

D 型光纤与微管耦合的微流控折射率传感器*

张伟 万静† 蒙列 罗曜伟 郭明瑞

(南京邮电大学电子与光学工程学院和柔性电子(未来技术)学院, 南京 210023)

(2022 年 6 月 8 日收到; 2022 年 7 月 12 日收到修改稿)

基于 D 型光纤与回音壁模式的微管谐振腔耦合, 结合微流控技术, 本文提出一种折射率传感器, 其中耦合区采用全封装方式. 此传感器所需液体样本很少 (约 5 nL), 不易碎, 抗环境干扰能力、可移植性和重复性优于一般光纤与微腔耦合的传感器. 通过数值仿真, 研究了微流控微管谐振腔的谐振特性, 并分析了折射率传感的性能. 研究表明, 管壁厚度和液体折射率对传感性能影响比较大, 谐振波长漂移量与液体折射率有良好的线性关系, 折射率灵敏度高 (510.5—852.7 nm/RIU), Q 值可达 5.53×10^4 , 探测极限可达 2.11×10^{-6} .

关键词: 微流控光学, D 型光纤, 微管谐振腔, 折射率传感

PACS: 07.07.Df, 42.60.Da, 42.81.Pa

DOI: 10.7498/aps.71.20221137

1 引言

液体的折射率与液体的浓度、成分、黏度、纯度以及环境温度、压力等密切相关. 各类光学传感器主要基于折射率传感, 已广泛应用于工业、环保、化学、生物、医药、光通信等领域的各种检测中. 相比其他折射率传感器, 光纤折射率传感器具有结构紧凑、体积小、灵敏度高、抗电磁干扰能力强、可远程操作等优点.

众多光纤折射率传感器中, 近十几年来, 光纤与回音壁模式 (whispering gallery mode, WGM) 微腔^[1–3]耦合的传感器因耦合效率高、成本低、测量精度高而受到越来越多的关注, 应用包括折射率^[4–6]、温度^[7]、磁场^[8]、生物传感^[9]等. 其中锥形光纤与微腔耦合的传感器最常见, 但是锥形光纤腰锥直径仅 1—2 μm , 易碎. 此外, 锥形光纤与微腔开放式耦合易受环境污染, 且耦合距离不稳定, 会改变耦合条件或降低耦合效率. 2011 年, Yan 等^[10]提出点封装法, 将锥形光纤与微球耦合, 品质因子 Q 值

达 10^7 级别. 2019 年 Zhang 等^[11]实现点封装法的锥形光纤与微球耦合的折射率传感器, 其灵敏度为 20.49 nm/RIU, 检测极限为 4.3×10^{-4} . 点封装法使耦合距离稳定, 但是开放式耦合易受环境干扰. 2013 年 Monifi 等^[12]提出全封装的实心微环与锥形光纤耦合的温度传感器, Q 值也达 10^7 级别. 全封装法提供了耦合稳定性, 避免环境干扰 (如污染物、振动等), 可移植, 可重复操作. 然而, 即便采用点封装或全封装方式, 锥形光纤在加工和组装时仍然易碎. D 型光纤 (D-type optical fiber, DTOF) 又称侧抛光纤 (side-polished fiber), 一侧包层抛去, 纤芯半露, 另一部分纤芯仍植于包层中, 因而相比锥形光纤不易碎. 2013 年 Duduś 等^[13]报道了一种 D 型光纤沉浸于待测液体中并运用马赫-曾德尔 (MZI) 干涉法的折射率传感器, 波长偏移量和折射率变化不具线性关系, 且波长漂移量相比折射率变化很小. 我们没有查到有关 D 型光纤与微腔耦合的传感器报道.

常见的 WGM 光学微腔有微球、微环、微管等. 相比固体实心微腔, 空心微腔可以充液体,

* 国家自然科学基金 (批准号: 61574080) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wanj@njupt.edu.cn

能够实现液体样本传送通道与谐振腔合二为一. 现代微流控光学可以提供微腔中液体输入、输出与替换技术, 构建微流控光学传感系统, 并且所需液体样本量少. 集微流控光学与 WGM 谐振腔卓越性能一体的传感器具有潜在的良好发展前景. 万洪丹等^[14]报道的锥形光纤与微管耦合的微流控生物传感器对应折射率灵敏度是 23.36 nm/RIU, 没有封装.

本文提出一种基于 D 型光纤与微管谐振腔耦合的微流控折射率传感器, 采用全封装方式, 集微流控光学与 WGM 谐振腔卓越性能一体. 此折射率传感器所需液体样本量很少 (约 5 nL), 不易碎, 其鲁棒性、抗环境干扰能力、可移植性和可重复性优于一般光纤与微腔耦合的传感器, 波长漂移量与液体样本折射率变化具有良好的线性关系, 且折射率灵敏度高 (510.5—852.7 nm/RIU).

2 结构与理论

如图 1(a), D 型光纤与微管耦合的微流控折射率传感器主要由三部分组成: D 型光纤、微流控微管谐振腔、低折射率封装介质. 其中 D 型光纤采用标准单模光纤侧面半抛光成 D 型, 一侧去包层后, 半露的纤芯由两端向中间逐渐抛光变细, 纤芯中间

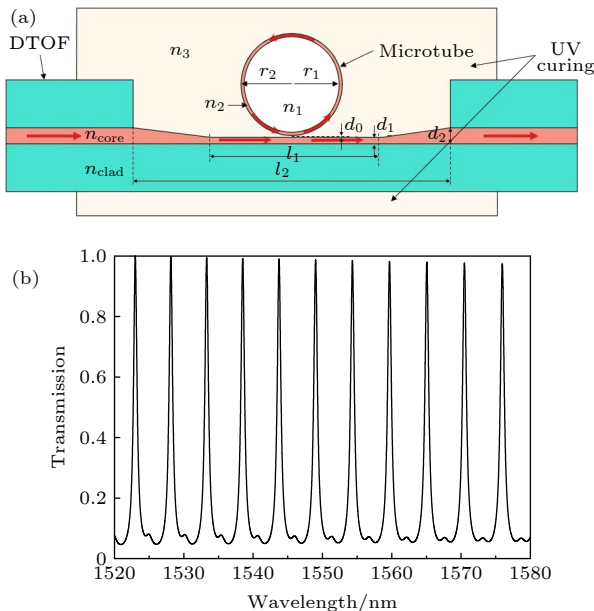


图 1 D 型光纤与微管耦合的微流控折射率传感器 (a) 结构; (b) 微管内 WGM 谐振光谱

Fig. 1. Microfluidic refractive index sensor based on D-type fiber and microtube coupling: (a) Structure; (b) WGM resonance spectrum in the microtube.

