

微管回音壁谐振模径向模式的影响

江俊峰¹ 张 晶¹ 刘铁根¹ 刘 琨¹ 于 哲¹ 张学智¹ 刘文辉^{1,2} 陈文杰¹

(¹ 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)
(² 军事交通学院基础部, 天津 300161)

摘要 理论分析了微管回音壁谐振模(WGM)不同径向模式下的光场分布对传感灵敏度的影响。通过改变入射光角度,利用棱镜耦合的方法在微管中激发出不同的径向模式,利用不同质量分数的乙醇水溶液进行传感实验,分别获得了不同径向模式的传感灵敏度。结果表明传感灵敏度受径向模式数影响较大,由 28 阶 WGM 径向模式下的 2.725 nm/RIU(折射率单元)提高到 38 阶径向模式时的 24.464 nm/RIU,实验结果与理论分析基本一致。

关键词 生物光学;径向模式;灵敏度;微管;回音壁谐振模

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1228003

Effect of Radial Modes of Whispering Gallery Mode in Microtube

Jiang Junfeng¹ Zhang Jing¹ Liu Tiegen¹ Liu Kun¹ Yu Zhe¹ Zhang Xuezhi¹
Liu Wenhui¹ Chen Wenjie¹

(¹ Key Laboratory of Optoelectronics Information Technology, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)
(² General Courses Department, Academy of Military Transportation, Tianjin 300161, China)

Abstract Effects of the radial modes of electric field in microtube on detection sensitivity of whispering gallery mode (WGM) based opto-fluidic biosensor are theoretically analyzed. By increasing the incident angle of the prism, different radial modes are excited in experiment through the prism coupling method. The sensitivity of the sensor with different radial modes is measured by sensing experiments using ethanol solution of different mass fractions. The results show that sensitivity is obviously affected by radial modes. The sensitivity is enhanced from 2.725 nm/RIU (refractive index unit) to 24.464 nm/RIU when the radial mode increases from 28 to 38, which is consistent with the theoretical analysis.

Key words biological optics; radial mode; sensitivity; microtube; whispering gallery mode

OCIS codes 030.4070; 080.2740; 260.2110; 260.6970; 280.1415; 310.6870

1 引 言

基于折射率变化的光学生物传感器是一种无标记的生物传感器,它通过探测生物化学反应中分析物折射率的变化感知待测样品,由于不需要样品具有荧光、特征吸收或散射带等特殊性质^[1-2],也无需对分析物进行预处理,因此极大地扩展了检测对象的范围^[3-4]。其中,基于回音壁谐振模式(WGM)的微谐振腔生物传感器近年来受到了各国科研工作者的广泛关注。这类微腔利用全反射效应将光限制在

光学微腔中,具有极高的谐振腔品质因数,大大增加了光与物质相互作用的距离,因而具有很高的传感灵敏度^[5-6]。

基于回音壁谐振模式的光学微腔结构的研究主要集中在微球腔、微盘腔、微环腔和微管等^[7-11]。其中,微管因其本身可作为分析物的输送通道,实现样品输送通道与传感通道合二为一,很大程度地简化传感探测体系^[12],因此非常适合用于构建光微流体传感系统。微管根据管壁厚度可以分为薄壁微管

收稿日期: 2013-06-08; **收到修改稿日期**: 2013-07-14

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327802)、国家自然科学基金(61227011, 11004150, 61108070)、教育部科学技术研究重大项目(313038)、天津市科技支撑计划重点项目(11ZCKFGX01900)、天津市自然科学基金(13JCYBJC162000)

作者简介: 江俊峰(1977—),男,博士,副教授,主要从事光微流体生物传感、光纤传感、光电检测等方面的研究。

E-mail: jiangjfxu@tju.edu.cn

和厚壁微管。通常薄壁微管壁厚小于 $5 \mu\text{m}$, 只支持几个低阶径向模式, 因此分析简便。然而薄壁微管本身机械强度较低, 加工难度大, 不易操作^[13]。厚壁微管相对而言在操作上更加简单易行^[14-15]。相应地, 厚壁微管支持非常多的径向模式, 它们之间的传感灵敏度并不相等。

本文首先从理论上分析了厚壁微管不同径向模式对传感灵敏度的影响, 接着利用棱镜耦合的方式在微管腔中分别激发具有不同径向模式数的 WGM, 并比较传感灵敏度。结果表明通过改变入

