

基于谐振分离效应的环形微腔设计及仿真研究

唐海泉, 魏重光, 邹璐, 张强, 菅傲群, 桑胜波, 张文栋

(太原理工大学信息工程学院微纳系统研究中心, 新型传感器与智能控制教育部和山西省重点实验室, 山西晋中 030600)

摘要: 随着微纳光学理论的完善和研究的不断深入, 基于环形谐振腔的光学传感器得到了迅速发展。依据单微环的基本理论, 设计串联双环结构并对其谐振不对称分离效应进行分析研究。通过 Mathematics 软件对影响串联双环结构输出谱线的各个参数进行仿真和数据分析, 研究各个参数变化对应输出谱线的变化规律, 确定实现串联双环结构谐振分离效应输出谱线高 Q 值的最优结构参数, 为开展基于串联双环结构谐振分离现象的传感器实验研究奠定基础。

关键词: 光学; 环形谐振腔; 串联双微环; 谐振分离

中图分类号: O436 文献标识码: A 文章编号: 1674-2850(2018)01-0040-06

Design and simulation of ring cavity based on the effect of resonance separation

TANG Haiquan, WEI Chongguang, ZOU Lu, ZHANG Qiang, JIAN Aoqun, SANG Shengbo, ZHANG Wendong

(Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Shanxi Province and Ministry of Education, Micronano System Research Center, College of Information Engineering, Taiyuan University of Technology, Jinzhong, Shanxi 030600, China)

Abstract: With the development of micro-nano optical technology, the optical sensor based on microring resonators has obtained considerable development. Based on the theory of single ring cavity, the series dual-microring configuration was designed and its resonance asymmetrical separation effect was analyzed. All parameters which effect the output spectrum with series dual-microring configuration were researched through Mathematics software by simulation and data analysis. The variation rule of each parameter vs the output spectrum was studied to find out the optimal structure parameters of high Q value of output spectrum to achieve series dual-microring resonance separation effect, respectively. These results laid a foundation for the development of optical sensor experiment based on resonance separation of series dual-microring configuration.

Key words: optics; microring resonators; series dual-microring; resonance separation

0 引言

近年来, 随着光波导研究的深入与制造工艺的不断进步和发展, 微纳光学传感器^[1]及其相关领域的研究得到了人们的广泛关注。微纳光学传感器主要利用光在光波导内传输的约束效应, 将光的发送、接收和信号处理等模块进行高度集成, 从而制作出体积小、方便检测的传感器, 实现对分析物的检测, 便于与其他设备集成, 同时批量化生产还可大幅度降低生产成本^[2-3]。

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金 (20131402110013)

作者简介: 唐海泉 (1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 纳米光波导

通信联系人: 张文栋, 教授, 主要研究方向: 动态测试技术、微纳机电系统 (MEMS 与 NEMS) . E-mail: wdzhang@tyut.edu.cn

光波导是由光透明介质构成的传输光频电磁波的导行结构,具有非线性阈值低^[4-5]、与传统的加工工艺兼容性好^[6-7]、损耗小^[8-9]等优点,可明显提高器件的性能,在光量子器件^[10-11]、光集成^[7, 12]、微光学器件^[13-14]、高分辨率传感器^[15-16]、光量子计算机和光通信网络^[17-18]等领域有着极大的研究潜力,也是研究高灵敏度传感器和发展全光网络的核心技术,同时也是超大规模集成电路光电一体化集成的重要基础^[6]。

设计和研究基于谐振腔理论的光学传感器是光波导研究领域的一个重要方向^[4, 7]。由谐振腔构成的回音壁模式,可以把光限制在微腔内传播,因此 Q 值可以达到很高。微腔的 Q 值与传感器的灵敏度和分辨率息息相关,应用回音壁模式高 Q 值的特点,可改善生物传感器的分辨率,提高现有传感器的检测精度和检测范围。光学生物传感器近几年发展迅速,由于具有免标记、无损、隔离电磁干扰等优点,受到很多学者的青睐。目前光学生物传感在食品检测、生物医学、国防科技、制药产业和环境治理等各个领域都有应用^[19-21]。

本文在单环理论的基础上,重点研究串联双环结构谐振的不对称分离现象,通过仿真分析的方法,对影响谐振不对称分离输出谱线的各个参数进行研究,最终确定应用谐振不对称分离现象设计传感器的最佳参数。

