

引用本文：陈炜垠,武向农. 基于楔形光纤的微管腔折射率传感器特性分析[J]. 光通信技术,2025,49(2):23–28.

基于楔形光纤的微管腔折射率传感器特性分析

陈炜垠,武向农*

(上海师范大学 信息与机电工程学院,上海 201400)

摘要:针对现有的锥形光纤耦合微管腔回音壁模式(WGM)存在耦合区域锥腰部分的机械强度不高及鲁棒性较弱的问题,提出了一种基于楔形光纤(WSF)的微管腔折射率传感器。通过引入 WSF 端面来激发倏逝场并与微管腔耦合形成 WGM,采用时域有限差分法(FDTD)建立理论模型,深入研究了楔角、管壁厚度及微管腔外径对折射率传感特性的影响。仿真结果表明:当楔角为 20° ,管壁厚度为 $1\text{ }\mu\text{m}$,微管腔外径为 $110\text{ }\mu\text{m}$ 时,传感器的折射率灵敏度为 326.5 nm/RIU ,品质因子为 3.236×10^3 ,分辨率为 $6.12\times 10^{-5}\text{ RIU}$;该传感器用于葡萄糖浓度检测时,灵敏度为 0.085 nm/mM ,分辨率为 0.23 mM 。

关键词:折射率传感;回音壁模式;楔形光纤;微管腔

中图分类号:TN253 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2025)02-0023-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.02.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Characteristic analysis of a microtube cavity refractive index sensor based on wedge-shaped fiber

CHEN Weiyin, WU Xiangnong*

(School of Information and Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 201400, China)

Abstract: To address the issues of low mechanical strength and weak robustness in the tapered waist region of existing tapered fiber-coupled microtube cavity whispering gallery mode (WGM) sensors, a microtube cavity refractive index sensor based on a wedge-shaped fiber (WSF) is proposed. By utilizing the evanescent field excited from the WSF end-face to couple with the microtube cavity and form WGM, a theoretical model is established using the finite-difference time-domain (FDTD) method. The effects of wedge angle, wall thickness, and microtube cavity outer diameter on refractive index sensing characteristics are thoroughly investigated. The simulation results show that when the wedge angle is 20° , the tube wall thickness is $1\text{ }\mu\text{m}$, and the microtube outer diameter is $110\text{ }\mu\text{m}$, the sensor achieves a refractive index sensitivity of 326.5 nm/RIU , a quality factor of 3.236×10^3 , and a resolution of $6.12\times 10^{-5}\text{ RIU}$. When used for glucose concentration detection, the sensor demonstrates a sensitivity of 0.085 nm/mM and a resolution of 0.23 mM .

Key words: refractive index sensing, whispering gallery mode, wedge-shaped fiber, microtube cavity

0 引言

折射率传感器作为光纤传感技术的重要分支,在液体浓度检测^[1]和生物样本分析^[2]等领域具有关键应用价值。目前,主流的折射率传感机制包括:长周期光栅的包层模耦合机制^[3]、马赫-曾德尔干涉仪的相位敏

感机制^[4]、表面等离子体共振的倏逝波增强机制^[5],以及微结构光纤的带隙调控机制^[6]。然而,这些技术均存在显著局限性:光纤光栅易受温度串扰,干涉仪与等离子体谐振腔制备工艺复杂,微结构光纤则面临成本过高等产业化瓶颈。

基于回音壁模式(WGM)的微管腔折射率传感器因其超高品质因子($Q>10^5$)和亚微升级样本需求等优势,在微量液体检测领域展现出独特价值^[7]。其中,锥形光纤耦合方案凭借 98%以上的耦合效率^[2,8-10],在无标记生物检测^[2,8]中具有重要应用。近年来的改进方案包括:张伟团队^[11]采用 D 型光纤与微管腔耦合,通过光固化胶增强传感器稳定性;袁国庆等人^[12]研发的光纤

收稿日期:2024-07-15。

作者简介:陈炜垠(2000—),男,硕士研究生,2022年毕业于湖北汽车工业学院电气与信息工程学院,获工学学士学位,现就读于上海师范大学信息与机电工程学院通信工程专业,主要研究方向为光纤传感。