射光的入射角度来激发具有不同径向模式数的 WGM, 可以获得不同的传感灵敏度, 在厚壁微管中通过激发高阶模式的方法可以提高传感器的传感灵敏度。

2 理论分析

2.1 传感模型

用于光微流体传感检测的微管结构如图 1 所示。在柱坐标下从 Maxwell 方程出发可以解得微管内电场模式分布为^[13]

$$E_r = \begin{cases} A_m J_m [k^{(m,l)} n_1 r], & r \leq R_1 \\ B_m J_m [k^{(m,l)} n_2 r] + C_m H_m^{(l)} [k^{(m,l)} n_2 r], & R_1 < r \leq R_2, \\ D_m H_m^{(l)} [k^{(m,l)} n_3 r], & r > R_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中 A_m, B_m, C_m, D_m 为待定常数, n_1, n_2, n_3 分别为微管内部、微管管壁和微管外部的折射率, R_1 和 R_2 为微管的内外壁半径, m 和 l 代表角模式数和径向模式数, J_m 和 $H_m^{(l)}$ 分别为 m 阶贝塞尔函数和 m 阶一类汉克尔函数, $k^{(m,l)}$ 是角模式数为 m , 径向模式数为 l 的波矢的绝对值。

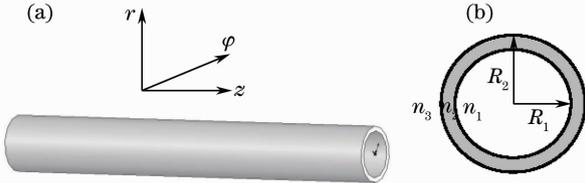


图 1 用于生物传感的微管模型。(a)微管腔结构; (b)横截面图

Fig. 1 Microtube model for biological sensing.

(a) Microtube structure; (b) cross section view

输入光通过倏逝场耦合进入微管, 当波长满足微管谐振腔谐振条件时, 可在垂直于 z 轴的横截面激发 WGM 模式, 因而输出光谱中可形成一系列对应 WGM 模式的窄带谐振下陷谱线, 其下陷位置与微管的谐振波长相对应。当微管内部通过待测溶液时, 管内的折射率会发生改变, 进而影响微管谐振腔中的光传播常数, 使得微管 WGM 谐振谱线在谐振波长处发生漂移。WGM 谐振谱线漂移量与分析物浓度变化的比值即为传感检测的灵敏度, 通过对 WGM 谐振模式漂移量的分析, 即可探测出待测溶液的浓度等信息。

2.2 径向模式对传感灵敏度的影响

通过对基于微管的光微流体传感模型的分析可知, 生物传感检测的灵敏度与微管内光场模式分布

有直接关系, 当谐振光场更多地进入到微管内部时, 光信号与待测样品的作用区域增大, 传感灵敏度也相应提高。在 WGM 谐振模的径向模式阶数较低时, 能量靠近微管的外壁; 当阶数增加时, 光场向内壁移动。因此使用高阶模式参与传感可使更多的光能参与到检测中, 有望获得更高的检测灵敏度。

图 2 是仿真计算的微管腔中 TE_{720}^{38} 和 TE_{720}^{40} 两种模式的光强径向分布, 仿真计算参数为: 微管内外壁半径分别为 $R_1 = 126 \mu\text{m}$, $R_2 = 162 \mu\text{m}$, 微管内部、微管管壁和外部的折射率分别为 $n_1 = 1.0000$, $n_2 = 1.4667$, $n_3 = 1.0000$ 。可以看到尽管两种模式下光场都在微管腔中形成谐振模式, 但具有高阶径向模式数 (TE_{720}^{40} 模式) 的光场分布更加靠近内壁, 其光场在微管内壁表面附近有较强的分布, 而相对低阶的 TE_{720}^{38} 模式的光场分布则较为靠近管壁的外表面, 这使得高阶的 TE_{720}^{40} 模式能有更强的光场参与到传感中, 增强与待测物质之间的相互作用, 提高传感检测的灵敏度。

图 3 是仿真计算的 TE_{715}^l 、 TE_{720}^l 、 TE_{250}^l 和 TE_{730}^l 四种模式下灵敏度随径向模式数 l 增加时的变化曲