1 串联双微环基本理论与谐振分离现象原理

1.1 串联双微环结构

串联双微环结构如图 1 所示,该结构由两个微环和一根直波导构成,两个微环在波导的同一侧构成串联结构。当光从入射端 (E_{in}) 进入串联微环系统中时,首先光通过直波导与环 1 间的耦合作用,进入环 1 中,这一过程与单环结构的耦合过程类似,接着两环之间发生耦合,即环 1 的部分光耦合到环 2 中。当两环的相位条件满足相消干涉时,光无法存储在微环中,此时输出端 ($E_{through}$) 的能量达到最大;当两环满足相位干涉增强的条件时,光主要存储在微环中,此时输出端 ($E_{through}$) 的光能量最小。

根据微环耦合理论,两环之间相互耦合,形成的电场各个参数之间的关系可表示为^[4]

$$\begin{pmatrix} E_{12} \\ E_{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_2 & it_2 \\ it_2 & r_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{11} \\ E_{22} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中, r_2 和 t_2 分别为两环之间的反射耦合系数和传输耦合系数,且二者之间的关系满足 $|r_2|^2 + |t_2|^2 = 1$ 。在理想条件下,当两环的谐振状态达到稳定时,两环的场边界条件是连续的,谐振条件满足:

$$\exp(i\delta_1) = \tau_{21} = \frac{r_2 - \exp(-i\delta_2)}{1 - r_2 \cdot \exp(-i\delta_2)}, \quad (2)$$

$$\exp(i\delta_2) = \tau_{12} = \frac{r_2 - \exp(-i\delta_1)}{1 - r_2 \cdot \exp(-i\delta_1)}. \quad (3)$$

通过对上述方程进行求解,可以得到以下特征方程:

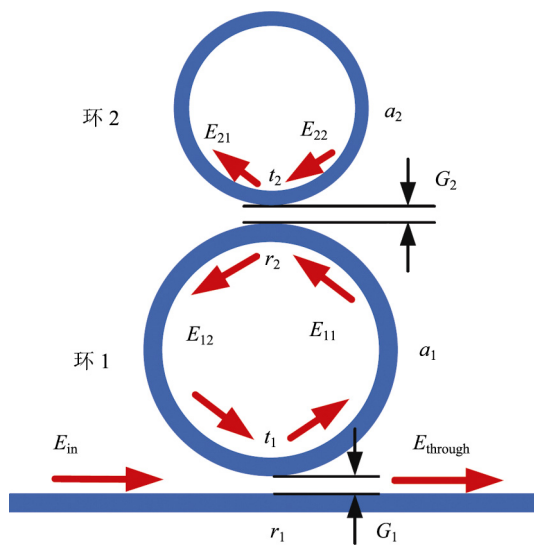


图 1 串联双微环结构示意图

Fig. 1 Diagram of series dual-microring configuration

$$\cos\left[\frac{(\gamma+1)\delta_1}{2}\right] = r \cos\left[\frac{(\gamma-1)\delta_1}{2}\right], \quad (4)$$

其中, $\gamma = \delta_2 / \delta_1$ 表示环 2 与环 1 的相位之比, γ 也代表了环 2 与环 1 的腔周长的比值。

由图 1 可以明显看出, 该结构是在单环的基础上增加了一个微环, 设新加入的微环对系统的影响为 τ_{21} :

$$\tau_{21} = \frac{r_2 - a_2 \cdot \exp(-i\delta_2)}{1 - a_2 \cdot r_2 \cdot \exp(-i\delta_2)}; \quad (5)$$

由此可得串联双环透射功率的表达式^[22]:

$$T = \left| \frac{E_{\text{through}}}{E_{\text{in}}} \right|^2 = \left| \frac{r_1 - a_1 \cdot \tau_{21} \cdot \exp(-i\delta_1)}{1 - a_1 \cdot r_1 \cdot \tau_{21} \cdot \exp(-i\delta_1)} \right|^2; \quad (6)$$

其中, a_1 、 a_2 分别为环 1、环 2 的损耗系数。

1.2 串联双微环谐振分离现象

谐振分离现象是指在串联双环结构的基础上, 改变两环半径, 使两环半径有较大差距, 环 1 的半径远大于环 2, 这样环 2 的耦合作用会远小于环 1。在串联双环两环半径相等的情况下, 此时两环的耦合作用基本相同, 是大小相同、相位不同的两条光路的光通过干涉形成的。当两环的半径不同时, 由于耦合进入微环的光在两个微环中的光程不同, 光的有效相位也不相同, 由此形成的谐振峰值也不同。当系统达到稳定状态时, 两环之间存在正谐振和反谐振两种状态。正谐振使输出的能量增强, 反谐振使输出的能量减弱, 因此得到的输出曲线观察到明显的谐振分离现象^[23]。

