

微环差分光子生物传感器的传感性能

管磊, 王卓然, 袁国慧, 陈昱任, 董礼, 彭真明

(电子科技大学 光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘要: 通过模拟仿真, 研究了基于绝缘衬底上的硅(Silicon-On-Insulator, SOI)的微环生物传感器的传感性能, 得出其体传感灵敏度为 38.71 nm/RIU, 探测极限为 1.8×10^{-3} RIU, Q 值为 2.22×10^4 。基于该结构, 分析了噪声对传感器性能的影响, 包括光源噪声和温度噪声。为了降低噪声影响, 设计了具有参考和探测通道的双微环差分传感器, 通过差分运算扣除噪声引起的谐振波长漂移, 从而可以有效降低噪声对传感器探测结果的影响。通过数值模拟和计算, 其被探测物的折射率变化的相对误差减小了 15.85%, 表明微环差分传感器可以有效降低噪声的影响, 对提高微环生物传感器的性能将有极大的促进作用。

关键词: 集成光学; 光子传感; 微环生物传感器; 回音壁模式; 差分降噪

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0222002

Sensing performance of micro-ring differential optical biosensor

Guan Lei, Wang Zhuoran, Yuan Guohui, Chen Yuren, Dong Li, Peng Zhenming

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: The sensing performance of micro-ring biosensor on Silicon-On-Insulator (SOI) was studied through simulation. The sensitivity of 38.71 nm/RIU, detection limit of 1.8×10^{-3} RIU and Q factor of 2.22×10^4 were achieved. The effects of noise on the sensor, including the light source noise and temperature noise, were then investigated. A dual micro-ring differential sensor with reference and probe channels was proposed, and the wavelength drift induced by the noises can be deducted to reduce the influence of noise by this differential operation. The relative error of the refractive index change was reduced by 15.85% through the calculation and numerical simulation, so the micro-ring differential biosensor can effectively reduce the influence of noise to enhance the sensing performance of the micro-ring biosensor.

Key words: integrated optics; optical sensing; micro-ring biosensor; whispering gallery mode; differential noise reduction

收稿日期: 2017-08-05; 修订日期: 2017-10-03

基金项目: 国家自然科学基金(61575038, 61571096); 中央高校基本科研业务费专项资金(ZYGX2015J052)

作者简介: 管磊(1990-), 男, 硕士生, 主要从事光通信与集成光学方面的研究。Email: 1510644711@qq.com

导师简介: 王卓然(1977-), 男, 教授, 博士, 主要从事微纳光子学、光通信及生物光子传感方面的研究。Email: wangzhuoran@uestc.edu.cn

0 引言

光学生物传感器^[1]具有非破坏性、灵敏度高、响应快速等诸多的优点,其受到了广泛的关注与研究。而基于光学回音壁模式(Whispering Gallery Mode, WGM)微腔^[2]的光学生物传感器具有品质因子(Quality Factor)高、体积小、自由光谱范围(Free Spectral Range, FSR)大等优点,在激光器^[3]、光学滤波器^[4]、光学传感^[5]等领域有重要应用。WGM 微腔按结构可分为微球腔^[6]、微盘腔^[7]和微环腔^[8],其中微球腔 Q 值很高,但其三维立体结构不易集成;微盘腔 Q 值较高,但盘内模式较复杂,一般为多模传输,各个模式间存在模式干扰;而微环腔内模式简单,且制作工艺简单,易于集成,因此被广泛应用于生物传感器领域。在制作材料的选取方面,硅基材料特别是绝缘衬底上的硅(Silicon-On-Insulator, SOI)^[9]和 Si_3N_4 ^[10]是制作 WGM 微腔的重要材料,主要原因是可与已发展成熟的 CMOS 工艺兼容,易实现微腔的大批量制作与大规模集成。如 2009 年,比利时根特大学 Katrien De Vos 等人制作的基于 SOI 的狭缝波导微环无标记生物传感器^[11]具有 298 nm/RIU 的灵敏度和 4.2×10^{-5} RIU 的探测极限;又如 2010 年,瑞典的 Carlborg 等人制作了基于 Si_3N_4 的微环生物传感芯片^[12],其灵敏度为 240 nm/RIU,探测极限为 8.8×10^{-6} RIU。