最细段厚度 $d_1 = 1.5 \mu\text{m}$, 长 $l_1 = 100 \mu\text{m}$, 纤芯两端直径 $d_2 = 8.3 \mu\text{m}$, 抛光区总长 $l_2 = 700 \mu\text{m}$, 过渡区成半拉锥状. 低折射率封装介质采用 UV 固化剂, 折射率为 1.315. 微管由中空的石英管制作, 折射率为 1.4446, 内径 $r_1 = 49 \mu\text{m}$, 外径 $r_2 = 50 \mu\text{m}$, 壁厚 $d = 1 \mu\text{m}$. 微管与 D 型光纤的耦合距离 $d_0 = 0.1 \mu\text{m}$. 微管内通过微流控技术输入、输出或更换液体. 液体折射率设为 n_1 , 耦合区所需液体样本约 5 nL.

D 型光纤与微管耦合的微流控折射率传感器制作过程分为四大步骤. 第一步, D 型光纤的制作^[15–17]. 选取一根单模光纤, 使用飞秒激光微加工的方法制作 D 型光纤 (侧抛光纤). 在抛光区, 先抛去光纤一侧的包层成传统 D 型光纤, 然后将半露的光纤芯由两端向中间逐渐抛光变细, 至中间细纤芯的厚度为 $1.5 \mu\text{m}$, 长度为 $100 \mu\text{m}$, 两端过渡区纤芯呈半拉锥形状. 第二步, 薄壁微管的制作^[18,19]. 首先, 选取一根直径为 100 mm 的中空石英微管, 利用光纤拉丝塔的炉腔进行拉伸, 至微管的直径到 $200 \mu\text{m}$, 然后, 使用融合和拉伸技术进一步减小微管的直径. 这种方法确保微管外表面的最佳光纤质量, 避免使用化学刻蚀所造成的损耗. 第三步, 调节耦合距离. 将制备好的 D 型光纤和微管置于多维移动平台上, 调整高精度光学显微镜的焦距和放大倍数, 清晰地看到 D 型光纤与微管. 调整多维移动平台, 达到所需耦合距离 d_0 , 同时保持微管的纵向与 D 型光纤纵向垂直, 并与光纤抛光面平行. 第四步, 使用 UV 固化剂对微管-D 型光纤耦合区封装. 将 UV 固化剂滴满整个耦合区, 同时进一步优化耦合距离, 具体方法与上述第三步相同, 再用紫外 (UV) 灯照射, 使其完全固化. 最后, 通过微流控技术给微管中注入待测液体.

在 D 型光纤与微管耦合区, 入射光中那些波长满足微腔谐振条件的光以倏逝波耦合方式从 D 型光纤进入微管谐振腔中, 以回音壁模式在腔内形成稳定的振荡. 结果使得光纤输出端的光谱中对应这些谐振波长处表现为强吸收, 呈现凹陷峰.

回音壁模式通常形成于支持光循环的对称微腔中, 如微环、微管、微球等, 可显著增加光与物质相互作用的长度^[20]. 回音壁模式谐振条件为

$$Ln_{\text{eff}} = m\lambda_{\text{res}}, \quad (1)$$

其中 $L = 2\pi r_2$ 为谐振腔的周长; m 为角模式数; λ_{res} 为谐振波长; n_{eff} 为谐振腔的有效折射率. n_{eff} 表达

式如下:

$$n_{\text{eff}} = n_1 a_1 + n_3 a_3 + n_2(1 - a_1 - a_3), \quad (2)$$

其中 n_1 , n_2 和 n_3 分别表示管芯内液体、管壁和周围介质的折射率; a_1 和 a_3 分别是管芯和微管外围分布的光能量比例.

本文中的无源微腔内不存在自由电荷和传导电流, 对应的 Maxwell 方程如下:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = -\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0, \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0. \quad (6)$$

由此可得无源介质波动方程:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 n^2 \mathbf{E} = 0. \quad (7)$$

对于轴向对称的微腔, 柱坐标系 (r, θ, z) 下的折射率分布与 θ 无关, 仅依赖于半径 r . 垂直于微管 z 轴横向激发 WGM 时, 电磁场 TE 模在微管中的电场只有径向分量 E_r 和轴向分量 E_θ , 由 Maxwell 方程可得^[21]

$$E_r = \frac{m}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r r} H_z, \quad (8)$$

$$E_\theta = \frac{1}{i\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r r} \frac{\partial H_z}{\partial r}, \quad (9)$$

其中 ε_0 为真空中的介电常数, ε_r 为介质中的介电常数. H_z 分布如下^[22]:

$$H_z(r) = \begin{cases} AJ_m(kn_1 r) & 0 \leq r \leq r_1, \\ BJ_m(kn_2 r) + CN_m(kn_2 r) & r_1 \leq r \leq r_2, \\ DH_m^{(1)}(kn_3 r) & r_2 \leq r \leq \infty, \end{cases} \quad (10)$$

其中 $J_m(\cdot)$ 是第一类 Bessel 函数; $N_m(\cdot)$ 是第二类 Bessel 函数; $H_m^{(1)}(\cdot)$ 是第一类 Hankel 函数, k 为波数, r_1 和 r_2 分别表示薄壁微管的内径和外径. 利用 r_1 和 r_2 两界面处的边界连续条件:

$$H_{z1}(r_1) = H_{z2}(r_1), \quad (11)$$

$$\left. \frac{\partial H_{z1}}{\partial r} \right|_{r=r_1} = \left. \frac{\partial H_{z2}}{\partial r} \right|_{r=r_1}, \quad (12)$$

$$H_{z2}(r_2) = H_{z3}(r_2), \quad (13)$$

$$\left. \frac{\partial H_{z2}}{\partial r} \right|_{r=r_2} = \left. \frac{\partial H_{z3}}{\partial r} \right|_{r=r_2}, \quad (14)$$