根据上述公式, 应用 Mathematics 软件, 设定损耗系数 $a_1=a_2=0.99$, 耦合系数 $r_1=r_2=0.90$, 环 1 半径 $R_1=5\ 000\ \mu\text{m}$, 两环的周长比 $\gamma=2$, 得到的输出谱线如图 2 所示, 图左侧形成了一个尖锐的谐振峰, 且其峰值较大, 主要是由于两环之间发生正谐振作用产生的; 图右侧形成的两个谐振峰峰值较小, 主要是由于两环之间发生反谐振作用产生的。通过计算可得, 左侧的谐振峰 Q 值可达 3×10^5 。

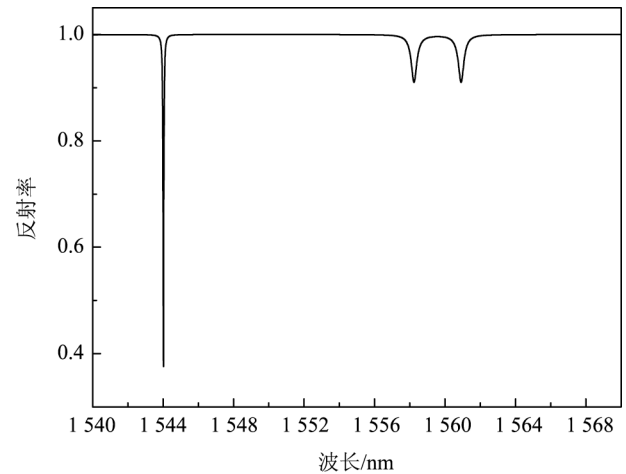


图 2 串联谐振分离输出谱线

Fig. 2 Series resonance separation output spectrum

2 串联双微环谐振分离参数仿真研究

微环折射率、损耗系数、两环周长比和耦合系数等参数是影响输出谱线的主要因素。本文通过对公式的推导和分析, 采用控制变量法, 应用仿真软件模拟仿真了不同参数情况下的输出谱线, 再对仿真结果进行对比分析, 选出最合适的数据, 从而确定串联结构中选用的参数。在仿真过程中, 采用控制变量法, 即研究某一参数时, 保持其他参数不变的方法。根据多组仿真结果, 结合推导出的输出谱线公式, 设定基础参数为: 损耗系数 $a_1=a_2=0.99$, 耦合系数 $r_1=r_2=0.90$, 环半径 $R_1=5\ 000\ \mu\text{m}$, $\gamma=2$, 折射率 $n=3.475$ 。

2.1 微环半径对谐振分离输出谱线的影响

谐振的不对称分离是在两环半径不同的基础上实现的, 因此两环的周长比 γ 对输出谱线十分重要。在本节中, 设定环 1 的半径 $R_1=5\ 000\ \mu\text{m}$, 改变环 2 的半径 R_2 , 不同半径下的输出谱线如图 3 所示。可

可以看出, 当 $\gamma=1$ 时, 没有谐振分离现象产生; 随着 γ 的增大, 谐振分离现象越来越明显, 当 $\gamma=2$ 时, 谐振峰值最大。不同 γ 情况下谐振峰的 Q 值变化很小, 但仍然呈增大趋势, 在 $\gamma=2$ 时达到最大。

2.2 损耗系数对谐振分离输出谱线的影响

从串联双环透射功率的表达式可以看出, 损耗系数对系统的输出曲线具有重要影响, 由于参数 a 与输出结果 T 之间并不是简单的比例关系, 本文仿真不同的耦合系数, 通过对比输出谱线的变化、分析仿真数据来确定参数对输出结果的影响, 并确定适合系统的最佳损耗系数。

1) 改变环 1 的损耗系数 a_1

设定其他系统参数为基础参数, 设定环 2 的损耗系数 $a_2=0.99$, 改变环 1 的损耗系数 a_1 , 得到的输出曲线如图 4 所示 (左侧峰值放大图)。可以看出, 环 1 的损耗系数从 0.91 增长到 0.99, 谐振波长始终保持不变, 随着损耗系数的增大, 谐振峰值逐渐增大, 所得的谐振峰 Q 值也不断增大。其原因在于, 随着损耗系数的增大, 损耗的光越来越少, 耦合进入环的光能量越来越大, 因此得到的峰值也越来越大。

