$ , 并指出随着环的个数增多, 灵敏度会提高. 这种多环级联结构的谐振腔一方面有效提高了谐振腔的相对尺寸大小, 另一方面微环间的耦合增加了系统的有效群折射率, 从而可以增加 Sagnac 相位差. 所以, 在确定系统结构情形下, 采用多环级联结构并优化相关的结构参数提高系统灵敏度是谐振式光学陀螺研究

\* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 91123036)、国家杰出青年科学基金 (批准号: 51225504)、国家自然科学基金 (批准号: 91123016, 61178058, 61275166)、国家重点基础研究发展计划前期研究专项项目 (批准号: 2012CB723404) 和山西省青年学术带头人支持项目资助的课题.

† 通信作者. E-mail: tangjun@nuc.edu.cn

的重要方向之一<sup>[14-17]</sup>. 但是考虑到目前工艺加工水平, 很难在单一芯片上同时加工出完全相同的个数如此庞大的环形谐振腔. 因此, 提出了双环级联结构的集成光波导陀螺结构, 通过波导与环之间和环与环之间的耦合系数调控, 实现平面环形谐振腔光学陀螺战术级导航应用.

本文深入研究了双环级联结构光波导谐振式陀螺的工作原理及理论灵敏度计算方法, 基于双环级联耦合模式理论, 推导出了谐振式光学陀螺 Sagnac 相位差与群有效折射率  $n_g$  关系的表达式. 用计算机仿真实验模型, 给出了不同耦合器透射系数对应的群有效折射率的变化特性, 选择最优化参量, 实现了陀螺 Sagnac 相位差大幅度增大的目的. 研究表明, 采用双环结构并对耦合器透射系数进行优化能够将陀螺理论灵敏度从单环结构的  $(10^4-10^5)^\circ/\text{h}$  提高到  $10^\circ/\text{h}$ , 可以大幅度地提高谐振式陀螺的性能指标.

## 2 结构与模型设计

图 1(a) 所示为双环耦合谐振腔结构, 环与环之间为耦合器 2, 环与波导之间为耦合器 1, 其中耦合器 1, 2 的透射系数分别为  $t_1, t_2$ , 耦合系数为  $k_1, k_2$ , 有  $t^2 + k^2 = 1$  的关系.  $r_1, r_2$  为环 1 和环 2 的环腔传输损耗系数,  $\phi_1$  和  $\phi_2$  为绕环 1、环 2 传输一周产生的相移, 由于两环结构尺寸完全一致, 取  $\phi_1 = \phi_2 = \phi$ , 环形谐振腔折射率为  $n_0$ .

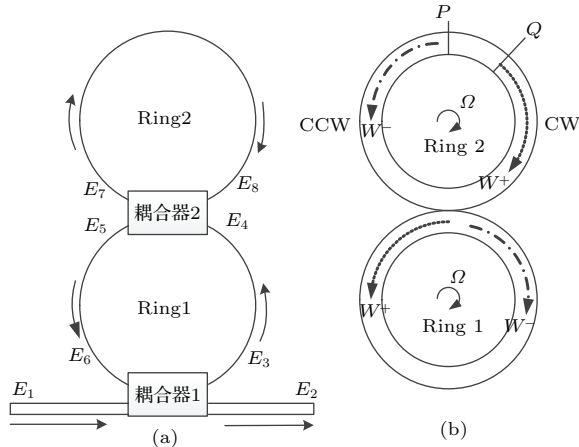


图 1 双环级联结构仿真实验模型 (a) 双环耦合谐振腔结构电磁场传输示意图; (b) 双环谐振腔 Sagnac 效应示意图

Fig. 1. The simulated theory model of double coupled ring structure: (a) the schematic diagram of the transmission of electromagnetic field of the structure; (b) the schematic diagram of the Sagnac effect structure.