可得

$$\frac{n_2 J_m(kn_1 r_1)}{n_1 J'_m(kn_1 r_1)} = \frac{(B/C)J_m(kn_2 r_1) + N_m(kn_2 r_1)}{(B/C)J'_m(kn_2 r_1) + N'_m(kn_2 r_1)}, \quad (15)$$

$$\frac{B}{C} = \frac{n_2 H_m^{(1)}(kn_2 r_2) N'_m(kn_3 r_2) - n_3 H'_m(kn_2 r_2) N_m(kn_3 r_2)}{n_3 J_m(kn_2 r_2) H'_m(kn_3 r_2) - n_2 J'_m(kn_2 r_2) H_m^{(1)}(kn_3 r_2)}. \quad (16)$$

进一步联立得到

$$\frac{A}{C} = \frac{(B/C)J_m(kn_2 r_1) + N_m(kn_2 r_1)}{J_m(kn_1 r_1)}, \quad (17)$$

$$\frac{D}{C} = \frac{(B/C)J_m(kn_2 r_2) + N_m(kn_2 r_2)}{J_m(kn_3 r_2)}. \quad (18)$$

根据上述公式可得到微管谐振腔内的 WGM 分布. 其中, WGM 模式的角模式数 m 由 (1) 式和 (2) 式确定, 径向模式数 l 由 (15) 式确定. 对于选定的 m , 由 (15) 式可以计算出一系列 k , 分别对应不同的径向模式数 l , 相应的模式表示为 TE_m^l .

根据以上理论, 当管芯中液体折射率 n_1 发生变化时, 谐振腔的有效折射率 n_{eff} 随之变化, 则各本征模谐振波长也随之发生偏移. 根据输出光谱中各谐振波长的偏移量, 可以测量液体折射率的变化. 设谐振波长随管芯液体折射率变化而发生的偏

移量为 $\Delta\lambda$, 则折射率传感器的灵敏度 S 为

$$S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n}. \quad (19)$$

除灵敏度外, Q 值和探测极限 (DL) 也是传感器的重要性能参数. 由谐振波长 λ_{res} 和半高线宽 (FWHM) 可得 Q 值^[23] 为

$$Q = \frac{\lambda_{\text{res}}}{\text{FWHM}}, \quad (20)$$

探测极限^[24] 为

$$\text{DL} = \frac{3\sigma}{S}. \quad (21)$$

其中 σ 是线宽的标准差, 通常取线宽的 1/50.

3 分析与讨论

基于前面理论和时域有限差分法仿真软件

FDTD Solutions, 本节研究和讨论了 D 型光纤与微管耦合的微流控折射率传感器的谐振特性与传感性能.

使用 FDTD Solutions 仿真软件进行仿真时, 网格的精细度为 3, 边界条件为理想匹配层 (PML), 空间背景折射率为 1; 光源为 1520—1580 nm 波长范围的高斯激光, 入射光功率为 1 mW.

传感器的性能 (如: Q 值、探测极限、灵敏度等) 主要取决于微管的直径、壁厚、折射率和管芯液体的折射率以及微管外封装介质的折射率. 本文采用折射率为 1.4446 的中空石英微管, 封装介质的折射率为 1.315. 如果管芯中液体折射率 n_1 小于 1.4446 (如: 1.330), 那么, 如图 2(b) 所示, 大部分光能量被束缚在微管壁中, 管芯中分布能量很少, 光与管芯中待测液体的相互作用很弱. 因而, 液体折射率灵敏度低 (89.5 nm/RIU), Q 值低 (939.59). 如果管芯液体的折射率 n_1 大于微管壁的折射率 n_2 , 则较多的光分布于管芯液体中, 可提高传感器的灵敏度等性能. 又由于大多数液体的折射率小于 1.700, 故本文选取 1.450, 1.500 和 1.700 附近三段折射率区间进行折射率传感分析.

图 3 是液体折射率 n_1 在 1.450 附近对应不同微管壁厚度的输出光谱. 表 1 列出了液体折射率 n_1 在 1.450 和 1.500 附近对应不同微管壁厚度的传感器性能. 由图 3 和表 1 可见, 随着微管壁厚度由 1.5 μm 减小到 1 μm , 折射率 n_1 在 1.450 附近的灵敏度由 238.3 nm/RIU 增加到 805.2 nm/RIU, Q 值由 2.42×10^3 增加到 3.86×10^3 . 折射率 n_1 在 1.500 附近的灵敏度和 Q 值也相应增加. 结果显示, 微管壁越薄, 传感器的折射率灵敏度和 Q 值越大. 但是, 管壁越薄对加工工艺要求越高. 综合考虑, 本文管壁厚度选为 1 μm .

表 1 不同微管壁厚度的传感器性能

Table 1. Sensor properties of different microtube-wall thicknesses.

微管壁的厚度/ μm	液体的折射率			
	1.450—1.458		1.500—1.504	
	Q 值	灵敏度/(nm·RIU ⁻¹)	Q 值	灵敏度/(nm·RIU ⁻¹)
1.5	2.42×10^3	238.3	1.10×10^4	709.7
1	2.77×10^3	510.7	1.15×10^4	815.6
0.5	3.86×10^3	805.2	5.00×10^4	914.4

