

微管内壁介质层参数对光微流体传感灵敏度的影响研究

姬 强¹ 江俊峰¹ 刘铁根¹ 刘 琨¹ 刘文辉^{1,2} 张 晶¹ 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 研究了微管内壁涂覆介质层的折射率传感灵敏度增强效应,通过建立四层环状结构模型对薄壁微管和厚壁微管进行了模式场分布和传感灵敏度仿真计算。计算结果表明涂覆高折射率介质层有效增加了微管内部的光场能量,从而增强传感灵敏度,将薄壁微管的一阶径向模式折射率传感灵敏度提高近 65 倍,厚壁微管高阶径向模式的折射率传感灵敏度提高近 302 倍。随涂覆介质层厚度的变化,厚壁微管高阶径向模式的折射率传感灵敏度变化存在多峰特点,并对该现象从几何光学的角度进行了分析。

关键词 传感器;生物传感器;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/AOS201333.0228004

Effect of Dielectric-Layer Parameter Coated on Microtube Inner Wall Surface on Optofluidics Biosensor Sensitivity

Ji Qiang¹ Jiang Junfeng¹ Liu Tiegeng¹ Liu Kun¹ Liu Wenhui^{1,2}

Zhang Jing¹ Chen Wenjie¹

¹ Key Laboratory of Optoelectronics Information Technology, Ministry of Education, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

² General Courses Department, Academy of Military Transportation, Tianjin 300161, China

Abstract The sensitivity enhancement effect of microtube coated with a dielectric layer on the inner surface is presented. The simulations of mode-field distribution and sensitivity are carried out for thin wall microtubes and thick wall microtubes with an established four-layer ring structure model. The results show that optical field energy in the core of the microtube can be increased when a dielectric layer with high refractive index is coated on the inner wall surface of the microtube, thus the sensitivity is enhanced. The sensitivity of the 1st-order radial mode of the thin wall microtube and the high-order radial mode of the thick wall microtube are enhanced by 65 and 302 times, respectively. The refractive-index sensing sensitivity of the high-order radial mode will experience multiple peaks accompanying with the thickness change of the dielectric layer, which is analyzed from the view of geometrical optics.

Key words sensors; biosensor; sensitivity; microtube; whispering gallery resonator mode (WGM)

OCIS codes 080.2740; 260.2110; 260.6970; 280.1415; 310.6860

1 引 言

基于光学折射率检测的无标记微流体生物传感

器可直接测量分子相互作用,避免了荧光标记生物传感器需要专用荧光标记物、复杂的标记处理、因标

收稿日期: 2012-09-10; **收到修改稿日期:** 2012-10-22

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327802)、国家自然科学基金(11004150, 61108070)、教育部博士点新教师基金(200800561020)、教育部留学回国人员科研启动基金(2010D4-0001)、天津市科技支撑计划(11ZCKFGX01900)和中国博士后科学基金(201003298)资助课题。

作者简介: 姬 强(1986—),男,硕士研究生,主要从事光微流体生物传感方面的研究。E-mail: jiqiangyangzi@163.com

导师简介: 江俊峰(1977—),男,副教授,硕士生导师,主要从事光微流体生物传感、光纤传感和光电检测等方面的研究。

E-mail: jiangjfxu@tju.edu.cn

记带来的生物活性减弱和对反应自身存在干扰等不利影响,在生命科学和医药研究等领域有着广泛应用前景^[1],已有研究人员基于表面等离子激元、谐振镜和光子晶体光纤等提出了多种传感器实现^[2]。然而上述传感技术中光与生物分子的有效作用距离较短,通常仅为光传输时的单向行程或者是较少次数的往复行程(驻波谐振),回音壁谐振模(WGM)能提供高品质因数的光学行波谐振,使光与物质具有较长的有效作用距离^[3,4],有利于实现高灵敏度传感,近年来研究人员基于 WGM 构建了多种无标记光微流体传感器。WGM 谐振腔结构包括微球、微环、微盘和微管等。如果能进一步增加电场的作用深度,可进一步提高传感灵敏度。2006 年 Teraoka 等^[5]基于该思路提出了在微球外面增加一层高折射率介质层提高传感灵敏度的设想并进行了理论分析,随后在掺氟二氧化硅微球上涂覆一层 340 nm 厚的聚苯乙烯进行了折射率传感实验,使得传感灵敏度提高 7 倍^[6]。但其灵敏度分析仍是在微球自身表面进行的,而不是在涂覆层界面上。相比于微球腔,微管将流体样品通道和光传感通道合二为一,是一种更方便实现的光微流体平台^[7]。2008 年 Sun 等^[8]针对化学蒸汽检测对微管的内表面或外表面涂覆聚合物的传感特性进行了仿真计算,但与 Teraoka 等^[5]的研究不同,该涂覆聚合物层充当化学蒸汽分子选择基底,聚合物通过吸收化学蒸汽分子后产生膨胀或收缩来改变聚合物层的厚度和折射率实现传感。由于待测物质与涂覆聚合物层产生化学作用,并且分析是针对壁厚为 3 μm 的薄壁微管进行的,没有考虑厚壁微管,限制了上述分析的适用性。事实上厚壁微管同样可以用于构建 WGM 光微流体生物传感,并具有特殊的优势,如根据激发条件不同,可以工作在倏逝场传感和非倏逝场传感模式,这带来更多的灵活性,同时厚壁微管结构强度较大,可靠性更高。本文进行了微管内壁涂覆介质层实现折射率传感灵敏度增强研究,其中的涂覆介质层只起光限制作用,不与待测物发生化学作用,仿真计算表明微管内壁涂覆一层高折射率介质层,可大幅度提高传感器的灵敏度。