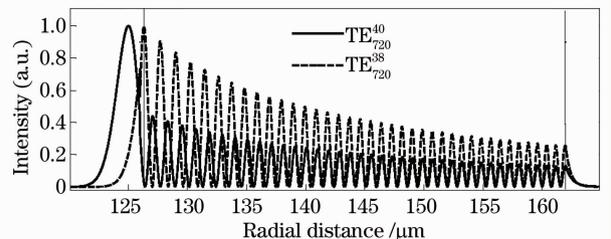


图 2 不同径向模式数光场分布比较

Fig. 2 Intensity distribution of the two WGMs

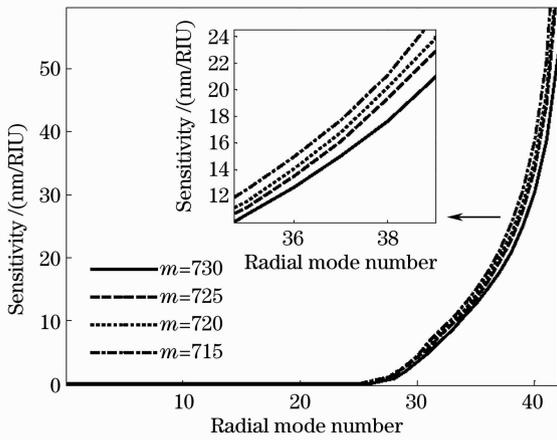

 图3 TE_m^l 模式下不同径向模式的灵敏度

Fig. 3 Sensitivity of TE_m^l mode for different radial modes 曲线。当径向模式数较低时,灵敏度接近为零,此时由于管壁较厚,光场几乎完全局限于微管管壁内,因此微管管腔内部折射率变化并不能引起谐振光场的明显变化;当径向模式数增加时,光场向内壁方向移动,有更多的光进入到微管内,与待测物相互作用,参与传感检测,此时灵敏度相应提高。可以看出

TE_m^{40} 相较 TE_m^{25} 灵敏度提升了 50 倍之多。通过仿真计算可知,不同角模式数下,灵敏度随径向模式数的变化趋势是一致的,而且从图中还可以看出,角模式数从 715 变化到 730,传感灵敏度的差别不大,这说明角模式数对灵敏度的影响较小,影响灵敏度的主要因素是径向模式数。

3 实验验证

图 4 为实验装置示意图,采用放大自发辐射 (ASE) 宽带激光器作为光源,光源波长范围为 1530~1570 nm, C-lens 自聚焦透镜固定在一个高精度旋转台上,旋转台的调节范围为 4° , 调节精度为 $2'$ 。输入光经棱镜通过倏逝场耦合进微管谐振腔(图中使用深色线条表示耦合光路),耦合棱镜选用 ZF13 等腰直角棱镜,其材料折射率为 1.7447;所用熔融石英微管内径 $250 \mu\text{m}$, 外径 $360 \mu\text{m}$ (含 $36 \mu\text{m}$ 厚的涂覆层), 在 1550 nm 处折射率为 1.4446。棱镜反射回的光再经另一个 C-lens 自聚焦透镜(未画出)接收,最后由光谱仪记录反射光谱。

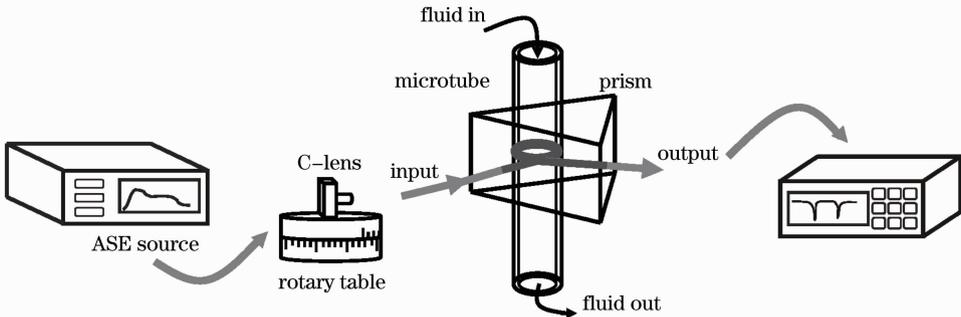


图 4 实验装置图

Fig. 4 Diagram of the experimental apparatus

实验中通过旋转台调节入射光入射角度可以获得具有不同阶数径向模式的 WGM 模。图 5 为顺时针旋转入射光源时的棱镜内光路示意图,设起始角度为 $\frac{\pi}{4}$, 当光源入射角度改变 θ_1 时,耦合点处实际的入射角度值为

$$i = \frac{\pi}{4} - \arcsin\left(\frac{1}{n_p} \sin \theta_1\right), \quad (2)$$