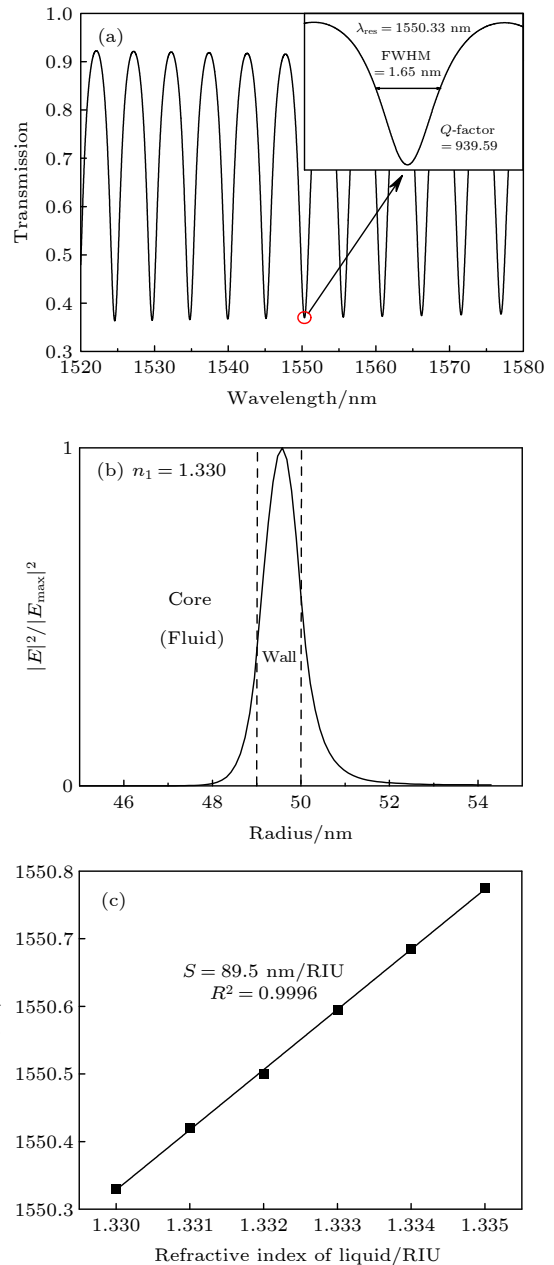


图 2 管芯液体折射率 n_1 为 1.330 时的传感特性 (a) 输出光谱, 其中右上角是谐振波长 λ_{res} 为 1550.33 nm 时对应的半高线宽 (FWHM) 和 Q 值; (b) 微管谐振腔中光场径向分布, 其中两条虚线所夹空间为微管壁; (c) 折射率灵敏度曲线

Fig. 2. Sensing characteristics under the liquid refractive index n_1 of 1.330: (a) Output spectrum, where there is the FWHM and Q -factor of the resonant wavelength (λ_{res}) of 1550.33 nm at the top-right corner; (b) radial distribution of optical field in the microtube resonator, and the space between two dotted lines is the microtube wall; (c) curve of the refractive index sensitivity.

微管谐振腔中径向光场分布和 D 型光纤后端输出光谱如图 4 和图 5 所示. 当微管芯液体折射率在 1.450—1.700 区间时, 微管谐振腔可以达到临界耦合状态, 且在折射率传感过程中耦合率保持在

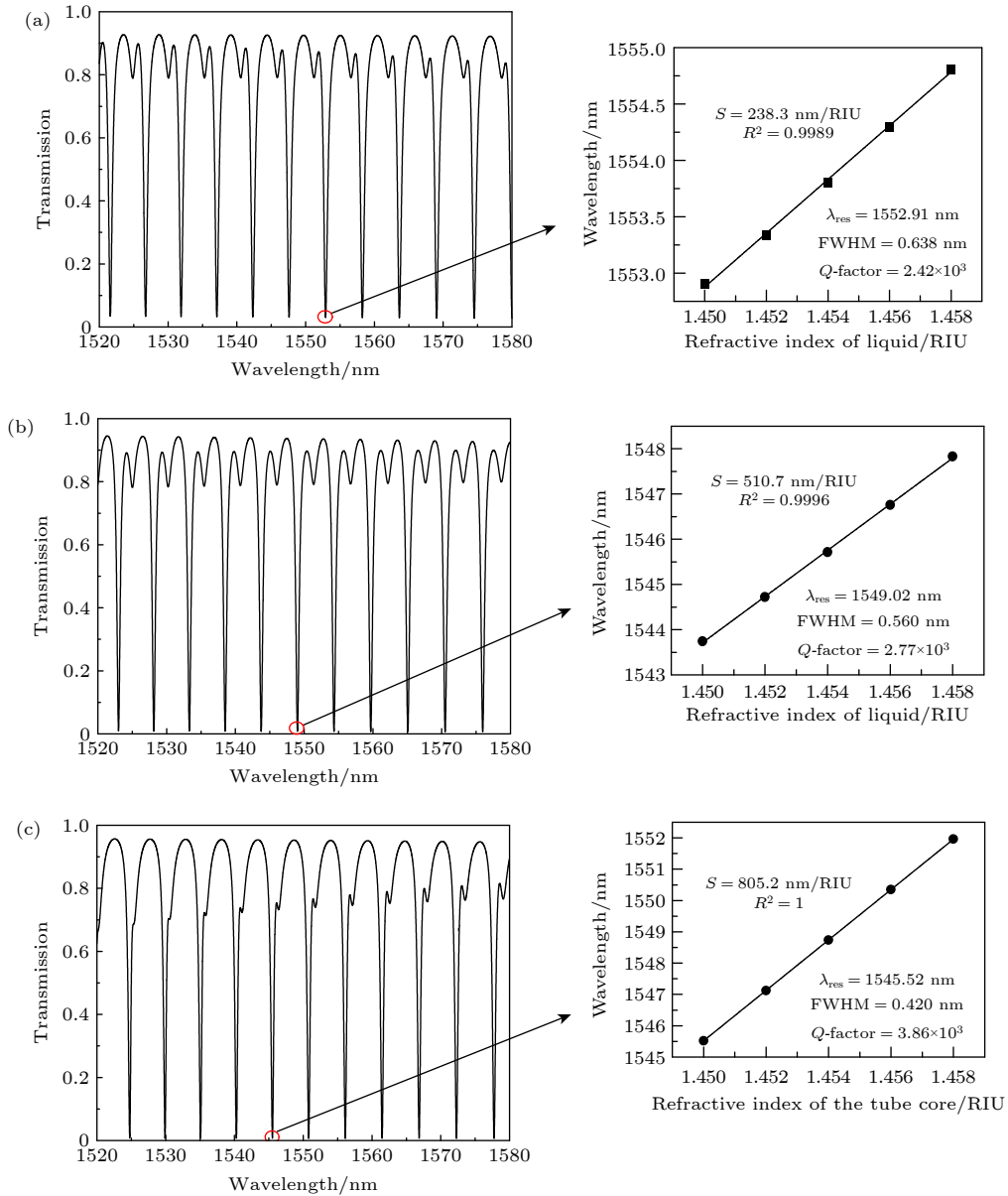


图 3 微管壁厚度不同时的输出光谱, 其中右上角是待测液体折射率 n_1 为 1.450—1.458 时的灵敏度曲线, 图 (a)—(c) 对应的微管壁厚度分别为 (a) 1.5 μm ; (b) 1 μm ; (c) 0.5 μm

Fig. 3. Output spectra corresponding to different microtube-wall thicknesses, where there is the sensitivity curve corresponding to the liquid refractive index n_1 of 1.450–1.458 at the top-right corner, and the microtube-wall thickness is (a) 1.5 μm , (b) 1 μm , (c) 0.5 μm .

