

doi:10.3788/gzxb20144308.0823005

# 反馈式跑道型光学微环的传感灵敏度研究

卜天容<sup>1</sup>, 陈曜<sup>2</sup>, 何鹏程<sup>1</sup>, 万玲玉<sup>1</sup>, 丁玉丽<sup>1</sup>

(1 广西大学 物理科学与工程技术学院, 南宁 530004)

(2 广州民航职业技术学院, 广州 510000)

**摘要:**提出了一种由 U 型反馈波导、跑道谐振腔和敏感环组成的反馈式跑道型光学微环传感器。采用耦合模理论推导了该传感器的归一化输出光强公式, 数值分析了传输损耗因子、自耦合因子和敏感环尺寸对归一化输出光强的影响。分析表明:敏感环的损耗因子对归一化输出光强的调制作用明显, 只要损耗因子发生微小变化, 输出光强即发生较大变化;敏感环工作在弱耦合状态时传感灵敏度较高;敏感环的尺寸对传感灵敏度影响较大, 适当地调整敏感环的大小可得到陡峭的输出光强谱线。对结构参数进行优化后不仅可以输出尖锐陡峭的非对称法诺谐振光强谱线, 而且具有较高的法诺谐振光谱斜率, 能更好地增强传感灵敏度。在信噪比为 30 dB 的测量系统中, 优化的反馈式跑道型光学微环传感器的探测极限达  $4.48 \times 10^{-8}$  单位折射率。

**关键词:**灵敏度; 传感器; 跑道谐振腔; 探测极限

**中图分类号:** TN256

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2014)08-0823005-7

## The Transducer Sensitivity of Racetrack Optical Micro-ring Resonator with Feedback

BU Tian-rong<sup>1</sup>, CHEN Yao<sup>2</sup>, HE Peng-cheng<sup>1</sup>, WAN Ling-yu<sup>1</sup>, DING Yu-li<sup>1</sup>

(1 College of Physics Science and Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China)

(2 Guang Zhou Civilaviation College, Guangzhou 510000, China)

**Abstract:** A racetrack micro-ring sensor with feedback loop was proposed, which make up of a U feedback waveguide, a racetrack cavity and a sensitive ring. The normalized transmission formula of the sensor was derived by Coupled-Mode theory. The effects of the transmission loss factor, the coupling factor and sensitive ring size of sensor on the normalized optical intensity were numerically analyzed. The results show that the normalized optical intensity is very sensitive to the transmission loss factor of the sensitive ring. As long as the transmission loss factor changes tinily, the normalized optical intensity changes greatly. When the sensitive ring works on the condition of weak coupling, the sensor may obtain high sensitivity. And the size of sensitive ring has great influence on sensing sensitivity, adjusting the size of sensitive ring properly, the sharp normalized optical spectra were got. Based on the results, the optimized structural parameters were given. The optimization of micro-ring structure can not only output sharp steep asymmetric Fano resonance spectral lines, but also obtain a high Fano resonance spectral slope, which was better to enhance the sensor sensitivity. For a measurement system of 30 dB signal-to-noise ratio, a detection limit can reach to  $4.48 \times 10^{-8}$  refractive index units in the optimized feedback racetrack micro-ring sensor.

**Key words:** Sensitive; Sensor; Racetrack resonator; Detection limit

**OCIS Codes:** 230.3120; 280.1415; 230.3990; 230.7370

**基金项目:** 国家自然科学基金 (No. 61367004)、北京大学开放课题 (No. 2012GZKF031214) 和广西自然科学基金 (No. 2012GXNSFBA053164) 资助

**第一作者:** 卜天容 (1988-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光学微环生物传感器. Email: smilytianrong@163.com

**导师 (通讯作者):** 万玲玉 (1975-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为微畴结构电光器件、纳米器件. Email: wanlingyu75@126.com

**收稿日期:** 2013-12-06; **录用日期:** 2014-01-15

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

## 0 引言

光学波导传感器具有非破坏性和高灵敏度优点,在生化传感器中获得广泛应用<sup>[1-4]</sup>.目前灵敏度较高的光波导传感器结构主要有马赫泽德型<sup>[5-6]</sup>、光子晶体型<sup>[7-9]</sup>和微环谐振腔型<sup>[10-11]</sup>.马赫泽德型传感器对平面波导芯和包层折射率没有太高的要求,适用于各种材料系统,但为了提高光与待测物之间的相互作用,需要增加器件的尺寸,结构较大;光子晶体型传感器利用环型谐振腔原理,可以探测到很小的折射率变化,但对结构尺寸准确度要求高,需控制在纳米量级,给器件加工增加了难度;微环谐振腔型传感器由于光在环形结构中循环传输,使有效长度远远大于器件的实际长度,具有器件尺寸小,可微型化、低成本和选择性好等优势,还具有高品质因子 $Q$ 能实现可集成的高灵敏度传感特点<sup>[5]</sup>.因此,在以实现高灵敏度、微型化、集成化为目标的传感器件中,微环谐振腔型传感器受到高度重视.对于微环传感器,其微环谐振腔类型有圆环型<sup>[12-13]</sup>、跑道型<sup>[14-15]</sup>等.目前报导的圆环型谐振腔传感器的探测极限可达 $10^{-8}$ 单位折射率(Refractive Index Unit, RIU)<sup>[16]</sup>,但该结构中圆环波导与直波导和弯曲波导之间的耦合效率对两者之间的耦合间隙非常敏感,不利于器件的加工制作.