2 理论模型

在微管内壁涂覆一层介质层后,构成的 4 层环状结构如图 1 所示。当在垂直于微管纵轴(z 向)的横向激发 WGM 模式时,对于 TE 模,微管中的横向电场只存在径向分量 E_r 和角向分量 E_θ ,可表示为

$E_r = [m/(\omega\epsilon_0 n^2 r)]H_z, E_\theta = [j/(\omega\epsilon_0 n^2)]\partial H_z/\partial r$, 其中 ϵ_0 为真空介电常数, m 为角模式数, n 为折射率, ω 为角频率, z 向的径向磁场分布为

$$H_z = \begin{cases} aJ_m(n_1 r), & r \leq R_1 - d \\ bJ_m(n_2 kr) + cN_m(n_2 kr), & R_1 - d < r \leq R_1 \\ dJ_m(n_2 kr) + eN_m(n_2 kr), & R_1 < r \leq R_2 \\ fH_m^{(1)}(n_3 kr), & r > R_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中 a, b, c, d, e, f 为待定系数, $J_m(\)$ 为第一类 Bessel 函数, $N_m(\)$ 为第二类 Bessel 函数, $H_m^{(1)}(\)$ 为第一类 Hankel 函数。 n_1, n_2, n_3, n_4 分别为微管内部、介质层、微管及微管外部的折射率, R_1, R_2 分别为微管内径和外径, t 为介质层的厚度。界面 I, II, III 分别为涂覆介质层内表面、介质层/微管界面、微管/空气界面,如图 1 所示。利用界面 I, II, III 处切向电场和切向磁场连续的边界条件,可计算出给定 m 值对应的一系列波矢 $k_{m,l}$, l 为径向模式数。

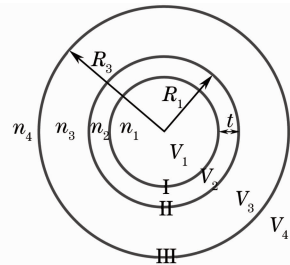


图 1 内表面涂覆介质层的 4 层微管生物传感模型

Fig. 1 Four-layer microtube biosensor model, in which a dielectric layer is coated on interior surface of a ring resonator

当微管的尺寸远大于波长时,可以认为

$$2\pi r_{\text{eff}} n_{\text{eff}} = 2\pi r_{\text{eff}} (n_1 \eta_1 + n_2 \eta_2 + n_3 \eta_3 + n_4 \eta_4) = m\lambda, \quad (2)$$

式中 r_{eff} 为有效半径, n_{eff} 为有效折射率, $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$ 分别为微管内部、介质层、微管及微管外部电磁场能量分布系数。电磁场能量分布系数 $\eta_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 和有效半径 r_{eff} 分别表示为^[9,10]

$$\eta_i = \frac{\gamma_i}{\gamma} = \frac{\int_{V_i} \epsilon_0 n(r)^2 |\mathbf{E}_{m,l}|^2 dr}{\int_V \epsilon_0 n(r)^2 |\mathbf{E}_{m,l}|^2 dr}, \quad (3)$$

$$r_{\text{eff}} = \frac{\int_V \epsilon_0 n(r)^2 |\mathbf{E}_{m,l}|^2 r dr}{\int_V \epsilon_0 n(r)^2 |\mathbf{E}_{m,l}|^2 dr}, \quad (4)$$