98% 以上, 如图 5 所示. 表 2 列出了传感器的输出特性. 同一液体折射率下, 越短的谐振波长, 对应的半高线宽 (FWHM) 和相邻谐振峰之间的自由光谱范围 (FSR) 越小, 而 Q 值则越大. 随着液体折射率 n_1 增大, FWHM 和 FSR 减小, 而 Q 值增大. 当液体折射率 n_1 为 1.700 时, Q 值为 5.53×10^4 . 谐振模式与微管壁厚度、管壁及其内外的折射率有关. 随着管芯液体折射率 n_1 增大, 管芯中分布的光能量逐渐增加, 如图 4 所示, 使光与微管中液体的相互作用增强. 同时, 随着管芯液体折射率 n_1 增大, 微管谐振腔中激发的模式数增多, 出现更高阶径向

模式, 如图 5 所示. 当管芯液体折射率 n_1 为 1.450 时, 可激发 2 阶径向模式. 当液体折射率 n_1 为 1.500 时, 激发了 3 阶径向模式. 当液体折射率 n_1 为 1.700 时, 最高径向模式是 8 阶.

如图 6(a)、图 6(c) 和图 6(e) 所示, 随着微管中待测液体的折射率 n_1 增大, 输出光谱中谐振波长向波长较长的方向红移. 图 6(b)、图 6(d) 和图 6(f) 为 1540—1560 nm 波段三个相邻谐振波长随折射率 n_1 变化的位移关系, 谐振波长漂移量随液体折射率变化成线性关系, 且线性度很高 ($R^2 \approx 1$). 当待测液体折射率 n_1 在 1.450—1.458 区间时, 三个

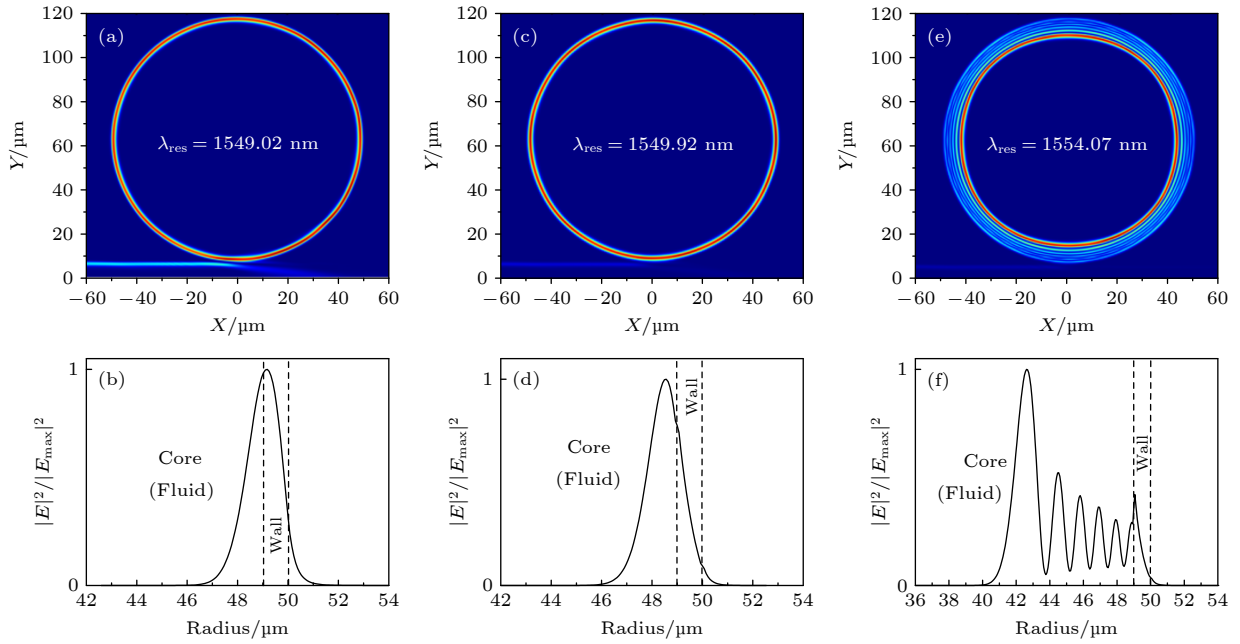

 图 4 微管谐振腔中光场分布图, 其中液体折射率 n_1 是 (a), (b) 1.450; (c), (d) 1.500; (e), (f) 1.700

Fig. 4. Distribution of optical field in the microtube resonator, where the liquid refractive index n_1 is: (a), (b) 1.450; (c), (d) 1.500; (e), (f) 1.700.

表 2 传感器的输出特性

Table 2. Output characteristics of the sensor.

液体折射率	谐振模式	谐振波长/nm	自由光谱范围/nm	半高线宽/nm	Q值
1.450	TE ₂₉₃ ¹	1543.75	5.27	0.555	2.78×10^3
	TE ₂₉₂ ¹	1549.02		0.560	2.77×10^3
	TE ₂₉₁ ¹	1554.34		0.570	2.73×10^3
1.500	TE ₃₀₂ ¹	1544.73	5.19	0.132	1.17×10^4
	TE ₃₀₁ ¹	1549.92		0.135	1.15×10^4
	TE ₃₀₀ ¹	1555.13		0.139	1.12×10^4
1.700	TE ₃₄₁ ⁶	1549.29	4.78	0.028	5.53×10^4
	TE ₃₄₀ ⁶	1554.07		0.029	5.36×10^4
	TE ₃₃₉ ⁶	1558.90		0.030	5.20×10^4

谐振模 (图中凹陷峰) 对应的折射率灵敏度分别为 510.5 nm/RIU, 513.5 nm/RIU 和 515.3 nm/RIU; n_1 在 1.500—1.504 区间时, 三个谐振模对应的折射率灵敏度分别为 813.1 nm/RIU, 815.6 nm/RIU 和 818.3 nm/RIU; n_1 在 1.696—1.700 区间时, 三个谐振模对应折射率灵敏度分别为 848.2 nm/RIU, 850.4 nm/RIU 和 852.7 nm/RIU.