* **通信作者:**武向农(1970—),女,博士,副教授,主要研究方向为光纤传感及光纤通信。



陈炜垠, 武向农: 基于楔形光纤的微管腔折射率传感器特性分析

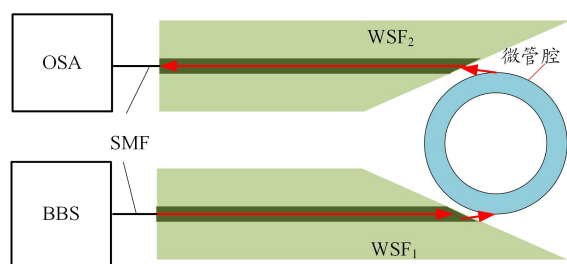
楔形端面耦合器, 成功实现机械强度提升。

尽管取得上述进展, 现有技术仍存在 3 个核心缺陷: 1) 锥形光纤锥腰区 (半径 $1\sim 2\ \mu\text{m}$) 结构脆弱; 2) D 型光纤研磨区域易发生断裂失效; 3) 端面耦合理论研究的薄弱, 特别是微扰理论^[13]对折射率灵敏度机理阐释不足。

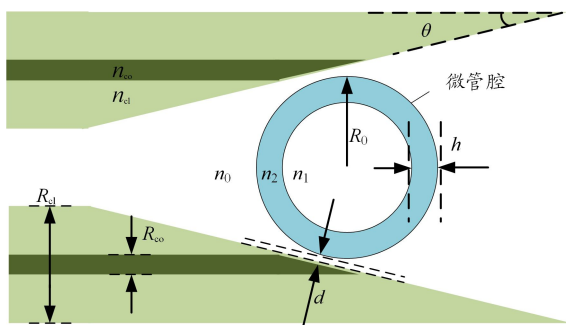
为此, 本文引入楔形光纤 (WSF) 并采用端面耦合方案, 利用光纤端面激发倏逝场, 提出一种基于 WSM 的微管腔折射率传感器, 旨在提升传感器的鲁棒性和机械强度, 同时可用于葡萄糖浓度传感检测。

1 传感器设计

本文所提出的基于 WSM 的微管腔折射率传感器原理图如图 1(a) 所示。传感系统由宽带光源 (BBS)、单模光纤 (SMF)、WSF、微管腔和光谱分析仪 (OSA) 组成。当 WSM₁ 中的导波传输至楔形端面时, 倏逝场将被激发, 倏逝场中满足相位匹配条件的光会耦合进微管腔形成 WGM, 最终耦合进 WSM₂ 的纤芯中。图 1(b) 中, 结构参数 R_0 、 h 、 R_{cl} 、 R_{co} 、 θ 、 d 分别表示微管腔外径、微管腔管壁厚度、WSF 包层半径、WSF 纤芯半径、楔角、WSF 端面处纤芯和微管腔的耦合间距。微管腔中空部位作为流体通道, 用于小样本液体检测。管芯内液体折射率为 n_1 , 空气折射率为 n_0 , 微管腔折射率为 n_2 , 纤芯和包层折射率分别为 n_{co} 和 n_{cl} 。



(a) 原理图



(b) 侧视结构图

图 1 基于 WSM 的微管腔折射率传感器原理与侧视结构图

2 理论模型与分析

本文采用时域有限差分 (FDTD) 法对 WGM 光学特性进行仿真研究。作为电磁场时域求解的典型数值方法, FDTD 法通过直接求解麦克斯韦微分方程, 能够有效模拟 WSM 与微管腔耦合系统的光学特性^[14]。考虑到微管腔赤道面的径向与角向模式分布特征, 本文采用二维仿真模型开展计算^[15-16]。在模型设置方面, 光源采用横电模 (TE) 偏振模式, 波长范围设定为 $1\ 545\sim 1\ 555\ \text{nm}$, 网格精度为 $100\ \text{nm}$, 光谱采样点数设置为 $1\ 000$, 背景介质选择空气。为消除计算域边界反射引起的数值失真, 在模型外围设置 12 层完美匹配层 (PML) 作为吸收边界条件。该 PML 参数经收敛性验证, 能够有效衰减截止频率以上的电磁波分量。仿真研究对象为石英材质的柔性微管腔传感器, 其基本参数为: $R_0=70\ \mu\text{m}$, $h=20\ \mu\text{m}$ 。为增强管芯内液体与 WGM 的能量耦合效率, 需通过减薄管壁厚度来提高倏逝场在管芯区域的占比^[2,8,13]。现有加工工艺主要包含氢氟酸 (HF) 溶液刻蚀法^[2,10]和热拉伸法^[17], 其中热拉伸法可使 h 降低至 $0.78\ \mu\text{m}$ ^[17]。然而, 随着 h 值减小, 加工精度控制难度呈指数级上升, 因此实际应用中的 h 参数的优化区间通常限定为 $1\sim 5\ \mu\text{m}$ 。

在仿真系统构建方面, WSM 的制备需先去除光纤涂覆层, 随后通过专业研磨设备^[12]或定制装置^[18]加工出特定楔角。为实现参数 d 的调控, 本文采用三维位移平台进行精密操作: 将 2 根 WSM 平行排布后与微管腔共同固定于位移平台, 通过显微成像系统实时观测耦合界面的空间位置关系。调节过程中需确保 WSM 端面与微管腔外圆切线方向保持平行, 并借助三维位移平台的纳米级定位能力实现参数 d 的精确控制。