其中 n_p 为棱镜的折射率。从(2)式可以看出,顺时针调节旋转台角度,可以减小入射角。当棱镜中光场模式的传播常数 $\beta = nk \cos i$ 与微管中支持模式的传播常数相同时,该模式的光波可以耦合进入微管,因此存在于微管中的光场模式与棱镜的入射角度有关,当入射角度减小时传播常数增加,光场模式数也相应增大。

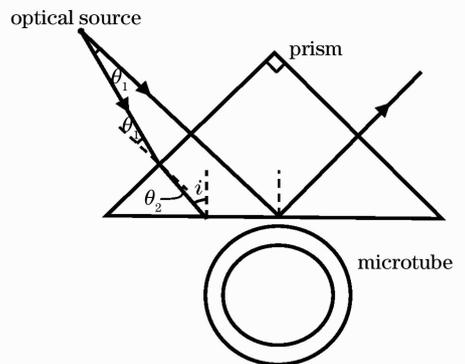


图 5 入射光角度示意图

Fig. 5 Diagram of the incident light angle

图 6 是微管内部为空气时的谐振传输谱线,其中长虚线为实测光源光谱,实线为激发微管谐振模式后的实测接收光谱,短虚线为二者之差亦即消除

了光源光谱影响的微管谐振光谱。光源波长范围为 1550~1565 nm,在光源的波长范围内有 8 个谐振峰,波长依次为 1550.928,1552.545,1554.152,1555.765,1557.340,1558.955,1560.594,1562.206 nm,每两个谐振峰之间存在较小的下陷。根据理论分析可知,径向模式数相同而角模式数不同的 WGM 模式在径向的电场分布几乎相同,具有相近的折射率传感灵敏度和耦合效率,在光谱上表现为一系列具有相近下陷深度的谐振峰,即 8 个大峰;而对于径向模式数不同的 WGM 模式,由于其在径向的电场分布不同,所以无论是折射率传感灵敏度还是耦合效率都有很大差别,在谐振谱上表现为深度较浅的下陷峰,即大峰之间的小峰。

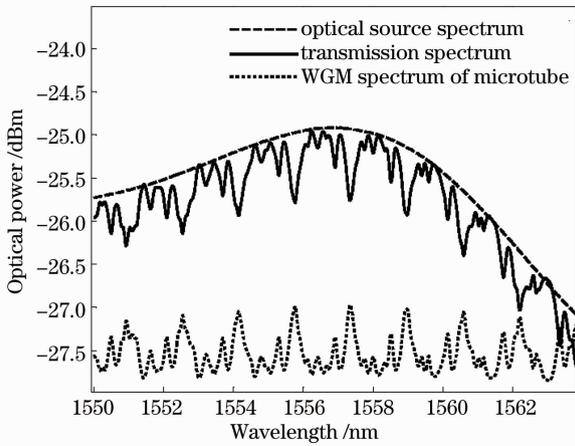


图 6 微管谐振谱线

Fig. 6 WGM spectra of microtube

相邻两个谐振波长之间的间隔,即自由光谱范围(FSR)约为 1.613 nm,在 $\lambda = 1557.340$ nm 处,谱线半峰全宽 $\Delta\lambda_{3\text{dB}} = 0.25$ nm,故微管的品质因数 $Q = \lambda / \Delta\lambda_{3\text{dB}} = 0.623 \times 10^4$ 。

图 7 为 5 种入射角度下的微管谐振谱线,入射光的起始入射角度为 40° ,每次减小 $2'$,可以看到激发出的微管 WGM 的透射谱线的位置和形状都发生了改变。将无水乙醇和蒸馏水配置成为不同浓度的乙醇溶液,并用蠕动泵以 20 mL/min 的恒定速率抽运到微管中,通过比较微管 WGM 谐振峰漂移情况对传感器的性能进行分析。图 8 给出乙醇溶液质量分数为 10%、20% 和 30% 的谐振谱线,可以明显看到谐振谱线的漂移。