如图 6(b)、图 6(d) 和图 6(f), 同一折射率区间, 谐振模的角模式数 m 越小, 对应灵敏度越大. 例如图 6(b) 中 TE₂₉₁¹, TE₂₉₂¹, TE₂₉₃¹ 模对应的灵敏度: $S_3 > S_2 > S_1$. 这是因为当折射率变化很小时,

灵敏度 $S = \Delta\lambda/\Delta n = L/m$, 因而角模式数 m 越小, 灵敏度越大. 此外, 液体折射率 n_1 在 1.500 区间段的灵敏度比在 1.450 区间段的灵敏度提高了约 58.8%, 而在 1.700 区间段的灵敏度比在 1.500 区间段的仅仅提高约 4.3%. 随着液体折射率 n_1 增大, 折射率灵敏度增速逐渐变缓慢. 主要原因在于: 由前面理论公式 (1)、(2) 和 (19) 可知, 管芯液体中光能量占比越大, 待测液体折射率的变化对有效折射率的影响比重越大, 从而折射率灵敏度越高. 如图 4 所示, 液体折射率越大, 管芯中分布的光能量越多. 液体折射率 n_1 分别为 1.450, 1.500, 1.700 时管芯中光能量占比分别为 48.8%, 76.2%, 93.3%. 因而, 随着折射率 n_1 增大, 灵敏度提高. 然而, 折射率 n_1 为 1.500 时管芯中已分布了大部分光能量 (76.2%), 当折射率 n_1 继续增大时, 管芯中光能量占比增长变缓, 故灵敏度随之增速变缓.

表 3 显示了优化结构参数后传感器在三个液体折射率区间的性能. 除了 Q 值、灵敏度外, 探测极限也是传感器的重要性能参数, 它表示传感器可以检测到的最小折射率变化. 较小的探测极限值意味着传感器具有更好的性能. 如表 3, 随着液体折射率 n_1 增大, 探测极限值变小. 在液体折射率 n_1 为 1.700 时, 探测极限约为 2.11×10^{-6} .

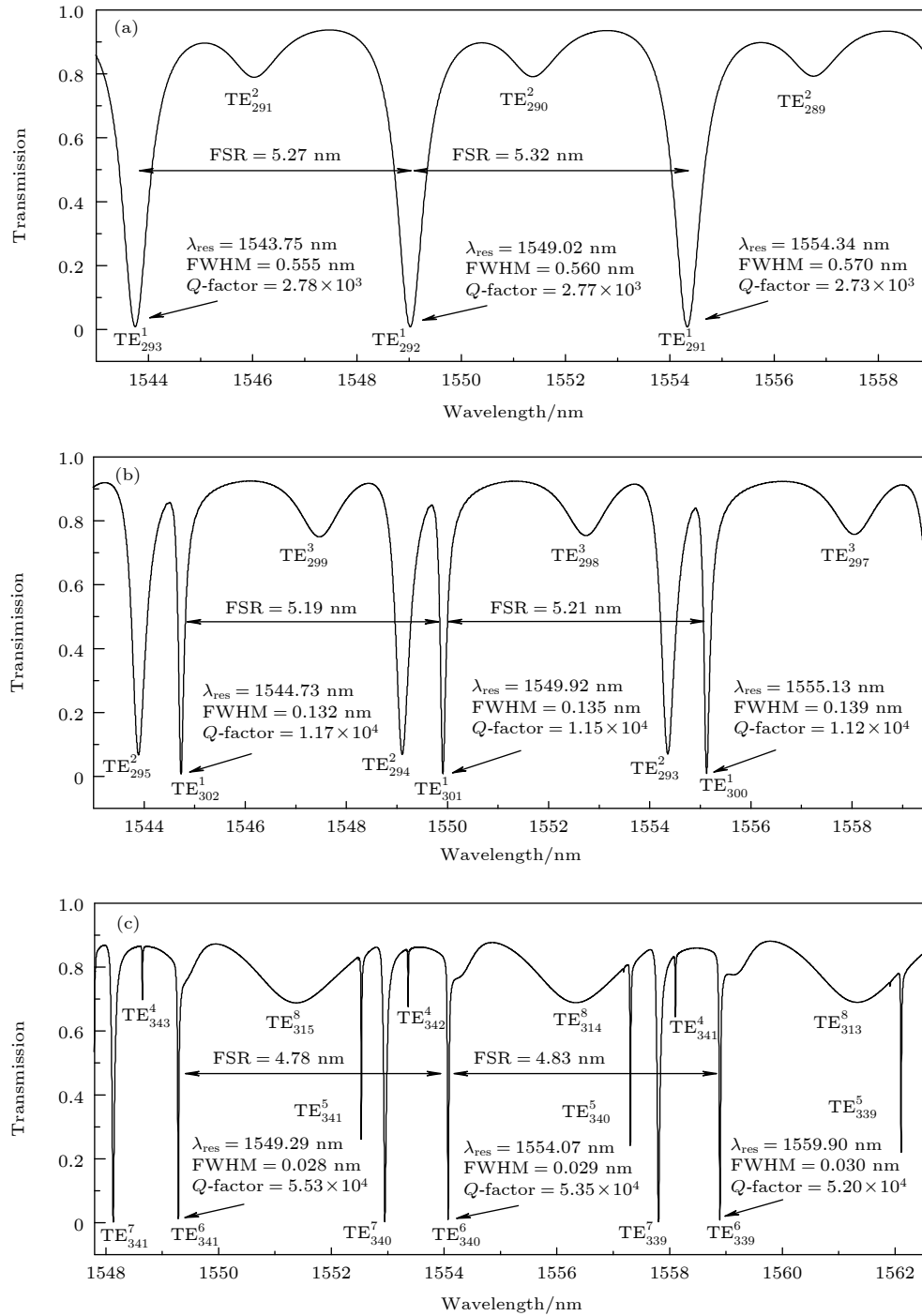

 图 5 液体折射率不同时的输出光谱, 其中液体折射率 n_1 是 (a) 1.450, (b) 1.500, (c) 1.700

 Fig. 5. Output spectra corresponding to different liquid refractive indices, where the liquid refractive index n_1 is (a) 1.450, (b) 1.500, (c) 1.700.