WSM 的制备通常基于普通 SMF, 其纤芯与包层直径分别为 8.2 、 $125\ \mu\text{m}$, 纤芯折射率与波长的关系^[19]如式 (1) 所示。

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{A_1 \lambda^2}{\lambda^2 - B_1^2} + \frac{A_2 \lambda^2}{\lambda^2 - B_2^2} + \frac{A_3 \lambda^2}{\lambda^2 - B_3^2} \quad (1)$$

其中, λ 为波长; $A_1\sim A_3$ 、 $B_1\sim B_3$ 均为常数, $A_1=0.492\ 11$, $A_2=0.629\ 25$, $A_3=0.592\ 02$, $B_1=0.048\ 07$, $B_2=0.112\ 75$, $B_3=8.292\ 99$; 在 $\lambda=1\ 550\ \text{nm}$ 处, 纤芯折射率 $n_{co}=1.450\ 4$ 。为了满足 WSM 所泄露的倏逝场与微管腔实现近场耦合, d 应小于倏逝场的穿透深度^[20]。由于倏逝场的穿透深度通常在几十到几百纳米之间, 因此本文选择 $d=100\ \text{nm}$ 开展后续研究。

WSM 在端面形成倏逝场时, 需满足合适的 θ 以确保入射光符合全反射条件, 如式 (2)^[12]所示。

$$\theta \leq \theta_0 = \frac{\pi}{2} - \arcsin(n_0/n_{co}) \quad (2)$$

其中, θ_0 为入射临界角。

在 WSF 端面实现倏逝场泄露的过程中, θ 必须小于 θ_0 , 以保证楔形端面激发倏逝场且满足微管内全反射条件。根据式(1)和式(2)的计算结果可知, WSF 的 $\theta_0=46^\circ$ 。为了实现图 1 中的耦合结构并维持 100 nm 的耦合间距, θ 需进一步限制为 $\theta \leq 25^\circ$ 。然而, 实际加工中 θ 过小(如低于 15°)将导致 WSF 尖端受损, 因此工程实践中 θ 取值范围通常设定为 $15^\circ \leq \theta \leq 25^\circ$ 。

当 WSF 的倏逝场与微管腔发生近场耦合时, 满足相位匹配条件的光会被耦合至微管腔内。基于几何光学理论, WGM 谐振的形成需满足特定条件: 光线沿微管腔内表面传播一周后, 其光程需为谐振波长的整数倍。当微管腔周长远大于谐振波长时, 谐振条件近似表示为 $2\pi n_{\text{eff}} R_0 = m\lambda_{\text{WGM}}^{[21]}$ 。其中, n_{eff} 为微管腔有效折射率, m 为角模式数, λ_{WGM} 为 WGM 谐振波长。 n_{eff} 受其结构介质影响^[13], $n_{\text{eff}} = \eta_1 n_1 + \eta_2 n_2 + \eta_0 n_0$ 。其中, η_1 、 η_2 、 η_0 分别为管芯、管壁、空气区域的光场占比, 且满足 $\eta_1 + \eta_2 + \eta_0 = 1$ 。当管芯折射率 n_1 变化时, n_{eff} 随之变化, 进而引起 λ_{WGM} 的偏移。通过微分运算可得 λ_{WGM} 与 n_1 的定量关系为

$$\frac{\partial \lambda_{\text{WGM}}}{\partial n_1} = \frac{\partial \lambda_{\text{WGM}}}{\partial n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial n_1} = 2\pi R_0 \frac{\eta_1}{m} \quad (3)$$

折射率灵敏度 $S = \Delta\lambda/\Delta n_1$ 。根据式(3), 将 λ_{WGM} 的移动量叠加, 则 S 可以表示为

$$S = \frac{\sum_j 2\pi R_0 (\eta_1^j/m) \partial n_1}{\Delta n_1} \quad (4)$$

其中, Δn_1 为 n_1 变化量, η_1^j 为管芯内光场占比 ($j=1, 2, 3, \dots$, 分别对应于管芯内不同折射率液体的光场占比)。

基于式(4)的分析可知, S 不仅由 n_1 和 η_1 决定, 还随 R_0 的增大和 m 的减小而增大。此外, h 的变化会引起 η_1 的改变, 从而进一步影响 S 的大小。因此, 本文可以通过调整这些参数来优化传感器性能, 并依据 η_1^j 计算 S 。