但在实际应用中,由于器件表面温度变化、光源中心波长的漂移^[10]等外界环境影响将会造成器件中光模式有效折射率的变化,引起谐振波长的漂移,从而影响器件的性能。目前,抑制温度噪声最直接的解决方法是引入外部温控系统以保证传感器工作于恒温下。而消除激光中心波长漂移的方法是通过锁相反馈技术^[13]或使用法布里珀罗(Fabry Perot, FP)校准具^[14],稳定激光器功率。但这些方法增大了整个传感系统的体积和复杂性。另外一种抑制温度噪声方法是基于硅基材料的热光系数为正,故可使用具有负热光系数的材料以补偿硅基材料的温度噪声^[15],但此方法对材料有较高的要求。相比之下,差分传感技术^[10]则是一种更为简单且有效的降低噪声影响的方法。该方法设置参考通道和探测通道,且两个通道中的微腔工作在不同波长,通过数学运算可扣除噪声引起的谐振波长漂移,降低噪声对传感器探测结果

的影响。此方法具有操作简单、不受材料限制、易于集成等优点。

鉴于此,文中在设计基于 SOI 的回音壁微环生物传感器的基础上,利用差分传感技术设计了双微环差分传感器,并分析了该差分传感器的抑噪能力。

1 单微环传感器性能分析

文中基于 SOI 材料构建单直波导耦合微环传感器,结构如图 1 所示,工作波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 。经过优化后的器件参数如下:直波导与环的宽度 w 均为 440 nm ,环半径 R 为 $5 \mu\text{m}$,耦合间距 gap 为 200 nm ,波导厚度 h 为 250 nm ,此时微环品质因子 Q 值达到 2.22×10^4 。

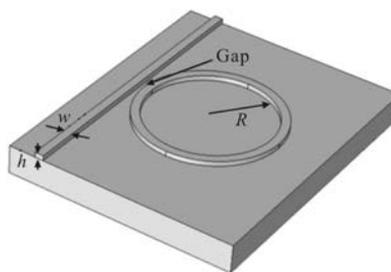


图 1 微环耦合单直波导结构图

Fig.1 Structure of the micro-ring coupled single straight waveguide

光学生物传感器的传感性能主要由灵敏度和探测极限两个参数来衡量。

(1) 灵敏度:表征传感器对待测信号变化的响应能力,WGM 传感器是基于折射率的传感,即被探测物折射率变化引起微腔中光模式有效折射率变化,进而引起微腔谐振波长的移动,其定义为:

$$S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n} \quad (1)$$

式中: Δn 表示被探测物折射率的改变量; $\Delta\lambda$ 表示由 Δn 引起的谐振波长漂移量。

(2) 探测极限:表征传感器所能探测的最小信息变化量,用 LOD(Limit of Detection)来表示,也称为传感器的分辨率,定义为:

$$\text{LOD} = \frac{\Delta\lambda}{S} \quad (2)$$

在理想状态下,在不同浓度的 NaCl 溶液中,微环传感器透射谱如图 2 所示,其中 0%、1%、2%、4%、6% 的 NaCl 溶液折射率分别为 1.331 8、1.335 0、1.336 8、1.340 5、1.344 2。