 表 3 传感器性能
Table 3. Sensor performance.

液体折射率	Q 值	灵敏度/(nm·RIU ⁻¹)	探测极限
1.450—1.458	$(2.73—2.78) \times 10^3$	510.5—515.3	$(6.52—6.63) \times 10^{-5}$
1.500—1.504	$(1.12—1.17) \times 10^4$	813.1—818.3	$(0.97—1.02) \times 10^{-5}$
1.696—1.700	$(5.20—5.53) \times 10^4$	848.2—852.7	$(1.98—2.11) \times 10^{-6}$

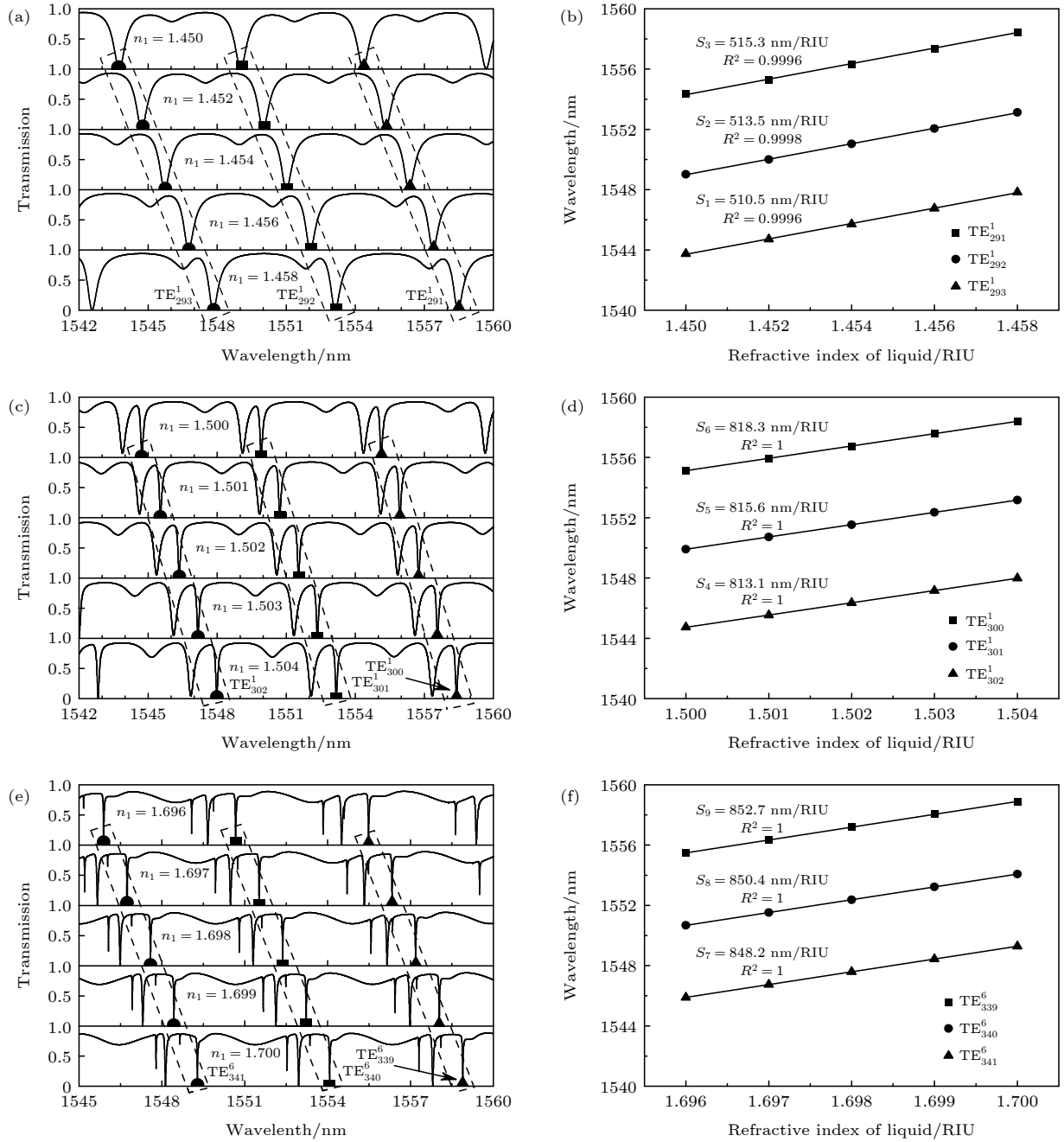


图 6 折射率传感器的输出光谱 (a), (c), (e) 和灵敏度曲线 (b), (d), (f)

Fig. 6. Output spectra (a), (c), (e) and sensitivity curves (b), (d), (f) of the refractive index sensor.

4 结 论

本文提出一种基于 D 型光纤与回音壁模式微管谐振腔耦合的微流控折射率传感器, 其中, 耦合区采用全封装方式. 它可以用于折射率大于 1.4446 的液体折射率传感, 液体采样量很少 (约 5 nL). 所提折射率传感器集微流控光学与 WGM 谐振腔卓越性能于一体, 并且解决了常见锥形光纤与微腔耦

合时易碎的问题, 其鲁棒性、抗环境干扰能力、可移植性和重复性优于一般光纤与微腔耦合的传感器. 结构优化后, 通过微管 WGM 谐振特性和折射率传感影响因素的研究, 发现 D 型光纤与微管谐振腔可以达到临界耦合 ($> 98\%$), 管壁厚度和液体折射率对传感性能影响比较大. 还讨论了灵敏度随液体折射率的变化规律. 谐振波长漂移量与液体折射率有良好的线性关系. 传感器的折射率灵敏度高 (510.5—852.7 nm/RIU), Q 值可达 5.53×10^4 ,

探测极限可达 2.11×10^{-6} . 所提传感器不仅可用于折射率传感, 还可应用于温度/压力传感、生物分子/化学检测、滤波器和激光器等, 具有潜在的良好发展前景.