2) 改变环 2 的损耗系数 a_2

设定其他系统参数为基础参数, 设定环 1 的损耗系数 $a_1=0.99$, 改变环 2 的损耗系数 a_2 , 得到的输出曲线如图 5 所示 (左侧峰值放大图)。可以看出, 随着 a_2 的增大, 谐振峰呈明显的增大趋势, 在 $a_2=0.99$ 时, 谐振峰值和 Q 值达到最大。原因在于, 环 2 的损耗系数增大, 使得环 2 中损耗的光能量减小, 留在环内的能量增多, 与环 1 耦合形成的谐振峰峰值越来越大。

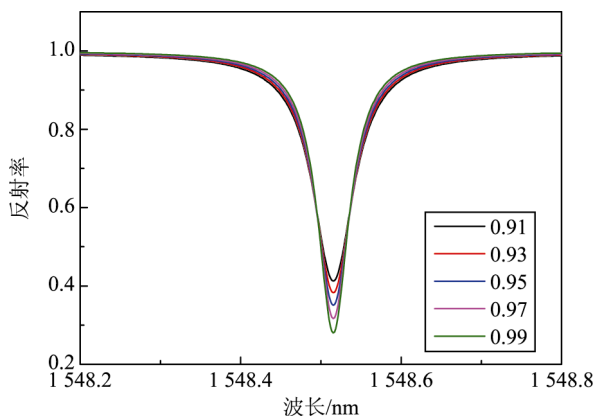


图 4 改变环 1 的损耗系数 a_1 的输出谱线
Fig. 4 Output spectrums of the changed loss coefficient a_1 of ring 1

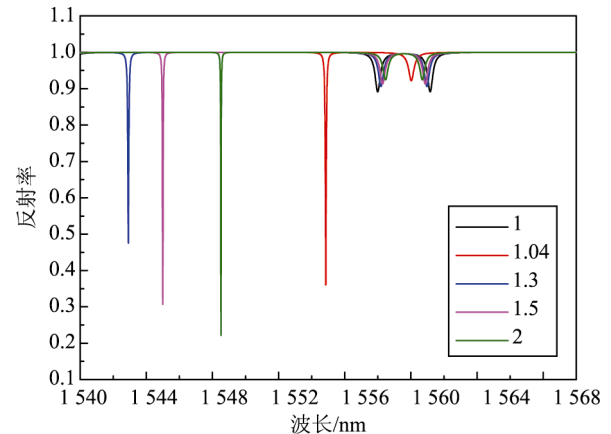


图 3 改变两环周长比 γ 的输出谱线
Fig. 3 Output spectrums of the changed two rings' perimeter ratio γ

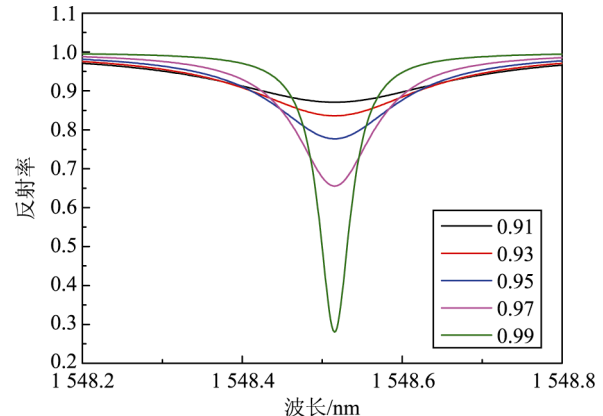


图 5 改变环 2 的损耗系数 a_2 的输出谱线
Fig. 5 Output spectrums of the changed loss coefficient a_2 of ring 2

通过以上仿真及对所得数据的对比分析发现, 曲线特性 (峰值、 Q 值等) 均随损耗系数的增大而增大, a_2 对输出曲线的影响比 a_1 更明显。当损耗系数 $a_1=a_2=0.99$ 时, 所得的输出曲线特性最好, 因此本系统最终选用这一组损耗系数。

2.3 耦合系数对谐振分离输出谱线的影响

根据串联双环透射功率的表达式, 耦合系数是影响输出曲线特性的另一重要因素, 文中将采用类似

研究损耗系数的方法来研究耦合系数与输出曲线的关系, 从而确定最适合系统的参数。

1) 改变环 1 的耦合系数 r_1

设定其他参数为基础参数, 设定环 2 的耦合系数 $r_2=0.90$, 改变环 1 的耦合系数 r_1 , 得到的输出曲线如图 6 所示。可以看出, 随着 r_1 的增大, 谐振波长不变, 谐振峰值逐渐减小, 但同时谐振峰也变得尖锐。