根据双环级联耦合模理论<sup>[18,19]</sup>可得环 2 传递函数  $T_2$  和整体双环系统传递函数  $T$ :

$$T_2 = \frac{E_5}{E_4} = \frac{t_2 - r_2 \exp(i\phi)}{1 - r_2 t_2 \exp(i\phi)}, \quad (1)$$

$$T = \frac{E_2}{E_1} = \frac{t_1 - r_1 T_2 \exp(i\phi)}{1 - r_1 t_1 T_2 \exp(i\phi)}. \quad (2)$$

系统的群有效折射率为

$$n_g = n_0 \frac{d\varphi}{d\phi_1} = n_0 \frac{\partial\varphi}{\partial\phi_1} \left( 1 + \frac{d\phi_2^{\text{eff}}}{d\phi_2} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial\phi_1} = r_1 |T| (1 + t_1^2) - t_1 (1 + r_1^2 |T|^2) \times \cos(\phi_2^{\text{eff}} + \phi_1), \quad (4)$$

$$\frac{d\phi_2^{\text{eff}}}{d\phi_2} = \frac{(t_2^2 - 1)r_2 \exp(i\phi_2)}{[t_2 - r_2 \exp(i\phi_2)][1 - t_2 r_2 \exp(i\phi_2)]} \quad (5)$$

其中, 环 2 有效相移为  $\phi_2^{\text{eff}}$ , 双环系统有效相移为  $\varphi$ . 联立方程组 (3), (4), (5) 可以得到双环并联系统的群有效折射率  $n_g$ .

对于图 1(b) 中所示的双环级联谐振腔, 两束光分别沿着顺时针和逆时针方向在环 2 中传播, 在经过耦合器后分别耦合进入环 1 反向传输, 分别以  $t_+$  和  $t_-$  表示两束光在双环谐振腔中传播一周的时间, 两个环形谐振腔半径均为  $R$ . 如果光束经过耦合传输要回到同一起点  $P$ , 由于谐振腔的旋转, 可以看到在环 2 中顺时针传输的  $W_+$  相当于要多走  $P$  到  $Q$  这一段路程, 而另一路光少走了一段路程, 因此有

$$t_{\pm} = \frac{4\pi R}{c/n_{\pm}} \pm \frac{R\Omega t_{\pm}}{c/n_{\pm}} = \frac{n_{\pm}}{c} (4\pi R \pm R\Omega t_{\pm}). \quad (6)$$

由 (6) 式可得

$$\begin{aligned} \Delta t &= t_+ - t_- \\ &= 4\pi R \frac{2c\Delta n + 2\Omega R(n_0^2 - \Delta n^2)}{[c - (n_0 + \Delta n)\Omega R][c + (n_0 - \Delta n)\Omega R]} \\ &= 8\pi R \frac{n_0}{c} \left( \frac{\Delta n}{n_0} + \Omega R \frac{n_0}{c} \right), \end{aligned} \quad (7)$$

其中,  $n_0$  为谐振腔静止时谐振频率为  $\omega_0$  时对应的初始折射率, 由于转动时谐振腔相对腔长的变化导致顺、逆时针折射率变为  $n_+$  和  $n_-$ , 其中顺、逆时针折射率差为  $\Delta n$ , 同时谐振频率  $\omega$  也随着旋转而发生变化, 顺、逆时对应的谐振频率  $\omega_{\pm}$  有

$$\omega_{\pm} = \omega_0 \left( 1 + \Omega R \frac{n_0}{c} \right). \quad (8)$$

对于色散介质结构满足  $n_g = n_0 + \omega \frac{\partial n}{\partial \omega} \gg n_0$ , 有

$$\frac{\Delta n}{n_0} \cong \frac{\omega_+ - \omega_-}{n_0} \frac{\partial n}{\partial \omega} = \Omega R \frac{\omega_0}{c} \frac{\partial n}{\partial \omega}. \quad (9)$$

将(9)式代入(7)式, 则有

$$\Delta t = 8\pi R^2 \Omega \frac{n_0}{c^2} \left( n_0 + w_0 \frac{\partial n}{\partial w} \right). \quad (10)$$

能够在谐振腔中传播的光束必须满足一定的谐振条件, 即  $w = qc/L$ ,  $q$  为整数, 只有满足波长是谐振腔长整数倍的光束才能发生谐振, 所以顺、逆时针的谐振频率随着光程的变化而变化, 其变化量:

$$\Delta w = w_0 \frac{\Delta L}{L} = \frac{c}{\lambda} \frac{c \Delta t}{L} = \frac{8\pi R^2 \Omega n_0 n_g}{\lambda}, \quad (11)$$

所得到的 Sagnac 相位差为

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_{\text{并联双环}} &= w_0 \cdot \Delta t \\ &= \frac{c}{\lambda} 8\pi R^2 \Omega \frac{n_0}{c^2} \left( n_0 + w_0 \frac{\partial n}{\partial w} \right) \\ &= \frac{8\pi R^2 \Omega n_0}{\lambda c} n_g, \end{aligned} \quad (12)$$