参考文献

- [1] Dehghannasiri R, Soltani M, Adibi A 2017 *J. Opt. Soc. Am. B* **34** 2259
- [2] Gardosi G, Mangan B J, Puc G S, Sumetsky M 2021 *ACS Photonics* **8** 436
- [3] Vahala K J 2003 *Nature* **424** 839
- [4] Ajad A K, Islam M J, Kaysir M R 2020 *11th International Conference on Electrical and Computer Engineering Dhaka, Bangladesh*, December 17–19, 2020 p202
- [5] Chang Y H, Dong B W, Ma Y M, Wei J X, Ren Z H, Lee C K 2020 *Opt. Express* **28** 6251
- [6] Zhang M, Cheng W F, Zheng Z, Cheng J G, Liu J S 2019 *Microfluid. Nanofluid.* **23** 1
- [7] Wang Z, Mallik A K, Wei F F, Wang Z C, Rout A, Wu Q, Semenova Y Y 2021 *Opt. Express* **29** 23569
- [8] da Silva J, Salameh E, Ötügen M V, Fourquette D 2021 *Appl. Opt.* **60** 1434
- [9] Zhang Y N, Zhou T M, Han B, Zhang A Z, Zhao Y 2018 *Nanoscale* **10** 13832
- [10] Yan Y Z, Zou C L, Yan S B, et al. 2011 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **23** 1736
- [11] Zhang Y N, Zhu N S, Zhou T M, Zheng Y, Shum P P 2019 *IEEE Sens. J.* **20** 833
- [12] Monifi F, Ozdemir S K, Friedlein J, Yang L 2013 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **25** 1458
- [13] Duduś A, Blue R, Uttamchandani D 2013 *IEEE Sens. J.* **13** 1594
- [14] Wan H D, Chen J J, Wan C, Zhou Q, Wang J, Zhang Z X 2019 *Biomed. Opt. Express* **10** 3929
- [15] Fan S, Healy N 2020 *Opt. Lett.* **45** 4128
- [16] Jiang L, Zhao L, Wang S, et al. 2011 *Opt. Express* **19** 17591
- [17] Zakaria R, Zainuddin N M, Fahri M A S A, et al. 2021 *Opt. Fiber Technol.* **61** 102449
- [18] Zhang X W 2014 *Ph. D. Dissertation* (Shanghai: Fudan University) (in Chinese) [张兴旺 2014 博士学位论文 (上海: 复旦大学)]
- [19] Zamora V, Díez A, Andrés M V, Gimeno B 2007 *Opt. Express* **15** 12011
- [20] Foreman M R, Swaim J D, Vollmer F 2015 *Adv. Opt. Photonics* **7** 168
- [21] Okamoto K 2021 *Fundamentals of Optical Waveguides* (Vol. 3) (Amsterdam: Elsevier) pp211–325
- [22] Ling T, Guo L J 2007 *Opt. Express* **15** 17424
- [23] Wang Y J, Zhang H, Duan S X, Lin W, Liu B, Wu J X 2020 *IEEE Sens. J.* **21** 9148
- [24] Cao J W, Wang Q, Chai Z E, Zhu Y X, Liu H, Liu K, Ren X M 2018 *Asia Communications and Photonics Conference Hangzhou, China, October 26–29, 2018* pSu2A.238

Microfluidic refractive index sensor with D-shape fiber and microtube coupling*

Zhang Wei Wan Jing[†] Meng Lie Luo Yao-Wei Guo Ming-Rui

(College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

(Received 8 June 2022; revised manuscript received 12 July 2022)

Abstract

Based on the coupling between the D-shape fiber and the microtube resonator in the whispering gallery mode, combined with the microfluidics, a refractive index sensor is proposed in this paper, in which the coupling region is fully encapsulated. This sensor requires a very little liquid sample (about 5 nL), is not fragile, and has better resistance to environmental perturbation, portability and repeatability than the general fiber-microcavity-coupled sensor. By the numerical simulation, the resonance properties of the microfluidic microtube resonator are investigated, and the refractive index sensing performance is analyzed. The research results show that the thickness of the microtube-wall and the liquid refractive index have a great influence on the sensor performance. The shift of the resonance wavelength has a good linear relationship with the liquid refractive index. Meanwhile, the refractive index sensitivity is high (510.5–852.7 nm/RIU), and the *Q*-factor reaches up to 5.53×10^4 , the detection limit can arrive at 2.11×10^{-6} .

Keywords: optofluidics, D-type fiber, microtube resonator, refractive index sensor

PACS: 07.07.Df, 42.60.Da, 42.81.Pa

DOI: 10.7498/aps.71.20221137

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61574080).

[†] Corresponding author. E-mail: wanj@njupt.edu.cn

D型光纤与微管耦合的微流控折射率传感器

张伟 万静 蒙列 罗曜伟 郭明瑞

Microfluidic refractive index sensor with D-shape fiber and microtube coupling

Zhang Wei Wan Jing Meng Lie Luo Yao-Wei Guo Ming-Rui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 210701 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20221137

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221137>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于向日葵型圆形光子晶体的高灵敏度太赫兹折射率传感器

High sensitivity terahertz refractive index sensor based on sunflower-shaped circular photonic crystal

物理学报. 2019, 68(20): 207801 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191024>

具有内参考热补偿功能的三层膜结构微球腔折射率传感器

Triple-layer-coated microspheres for refractive index sensor with internally referenced self-compensated thermal effect

物理学报. 2020, 69(1): 014203 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191265>

基于乙醇密封共振腔金属-介质-金属波导的高性能温度和折射率两用传感器

High performance temperature and refractive index dual-purpose sensor based on the ethanol-sealed metal-dielectric-metal waveguide

物理学报. 2020, 69(16): 167301 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200405>

基于Fano共振的金属-绝缘体-金属-石墨烯纳米管混合结构动态可调折射率传感器

Dynamically tunable refractive index sensor based on Fano resonance with metal-insulator-metal-graphene nanotube hybrid structure

物理学报. 2022, 71(17): 178101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220652>

基于十字连通形环形谐振腔金属-介质-金属波导的折射率传感器和滤波器

Refractive index sensor and filter of metal-insulator-metal waveguide based on ring resonator embedded by cross structure

物理学报. 2018, 67(19): 197301 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180758>

太赫兹波段电磁超材料吸波器折射率传感特性

Refractive index sensing characteristics of electromagnetic metamaterial absorber in terahertz band

物理学报. 2021, 70(3): 038102 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201054>