式中 V 为整个空间, $V_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 分别为微管内

部、介质层、微管及微管外部区域, $\gamma_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 分别为 $V_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 区域内的电场能量。当微

管内部中的电场采用指数衰减函数作近似时^[5], 对于微管内部存在均匀待测物质的体传感, 有

$$\gamma_1 \approx \int_0^{R_1-d} \epsilon_0 n_1^2 |\mathbf{E}(r = R_1 - d)|^2 \exp[2\tau(r - R_1 + d)] dr = \frac{\epsilon_0 n_1^2 |\mathbf{E}(r = R_1 - d)|^2 \{1 - \exp[-2\tau(R_1 - d)]\}}{2\tau}, \quad (5)$$

式中衰减常数 $\tau = k \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$, 而对于表面传感, 假定分子层均匀分布于微管的内表面, 厚度为 t , 则能够与分子层发生有效作用的电场能量为

$$\gamma_1 = \int_{R_1-d-t}^{R_1-d} \epsilon_0 n_1^2 |\mathbf{E}|^2 dr \approx \frac{\epsilon_0 n_1^2 |\mathbf{E}(r = R_1 - d)|^2 [1 - \exp(-2\tau t)]}{2\tau}. \quad (6)$$

根据(2)式, 可以得到折射率传感灵敏度为

$$S = \frac{\partial \lambda}{\partial n_1} = \frac{\lambda}{n_{\text{eff}}} \frac{dn_{\text{eff}}}{dn_1} + \frac{\lambda}{r_{\text{eff}}} \frac{dr_{\text{eff}}}{dn_1}. \quad (7)$$

通常传感时微管内部流体折射率变化非常小, 如果忽略微管内部折射率变化时的电磁场能量分布变化, 可得到

$$S \approx \frac{\lambda}{n_{\text{eff}}} \eta_1. \quad (8)$$

可以看出, 无论是体传感还是表面传感, 为了进一步提高传感器的灵敏度, 必须提高电磁场在微管内部中的能量分布系数 η_1 , 即必须提高能够与分子层发生有效作用的电场能量 γ_1 , 也即必须提高电场在内表面处的值。在微管的内壁涂覆一层高折射率介质层, 可以吸引电磁场向微管内部移动, 使模式有效半径减小, 从而增加电磁场在微管内部中的能量, 提高电场在内表面处的值, 提高传感器的灵敏度。在实验测量灵敏度时, 往微管中输入不同浓度的微流体, 使微管内部折射率 n_1 发生变化, 微管谐振腔 WGM 模谱线将产生漂移, 通过光谱仪测量出谐振波长漂移量, 即可通过响应曲线斜率确定折射率传感灵敏度^[11~13]。

3 仿真分析

基于微管的光微流体传感从结构上可以分为薄壁微管型和厚壁微管型。微管支持的径向模式数受到微管壁厚的限制, 薄壁微管主要采用具有低阶径向模式的 WGM 模进行传感, 由于低阶径向模式的电场分布偏向微管外壁附近, 微管壁厚必须足够薄才能保证内壁附近存在消逝场, 因此通常壁厚要小于 $5 \mu\text{m}$ 。厚壁微管壁厚通常在 $20 \mu\text{m}$ 以上, 更易操作, 但需要采用具有高阶径向模的 WGM 进行传感。利用 Matlab 进行仿真, 所用石英微管折射率为

$n_3 = 1.4446$, 假定微管内部注入待测物溶液, 折射率 $n_1 = 1.3200$, 微管外部为空气, 折射率 $n_4 = 1.000$, 通过改变微管内部的折射率 (n_1 由 1.3200 变为 1.3210) 确定折射率传感灵敏度。涂覆介质层分别选为聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 和聚 3-辛基噻吩 [Poly(3-octylthiophene)], 在 1550 nm 波段其折射率分别为 1.4100 和 1.7000 ^[8,14]。