而采用单环结构的谐振腔所得到的 Sagnac 相位差为

$$\Delta\Phi_{\text{单环}} = \frac{4\pi R^2 \Omega n_0}{\lambda c}. \quad (13)$$

从(12)和(13)式双环结构和单环结构的 Sagnac 相位差可以看到,  $\Delta\Phi_{\text{并联双环}} = 2n_g \Delta\Phi_{\text{单环}}$ , 也意味着双环结构灵敏度比单环结构灵敏度提高  $2n_g$  倍. 因此, 通过采用双环级联结构, 并对其耦合器进行优化设计以获得较高的群有效折射率值, 可以有效地提高谐振式陀螺灵敏度.

对于已知耦合系数  $k$  和半径  $R$  的单一微环谐振腔结构, 其理论品质因数  $Q$  值<sup>[20]</sup> 和理论灵敏度  $\delta\Omega$  为

$$Q = \frac{2\pi^2 R n_0}{\lambda_k^2}, \quad (14)$$

$$\delta\Omega = \frac{1}{2RQ\sqrt{P_{pd}}} \sqrt{\frac{2hc^3}{\tau\lambda\eta} \left( \frac{3600 \times 180}{\pi} \right)^\circ} / h, \quad (15)$$

其中  $c$  是光在真空中的传播速度 ( $c = 3 \times 10^8$  m/s),  $h$  是普朗克常量 ( $h = 6.62 \times 10^{-34}$  J/s),  $P_{pd}$  为光电探测器的输入功率 ( $P_{pd} = 1$  mW),  $\eta$  为光电探测器的量子效率 ( $\eta = 0.82$ ),  $\lambda$  为输入光波长,  $\tau$  为光在环中传播一周的时间.

### 3 耦合器优化设计与陀螺参数计算

#### 3.1 环间耦合器 2 优化设计

不考虑耦合器插入损耗  $\gamma$  对环形谐振腔耦合传输的影响, 保持环 1 和环 2 环腔传递损耗系数

$r_1 = r_2 = 0.95$ , 在耦合器 2 的仿真计算中首先保持耦合器 1 参数不变, 设置  $t_1 = 0.95$ , 逐步改变耦合器 2 的透射系数  $t_2$ , 使耦合器 2 从强耦合到临界耦合再到弱耦合状态. 通过数学计算得到了不同  $t_2$  情况下的谐振谱线, 如图 2(a) 所示; 同时选取了耦合器 2 三种耦合状态的相位曲线进行对比, 如图 2(b) 所示.

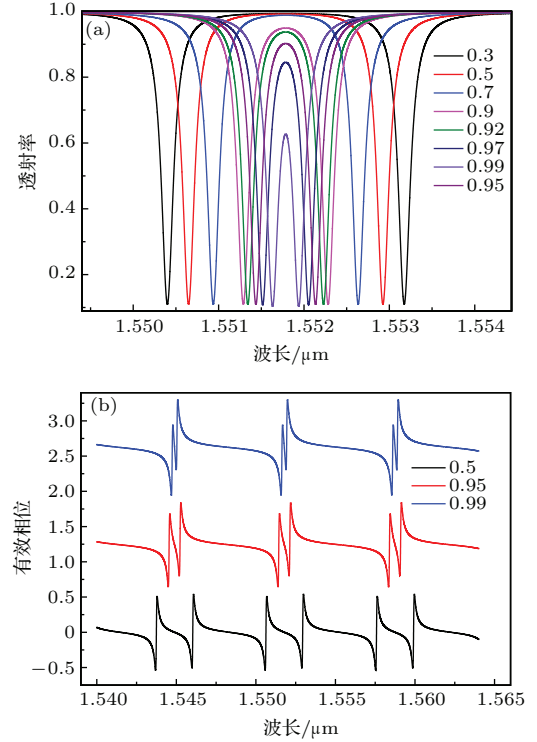


图 2 (网刊彩色)  $t_1 = 0.95$  时, 改变耦合器 2 透射系数的值, 透射率和有效相位的变化曲线 (a) 谐振谱线随  $t_2$  的变化; (b) 耦合器 2 的三种耦合状态

Fig. 2. (color online) The transmission (a) and effective phase (b) change curve with the transmission coefficient of the coupler 2 when  $t_1 = 0.95$ .