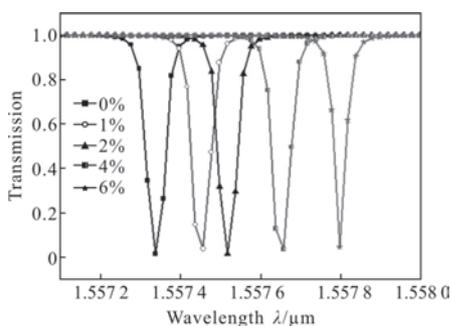


图 2 微环传感器对 NaCl 溶液的体传感响应

Fig.2 Sensitivity response of micro-ring sensor to NaCl solution

从图 2 可知,随着溶液浓度(即折射率)的增大,谐振波长会向长波长方向漂移。根据图 2 谐振波长的漂移量,可获得灵敏度的拟合曲线,如图 3 所示。

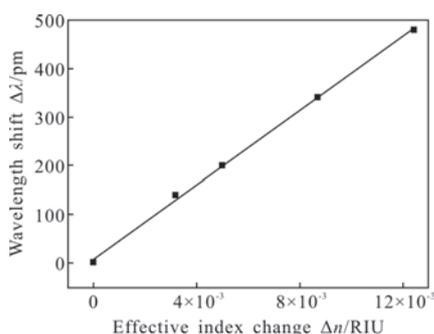


图 3 微环腔传感器对 NaCl 溶液的灵敏度拟合曲线

Fig.3 Sensitivity fitting curve of micro-ring cavity sensor to NaCl solution

根据图 3 的灵敏度拟合曲线,可获得传感器的灵敏度和探测极限为:

$$S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n} = 38.71 \text{ nm/RIU} \quad (3)$$

$$\text{LOD} = \frac{\Delta\lambda}{S} = 1.8 \times 10^{-3} \text{ RIU} \quad (4)$$

2 双微环差分传感器

2.1 噪声分析

WGM 微环生物传感器的噪声主要来自于光源噪声和温度噪声。光源噪声是指光源中心波长的不稳定,如激光器由于驱动电流不稳定或温度变化将导致输出的中心波长 λ_0 有一定的波动,对于中心波长 λ_0 为 $1.55 \mu\text{m}$ 的 DFB 激光器,其中心波长常有 $\Delta\lambda = \pm 0.2 \text{ nm}$ 的波动。图 4 为由于光源中心波长 λ_0 的波动所对应的 SOI 波导中光波模式有效折射率 n_{eff} ,其中波导宽度与厚度均为 250 nm 。而当光源中心波

长 λ_0 波动时,波导中光波模式有效折射率 n_{eff} 也会发生改变,进而引起环的谐振波长 λ_{res} 的移动。从图 4 可以看出,当光源中心波长增大时,波导中光波模式的有效折射率 n_{eff} 减小;再根据环的谐振条件 $2\pi R n_{\text{eff}} = m\lambda_{\text{res}}$,当微环半径 R 和谐振级次 m 确定时, n_{eff} 减小会导致谐振波长 λ_{res} 减小,故光源噪声会影响传感器的灵敏度。

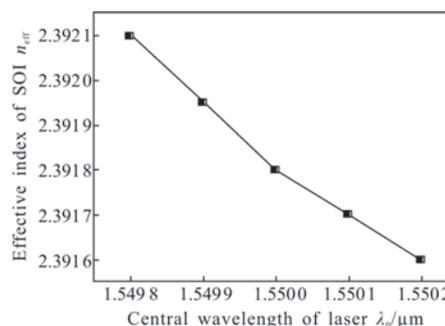


图 4 不同光源中心波长所对应 SOI 波导有效折射率

Fig.4 Effective refractive index of SOI waveguide with different central wavelength of light source

温度噪声对传感器的影响是指由于谐振波长 λ_{res} 随环境温度 T 的升高而向长波长方向移动,造成探测结果的不准确。在 $300 \sim 600 \text{ K}$, $1.55 \mu\text{m}$ 波长处, Si 热光系数可由以下经验公式求得^[16]:

$$\frac{\Delta n}{\Delta T} = 9.45 \times 10^{-5} + 3.47 \times 10^{-7} T - 1.49 \times 10^{-10} T^2 + \dots \quad (5)$$

在 300 K 时, Si 的热光系数在 10^{-4} 量级,而 SiO_2 材料热光系数^[10]约为 $1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$,故基于 SOI 的 WGM 微腔较易受环境温度的影响。