为了提高器件的稳定性和设计灵活性,本文提出了一种带反馈的跑道型微环谐振腔结构,相对于圆环型谐振器,跑道型谐振器与直波导间的耦合更稳定,并可以通过调节直波导段的长度灵活地控制耦合效率,设计冗余度大.此外,该反馈式跑道型光学微环结构能实现非对称性的法诺(Fano)谐振谱线<sup>[17-19]</sup>.相比传统的洛伦兹力谱线,非对称 Fano 谱线能更好地提高光强的输出变量<sup>[19]</sup>.常见的 U 型反馈式波导结构一般以非对称的干涉臂作为敏感区,虽然也能输出 Fano 谱线,但传感器灵敏度的提高有限,并且需要在增加干涉臂长度的基础上才能实现,这样会增加器件的尺寸,降低集成化程度,不易于阵列.本文提出带敏感环的反馈结构,不仅可以大幅提高传感器的灵敏度,而且可以使器件小型化,提高集成度.

## 1 模型与理论分析

### 1.1 反馈式跑道型光学微环结构

图 1 为反馈式跑道型光学微环结构示意图,主要由一个 U 型反馈波导、一个跑道谐振腔和一个敏感环组成,U 型波导和跑道波导间通过直波导段进行耦合,性能稳定.图 1 中, $L_a$  为跑道半环的长度, $L_b$  为 U 型反馈波导的长度, $L_c$  为跑道直波导部分的长度, $L$  为敏感环的周长.设硅波导有效折射率为 2.442(假设已制作出

来的敏感环在未探测前的有效折射率为 2.442). $\varphi = 2.442L_c(2\pi/\lambda)$  为跑道谐振腔直波导段和 U 型反馈波导耦合处的相位变化(当  $\varphi = 0$  时,跑道的直波导长度  $L_c = 0$ ,则跑道变为圆环), $\theta = 2.442L_a(2\pi/\lambda)$  为跑道谐振腔半环的相位变化, $\Phi = 2.442L_b(2\pi/\lambda)$  为 U 型反馈波导弯曲部分的相位变化.

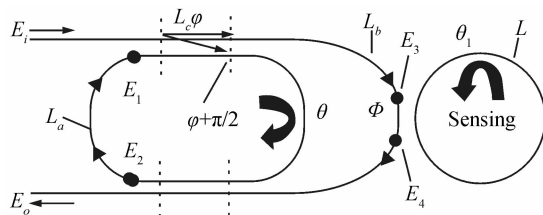
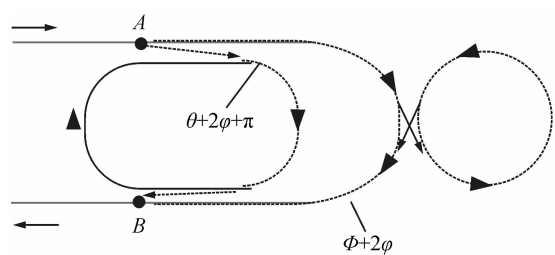


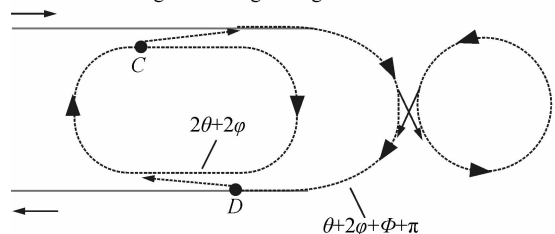
图 1 反馈式跑道型光学微环结构示意图

Fig. 1 The structure diagram of racetrack optical micro-ring with feedback

图 2 为光在反馈跑道谐振腔结构中的传输过程.图 2(a)中,光从 A 端输入通过两条路径传输到 B 端,第一条路径为:一部分光从 A 端耦合进入跑道谐振腔,经过跑道谐振腔右半环传输后,与跑道谐振腔下端的耦合器发生耦合输出到 B 端,这条路径的光从 A 端耦合输入经过跑道谐振腔半环后到达 B 端所发生的相位变化为  $\theta + 2\varphi + \pi$ ;第二条路径为:另一部分光从 A 端沿 U 型反馈波导传输到 B 端,中间与敏感环发生耦合,光沿敏感环传输后又耦合输出到 U 型波导中,这条路径所发生的相位变化为  $\Phi + 2\varphi$ .图 2(b)中,耦合进入跑道谐振腔的光一部分以 C 点为始点在跑道谐振腔中传输一周后回到 C 点,所经历的相位变化为  $\theta + 2\varphi$ ,中间有一小部分光分别与跑道谐振腔上下端耦合器发生耦合输出;另一部分光则从 C 点开始与跑道谐振腔上



(a) The optical transmission through the feedback-waveguide and the right half-ring waveguide of the racetrack



(b) The optical transmission through around the racetrack and the feedback-waveguide

图 2 光在反馈式跑道型光学微环中的传输过程

Fig. 2 Light transmission in optical feedback racetrack micro-ring

端的耦合器发生耦合进入 U 型反馈波导中,中间与敏感环耦合传输后进入 U 型反馈波导,最后在 D 点与跑道谐振腔下端耦合器发生耦合进入跑道谐振腔中,并沿着跑道谐振腔左半环传输回到 C 点,此过程所经历的相位变化为  $\theta+2\varphi+\Phi+\pi$ . 在具体应用中,敏感环的有效折射率变化引起相位变化,使整个结构的输出光强发生改变,通过对输出光强谐振谱线的测量,得到被测物质的变化信息.