3.1 薄壁微管涂覆介质层的仿真分析

薄壁微管仿真参数为: 内径 $R_1 = 21 \mu\text{m}$, 外径 $R_2 = 24 \mu\text{m}$, 涂覆介质层的折射率为 $n_2 = 1.7000$ 或者 $n_2 = 1.4100$ 。图 2(a) 为未涂覆介质层时微管中 $\text{TE}_{120}^1, \text{TE}_{120}^2, \text{TE}_{120}^3$ 的归一化径向电场分布图, 可以看到径向模式数越小, 能量分布越靠近微管外部, 图 2(b) 为未涂覆介质层和介质层厚度为 $0.9 \mu\text{m}$ (涂覆介质层折射率为 1.7) 时 TE_{120}^1 的归一化径向电场分布图, 可以看出, 由于高折射率介质层的吸引作用, 微管内部电磁场能量增加, 与待测物质作用的介质层内表面处的电场值增大。图 3 为上述 3 个 WGM 模灵敏度随介质层厚度的变化图, 图 3(a) 中涂覆介质层折射率为 1.7000 , 图 3(b) 中涂覆介质层折射率为 1.4100 。图 3(a) 显示, 没有涂覆介质层时, TE_{120}^1 的灵敏度仅为 0.73 nm/RIU (RIU 表示折射率单位), 当介质层的厚度为 $0.9 \mu\text{m}$ 时, 该模式的灵敏度达到最大值 47.65 nm/RIU , 提高了 65.27 倍, 当继续增加介质层厚度时, 灵敏度又开始下降。 $\text{TE}_{120}^2, \text{TE}_{120}^3$ 模式灵敏度的最大提高幅度分别为 $4.35, 1.21$ 倍, 灵敏度达到最大时的介质层厚度分别为 $0.5 \mu\text{m}, 0.25 \mu\text{m}$ 。可以看到一阶径向模式灵敏度提高的幅度最大, 灵敏度达到最大值时所需要的介质层厚度也最大, 二阶、三阶径向模式次之。这是因为越低阶径向模式的能量峰值越靠近微管外表面, 所以被高折射率介质层吸引向微管内部移动的幅

度越大,灵敏度达到最大时的介质层厚度越大。由于不同径向模式灵敏度提高的幅度不同,因而可通过调节高折射率介质层的折射率和厚度,使得不同的径向模式获得相同的灵敏度,如图 3(a)所示,当介质层的厚度为 $0.75 \mu\text{m}$ 时, TE_{120}^1 , TE_{120}^2 获得相同的灵敏度,而 TE_{120}^2 , TE_{120}^3 模式在介质层的厚度为 $0.4 \mu\text{m}$,

$0.85 \mu\text{m}$ 时获得相同的灵敏度,分别为 $85.6 \mu\text{m}/\text{RIU}$, $15.3 \text{nm}/\text{RIU}$ 。如图 3(b)所示,当在微管内壁镀一层低折射率物质(低于微管折射率 1.4446)时,并不能提高电场在内表面的值,因此各阶模式的灵敏度均单调减小。

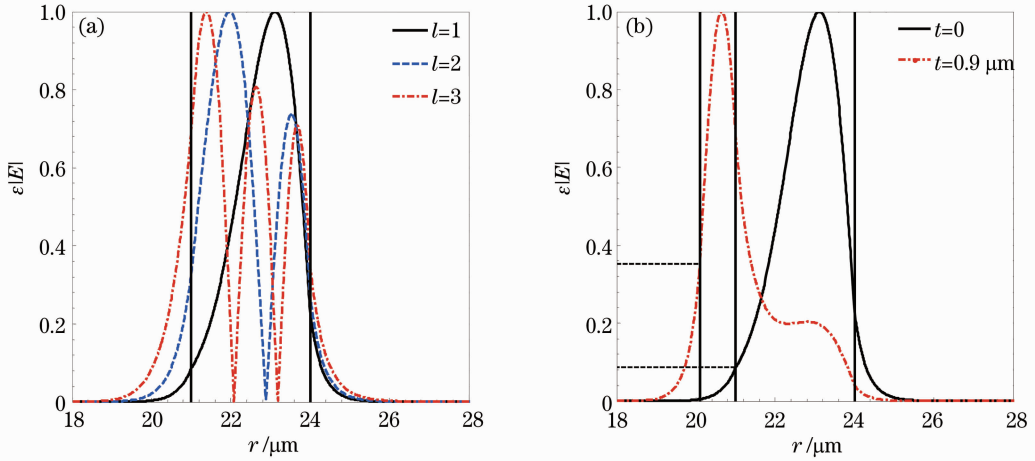


图 2 (a)无涂覆层时一阶,二阶,三阶 WGM 径向电场分布图,微管内径 $R_1=21 \mu\text{m}$,外径 $R_2=24 \mu\text{m}$;