2.2 双微环差分传感器性能分析

双微环的差分传感器是将两个 WGM 微环级联构成一个新的传感系统,其结构如图 5 所示,其中半

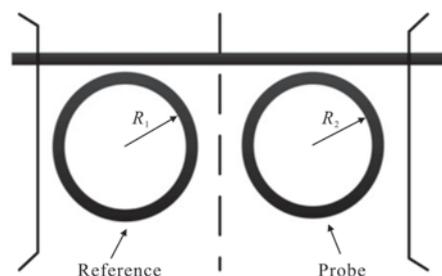


图 5 差分传感器结构

Fig.5 Structure of differential sensor

径为 R_1 的微环为参考通道,半径为 R_2 的微环为探测通道,两个微环半径 R_1 、 R_2 有细微差别,可使两个环的谐振波长不重叠,如图 6 所示。

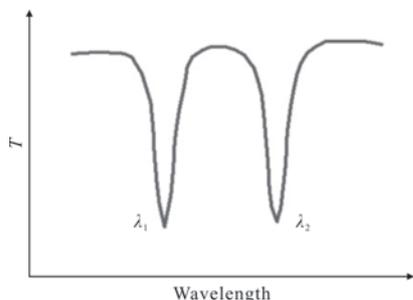


图 6 差分传感器的谐振谱线

Fig.6 Resonance spectrum of differential sensor

取 $R_1=4.996 \mu\text{m}$, $R_2=5 \mu\text{m}$ 。在未施加噪声情况下,参考微环(Refernce Ring, RR)与探测微环(Probe Ring, PR)都流过参考液(去离子水, $n=1.3318$)时,两通道的谐振波长分别为 $\lambda_1=1.555898 \mu\text{m}$, $\lambda_2=1.556897 \mu\text{m}$ 。然后,保持参考通道流过参考液,而探测通道流过待测液(NaCl 溶液),两个通道受相同噪声的影响,得到在不同浓度(折射率)的 NaCl 溶液下差分传感器透射谱线,如图 7 所示。

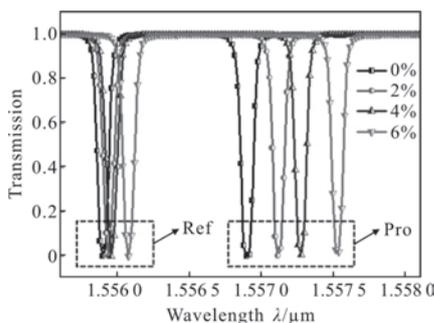


图 7 双微环差分传感器对 NaCl 溶液的体传感响应

Fig.7 Sensitivity response of the double micro-ring differential sensor to the NaCl solution

RR 的谐振波长 λ_1 在仅在噪声干扰下发生漂移(如图 7 中 ref 区域),漂移量为 $\Delta\lambda_1$;而 PR 谐振波长 λ_2 在噪声与待测液折射率变化的共同作用下发生漂移(如图 7 中 pro 区域),漂移量为 $\Delta\lambda_2$ 。从图 7 可以看出,PR 的振波长 λ_2 的漂移量 $\Delta\lambda_2$ 大于 RR 的谐振波长 λ_1 的漂移量 $\Delta\lambda_1$ 。从图 7 中可得 $\Delta\lambda_1$ 、 $\Delta\lambda_2$ 与折射率改变量 Δn 的对应关系,如表 1 所示。将 $\Delta\lambda_2$ 、 $\Delta\lambda_{\text{net}}$ ($\Delta\lambda_{\text{net}}=\Delta\lambda_2-\Delta\lambda_1$) 分别与 Δn 进行拟合,得到如图 8 所

示的灵敏度拟合曲线,其中 PR 表示探测微环,即未去噪时传感器灵敏度,DR 表示差分微环,即差分去噪后传感器灵敏度。

表 1 参考和探测微环谐振波长漂移量与折射率改变量的关系

Tab.1 Relationship between the resonance wavelength shift of the reference and detection micro-ring and the variation of the refractive index

Concentration	$\Delta n/\text{RIU}$	Reference ring $\Delta\lambda_1/\text{pm}$	Detection ring $\Delta\lambda_2/\text{pm}$	$\Delta\lambda_{\text{net}}/\text{pm}$
0%(1.3318)	0	0	0	0
2%(1.3368)	5×10^{-3}	22	223	201
4%(1.3405)	8.7×10^{-3}	70	412	342
6%(1.3442)	12.4×10^{-3}	140	622.4	482.4