## 1.2 理论分析

反馈式跑道型光学微环结构的传输特性可以采用耦合模理论<sup>[20]</sup>和传输矩阵法<sup>[21]</sup>进行分析.

图 1 中,光在 U 型波导与敏感环通过倏逝波耦合,  $E_3$  为 U 型反馈波导与敏感环耦合前在反馈波导中的输入光场,  $E_4$  为 U 型反馈波导与敏感环耦合后在反馈波导中的输出光场. 光场  $E_3$  和  $E_4$  可等效为敏感环的输入和输出,根据耦合模理论,其关系式为

$$\frac{E_4}{E_3} = \frac{\tau_1 - c \exp(i\theta_1)}{1 - \tau_1 c \exp(i\theta_1)} \quad (1)$$

式中,  $\tau_1$  为敏感环与 U 型波导耦合器处的自耦合因子,  $c$  为光在敏感环的传输损耗因子,  $\theta_1$  为敏感环中传输光场的相位,即

$$\theta_1 = \frac{n_{\text{eff}} \cdot L}{\lambda} \cdot 2\pi \quad (2)$$

式中  $n_{\text{eff}}$  为敏感环中波导的有效折射率,  $L=2\pi R$  为敏感环的周长,其中  $R$  为敏感环的半径,  $\lambda$  为当前的工作波长.

通过 U 型波导的光场,经过敏感环耦合后又重新回到 U 型波导中传输,因此,式(1)描述的光场变化为在 U 型波导传输过程中的光场强度和相位变化的一部分,用  $t$  来表示为

$$t = \frac{\tau_1 - c \exp(i\theta_1)}{1 - \tau_1 c \exp(i\theta_1)} \quad (3)$$

光场  $E_i$  和  $E_o$  分别为整个结构的输入和输出,其满足关系

$$\begin{bmatrix} E_o \\ E_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau e^{-i\varphi} & k e^{-i(\varphi+\pi/2)} \\ k e^{-i(\varphi+\pi/2)} & \tau e^{-i\varphi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b t e^{-i\varphi} & 0 \\ 0 & a e^{-i\theta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_i \\ E_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中  $\tau$  和  $k$  分别为跑道谐振腔的自耦合因子和交叉耦合因子(假设耦合区是无损耗的,则满足  $\tau^2+k^2=1$ ),  $b$  为 U 型波导的传输损耗因子.  $E_1$  为跑道谐振腔直波导段与 U 型反馈上直波导耦合前在跑道谐振腔中的输入光场,  $E_2$  为跑道谐振腔直波导段与 U 型反馈下直波导耦合器处耦合后在跑道谐振腔中的输出光场,它们的关系为

$$E_1 = E_2 a \exp(-i\theta) \quad (5)$$

$a$  为跑道谐振腔的传输损耗因子.

由式(4)和式(5)得到带反馈跑道谐振腔结构的输

出光场为

$$\frac{E_o}{E_i} = \frac{[\tau^2 b t e^{-i(\varphi+2\varphi)} + k^2 a e^{-i(\theta+2\varphi+\pi)} + a^2 b t e^{-i(2\theta+4\varphi+\varphi+\pi)}] / \{1 - [\tau^2 a^2 e^{-i(2\theta+2\varphi)} + k^2 a b t e^{-i(\theta+2\varphi+\varphi+\pi)}]\}} \quad (6)$$

将式(6)中的  $t$  去掉,即可得到无敏感环时,反馈波导部分作为敏感区的输出光场为

$$\frac{E_o}{E_i} = \frac{[\tau^2 b e^{-i(\varphi+2\varphi)} + k^2 a e^{-i(\theta+2\varphi+\pi)} + a^2 b e^{-i(2\theta+4\varphi+\varphi+\pi)}] / \{1 - [\tau^2 a^2 e^{-i(2\theta+2\varphi)} + k^2 a b e^{-i(\theta+2\varphi+\varphi+\pi)}]\}} \quad (7)$$

则输出的归一化光强表达式为

$$I_o = |E_o/E_i|^2 \quad (8)$$

由式(3)和式(8)可知,敏感环相位变化是决定结构输出光场的因数之一. 当探测环境的变化被敏感环感知时,引起敏感环有效折射率发生变化,从而导致输出相位  $\theta_1$  发生变化,使最终输出光场  $E_o$  发生改变,则输出光强也随之改变,因此可通过测量输出光强来进行传感测量.

对于微环传感器,传感性能主要通过灵敏度和探测极限来描述,其中传感灵敏度定义为测量信号随待测信息的变化率,即输出光强谱线的斜率,强度变化的传感灵敏度表示为<sup>[2]</sup>

$$S = \frac{\Delta I_o}{\Delta n_{\text{eff}}} \quad (9)$$

式中  $\Delta n_{\text{eff}}$  为被测物引起敏感环的波导有效折射率变化,与其对应的是输出光强变化  $\Delta I_o$ . 探测极限直接反映传感器所能分辨的最小信息变化,定义为传感器能测量的最小变化量<sup>[10,16]</sup>

$$\delta n = \frac{\delta I}{S} \quad (10)$$

式中  $\delta I$  为光强测量仪器的测量极限,本文讨论在信噪比为 30 dB 的测量系统中的探测极限,其系统能分辨的归一化最小光强变化  $\delta I$  为 0.003<sup>[22]</sup>.