(b)涂覆层厚度分别为 $t=0$ 和 $t=0.9 \mu\text{m}$ 时一阶 WGM 径向电场分布图

Fig. 2 (a) WGM radial electric-field distribution of the 1st-order, 2nd-order, 3rd-order mode with relevant parameters are: $R_1=21 \mu\text{m}$, $R_2=24 \mu\text{m}$; (b) WGM radial electric-field distribution of the 1st mode, thickness of dielectric layer t is 0 and $0.9 \mu\text{m}$, respectively

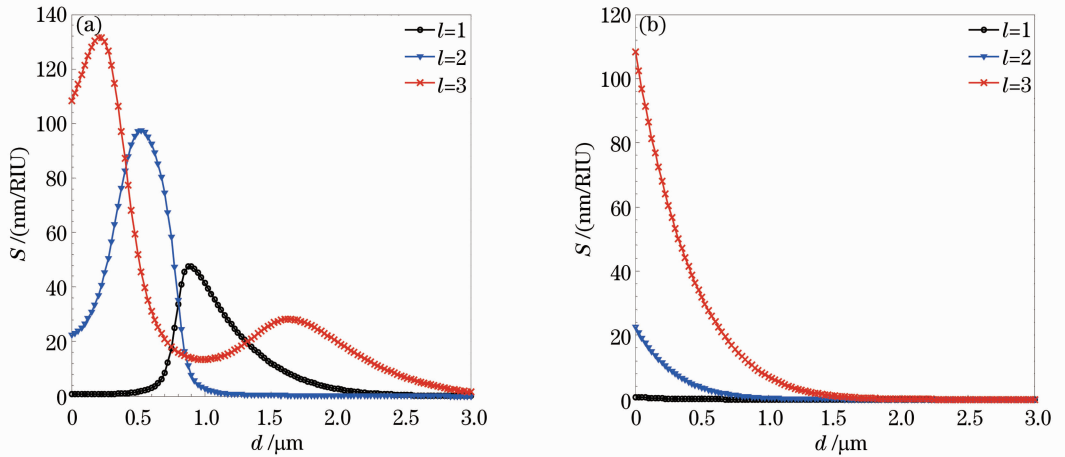


图 3 折射率传感灵敏度随介质层厚度变化图。(a)介质层折射率 $n_2=1.70$; (b)介质层折射率 $n_2=1.41$

Fig. 3 Refractive-index sensing sensitivity as a function of dielectric-layer thickness. (a) $n_2=1.70$; (b) $n_2=1.41$

3.2 厚壁微管涂覆介质层的仿真分析

由于当 $d \geq R_2(1 - \sin \theta_c)$ (其中 θ_c 为微管/空气界面全反射临界角)时,微管支持的 WGM 模在微管内部没有电场分布^[15],此时微管内部注入流体的折射率变化不会引起 WGM 谐振波长的漂移。本文厚壁微管仿真参数:微管内径 $R_1=126 \mu\text{m}$,微管外径 $R_2=162 \mu\text{m}$,微管内部折射率 $n_1=1.3200$,微管外部折射率 $n_4=1.0000$,高折射率涂覆介质层的

折射率 $n_2=1.7000$ 。所取厚壁微管壁厚 $d=36 \mu\text{m}$,小于等于 $R_2(1 - \sin \theta_c) \approx 50 \mu\text{m}$ 支持的 WGM 模在微管内部可具有电场分布。

对于厚壁微管,具有低阶径向模式数的 WGM 模的电场主要分布在微管外壁附近,不能与微管内部中的待测物质发生有效作用,只能使用高阶模式实现光微流体传感。为了激发厚壁微管高阶模式,可以采用棱镜耦合^[16]。同薄壁微管一样,当在厚壁

微管的内壁涂覆一层高折射率介质层后,会吸引厚壁微管中的电磁场向厚壁微管内部移动,从而提高传感器的灵敏度。当在内壁中涂覆一层高折射率介质层(高折射率介质层折射率 $n_2 = 1.70$)时,对于 $1 \sim 27$ 阶径向模式(角模式数 $m = 730$),限制在微管壁中的电磁场虽有一定内移,但仍无法与内腔中的待测物质发生有效作用,对于传感没有意义,所以只考虑 $28 \sim 40$ 阶的高阶模式。

厚壁微管高阶径向模式的电场在厚壁微管壁中有多个峰值,并且峰值由内向外逐渐减小,图 4 为 TE_{730}^{36} 的归一化电场分布图。图 5 显示灵敏度随介质层厚度的变化也呈多峰特点,而且灵敏度的峰值逐渐减小。与薄壁微管类似,径向模式数越大,厚壁微管灵敏度提高的幅度越小,如 TE_{730}^{36} , TE_{730}^{37} , TE_{730}^{38} 灵敏度提高的幅度分别为 1.81, 1.57, 1.40 倍。