2) 改变环 2 的耦合系数 r_2

设定其他参数为基础参数, 设定环 1 的耦合系数 $r_1=0.90$, 改变环 2 的耦合系数 r_2 , 得到的输出曲线如图 7 所示。可以看出, 随着 r_2 的增大, 谐振波长不变, 谐振峰值逐渐减小, 但同时谐振峰也变得尖锐, 与单独改变 r_1 的情况类似。

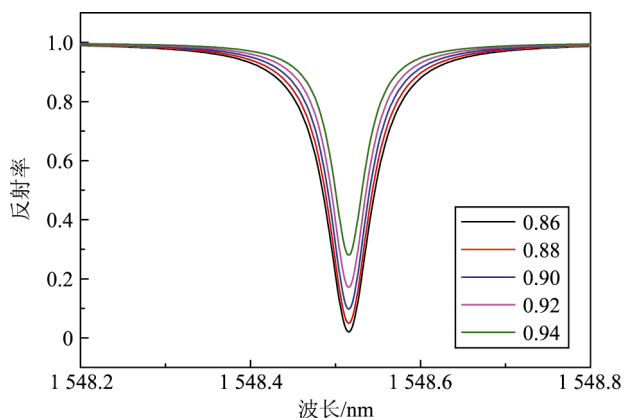


图 6 改变环 1 的耦合系数 r_1 的输出谱线

Fig. 6 Output spectrums of the changed coupling coefficient r_1 of ring 1

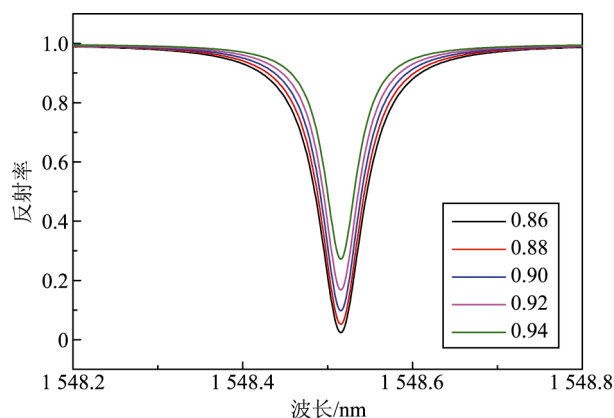


图 7 改变环 2 的耦合系数 r_2 的输出谱线

Fig. 7 Output spectrums of the changed coupling coefficient r_2 of ring 2

根据以上对耦合系数的仿真数据对比与分析, 通过计算可知, 虽然随着耦合系数的增大, 谐振峰越来越尖锐, 但谐振峰的峰值在减小, 这两者同时影响着系统的 Q 值, 因此并非耦合系数越大, Q 值越大。根据仿真结果计算, 在 $r_1=r_2=0.90$ 时, 系统的 Q 值达到最大, 传感器的综合参数达到最佳。

3 结论

本文主要介绍了串联双环结构光学传感器的基本原理及计算方法, 着重研究了串联双环结构在两个微环半径不等的条件下形成的谐振分离现象。根据微环基本理论, 应用转移矩阵法推导出输出谱线的表达式, 并应用 Mathematics 软件, 根据公式对影响输出谱线的各个参数进行仿真和分析。对影响谐振分析输出谱线的微环半径比、微环折射率、波导耦合系数和损耗系数等关键参数进行仿真计算与分析, 找出各个参数与输出谱线的关系, 确定串联不对称分离模型的最优参数为: 损耗系数 $a_1=a_2=0.99$, 耦合系数 $r_1=r_2=0.90$, 环半径 $R_1=5\ 000\ \mu\text{m}$, $\gamma=2$ 。为以后开展基于串联双环谐振不对称分离传感器的实验和研究奠定了理论基础。

[参考文献] (References)

- [1] 江先鑫. 硅基集成光波导生物传感器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
JIANG X X. Optical waveguide biosensors based on silicon-on-insulator platform[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese)
- [2] 严英占. 面向角速度传感的高 Q 值微谐振腔及其耦合结构关键技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2012.
YAN Y Z. The key technology of the high- Q microresonator and its coupling structure for angular rate sensing researches[D]. Taiyuan: North Central University, 2012. (in Chinese)