## 2 数值分析

### 2.1 传输损耗因子对传感灵敏度的影响

反馈式跑道型微环结构的传输特性主要取决于光信号在结构中的传输、跑道谐振腔与 U 型反馈波导间的耦合及敏感环与 U 型反馈波导间的耦合等因素,敏感环的灵敏度通过输出光强谱线的斜率来体现.

假设被测物质引起有效折射率的变化在 2.442 15~2.442 35 之间,改变 U 型波导的传输损耗因子  $b$ ,分析不同有效折射率变化下的归一化输出光强. 计算中选择的模型参数为:工作波长  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ ,敏感环半径  $R=50 \mu\text{m}$ ,跑道半环的长度  $L_a=150 \mu\text{m}$ ,U 型反馈波导的长度  $L_b=200 \mu\text{m}$ ,跑道直波导部分的长度  $L_c=15 \mu\text{m}$ ,敏感环与 U 型波导耦合器处的自耦合因子  $\tau_1=0.99$ ,跑道谐振腔的输入耦合器/输出耦合

器处的自耦合因子  $\tau=0.7$ , 跑道传输损耗因子  $a=0.999$ , 光在敏感环的传输损耗因子  $c=0.999$ .

图3为U型波导的传输损耗因子  $b$  对归一化光强谱线的影响. 由图3可以看出,  $b$  值趋于0.1时, 归一化输出光强谱线的 Fano 谐振特征不突出, 而随着  $b$  值的增大, 输出谱线 Fano 特征的非对称性逐渐显示出来, 但当  $b=1$  时, 输出光强谱线呈对称的洛伦兹曲线, 反馈特性不明显, 灵敏度不如将一谐振耦合到另一谐振上的 Fano 谐振高.  $b$  小于0.83时, 在近似的有效折射率变化区间内, 归一化输出光强的最大变化量增大, 灵敏度也随之增大;  $b$  小于0.83时, 反之. 因此通过选取适当的反馈波导传输损耗因子, 可以获取反对称性质明显的 Fano 谐振谱线. 由图3知, U型波导的传输损耗因子  $b=0.83$  时输出性能最佳, 因此下文, 取 U型波导的传输损耗因子  $b=0.83$ .

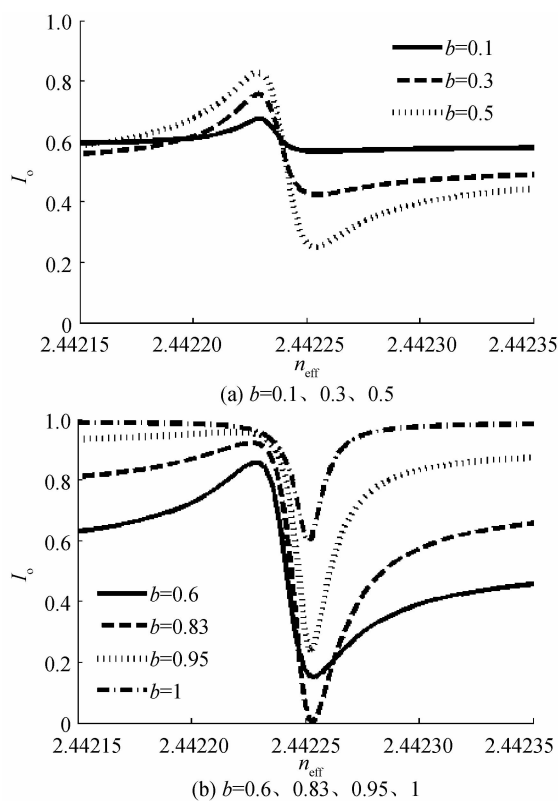


图3 不同传输损耗因子  $b$  下, 归一化光强与有效折射率关系  
Fig. 3 When the transmission loss factor  $b$  of the feedback waveguide change, the relationship of normalized transmission  $I_o$  and effective index  $n_{eff}$

保持其他结构参数不变, 图4为敏感环的传输损耗因子  $c$  对归一化输出光强的影响. 对于敏感环,  $c$  大于0.98后才有较显著的谐振谱线出现, 并随  $c$  的增大谱线逐渐尖锐, 当  $c=0.999$  时, 输出陡峭斜率大的非对称 Fano 谐振曲线, 此时传感器的敏感特性最好, 所以  $c=0.999$  可作为结构的优化参数. 反之, 随着  $c$  的减小, Fano 谐振的谱线被拉伸, 非对称性质越来越不显著, 强度变化趋于平缓, 归一化输出光强的最大值与最

小值之间的差值减小. 由图4可知, 归一化输出光强对敏感环的传输损耗因子  $c$  非常敏感, 只要  $c$  发生微小变化, 输出光强谱线就会发生较大的变化.