针对 5 种不同的径向模式,向微管内分别通入质量分数为 10%~90% 的乙醇溶液进行传感检测,其结果如图 9 所示,其中纵坐标为微管中 WGM 谐振谱线波长相对于注入质量分数为 10% 乙醇溶液的漂移量。从图中可以看出,相同折射率变化引起的波长漂

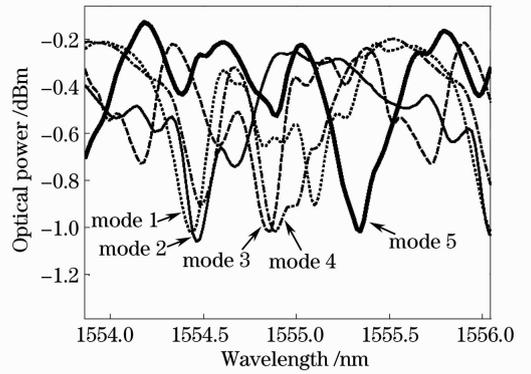


图 7 5 个入射角度对应的 5 种模式谱线

Fig. 7 Modes corresponding to five incident angles

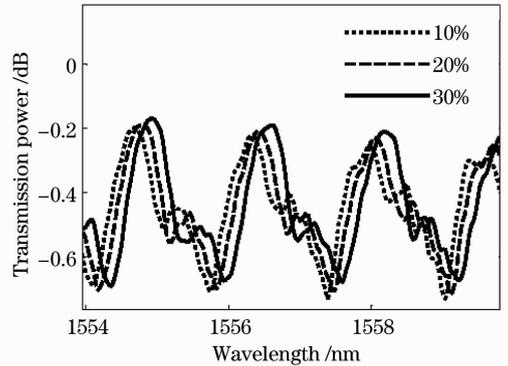


图 8 微管中通入不同浓度的乙醇溶液时的谐振谱

Fig. 8 Resonance spectra of microtube for alcohol with different mass fractions

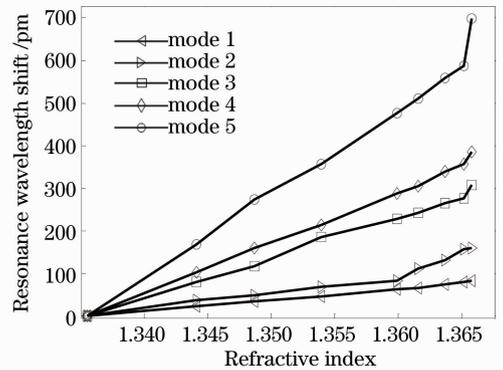


图 9 谐振波长随微管中乙醇溶液折射率的变化曲线

Fig. 9 Relation between the resonance wavelength shift and the liquid refractive index in the microtube

移量会随着径向模式数增加而增加,相应的传感检测的灵敏度也随之提高,相比 mode 1,mode 5 的灵敏度从 2.725 nm/RIU 提高到了 24.464 nm/RIU,提高了 9 倍。

图 10 给出了不同 WGM 径向模式灵敏度的理论仿真计算值与实验结果的对比,图中叉号为实验所得数据。实验数据落在了角模式数 715~730 的范围内,通过 2 节的理论分析可知,角模式数对传感

灵敏度影响不大,影响灵敏度的主要因素是径向模式数,因此图 10 中 5 种模式的灵敏度变化主要是径向模式数的改变造成的。从图 10 可以看出,实验中激发的最高阶径向模式为第 38 阶,相比于起始角度时的第 28 阶 WGM 径向模式,其灵敏度从 2.725 nm/RIU 提高到了 24.464 nm/RIU,这一实验结果与前述理论分析基本一致。