- [3] 刘正. 基于 SOI 环形谐振腔的加速度传感器研究[D]. 太原: 中北大学, 2011.
LIU Z. Research of MOEMS accelerometer based on SOI micro-ring resonator[D]. Taiyuan: North Central University, 2011. (in Chinese)
- [4] 邓丽莉. 基于 SOI 的光学微环谐振腔设计及性能研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
DENG L L. Design and performance research of optical micro-ring resonators based on SOI[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [5] 史倩. 集成光波导光延迟技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
SHI Q. Research on integrated optical waveguide for optical true time delay technology[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [6] 石强. SOI 光波导微环结构的优化设计与加工[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
SHI Q. Structural design and optimization of SOI-based microring[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [7] 臧俊斌. 集成光波导微环谐振腔的电光调制特性研究[D]. 太原: 中北大学, 2013.
ZANG J B. Research of electro-optical modulation characteristics of integrated optical waveguide micro-ring resonator[D]. Taiyuan: North Central University, 2013. (in Chinese)
- [8] 刘丹, 马仁敏, 王菲菲, 等. 纳米集成光路中的光源、光波导和光增强[J]. 物理学报, 2008, 57(1): 371-381.
LIU D, MA R M, WANG F F, et al. The light source, optical waveguide and light enhancement of nano-integrated optical circuit[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(1): 371-381. (in Chinese)
- [9] 晋玉剑, 薛晨阳, 丑修建, 等. 高 Q 值环形波导微谐振腔研究进展[J]. 材料导报, 2011, 25(13): 65-69.
JIN Y J, XUE C Y, CHOU X J, et al. Research advance of waveguide micro-ring resonators with high Q value[J]. Materials Review, 2011, 25(13): 65-69. (in Chinese)
- [10] AOKI T, PARKINS A S, ALTON D J, et al. Efficient routing of single photons by one atom and a microtoroidal cavity[J]. Physical Review Letters, 2009, 102(8): 083601.
- [11] LU T, YANG L, van LOON R V, et al. On-chip green silica upconversion microlaser[J]. Optics Letters, 2009, 34(4): 482-484.
- [12] VAHALA K, HERRMANN M, KNÜNZ S, et al. A phonon laser[J]. Nature Physics, 2009, 5(9): 682-686.
- [13] KNUNZ S, HERRMANN M, BATTEIGER V, et al. Injection locking of a trapped-ion phonon laser[J]. Physical Review Letters, 2010, 105(1): 013004.
- [14] LIN Q, ROSENBERG J, CHANG D, et al. Coherent mixing of mechanical excitations in nano-optomechanical structures[J]. Nature Photonics, 2010, 4(4): 236-242.
- [15] GRUDININ I S, VAHALA K J. Thermal instability of a compound resonator[J]. Optics Express, 2009, 17(16): 14088-14097.
- [16] MIN B, OSTBY E, SORGER V, et al. High- Q surface-plasmon-polariton whispering-gallery microcavity[J]. Nature, 2009, 457(7228): 455-458.
- [17] VOLLMER F, ARNOLD S. Whispering-gallery-mode biosensing: label-free detection down to single molecules[J]. Nature Methods, 2008, 5(7): 591-596.
- [18] KIPPENBERG T J, TCHEBOTAREVA A L, KALKMAN J, et al. Purcell-factor-enhanced scattering from Si nanocrystals in an optical microcavity[J]. Physical Review Letters, 2009, 103(2): 027406.
- [19] FAN X D, WHITE I M, SHOPOVA S I, et al. Sensitive optical biosensors for unlabeled targets: a review[J]. Analytica Chimica Acta, 2008, 620(1-2): 8-26.
- [20] BAASKE M, VOLLMER F. Optical resonator biosensors: molecular diagnostic and nanoparticle detection on an integrated platform[J]. Chem. Phys. Chem., 2012, 13(2): 427-436.
- [21] 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.
- [22] 王永华. 基于 SOI 级联双环的耦合谐振腔诱导透明效应的研究[D]. 太原: 中北大学, 2014.
WANG Y H. The coupled-resonator-induced transparency based on cascaded double-ring resonators in SOI[D]. Taiyuan: North Central University, 2014. (in Chinese)
- [23] FARD S T, DONZELLA V, SCHMIDT S A, et al. Performance of ultra-thin SOI-based resonators for sensing applications[J]. Optics Express, 2014, 22(12): 14166-14179.