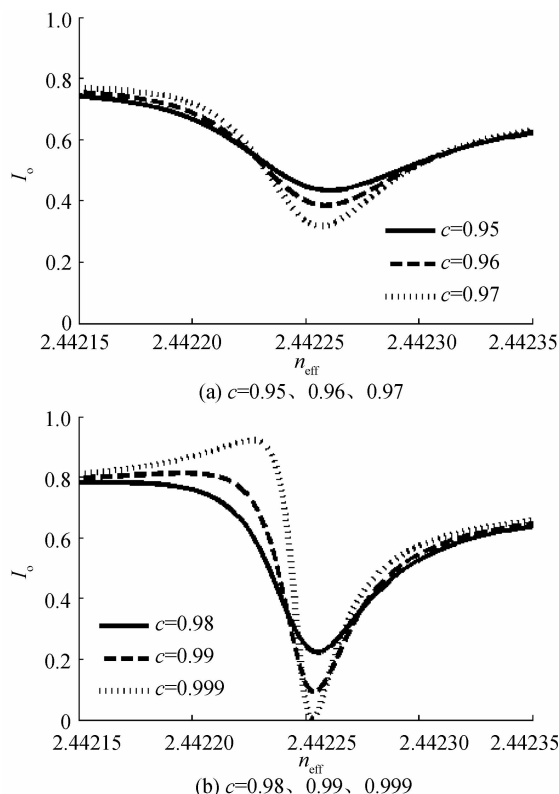


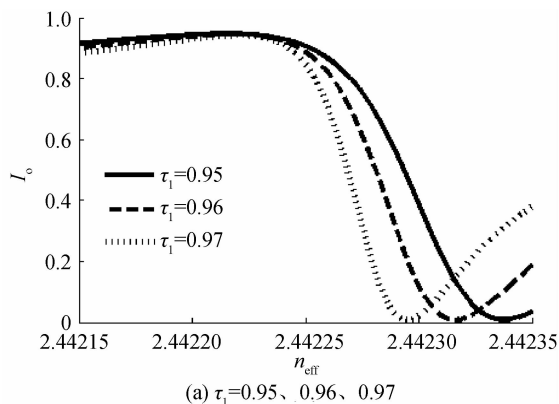
图4 敏感环的传输损耗因子  $c$  不同时, 归一化光强与有效折射率的关系

Fig. 4 When the transmission loss factor  $c$  of the sensitive ring change, the relationship of normalized transmission  $I_o$  and effective index  $n_{eff}$

## 2.2 自耦合因子对传感灵敏度的影响

图5和图6分别为不同自耦合因子  $\tau_1$  和  $\tau$  条件下, 波导的有效折射率改变时归一化输出光强的变化关系.

取敏感环与U型波导耦合器的自耦合因子  $\tau_1$  从0.95变化到0.999, 由图5可以看出, 当自耦合因子  $\tau_1$  小于0.99时, 归一化光强谱线的斜率随着  $\tau_1$  的增大而增大; 当  $\tau_1$  大于0.99时, 归一化光强谱线变得尖锐、陡峭, 但是其归一化光强的最大变化量减小.  $\tau_1=0.95$



(a)  $\tau_1=0.95, 0.96, 0.97$

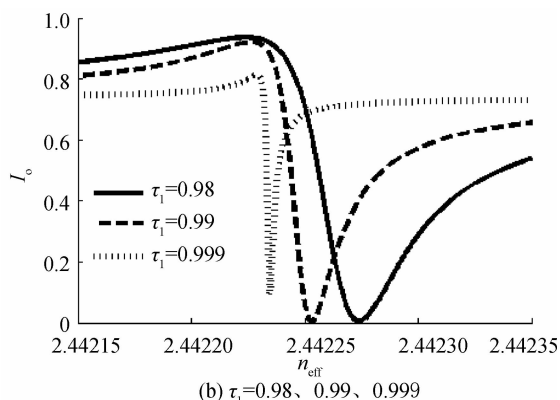
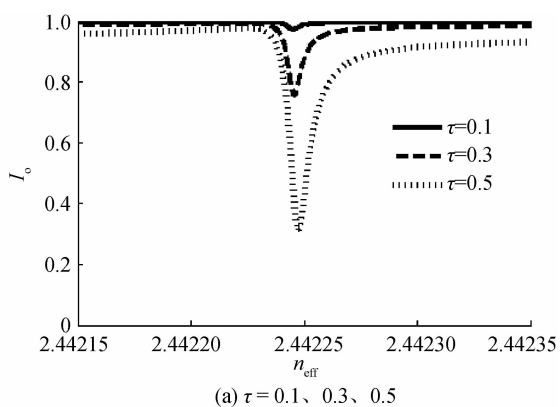
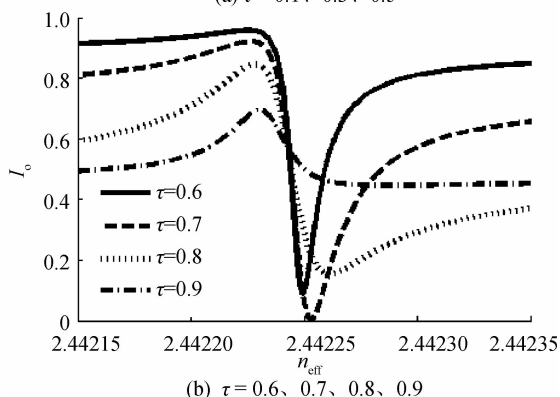