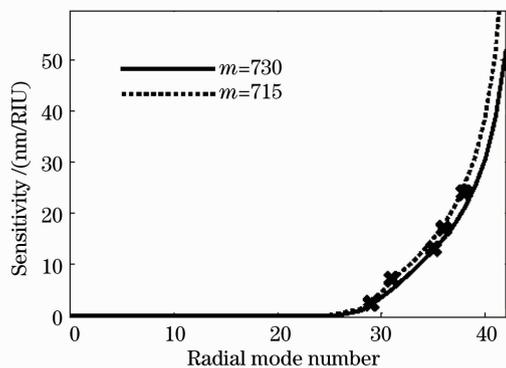


图 10 不同径向模式灵敏度的仿真值与实验数据比较

Fig. 10 Comparison of different radial mode sensitivity between simulation and experiment

4 结 论

通过对微管中具有不同径向模式数的 WGM 进行理论分析,表明了当径向模式数增加时,光场分布会更趋向微管内部,因此灵敏度可以通过增加径向模式数的方法来提高。在实验中通过改变入射光角度激发具有不同径向模式的 WGM,对理论部分进行了验证。实验中观察到灵敏度由 2.725 nm/RIU 提高到了 24.464 nm/RIU,与理论预期一致,有助于今后在厚壁微管传感器中实现高灵敏度生物化学传感。

参 考 文 献

1 Jiang Junfeng, Liu Tiegeng, Li Haiwei, *et al.*. Review on label-free optical bio-sensing technology based on whisper-gallery-mode [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 30(11): 3076–3080.
江俊峰, 刘铁根, 李海伟, 等. 基于回音壁谐振模的无标记光学生物传感技术[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 30(11): 3076–3080.

2 X Fan, I M White, S I Shopova, *et al.*. Sensitive optical biosensors for unlabeled targets; a review [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2008, 620(1-2): 8–26.
3 X Fan, I M White. Optofluidic microsystems for chemical and biological analysis [J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(10): 591–597.
4 Shu Fangjie, Yang Qifan. Research progress of asymmetric microcavity [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(6): 060006.
舒方杰, 杨起帆. 非对称微腔研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(6): 060006.
5 K J Vahala. Optical microcavities [J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 839–846.
6 A M Armani, R P Kulkarni, S E Fraser, *et al.*. Label-free, single-molecule detection with optical microcavities [J]. *Science*, 2007, 317(5839): 783–787.
7 X Fan, I M White, H Zhu, *et al.*. Overview of novel integrated optical ring resonator bio/chemical sensors [C]. *SPIE*, 2007, 6452: 64520M.
8 M L Gorodetsky, A A Savchenkov, V S Ilchenko. Ultimate Q of optical microsphere resonators [J]. *Opt Lett*, 1996, 21(7): 453–455.
9 Dai Shixun, Lu Laiwei, Tao Guangming, *et al.*. Research progress of glass microspheres for optical microcavity [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(8): 080001.
戴世勋, 路来伟, 陶光明, 等. 用于光学微腔的玻璃微球研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(8): 080001.
10 Yang Rui, Yu Wenhua, Bao Yang, *et al.*. Whispering-gallery modes based on evanescent field in cylindrical micro-cavity [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(10): 6412–6418.
杨睿, 於文华, 鲍洋, 等. 消逝场耦合圆柱形微腔中回音壁模式结构的实验研究[J]. *物理学报*, 2008, 57(10): 6412–6418.
11 Jin Hu, Lu Yun, Bai Xiaosong. Experimental study of whispering gallery mode-based spherical optical microcavity [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(6): 062301.
金虎, 陆云, 白晓淞. 基于回音壁模式的球形光学微腔实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(6): 062301.
12 I M White, H Oveys, X Fan, *et al.*. Integrated multiplexed biosensors based on liquid core optical ring resonators and antiresonant reflecting optical waveguides [J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 89(19): 191106.
13 I M White, H Oveys, X Fan. Liquid-core optical ring-resonator sensors [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(9): 1319–1321.
14 T Ling, L J Guo. A unique resonance mode observed in a prism-coupled micro-tube resonator sensor with superior index sensitivity [J]. *Opt Express*, 2007, 15(25): 17424–17432.
15 Ji Qiang, Jiang Junfeng, Liu Tiegeng, *et al.*. The effect of dielectric layer parameter coated on microtube inner wall surface on optofluidics biosensor sensitivity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0228004.
姬强, 江俊峰, 刘铁根, 等. 微管内壁介质层参数对光微流体传感灵敏度的影响研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0228004.

栏目编辑: 张 腾