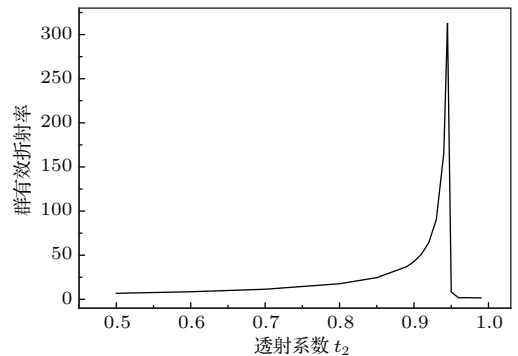


图 3 群有效折射率随耦合器 2 透射系数  $t_2$  的变化

Fig. 3. The effective group refractive index changing curve with the transmission coefficient of the coupler 2.

从图 2(a) 可以看到, 在耦合器 2 处于强耦合状态 ( $t_2 < 0.95$ ) 时, 谐振峰的形状不会随着耦合器 2

透射系数的改变而变化, 只会发生谐振峰位置的平移; 当  $t_2 = r_2 = 0.95$  时, 耦合器 2 处于临界耦合状态; 在  $t_2 > 0.95$  时, 谐振峰形状发生变化, 此时耦合器 2 处于欠耦合状态, 大部分光处于环 1 中, 即只经过一次耦合器, 与输入光相比存在  $\pi/2$  的相移, 只有极少部分光会进入环 2. 这与  $t_2 < 0.95$  的强耦合状态相比, 有大部分光会进入环 2 中, 即经过两个耦合器, 与输入光相比存在  $\pi$  的相移. 这两种状态在相位曲线上如图 2(b) 所示, 欠耦合状态的相位曲线表现为接近单环状态, 过耦合状态的相位曲线表现为明显的双环耦合曲线. 随着透射系数  $t_2$  的降低, 耦合系数  $k_2$  增加, 谐振峰分别向两侧展宽, 诱导透明峰变宽.

图 3 为群有效折射率对耦合器 2 透射系数  $t_2$  的变化曲线, 随着透射系数  $t_2$  的增加, 耦合间距增大, 在耦合器 2 从强耦合到趋近于临界耦合的变化过程中, 群有效折射率逐步变大又逐步变小, 在无限趋近于临界耦合 ( $t_2 \rightarrow 0.95$ ) 的状态时得到最大的群有效折射率, 此时能够实现双环级联谐振式陀螺最大 Sagnac 相位差.

### 3.2 波导与环间耦合器 1 设计

在仿真计算中仍然不考虑插入损耗的影响, 保持环腔损耗系数  $r_1 = r_2 = 0.95$  和耦合器 2 参数不变, 设置  $t_2 = 0.95$ , 逐步改变耦合器 1 的透射系数  $t_1$ , 使耦合器 1 从强耦合到临界耦合再到弱耦合状态. 通过数学计算得到了双环并联系统谐振谱线, 如图 4(a) 所示; 同时选取了耦合器 1 的三种耦合状态相位变化曲线进行对比, 如图 4(b) 所示.

耦合器 2 保持临界耦合状态, 改变耦合器 1 的透射系数  $t_1$ , 从图 4 中可以看到, 在  $t_1 < 0.5$  时谐振谱线表现为单一峰; 在  $t_1 = 0.5$  时双环透射谱线在谐振点附近出现了一个较宽的平顶效应; 随着  $t_1$  的进一步增大, 每个单一的谐振峰处都会发生谷底分裂现象, 形成双峰结构, 表现出类电磁诱导透明效应 (CRIT); 在  $t_1 > 0.95$  时, 谐振谱线的峰值会逐渐降低. 透射光谱的多峰结构是源于直波导和微环谐振腔耦合时存在对称耦合和非对称耦合两种模式, 耦合模式的不同导致透射谱线谐振频率位置会出现两个透射峰 [21].

图 5 为保持耦合器 2 处于临界耦合状态时, 群有效折射率随耦合器 1 透射系数  $t_1$  的变化情况. 从图 5 可以看到, 随着透射系数  $t_1$  的增加, 在耦合器 1 从强耦合到弱耦合的变化过程中, 双环级联系统的

群有效折射率逐步变大. 为了实现双环谐振式陀螺较大的 Sagnac 相位差, 耦合器 1 的透射系数要越大越好.