除了 S 外, 品质因子 Q 和传感器分辨率也是评估传感器性能的重要指标。 Q 表示谐振腔储存光子的能力。 WGM 微腔的 Q 由多个损耗因子决定, 可表示为 $Q^{-1} = Q_{\text{mat}}^{-1} + Q_{\text{cou}}^{-1} + Q_{\text{sca}}^{-1[22]}$ 。其中, Q_{mat} 为谐振腔的本征损耗, Q_{cou} 为谐振腔的耦合损耗, Q_{sca} 为谐振腔表面粗糙度引起的散射损耗。从理论模型的角度来看, Q 主要受耦合损耗因子的影响。耦合损耗越低, 耦合效率越高, WGM

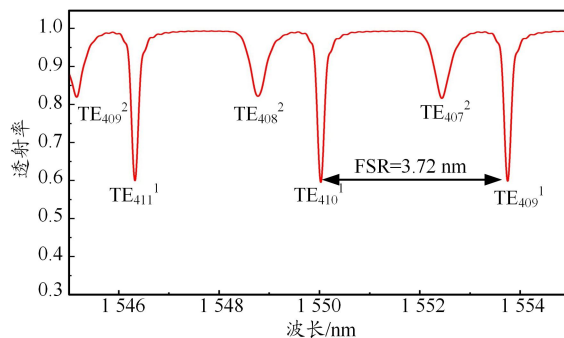
谐振模式的半峰宽(FWHM)越小, 从而导致 Q 越高。因此, Q 与 FWHM 成反比关系^[13]。传感器分辨率定义为传感器能够探测的最小折射率变化量, 通常表示为光谱仪精度 $\Delta\lambda_{\text{min}}$ 与 S 之比。

3 可行性分析

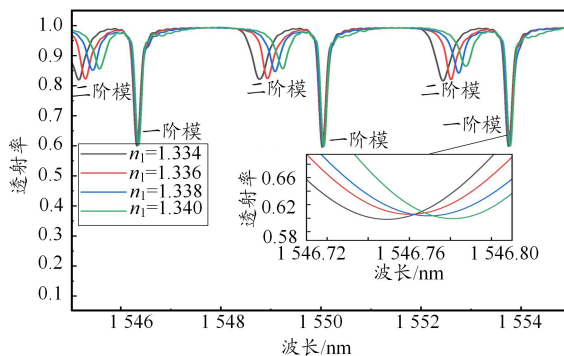
为了初步表征所提出传感器的 WGM 谐振特性和传输特性, 本文将初始模型参数设置为 $h=3 \mu\text{m}$, $\theta=15^\circ$, 其余参数保持默认设置。在此条件下, 当 $n_1=1.334$ 时, WSF₂ 的透射谱如图 2(a)所示。可以看出, 透射谱中存在一阶模和二阶模。其中, 一阶模(TE_{409}^1 和 TE_{410}^1)的自由光谱范围(FSR)为 3.72 nm, 与文献[22]理论计算结果(3.78 nm)高度吻合。该结果验证了光波沿微管腔内壁传播一周的光程条件, 符合 WGM 谐振的核心特征。电场分布分析表明, WGM 在微管腔赤道面呈亮环状且能量局域于腔体表面; 楔形端面耦合机制使传感器机械稳定性显著优于传统锥形光纤与 D 型光纤方案。

当流入微管腔中空通道的液体折射率发生变化时, WSF 和微管腔之间的相位匹配条件随之改变, 导致 λ_{WGM} 发生偏移, 偏移量为 $\Delta\lambda_{\text{WGM}}$ 。不同 n_1 时的透射谱如图 2(b)所示。可以看出, 一阶模和二阶模均随 n_1 的增加而发生红移, 且二阶模的红移量明显高于一阶模。

$\Delta\lambda_{\text{WGM}}$ 随 n_1 变化的线性响应关系如图 2(c)所示。



(a) WSF₂ 在 $n_1=1.334$ 时的透射谱



(b) 不同 n_1 取值时的透射谱

陈炜垠, 武向农: 基于楔形光纤的微管腔折射率传感器特性分析

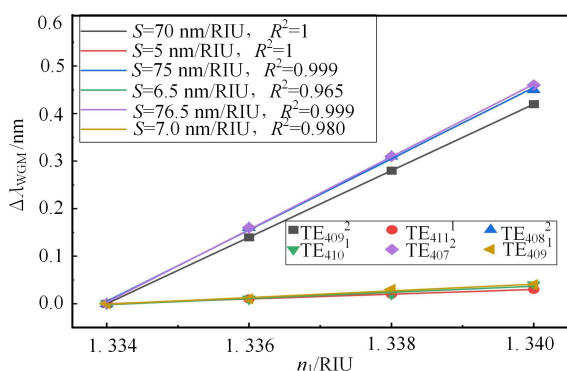
(c) $\Delta\lambda_{\text{WGM}}$ 随 n_1 变化的线性响应关系