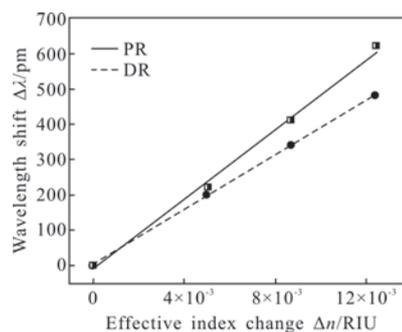


图 8 双微环差分传感器灵敏度拟合曲线

Fig.8 Sensitivity fitting curve of double micro-ring differential sensor

由图 8 可知,在未去噪时传感器灵敏度(S_{noise})和差分去噪后灵敏度(S_{diff})分别为:

$$S_{\text{noise}} = \frac{\Delta\lambda_2}{\Delta n} = 48.27 \text{ nm/RIU} \quad (6)$$

$$S_{\text{diff}} = \frac{\Delta\lambda_{\text{net}}}{\Delta n} = 39.67 \text{ nm/RIU} \quad (7)$$

公式(6)表示半径 $R=5 \mu\text{m}$ 的单微环传感器在受噪声影响时的传感器灵敏度。对单微环传感器来说,在理想情况下,根据公式(3)可知折射率该变量为 $\Delta n = \frac{\Delta\lambda}{38.71}$;而在受噪声影响时,根据公式(6)可知折射率该变量为 $\Delta n = \frac{\Delta\lambda}{48.27}$ 。当在相同的波长漂移量的情况下,单微环传感器由于受噪声的影响,测得的折射率改变量 Δn 偏小。

下面对双微环差分传感器的抑噪能力做分析。设探测物的折射率实际改变量为 Δn_0 , 则在理想的单微腔传感器(不受噪声干扰的传感器)中, Δn_0 引起的谐振波长漂移量为:

$$\Delta\lambda_0 = \Delta n_0 \times S_0 \quad (8)$$

式中: S_0 为理想的单微腔传感器的灵敏度。设在实际传感器中由噪声引起的谐振波长漂移量为 σ , 则在未去噪的单微环(半径 $R=5 \mu\text{m}$)传感器中, 由 Δn_0 引起的谐振波长漂移量实际测量值为:

$$\Delta\lambda_{\text{noise}} = \Delta\lambda_0 + \sigma \quad (9)$$

则由 $\Delta\lambda_{\text{noise}}$ 计算得未去噪时的探测物的折射率改变量为:

$$\Delta n_{\text{noise}} = \frac{\Delta\lambda_{\text{noise}}}{S_{\text{noise}}} = \frac{\Delta\lambda_0 + \sigma}{S_{\text{noise}}} = \frac{\Delta n_0 S_0}{S_{\text{noise}}} + \frac{\sigma}{S_{\text{noise}}} \quad (10)$$

则计算得到的 Δn_{noise} 相对于实际值 Δn_0 的相对误差为:

$$\zeta_{\text{noise}} = \frac{|\Delta n_{\text{noise}} - \Delta n_0|}{\Delta n_0} = \frac{\Delta n_0 - (\Delta n_0 S_0 + \sigma) S_{\text{noise}}}{\Delta n_0} = \left(1 - \frac{S_0}{S_{\text{noise}}}\right) - \frac{\sigma}{S_{\text{noise}}} \cdot \frac{1}{\Delta n_0} \quad (11)$$

在双微环差分传感器, 由于微环半径上稍有差别, 故两个微环在相同噪声干扰下受噪声影响不同。考虑在相同噪声干扰下, PR 由噪声引起的谐振波长漂移量 $\sigma_2 (\sigma_2 = \sigma)$ 不等于 RR 由噪声引起的谐振波长漂移量 σ_1 。则在双微环差分传感器中, 由 Δn_0 引起谐振波长漂移量的实际测量值为:

$$\Delta\lambda_{\text{diff}} = \lambda_2 - \lambda_1 = (\Delta\lambda_0 + \sigma_2) - \sigma_1 = \Delta\lambda_0 + \sigma - \sigma_1 \quad (12)$$