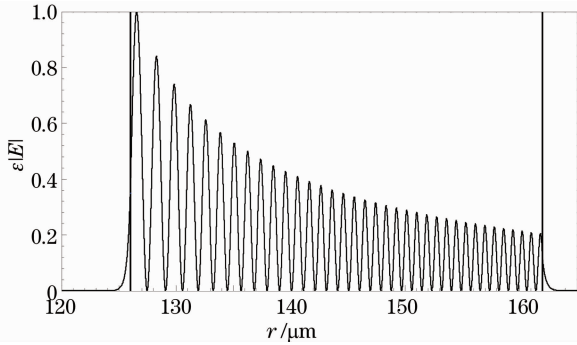


图 4 TE_{730}^{36} 的径向电场分布图。微管内径为

$$R_1 = 126 \mu\text{m}, \text{壁厚 } d = 36 \mu\text{m}$$

Fig. 4 Radial electric-field distribution of transverse electric-field mode TE_{730}^{36} with relevant parameters

$$R_1 = 126 \mu\text{m}, d = 36 \mu\text{m}$$

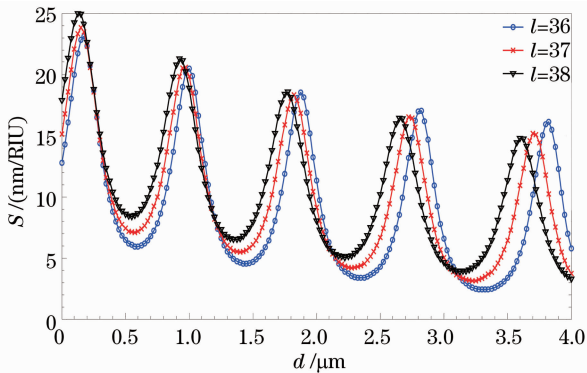


图 5 TE_{730}^{36} , TE_{730}^{37} , TE_{730}^{38} 的折射率传感灵敏度随介质层厚度变化图,涂覆介质层的折射率为 1.700

Fig. 5 Refractive index sensitivity as a function of dielectric-layer thickness for transverse electric-field mode TE_{730}^{36} , TE_{730}^{37} , TE_{730}^{38} , refractive index of the dielectric layer is 1.700

图 6 是 TE_{730}^{28} 模式的计算结果。由图 6(a) 可以看到,没有涂覆介质层时,其传感灵敏度为 0.32 nm/RIU ,当介质层的厚度分别为 $0.3625, 1.3875, 2.4625, 3.6375 \mu\text{m}$ 时,灵敏度分别为 $96.5, 82.2, 56.8, 38.3 \text{ nm/RIU}$,分别是原灵敏度的 301.56、256.88、177.50、119.69 倍。图 6(b)~(f) 分别为图 6(a) 中 A, B, C, D, E 5 处的归一化电场分布图。图 6(c) 和图 6(e) 显示,当介质层的厚度分别为 $0.3625 \mu\text{m}$ [图 6(a) 中 B 点] 和 $1.3875 \mu\text{m}$ [图 6(a) 中 D 点],即灵敏度达到峰值时微管内部中的电场能量很大,电场分布与图 6(a) 中 A, C, E 处有很大的不同。这主要是因为在这些高折射率涂覆介质层厚度下,在界面 I 和界面 II 产生了干涉增强效应^[17]。图 7 是产生干涉增强效应下的光线传播干涉示意图及其局部放大图,光线 1、光线 2、光线 3 分别表示在微管、涂覆介质层、管芯中传播的光线。对于一个 WGM 模,光线以入射角 θ_1 入射到界面 II 产生反射和折射,折射角为 θ_2 的光线继续前行,在界面 III 处产生反射和折射角为 θ_3 的折射。如果光线 1 与光线 2 在界面 II 周期性相遇,同时光线 3 与光线 2 在界面 I 发生周期性相遇,则会在界面处发生稳定的干涉,从而使电场能量主要分布在高折射率介质层中。光线 2 也可以经过界面 I 的多次反射后,再与光线 1 在界面 II 处发生周期性相遇产生稳定的干涉(如图 7 中,对于涂覆介质层厚度 t_2 ,光线 2' 经过界面 I 的两次反射后与光线 1 相遇),因此对于一个 WGM,可有一系列介质层厚度满足干涉增强条件,从而使灵敏度随介质层厚度呈多峰变化。