图 5 不同敏感环的自耦合因子  $\tau_1$  下, 归一化光强与有效折射率的关系图

Fig. 5 When the self-coupling factor  $\tau_1$  of the sensitive ring change, the relationship of normalized transmission  $I_0$  and effective index  $n_{eff}$



(a)  $\tau=0.1, 0.3, 0.5$



(b)  $\tau=0.6, 0.7, 0.8, 0.9$

图 6 不同跑道谐振腔自耦合因子  $\tau$  下, 归一化光强与有效折射率的关系

Fig. 6 When the self-coupling factor  $\tau$  of the racetrack resonance change, the relationship of normalized transmission  $I_0$  and effective index  $n_{eff}$

时归一化光强变化最为缓慢, 谱线的倾斜角度最大, 斜率最小, 因敏感环的灵敏度等效于归一化输出光强谱线的斜率, 所以此时的灵敏度在这 6 个值中为最小;  $\tau_1=0.99$  时归一化光强变化急剧, 输出谱线比较陡峭, 谱线斜率较大, 灵敏度较高. 可见, 要获得较大的灵敏度, 应使敏感环工作在弱耦合状态下, 因此, 本文选取敏感环与 U 型波导耦合器的自耦合因子  $\tau_1$  为 0.99 作

为传感结构的优化参数. 在同一条输出光强谱线上, 不同位置处的斜率不一定相同, 即有效折射率变化范围相同, 其对应的光强变化也有所区别.

取跑道谐振腔与 U 型波导之间的自耦合因子  $\tau$  分别为 0.1、0.3、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9. 由图 6 可知, 当  $\tau=0.7$  时, 归一化光强从最小值到最大值的变化比较大, 谱线相对陡峭, 当  $\tau$  小于 0.7 时, 归一化光强的最大值与最小值之间的差值随  $\tau$  的减小而减小, 谐振波谷往左漂移, 当  $\tau$  较小时, 归一化输出光强值近似为 1, 其变化率较小, 输出光强谱线为对称的洛伦兹曲线; 当  $\tau$  大于 0.7 时, 随着  $\tau$  逐渐增大, 原本向下的尖锐谐振波谷逐渐被磨平, 并在左上角形成一个向上的谐振波峰, 这说明  $\tau$  的变化导致波导内传输相位改变, 从而使输出的光强谱线位置发生变化. 由式(9)可知归一化光强随有效折射率的输出变化量体现了灵敏度高, 归一化光强输出变化最大的灵敏度最高, 即  $\tau=0.7$  时灵敏度最高, 在优化参数时选取跑道谐振腔与 U 型波导之间的自耦合因子为 0.7.

### 2.3 敏感环大小对传感灵敏度的影响

图 7 为敏感环的大小对输出光强谱线的影响. 取  $R=50, 100, 150 \mu\text{m}$ . 从图 7 可以看出, 随着敏感环半径的增大, 谐振半高全宽变窄, 输出光强谱线变得锐利, 输出光强最大值与最小值所对应的有效折射率变化区间变小. 当敏感环半径分别为  $100 \mu\text{m}$  和  $150 \mu\text{m}$  时, 输出光强谱线的倾斜部分几乎重叠, 说明它们有近似相等的灵敏度, 在考虑器件小型化方面, 选取  $R=100 \mu\text{m}$  作为其中的一个优化参数.

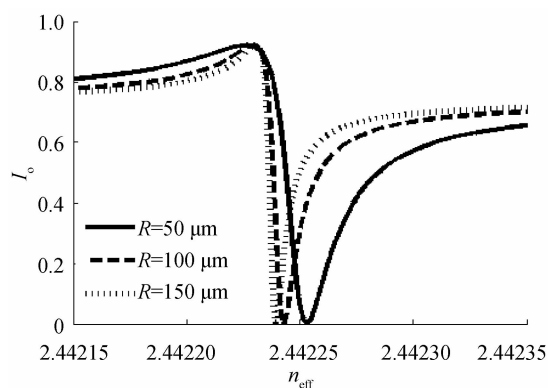


图 7 敏感环半径改变时, 归一化光强与有效折射率关系

Fig. 7 When the radius of sensitive ring change, the relationship of normalized transmission  $I_0$  and effective index  $n_{eff}$

在图 7 中, 三条光强谱线输出光强的最大值相交于同一点处, 且最小值为 0, 可知它们的输出光强最大变化量相同. 由式(9)可知, 输出光强的最大变化量对应的有效折射率变化区间越小灵敏度越大, 所以敏感环大的传感器灵敏度高, 敏感环大小是影响灵敏度的重要因素之一, 可以通过调整敏感环的大小来获取陡峭的 Fano 谱线, 从而提高传感器的灵敏度, 降低探测

极限.

## 2.4 优化结构性能分析

反馈式跑道型光学微环传感器的优化参数为:跑道谐振腔的损耗因子  $a=0.999$ ,反馈波导的损耗因子  $b=0.83$ ,敏感环的损耗因子  $c=0.999$ ,敏感环的自耦合因子  $\tau_1=0.99$ ,跑道谐振腔的自耦合因子  $\tau=0.7$ ,跑道谐振腔半环周长  $L_a=150\ \mu\text{m}$ ,反馈波导长度  $L_b=200\ \mu\text{m}$ ,跑道谐振腔耦合长度  $L_c=15\ \mu\text{m}$ ,敏感环的半径  $R=100\ \mu\text{m}$ .图8为优化结构的输出光强谱线图,由图计算出有效折射率变化  $\Delta n_{\text{eff}}\approx 1.38\times 10^{-5}$ 时,对应的输出光强变化  $\Delta I_0\approx 0.92$ ,在信噪比为 30 dB 的测试系统中,相应的探测极限为  $4.48\times 10^{-8}$  RIU.