图2 所提传感器的透射光谱及特性分析

可以看出,一阶模、二阶模的 $\Delta\lambda_{\text{WGM}}$ 均随 n_1 增大而增大。经计算可得,二阶模灵敏度 S 达到 76.5 nm/RIU,较一阶模的灵敏度(7.0 nm/RIU)提升了约 11 倍。这种差异的原因在于二阶模的光场分布更靠近管芯,导致其管芯内的光场占比 η_1 更大。微管腔的模式分布表明,一阶模和二阶模的管芯内光场占比分别为 $\eta_1=0.64\%$ 和 $\eta_1=8.06\%$,相差近 12 倍,与式(4)的理论分析相符。

4 参数对传感特性的影响

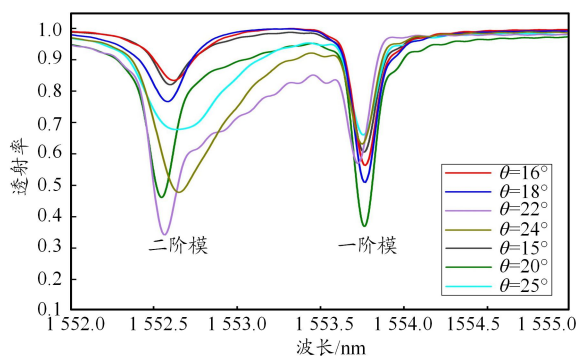
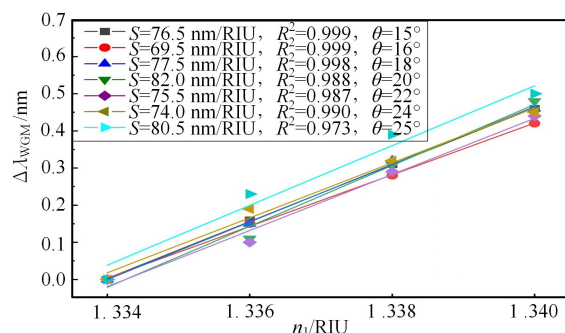
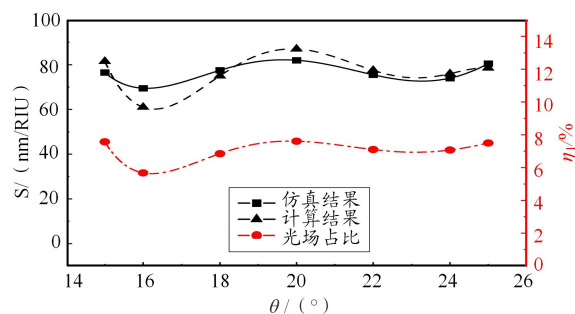
从第2节的理论分析可知,当结构参数发生变化时, S 会随之改变。此外,实际制备工艺可能导致器件结构与理论模型存在偏差,因此需系统评估传感性能对关键参数的依赖性及工艺公差。本文通过数值模拟,探究 θ 、 h 和 R_0 对折射率传感特性的影响。

4.1 θ 的影响

为了研究端面研磨加工过程中工艺公差对传感器性能的影响,本文设定 θ 在 $15^\circ\sim 25^\circ$ 内以 2° 为步长进行参数扫描,得到传感器的透射谱如图3(a)所示,二阶模随 n_1 的线性响应关系如图3(b)所示。从图3(a)可以看出,一阶模谐振波长对 θ 变化不敏感,而二阶模表现出显著波长漂移。此现象源于二阶模有效折射率随 θ 改变,进而影响相位匹配条件。从图3(b)可以看出,二阶模的 λ_{WGM} 均随 n_1 增大而增大。经计算可得,当 $\theta=20^\circ$ 时,传感器性能达到最优, $S=82$ nm/RIU,线性拟合度 $R^2=0.988$ 。 η_1 与 S 随 θ 的变化关系如图3(c)所示。可以看出, η_1 在 $\theta=20^\circ$ 时达到最大值,并且 η_1 与 S 呈现出正相关关系。这一结果与式(4)的理论分析一致,验证了理论模型的正确性。

4.2 h 的影响

在传感器制备过程中, h 的加工公差直接影响模式特性与传感灵敏度。为量化其影响规律,本文固定 $\theta=20^\circ$,设定 h 在 $1\sim 5\ \mu\text{m}$ 内以 $2\ \mu\text{m}$ 为步长变化,研究