则由 $\Delta\lambda_{\text{diff}}$ 计算得差分去噪后的探测物的折射率改变量 Δn_{eff} 及其相对于实际值 Δn_0 的相对误差为:

$$\Delta n_{\text{diff}} = \frac{\Delta\lambda_{\text{diff}}}{S_{\text{diff}}} = \frac{\Delta\lambda_0 + \sigma - \sigma_1}{S_{\text{diff}}} = \frac{\Delta n_0 S_0}{S_{\text{diff}}} + \frac{\sigma - \sigma_1}{S_{\text{diff}}} \quad (13)$$

$$\zeta_{\text{diff}} = \frac{|\Delta n_{\text{diff}} - \Delta n_0|}{\Delta n_0} = \frac{\Delta n_0 - (\Delta n_0 S_0 + \sigma) S_{\text{diff}}}{\Delta n_0} = \left(1 - \frac{S_0}{S_{\text{diff}}}\right) - \frac{\sigma - \sigma_1}{S_{\text{diff}}} \cdot \frac{1}{\Delta n_0} \quad (14)$$

由于对两个微环施加相同的噪声, 可将由噪声引起的光波模式的等效有效折射率改变量表示为 δn_{noise} :

$$\delta n_{\text{noise}} = \frac{\sigma}{S_{\text{noise}}} = \frac{\sigma - \sigma_1}{S_{\text{diff}}} \quad (15)$$

则公式(11)、(14)可表示为:

$$\zeta_{\text{noise}} = \left(1 - \frac{S_0}{S_{\text{noise}}}\right) - \frac{\delta n_{\text{noise}}}{\Delta n_0} \quad (16)$$

$$\zeta_{\text{diff}} = \left(1 - \frac{S_0}{S_{\text{diff}}}\right) - \frac{\delta n_{\text{noise}}}{\Delta n_0} \quad (17)$$

对比公式(16)、(17), 由于 $S_{\text{diff}} < S_{\text{noise}}$, 故 $\zeta_{\text{diff}} < \zeta_{\text{noise}}$, 即双微腔差分传感器降低了测量值的误差, 提高了探测准确度。

对于单微环传感器, 理想情况下其灵敏度为 $S_0 = 38.71 \text{ nm/RIU}$, 又由公式(6)、(7)知 $S_{\text{noise}} = 48.27 \text{ nm/RIU}$, $S_{\text{diff}} = 39.67 \text{ nm/RIU}$, 则

$$\zeta_{\text{noise}} = 1 - \frac{38.71}{48.27} - \frac{\Delta n_{\text{noise}}}{\Delta n_0} = 19.81\% - \frac{\delta n_{\text{noise}}}{\Delta n_0} \quad (18)$$

$$\zeta_{\text{diff}} = 1 - \frac{38.71}{39.67} - \frac{\Delta n_{\text{noise}}}{\Delta n_0} = 3.96\% - \frac{\delta n_{\text{noise}}}{\Delta n_0} \quad (19)$$

可见, SOI 微环传感器受噪声影响较大, 在未去噪时其测量值存在较大误差, 而差分去噪后 Δn_0 的相对误差减小 15.85%, 其误差得到显著提高。差分传感器虽然不能完全消除噪声的干扰, 但有效降低了测量值的误差, 提高测量结果的准确度。

3 结 论

文中首先设计了基于 SOI 的 WGM 单微环生物传感器, Q 值为 2.22×10^4 , 在理想状态下, 其对 NaCl 溶液体传感灵敏度为 38.71 nm/RIU , 探测极限为 $1.8 \times 10^{-3} \text{ RIU}$ 。但由于实际应用中, 传感器受噪声影响较大, 其中光源噪声由于光源中心波长的漂移会引起波导中光模式的有效折射率改变, 进而引起谐振波长的漂移; 而温度噪声是由于环境温度的改变引起的谐振波长的漂移, 这些影响都会使得测量值存在较大误差, 故文中分析了光源噪声和温度噪声对传感器性能的影响。为了降低噪声影响, 利用差分传感技术设计了双微环差分传感器, 通过差分运算扣除噪声引起的谐振波长漂移, 使折射率的改变量 Δn_0 的误差减小了 15.85%, 从而有效地降低噪声对传感器探测结果的影响, 这对提高微环生物传感器的性能具有重要的作用。相同的分析方法也可扩展到其它差分微腔结构, 对微腔生物传感器的研究及实际应用具有重大意义。