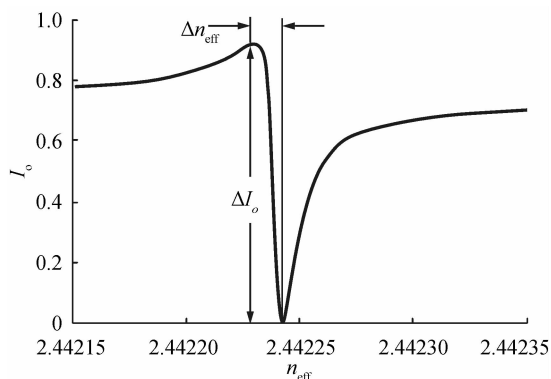


图8 敏感环优化结构的归一化光强随有效折射率的关系  
Fig. 8 The relationship of normalized transmission  $I_0$  and effective index  $n_{\text{eff}}$  in optimization structure

为比较该优化结构和普通的无敏感环非对称干涉臂结构的探测性能,根据式(7)对无敏感环结构进行优化,得到其优化参数为:跑道谐振腔的损耗因子  $a=0.98$ ,反馈波导的损耗因子  $b=0.85$ ,跑道谐振腔的自耦合因子  $\tau=0.68$ ,跑道谐振腔半环周长  $L_a=150\ \mu\text{m}$ ,跑道谐振腔耦合长度  $L_c=15\ \mu\text{m}$ .图9给出了优化条件下,无敏感环时,将反馈波导部分作为敏感区,不同

敏感区波导长度对输出光强谱线的影响. U型反馈波导的长度  $L_b$  以  $200\ \mu\text{m}$  为初始参数,并以步长  $200\ \mu\text{m}$  增大.由图9可知,当有效折射率在  $2.4400\sim 2.4425$  之间发生微小变化时,随着敏感区波导长度增加,归一化输出光强谱线变窄,谱线斜率增大,灵敏度提高,但输出光强谱线的非对称 Fano 特性并不明显,并且  $L_b$  需要增加到  $600\ \mu\text{m}$  以上才有较窄的谱线出现,因此无敏感环时,要获得较好的输出特性,器件尺寸大为增加,严重影响器件的集成度.从图9可以算出,当  $L_b=600\ \mu\text{m}$  时,有效折射率变化  $\Delta n_{\text{eff}}\approx 3.61\times 10^{-4}$  时,输出光强变化  $\Delta I_0\approx 0.87$ ,灵敏度为  $2.41\times 10^3$  dB/RIU,在信噪比为 30 dB 的测试系统中,相应的探测极限为  $1.67\times 10^{-6}$  RIU.表1给出了无敏感环和有敏感环这两种结构的探测能力对比,从表1可明显看出,本文提出的敏感环结构,在敏感环尺寸  $R$  为  $100\ \mu\text{m}$  时的探测灵敏度比  $L_b=600\ \mu\text{m}$  的无敏感环结构高 27.7 倍,探测极限相应下降 27.9 倍,不仅大幅提高了器件的探测性能,还可以使器件小型化,有利于微型集成.

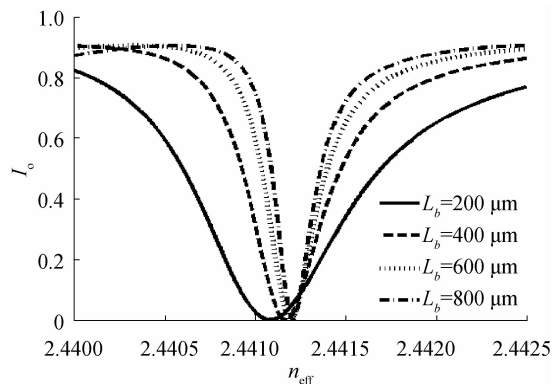


图9 无敏感环结构的归一化光强与有效折射率的关系  
Fig. 9 When the sensitive ring is removed, the relationship of normalized transmission  $I_0$  and effective index  $n_{\text{eff}}$

表1 反馈式优化结构和无敏感环结构的探测能力对比

Table 1 The comparison of detecting ability between structures with sensitive ring and without sensitive ring

The sensitive area Size( $R$ or $L_b$ ) / $\mu\text{m}$	The structure with sensitive ring			The structure without sensitive ring		
	50	100	150	400	600	800
Sensitivity( $S$ )/(dB $\cdot$ RIU $^{-1}$ )	$3.31\times 10^4$	$6.67\times 10^4$	$8.29\times 10^4$	$1.53\times 10^3$	$2.41\times 10^3$	$2.70\times 10^3$
detection limit( $\delta n$ ) / RIU	$9.06\times 10^{-8}$	$4.48\times 10^{-8}$	$3.62\times 10^{-8}$	$1.96\times 10^{-6}$	$1.25\times 10^{-6}$	$1.11\times 10^{-6}$