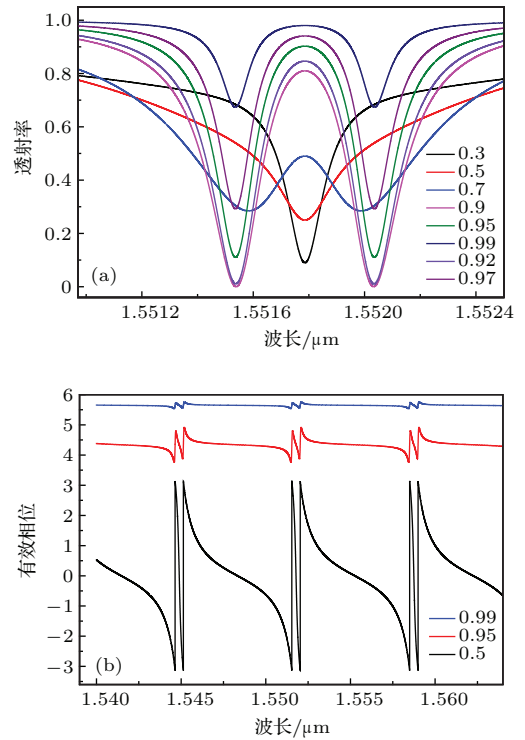


图 4 (网刊彩色)  $t_2 = 0.95$  时改变耦合器 1 透射系数  $t_1$  的值, 透射率和有效相位的变化曲线 (a) 谐振谱线随  $t_1$  的变化; (b) 耦合器 1 的三种耦合状态

Fig. 4. (color online) The transmission (a) and effective phase (b) change curve with the transmission coefficient of the coupler 1 when  $t_2 = 0.95$ .

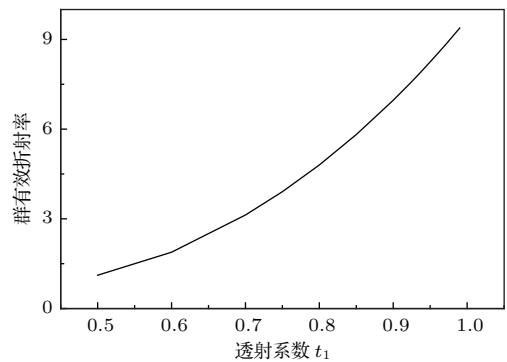


图 5 群有效折射率随耦合器 1 透射系数  $t_1$  的变化  
Fig. 5. The effective group refractive index changing curve with the transmission coefficient of the coupler 1.

### 3.3 陀螺参数计算分析

根据 (14) 和 (15) 式得到半径  $R = 100 \mu\text{m}$  的单环谐振式陀螺理论灵敏度  $\delta\Omega^\circ/\text{h}$  与透射系数  $t$  之间的关系曲线, 如图 6 所示. 随着透射系数  $t$  的增大, 陀螺的理论灵敏度数值逐渐降低, 即精度逐步

提高. 从图6中可以看到, 半径  $R = 100 \mu\text{m}$  的环形谐振腔所能达到的理论灵敏度指标为  $(10^4\text{—}10^5)^\circ/\text{h}$ , 这远远不能够满足实际应用需求. 理论分析推导发现通过采用双环级联结构, 并对环间耦合器、环与波导间耦合器相关参数进行优化设计, 能够大幅度地提高陀螺理论灵敏度指标.

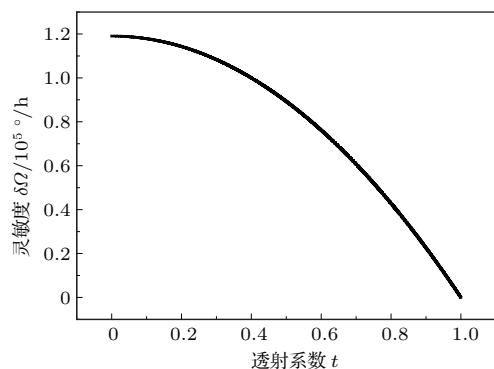


图6 半径  $R = 100 \mu\text{m}$  的单环结构陀螺理论灵敏度与透射系数的关系

Fig. 6. The curve of the theory sensitivity of single ring structure (radius  $R = 100 \mu\text{m}$ ) and the transmission coefficient.