4 结 论

建立了 4 层环状光微流体传感理论模型,数值仿真研究了微管内壁介质层折射率及厚度对光微流体传感灵敏度的影响。计算结果表明微管的内壁涂覆一层高折射率介质层,可以吸引微管中的电磁场向微管内部移动,增加微管内部的电磁场能量,增加光与待测物质的有效作用深度,从而大幅提高传感器的折射率传感灵敏度。对于薄壁微管的一阶径向模式,其折射率传感灵敏度提高近 65 倍,对于厚壁微管的高阶模式,折射率传感灵敏度提高近 302 倍。从几何光学的角度解释了厚壁微管传感灵敏度随介质层厚度变化具有多峰值的现象,有助于今后涂覆介质层的选择设计。

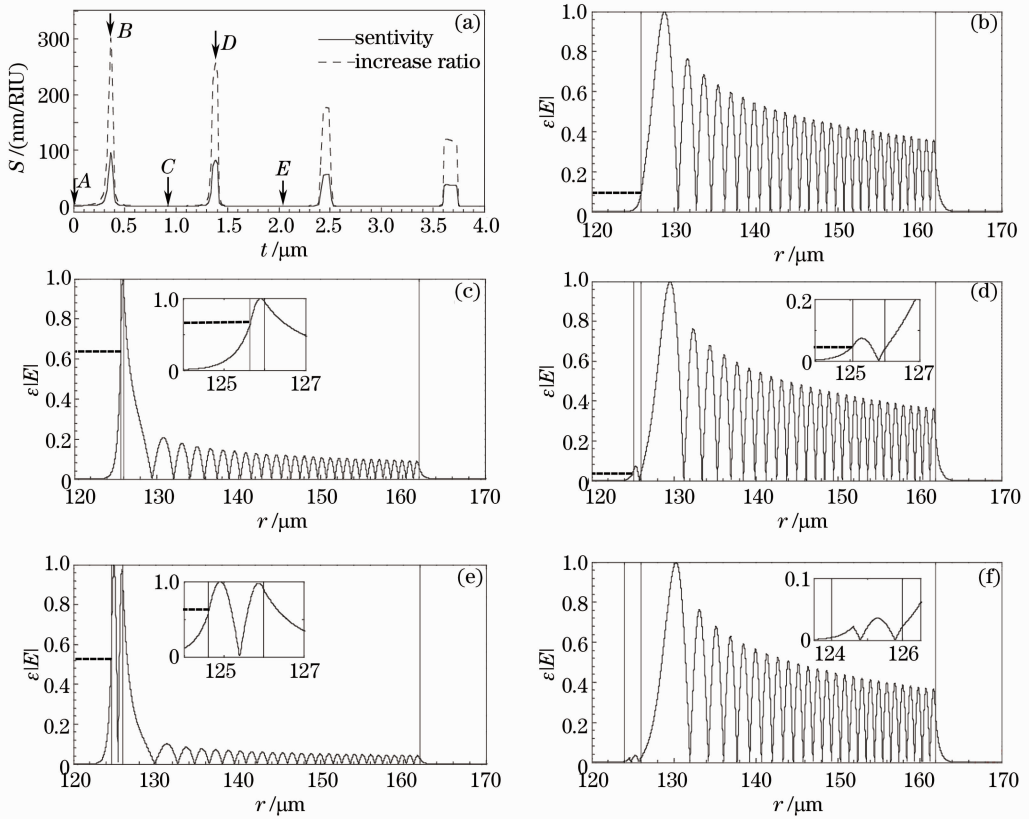


图 6 (a) TE_{730}^{28} 的折射率传感灵敏度随介质层厚度变化图和图 6(a)中 A, B, C, D, E 5 处的电场分布图, 介质层厚度分别为 (b) $t=0$, (c) $t=0.3625 \mu\text{m}$, (d) $t=0.9 \mu\text{m}$, (e) $t=1.3875 \mu\text{m}$, (f) $t=2 \mu\text{m}$

Fig. 6 (a) Refractive-index sensitivity and increase ratio as a function of the dielectric-layer thickness for transverse electric-field mode TE_{730}^{28} and radial electric-field distribution of A, B, C, D, E five points in fig. 6(a), respectively, with (b) $t=0$, (c) $t=0.3625 \mu\text{m}$, (d) $t=0.9 \mu\text{m}$, (e) $t=1.3875 \mu\text{m}$, (f) $t=2 \mu\text{m}$