(a) 不同 θ 的透射谱(b) 不同 θ 的二阶模随 n_1 变化的线性响应关系(c) η_1 与 S 随 θ 的变化关系图3 不同 θ 的折射率传感特性

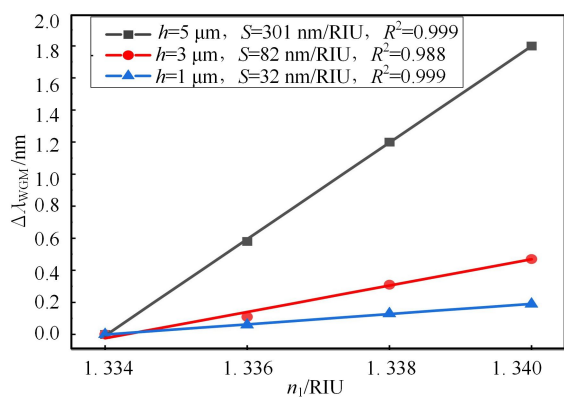
h 对折射率传感特性的影响,得到 $\Delta\lambda_{\text{WGM}}$ 随 n_1 变化的线性响应关系如图4(a)所示。可以看出, $\Delta\lambda_{\text{WGM}}$ 均随 n_1 增大而增大;随着 h 的减小, $\Delta\lambda_{\text{WGM}}$ 显著降低。经计算可得,当 $h=1\ \mu\text{m}$ 时, $S=301$ nm/RIU,约为 $h=5\ \mu\text{m}$ 时的 9.4 倍。这是由于 h 减小导致 η_1 增大,从而提升了 S 。 η_1 与 S 随 h 的变化关系如图4(b)所示。可以看出,当 h 由 $5\ \mu\text{m}$ 减小至 $1\ \mu\text{m}$ 时, η_1 提升了约 9.09 倍,并且 S 的计算结果和仿真结果相符。

综上所述,在综合考量传感性能以及实际加工难度的前提下,本文选定 h 为 $1\ \mu\text{m}$ 。

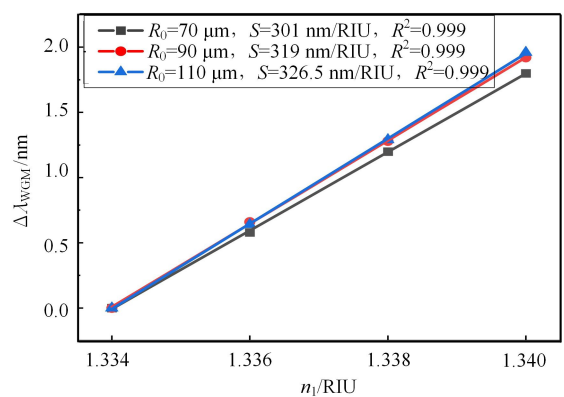
4.3 R_0 的影响

在实际应用中,微管腔的规格以及 R_0 存在差异。此外,采用热拉伸法加工管壁时,也可能导致 R_0 发生变化。在已报道的微管腔折射率传感器中,最大 R_0 为

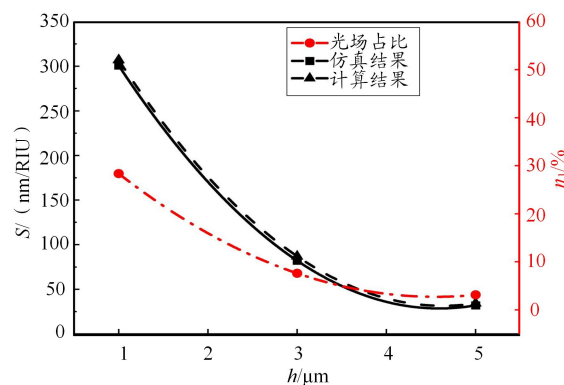
陈炜垠,武向农: 基于楔形光纤的微管腔折射率传感器特性分析



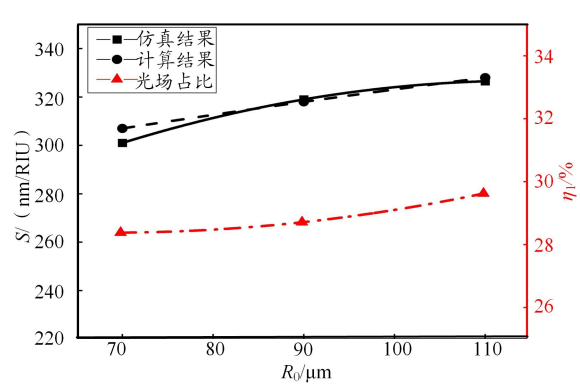
(a) 不同 h 时 $\Delta\lambda_{\text{WCM}}$ 随 n_1 变化的线性响应关系