结合图3、图5和图6的曲线可以得到不同参数情况下的双环级联结构谐振式陀螺的理论灵敏度. 在耦合器仿真参数  $r_1 = r_2 = 0.95$ ,  $R = 100 \mu\text{m}$  时, 计算得到在  $t_1 = 0.95$ ,  $t_2 = 0.945$  时群有效折射率  $n_g$  可以达到313, 该种参数下的双环级联结构相比同等半径大小的单环结构Sagnac相位差提高了600倍以上, 也即精度提高了600倍以上. 半径  $R = 100 \mu\text{m}$ 、透射系数  $t = 0.95$  的单环谐振腔结构应用于光学陀螺时其理论灵敏度可以达到  $(1.16 \times 10^4)^\circ/\text{h}$ , 则双环级联结构的谐振式光学陀螺理论灵敏度可以达到  $10^\circ/\text{h}$ .

## 4 讨论与分析

针对目前单微环谐振腔直径和品质因数优化在集成光学陀螺应用上的瓶颈问题和无限环个数谐振腔加工工艺的难度, 提出了双微环级联结构的平面环形谐振腔陀螺系统, 并对其进行了理论分析与计算仿真. 结果表明, 通过采用双环级联结构并对耦合器进行优化设计提高系统的群有效折射率  $n_g$ , 可以成倍地提高Sagnac相位差  $\Delta\Phi$ , 进而提高陀螺灵敏度. 由近似耦合模理论出发, 通过分别对环间耦合器2和波导与环间耦合器1的分析与计算得出, 两个耦合器透射系数对群有效折射率的影响

趋势不同. 在耦合器2从强耦合到趋近于临界耦合的变化过程中, 群有效折射率逐步变大, 从临界耦合到弱耦合过程, 群有效折射率又逐步减小, 在无限趋近于临界耦合的状态时能够得到最大的群有效折射率, 此时可以实现双环级联谐振式陀螺最大Sagnac相位差. 而随着耦合器1透射系数的增大, 群有效折射率逐步变大, 即Sagnac相位差逐步变大. 从两个耦合器对群有效折射率的影响曲线图上可以看出环间耦合器2在双环级联谐振系统中起着主导作用. 文中计算了在  $r_1 = r_2 = 0.95$ ,  $t_1 = 0.95$ ,  $t_2 = 0.945$  时, 系统群有效折射率可以达到313, Sagnac相位差相比同等直径单环结构可以提高600倍以上, 意味着其精度可以提高600倍以上, 其极限灵敏度可以达到  $10^\circ/\text{h}$ , 能够满足基本应用需求.

本文的相关理论分析和计算表明, 通过采用合适的直径尺寸的双环形谐振腔并联结构, 并对其耦合器的参数进行合理的优化设计, 可以有效地大幅度提高谐振光波导陀螺的灵敏度. 本文的研究对于芯片级平面环形谐振腔在集成光学陀螺中的应用提出了新的思路, 相信随着研究的进一步深入, 能够为芯片级平面环形谐振腔实现高集成化、高精度的角速度检测奠定基础.

## 参考文献

- [1] Yu H Y, Zhang C X, Feng L S, Zhou Z, Hong L F 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 054210
- [2] Guo Z B, Tang J, Liu J, Wang M H, Shang C L, Lei L H, Xue C Y, Zhang W D, Yan S B 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 227802 (in Chinese) [郭泽彬, 唐军, 刘俊, 王明焕, 商成龙, 雷龙海, 薛晨阳, 张文栋, 闫树斌 2014 物理学报 **63** 227802]
- [3] Chang X 2013 *M. S. Dissertation* (Hangzhou: Zhejiang University) (in Chinese) [常旭 2013 硕士学位论文 (杭州: 浙江大学)]
- [4] Yan Y Z, Ji Z, Wang B H, Yan S B, Xiong J J, Ma J 2010 *Chin. J. Lasers* **37** 1789 (in Chinese) [严英占, 吉喆, 王宝花, 闫树斌, 熊继军, 马骏 2010 中国激光 **37** 1789]
- [5] Wei W 2007 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [尉伟 2007 博士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]
- [6] Ciminelli C, Dell' Olio F, Armenise M N, Soares F M, Passenberg W 2013 *Opt. Express* **21** 556
- [7] Huang Q Z, Yu J Z, Chen S W, Xu X J, Han W H, Fan Z C 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2562
- [8] Feng L S, Wang J J, Zhi Y Z, Tang Y C, Wang Q W, Li H C, Wang W 2014 *Opt. Express* **22** 27565