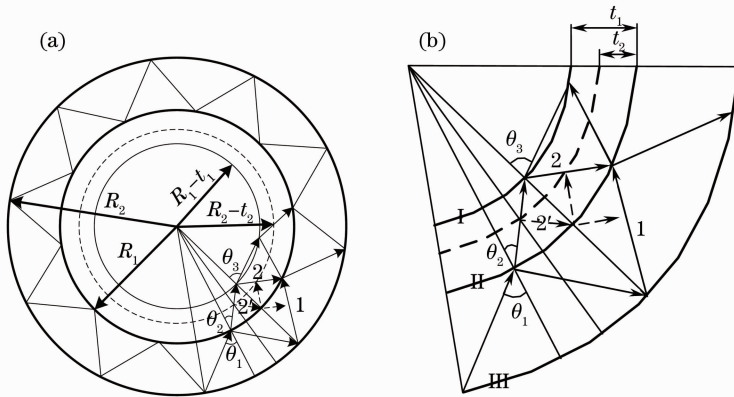


图 7 (a) 干涉增强效应下的光线传播干涉示意图; (b) 为其局部放大图

Fig. 7 (a) Interference schematic diagram of light propagation under interference enhancement; (b) drawing of partial enlargement of fig. (a)

参 考 文 献

1 R. L. Rich, D. G. Myszka. Survey of the year 2006 commercial optical biosensor literature[J]. *J. Mol. Recogn.*, 2007, **20**(5): 300~366
 2 Y. Fang. Non-invasive optical biosensor for probing cell signaling [J]. *Sensors*, 2007, **7**(10): 2316~2329

3 X. D. Fan, I. M. White, H. Y. Zhu *et al.*. Overview of novel integrated optical ring resonator bio/chemical sensors[C]. *SPIE*, 2007, **6452**: 64520M
 4 Y. Sun, X. Fan. Optical ring resonators for biochemical and chemical sensing[J]. *Anal. Bioanal. Chem.*, 2011, **399**(1): 205~211
 5 I. Teraoka, S. Arnold. Enhancing the sensitivity of a whispering

- gallery mode microsphere sensor by a high-refractive-index surface layer [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23** (7): 1434~1441
- 6 O. Gaathon, J. C. Viskota, M. Mihnev *et al.*. Enhancing sensitivity of a whispering gallery mode biosensor by subwavelength confinement [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(22): 223901
- 7 I. M. White, H. Oveys, X. D. Fan. Integrated multiplexed biosensors based on liquid core optical ring resonators and antiresonant reflecting optical waveguides [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(19): 191106
- 8 Y. Sun, X. Fan. Analysis of ring resonators for chemical vapor sensor development [J]. *Opt. Express*, 2008, **16** (14): 10254~10268
- 9 H. Y. Zhu, I. M. White, J. D. Suter *et al.*. Analysis of biomolecule detection with optofluidic ring resonator sensors[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(15): 9139~9146
- 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, **28**(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, **28**(10): 6412~6418
- 11 Jiang Junfeng, Li Haiwei, Liu Tiegeng *et al.*. Experimental study on micro-tube biosensor based on hollow optical fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1421~1425
江俊峰, 李海伟, 刘铁根等. 基于空心光纤构建微管生物传感器的实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1421~1425
- 12 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
- 13 Zhang Yuanxian, Feng Li, Liu Chun *et al.*. Gain calculation of a whispering gallery mode fiber laser pumped by evanescent waves [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **32**(2): 0214001
张远宪, 冯黎, 刘春等. 倏逝波抽运的回音壁模式激光增益计算[J]. *光学学报*, 2011, **32**(2): 0214001
- 14 J. C. Solis, E. D. Rosa, E. P. Cabrera. Absorption and refractive index changes of poly (3-octylthiophene) under NO₂ gas exposure[J]. *Opt. Mater.*, 2006, **29**(2-3): 167~172
- 15 H. J. Moon, G. W. Park, S. B. Lee *et al.*. Waveguide mode lasing via evanescent-wave-coupled gain from a thin cylindrical shell resonator [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84** (22): 4547~4549
- 16 Wang Donglin, Jiang Nan, Jiang Liquan *et al.*. Accurately determine the whispering gallery mode of the cylindrical microcavity [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, **28**(12): 2749~2753
王东林, 江楠, 姜利群等. 柱形微腔回音壁激光光谱模式的精确标定[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, **28**(12): 2749~2753
- 17 H. J. Moon, D. Y. Kang. Strongly enhanced mode selection in a thin dielectric coated layered microcavity laser[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(11): 1554~1556

栏目编辑: 何卓铭