(a) $\Delta\lambda_{\text{WCM}}$ 随 n_1 变化的线性响应关系



(b) η_1 与 S 随管壁 h 的变化关系



(b) η_1 与 S 随 R_0 的变化关系

图 4 不同 h 的传感器透射谱

图 5 不同 R_0 的传感器透射谱

114 μm ^[10]。基于此,本文以 $\theta=20^\circ$, $h=1 \mu\text{m}$ 为条件,深入探究当 R_0 为 70~110 μm 时的折射率传感特性,得到 $\Delta\lambda_{\text{WCM}}$ 随 n_1 变化的线性响应关系如图 5(a)所示。可以看出,在 h 和 θ 保持不变的情况下, S 随 R_0 的增加而提升。经计算可得,当 R_0 从 70 μm 增至 110 μm 时, S 从 301.0 nm/RIU 提升至 326.5 nm/RIU,增幅达 8.47%。 η_1 与 S 随 R_0 的变化关系如图 5(b)所示。可以看出,在 h 和 θ 固定时, η_1 随 R_0 的增大而提高,从而促使 S 也随之增加。当 R_0 从 70 μm 增大至 110 μm 时, η_1 提升了 4.38%,计算所得的 S 与仿真结果相符。此外,经计算可得,在 $\theta=20^\circ$, $h=1 \mu\text{m}$ 且 $R_0=110 \mu\text{m}$ 的条件下,透射谱谐振波谷位于 $\lambda_{\text{WCM}}=1\ 553.28 \text{ nm}$ 处,对应的 Q 值为 3.236×10^3 ,传感器的最小折射率分辨率为 $6.12\times 10^{-5} \text{ RIU}$ 。

5 面向生物医学应用的 WSF 微管腔传感器设计与性能分析

本文依据第 4 节的分析,确定传感器参数为: $h=1 \mu\text{m}$, $\theta=20^\circ$, $R_0=110 \mu\text{m}$,并将其应用于葡萄糖浓度传感检测。分析结果表明,该传感器用于葡萄糖浓度检测时的灵敏度为 0.085 nm/mM,分辨率为 0.23 mM,且各项

误差均低于临床要求^[9]。

此外,本文最后对近年来类似的微管腔折射率传感器进行了详细对比,对比结果如表 1(仿真结果以 * 标注,未标注的为实验结果)所示。可以看出,本文提出的传感器具有更高的折射率灵敏度,相较于文献[8]

表 1 不同结构的微管腔折射率传感器性能比较

结构	n_1	灵敏度/ (nm/RIU)	Q	文献
锥形光纤+ 多芯光纤	1.331 2~1.358 4	274	9.5×10^3	[2]
锥形光纤+ 微管腔	1.34~1.42	27.3*	1.3×10^6	[8]
锥形光纤+ 微管腔	1.33~1.36	80.14	4×10^5	[9]
锥形光纤+ 微管腔	1.336~1.348	26.5	8.724×10^3	[10]
D 型光纤+ 微管腔	1.330~1.335	89*	5.53×10^4	[11]
锥形光纤+ 微环腔	1.333 5~1.339 8	40.89	—	[23]
WSF+ 微管腔	1.334~1.34	326.5*	3.236×10^3	本文

陈炜垠, 武向农: 基于楔形光纤的微管腔折射率传感器特性分析

提升了约 11 倍。同时, 采用 WSF 方案有效规避了锥形光纤中间锥腰部分结构脆弱的问题, 也避免了 D 型光纤方案中 D 型研磨区域加工易断裂、机械强度较低的缺陷。然而, 该方案面临的主要挑战是 WSF 端面与微管腔之间的耦合效率相对较低, 仅为 68%, 这导致耦合损耗略高, 并限制了 Q 的进一步提升。

6 结束语

本文引入 WSF, 提出了一种基于 WSF 微管腔的折射率传感器, 该传感器可应用于葡萄糖浓度检测。本文深入研究了 θ 、 h 以及 R_0 等结构参数对传感器性能的影响, 并分析了这些结构参数与折射率灵敏度的变化关系。仿真结果表明, 当 $\theta=20^\circ$ 、 $h=1\ \mu\text{m}$ 、 $R_0=110\ \mu\text{m}$ 时, 传感器的性能达到最优: 折射率灵敏度高达 $326.5\ \text{nm/RIU}$, Q 为 3.236×10^3 , 分辨率为 $6.12\times 10^{-5}\ \text{RIU}$ 。计算结果与仿真结果高度吻合。在葡萄糖浓度检测中, 该传感器的灵敏度、分辨率分别为 $85\ \text{pm/mM}$ 和 $0.23\ \text{mM}$ 。该设计方案具备结构简单、灵敏度高、鲁棒性强以及机械强度高显著优点, 有效规避了传统锥形光纤和 D 型光纤方案中存在的结构脆弱问题, 为相关领域提供了一种全新的可行方案, 具有重要的理论价值和潜在的应用前景。