- [9] Sanders G A, Prentiss M G, Ezekiel S 1981 *Opt. Lett.* **6** 569
- [10] Ezekiel S, Balsamo S R 1977 *App. Phys. Lett.* **30** 478
- [11] Jiang W C, Zhang J, Lin Q 2014 *Opt. Express* **22** 1187
- [12] Scheuer J, Yariv A 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 053901
- [13] Sorrentino C, Toland J R, Search C P 2012 *Opt. Express* **20** 354
- [14] Tian H, Sun W M, Zhang Y D 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 194204 (in Chinese) [田赫, 孙伟民, 掌蕴东 2013 物理学报 **62** 194204]
- [15] Peng C, Li Z, Xu A 2007 *Appl. Opt.* **46** 4125
- [16] Zhang Y, Wang N, Tian H, Wang H, Qiu W, Wang J F, Yuan P 2008 *Phys. Lett. A* **372** 5848
- [17] Kalantarov D, Search C P 2013 *J. Opt. Soc. Am. B* **30** 377
- [18] Smith D D, Chang H R, Fuller K A 2003 *J. Opt. Soc. Am. B* **20** 9
- [19] Poon J K S, Scheuer J, Mookherjea S, Paloczi G T, Huang Y Y, Yariv A 2004 *Opt. Express* **12** 90
- [20] Wang Y 2013 *M. S. Dissertation* ( Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [王莹 2013 硕士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [21] Cui D F, Xie C F, Liu Y Y, Li Y N, Wei L P, Wang Y H, Liu J, Xue C Y 2014 *Opt. Commun.* **324** 296

# Design and optimization of integrated micro optical gyroscope based on a planar ring resonator\*

Liu Jun Zhang Tian-En Zhang Wei Lei Long-Hai Xue Chen-Yang  
Zhang Wen-Dong Tang Jun<sup>†</sup>

(Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement Ministry of Education of China, Science and Technology on Electronic Test and Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, China)

( Received 25 November 2014; revised manuscript received 26 January 2015 )

## Abstract

In order to optimize the performance of the coupled resonator optical waveguide (CROW) gyroscope, a well-designed structure by optimizing the ring number and the transmission coefficient of the coupler is used as the core component of the planar waveguide optical gyroscope. The structure with double coupled ring resonator may possess large effective group refractive index to enhance angular sensing sensitivity was proposed. The concept of the Sagnac effect in this new double coupled ring resonator structure with a large effective group refractive index is investigated, it's found that the rotation-induced phase shift is proportional to the effective group refractive index. On the basis of this effect, we calculate the general relation expression of theoretical rotation sensitivity and the effective group refractive index for this two-ring bidirectional CROW gyroscope by numerical simulation. Based on the relation, the phase shift characteristics of double coupled ring resonator and single ring resonator was analyzed. And the changing characteristics of the transmission coefficient of the couplers and the effective group refractive index was discussed based on the double cascaded ring resonator coupling mode theory. In the case of  $R_1 = R_2 = 100 \mu\text{m}$  and ring transmission loss coefficient  $t_1 = t_2 = 0.95$ , the generating condition of the largest effective group refractive index was obtained, according to the different effects of the couplers between rings and waveguide on the effective group refractive index. By using the parameters of  $R = 100 \mu\text{m}$  and  $t = 0.95$ , the sensitivity of a single ring resonator gyroscope is  $(10^4\text{--}10^5)^\circ/\text{h}$ , and the sensitivity of double coupled ring resonator gyroscope can reach to  $10^\circ/\text{h}$ . In summary, we show that the theoretical sensitivity of the double coupled ring gyroscope and single ring gyroscope are comparable when both have the same parameters. Using numerical and analytical methods, we demonstrated that coupling multiple resonators together can enhance rotation sensitivity. This research is important for applications of coupled ring resonator in optical angular velocity detection, and a promising regime to realize highly compact optical gyroscope.

**Keywords:** resonator optical gyroscope, effective group refractive index, double coupled ring, transmission coefficient

**PACS:** 78.20.-e, 42.81.Pa, 42.87.-d

**DOI:** 10.7498/aps.64.107802

\* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 91123036), the National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China (Grant No. 51225504), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 91123016, 61178058, 61275166), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB723404), and the Shanxi Provincial Foundation for Leaders of Disciplines in Science, China.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [tangjun@nuc.edu.cn](mailto:tangjun@nuc.edu.cn)