## 3 结论

针对生物传感探测,提出了一种跑道型反馈式光学微环传感器,运用耦合模理论和传输矩阵法分析了该结构的传输损耗因子、自耦合因子和敏感环大小对归一化输出光强谱线的影响,得到了不同参数下的探测灵敏度.通过结构参数的优化,得到了非对称的尖锐、陡峭的法诺谱线,法诺谐振增加了谱线斜率,从而获得高的探测灵敏度.在优化参数下,有效折射率

$\Delta n_{\text{eff}}\approx 1.38\times 10^{-5}$  时,谱线输出光强变化  $\Delta I_0\approx 0.92$ ,在信噪比为 30 dB 的测试系统中,探测极限达到  $4.48\times 10^{-8}$  RIU,比传统非对称干涉臂结构性能大幅提高.另外,该传感器采用 U 型波导和跑道波导的直线段进行耦合,提高了耦合效率和耦合稳定性,降低了加工要求,通过敏感环大小的调节还可进一步提高传感灵敏度,具有较大的应用潜力.

### 参考文献

- [1] FAN X, WHITE I M, SHOPOVA S I, *et al.* Sensitive optical biosensors for unlabeled targets: A review [J]. *Analytica*

- Chimica Acta*, 2008, **620**:8-26.
- [2] CHAO C Y, GUO L J. Design and optimization of microring resonators in biochemical sensing applications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, **24**(3):1395-1402.
- [3] CHAO C Y, FUNG W, GUO L J. Polymer microring resonators for biochemical sensing applications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, **12**(1):134-142.
- [4] ZOU Ren-ling, CHEN Bao-xue, WANG You-you, *et al.* Biochemical solution concentration sensing using stripe waveguides based on ion exchange technology [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(2):150-153.  
邹任玲,陈抱雪,王悠悠,等. 基于离子交换条波导的生物溶液浓度传感研究[J]. *光子学报*, 2012, **41**(2):150-153.
- [5] TERREL M, DIGONNET M J F, FAN S H. Ring-coupled Mach-Zehnder interferometer optimized for sensing [J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(26):4874-4878.
- [6] ZHANG Qi, ZHOU Jun, CHEN Jin-ping, *et al.* Temperature sensing characteristics of all-fiber Mach-Zehnder interferometer based on Bitaper-LPFG-Bitaper Structure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **42**(3):308-310.  
张琪,周骏,陈金平,等. 基于 Bitaper-LPFG-Bitaper 结构的全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪的温度传感特性[J]. *光子学报*, 2013, **42**(3):308-310.
- [7] RINDORF L, JENSEN J B. Photonic crystal fiber long-period gratings for biochemical sensing[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(18):8224-8231.
- [8] HE Zhong-jiao. Characteristics of photonic crystal fiber for hydraulic pressure sensing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(3):317-319.  
何忠蛟. 应用于液压传感的光子晶体光纤特性[J]. *光子学报*, 2012, **41**(3):317-319.
- [9] PRASAD T, MITTLEMAN D M, COLVIN V L. A photonic crystal sensor based on the superprism effect [J]. *Optical Materials*, 2006, **29**(1):56 - 59.
- [10] YI Hua-xiang, CITRIN D S, ZHOU Zhi-ping. Highly sensitive silicon microring sensor with sharp asymmetrical resonance[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(3):2967-2971.
- [11] VOS K D, BARTOLOZZI I, SCHACHT E, *et al.* Silicon-on-Insulator microring resonator for sensitive and label-free biosensing [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(12):7610-7615.
- [12] BOYD R W, HEEBNER J E. Sensitive disk resonator photonic biosensor[J]. *Applied Optics*, 2001, **40**(31):5742-5746.
- [13] ZHANG Xiao-bei, HUANG De-xin, ZHANG Xin-liang. Transmission characteristics of dual microring resonators coupled via 3×3 couplers[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(21):13557-13573.
- [14] XIA F, SEKARIC L, VLASOV Y. A mode conversion losses in silicon-on-insulator photonic wire based racetrack resonators[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(9):3872-3886.
- [15] ZHOU Lin-jie, POON A W. Electrically reconfigurable silicon microring resonator-based filter with waveguide-coupled feedback[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(15):9196-9197.
- [16] YI Hua-xiang, CITRIN D S, ZHOU Zhi-ping. Coupling-induced high-sensitivity silicon microring intensity-based sensor[J]. *Journal of Optical Society in America B*, 2011, **28**(7):1611-1615.
- [17] FAN S. Sharp asymmetric line shapes in side-coupled waveguide-cavity systems [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, **80**(6):908-910.
- [18] CHAO C Y. Biochemical sensors based on polymer microrings with sharp asymmetrical resonance[J]. *Applied Physics Letters*, **83**(8):1527.
- [19] LU Ying, FU Xiang-yong, *et al.* Fano resonance and spectral compression in a ring resonator dropfilter with feedback[J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(1):476-479.
- [20] HAUS H A, HUANG W P, KAWAKAMI S, *et al.* Coupled mode theory of optical waveguides[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1987, **5**(1):16-23.
- [21] CAPMANY J, MURIEL M A. A new transfer matrix formalism for the analysis of fiber ring resonators; compound coupled structures for FDMA demultiplexing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1990, **8**(12):1904-1919.
- [22] KINROT N. Investigation of a periodically segmented waveguide Fabry-Perot interferometer for use as a chemical/biosensor [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, **24**(5):2139-2143.