参考文献:

- [1] ZHANG S, CHEN H L, FAN X Y, et al. Ultra-sensitive fiber optic sensor for glucose concentration measurement based on vernier effect in cascaded Mach-Zehnder interferometers[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2024, 57: 245109-1-245109-11.
- [2] LI X G, ZHANG H X. Label free optofluidic DNA hybridization detection based on suspended core fiber whispering gallery mode resonator[J]. Measurement, 2023, 222: 113661-1-113661-8.
- [3] JIN X, XU X, LV M Y, et al. Analysis and comparative study of intermittent-spiral long period fiber grating[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2022, 34(8): 440-443.
- [4] ZHANG X B, WANG J W, YAN M, et al. Silica capillary based whispering gallery mode resonators and functional fiber devices[C]//IEEE. Proceedings of Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC). San Diego: IEEE, 2018: 1-3.
- [5] KADHIM R A, YUAN L, XU H, et al. Highly sensitive D-shaped optical fiber surface plasmon resonance refractive index sensor based on Ag- α -Fe $_2$ O $_3$ grating[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(17): 9816-9824.
- [6] DAI T T, YAN J Q, ZHU W L, et al. Ultra-high sensitivity surface plasmon U-channel photonic crystal fiber for hemoglobin sensing[J]. Sensors and Actuators: Physical A, 2024, 366: 115053-1-115053-11.
- [7] VANESSA Z, ANTONIO D, MIGUEL V A, et al. Refractometric sensor based on whispering-gallery modes of thin capillaries[J]. Optics Express, 2007, 15(19): 12011-12016.
- [8] WAN H, CHEN J, WAN C, et al. Optofluidic microcapillary biosensor for label-free, low glucose concentration detection[J]. Biomedical Optics Express, 2019, 10(8): 3929-3937.
- [9] LUO Y H, CHEN X L, XU M Y, et al. Optofluidic glucose detection by capillary-based ring resonators[J]. Optics Laser Technology, 2014, 56: 12-14.
- [10] 赵帅昌, 王梓杰, 张小贝, 等. 空心微瓶谐振腔的封装及折射率传感特性研究[J]. 应用光学, 2022, 43(5): 1001-1006.
- [11] 张伟, 万静, 蒙列, 等. D 型光纤与微管耦合的微流控折射率传感器[J]. 物理学报, 2022, 71(21): 52-60.
- [12] 袁国庆, 李红, 罗新建, 等. 用于毛细管回音壁谐振的光纤楔形端面耦合器[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(9): 253-260.
- [13] MALLIK A K, WEI F, WANG Z, et al. Enhancing the thermo-optic tuning performance of whispering gallery modes in a microcapillary resonator filled with nematic liquid crystal[J]. Optics Communications, 2023, 537: 129442-1-129442-7.
- [14] HUANG H M, YU Y, ZHOU L J, et al. Whispering gallery modes in a microsphere attached to a side-polished fiber and their application for Magnetic field sensing[J]. Optics Communications, 2021, 478: 126366-1-126366-9.
- [15] ZHANG Z H, YANG S L, WANG L L. Mode splitting of high-Q whispering-gallery modes in a microring resonator coated with a fluorescent high-refractive-index film[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(6): 1843-1849.
- [16] 杨礼铨, 于佳鑫. 基于微球腔的回音壁模式激光的最小尺寸研究[J]. 光学仪器, 2021, 43(4): 28-32.
- [17] WRAD M J, YANG Y, LEI F C, et al. Nanoparticle sensing beyond evanescent field interaction with a quasi-droplet microcavity[J]. optica, 2018, 5(6): 674-677.
- [18] DAVENPORT J J, HICKEY M, PHILLIPS J P, et al. Method for producing angled optical fiber tips in the laboratory[J]. Optical Engineering, 2016, 55(2): 026120-1-026120-6.
- [19] KIVILCIM Y. Optical fiber sensor system for remote and multi-point refractive index measurement[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 250: 29-34.
- [20] 叶祖国. 基于全无机 CsPbCl $_3$ 钙钛矿量子点的 SPF 折射率传感器研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2021.
- [21] SUN B, WANG X J, MA X B, et al. Magnetic-based polydimethylsiloxane microspheres for magnetic field measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-7.
- [22] 李明. 高 Q 回音壁模式微泡光学谐振腔的光学特性研究[D]. 上海: 复旦大学, 2014.
- [23] 刘明慧, 马麟, 邱辞源, 等. 基于少模氮化硅微环谐振器的折射率传感技术[J]. 光通信技术, 2020, 44(10): 6-8.