参 考 文 献:

[1] Liang Jufa, Jing Shimei, Meng Aihua, et al. Integrated optical sensor based on a FBG in parallel with a LPG[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(3): 329-334. (in Chinese)
梁居发, 敬世美, 孟爱华, 等. 基于光纤布拉格光栅与长周

- 期光栅并联的集成光学传感器 [J]. 中国光学, 2016, 9(3): 329–334.
- [2] Lu Xiaoyun, Xue Chenyang, Wang Yonghua, et al. Fabrication and test of millimeter-size CaF_2 disk resonator[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 3049–3054. (in Chinese)
卢晓云, 薛晨阳, 王永华, 等. 毫米级氟化钙盘腔的加工与测试[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 3049–3054.
- [3] Tomazio N B, Otuka A J G, Almeida G F B, et al. Femtosecond laser fabrication of high-Q whispering gallery mode microresonators via two-photon polymerization [J]. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 2017, 55(7): 569–574.
- [4] Wan H, Zhu H, Liu L, et al. Ultra-narrow-band optical filter based on whispery-gallery-mode hybrid-microsphere-cavity [C]//International Symposium on Optoelectronic Technology and Application, 2016: 1015311.
- [5] Cui Naidi, Kou Jieting, Liang Jingqiu, et al. Athermal biosensor based on three waveguide micro-ring resonators[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 428–434. (in Chinese)
崔乃迪, 寇婕婷, 梁静秋, 等. 三环型波导微环谐振器无热化生物传感器[J]. 中国光学, 2014, 7(3): 428–434.
- [6] Wang H, Yuan L, Huang J, et al. Integrated microsphere whispering gallery mode probe for highly sensitive refractive index measurement [J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(6): 067105.
- [7] Xu Junjie. Fabrication and research of microdisk resonator with holes [D]. Changchun: Jilin University, 2016. (in Chinese)
徐俊杰. 小孔圆盘复合结构微腔谐振器的制备与研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [8] Ying Yuhai. Design of new kind of tunable micro ring resonator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0620002. (in Chinese)
应毓海. 新型的可调谐微环谐振器的设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(6): 0620002.
- [9] Zhao Jian, Shi Qin, Xia Guoming, et al. Implementation and measurement of a miniaturized silicon resonant accelerometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24 (8): 1927–1933. (in Chinese)
赵健, 施芹, 夏国明, 等. 小型化硅微谐振式加速度计的实现与性能测试[J]. 光学精密工程, 2016, 24(8): 1927–1933.
- [10] Sendowski J B. On-chip integrated label-free optical biosensing[D]. California: California Institute of Technology, 2013.
- [11] Claes T, Molera J G, Vos K D, et al. Label-free biosensing with a slot-waveguide-based ring resonator in silicon on insulator[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2009, 1(3): 197–204.
- [12] Barrois C A. Integrated microring resonator sensor arrays for labs-on-chips [J]. *Analytical & Bioanalytical Chemistry*, 2012, 403(6): 1467–1475.
- [13] Yalcin A, Popat K C, Aldridge L J C, et al. Optical sensing of biomolecules using microring resonators[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, 12 (1): 148–155.
- [14] Li Chao, Wang Yongjie, Li Fang. Highly stable FBG wavelength demodulation system based on F-P etalon with temperature control module [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0122002. (in Chinese)
李超, 王永杰, 李芳. 基于 F-P 温控标准具的高稳定性 FBG 波长解调系统 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 0122002.
- [15] Lee J M, Kim D J, Ahn H. Temperature dependence of silicon nanophotonic ring resonator with a polymeric overlayer [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(8): 2236–2243.
- [16] Wang C T, Wang C Y, Yu J H, et al. Highly sensitive optical temperature sensor based on a SiN micro-ring resonator with liquid crystal cladding [J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 1002–1007.