



## 基于表面等离子体共振的新型超宽带微结构光纤传感器研究

丁子平 廖健飞 曾泽楷

### A new type of ultra-broadband microstructured fiber sensor based on surface plasmon resonance

Ding Zi-Ping Liao Jian-Fei Zeng Ze-Kai

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 074207 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201477

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201477>

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

开放式多通道多芯少模光纤表面等离子体共振生物传感器

Multi-channel few-mode multicore fiber based surface plasmon resonance biosensor with open air-hole

物理学报. 2020, 69(13): 137802 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200353>

基于全相位滤波技术的光纤表面等离子体共振传感解调算法

Optical fiber SPR sensing demodulation algorithm based on all-phase filters

物理学报. 2017, 66(7): 074202 <https://doi.org/10.7498/aps.66.074202>

长距离分布式光纤传感技术研究进展

Recent progress in ultra-long distributed fiber-optic sensing

物理学报. 2017, 66(7): 074207 <https://doi.org/10.7498/aps.66.074207>

Airy光纤:基于阵列波导耦合的光场调控方法

Airy fiber: waveguides array coupling based light beam control method

物理学报. 2017, 66(7): 074211 <https://doi.org/10.7498/aps.66.074211>

高性能反谐振空芯光纤导光机理与实验制作研究进展

Theoretical and experimental investigation of light guidance in hollow-core anti-resonant fiber

物理学报. 2018, 67(12): 124201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180724>

铁掺杂多孔氧化铟的NO<sub>2</sub>传感特性

NO<sub>2</sub> sensing properties of porous Fe-doped indium oxide

物理学报. 2020, 69(24): 248101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200956>

# 基于表面等离子体共振的新型超宽带 微结构光纤传感器研究\*

丁子平 廖健飞<sup>†</sup> 曾泽楷

(赣南师范大学物理与电子信息学院, 赣州 341000)

(2020年9月6日收到; 2020年11月24日收到修改稿)

基于表面等离子体共振的微结构光纤传感器具有高灵敏、免标记和实时监控等优点. 如今, 由于此类传感器广泛应用于食品安全控制、环境检测、生物分子分析物检测等诸多领域而受到大量研究. 然而, 目前所报道的绝大多数此类传感器只能应用于可见光或近中红外传感. 因此, 对可应用于中红外传感的表面等离子体共振微结构光纤传感器的研究是一项极具挑战性的工作. 基于此, 本文设计了一种可以工作在近红外和中红外区域的新型高灵敏表面等离子体共振微结构光纤传感器. 传感器采用双芯单样品通道结构, 该结构不仅可以消除相邻样品通道间的相互干扰和提高传感器的信噪比, 还可以在超宽带波长范围内实现高灵敏检测. 采用全矢量有限元法对其传感特性进行了系统的研究, 研究表明: 当待测样品折射率分布在 1.423—1.513 范围内时, 传感器不仅可以在 1.548—2.796  $\mu\text{m}$  的超宽带波长范围内进行工作, 而且其平均灵敏度高达 13964 nm/RIU. 此外, 传感器的最高波长灵敏度和折射率分辨率分别为 17900 nm/RIU,  $5.59 \times 10^{-7}$  RIU.

**关键词:** 光纤光学, 微结构光纤, 表面等离子体共振, 传感器

**PACS:** 42.81.-i, 42.81.Bm, 73.20.Mf, 42.81.Pa

**DOI:** 10.7498/aps.70.20201477

## 1 引言

痕量检测是一种检测物质含量在百万分之一以下的分析检测方法, 它在安全生产、生物医学、环境检测、国防科技等众多领域都有极为重要的应用<sup>[1-3]</sup>. 因此, 对高精度、超灵敏的痕量检测技术的研发已变得至关重要, 而基于微结构光纤 (microstructured fiber, MF) 表面等离子体共振 (surface plasmon resonance, SPR) 的传感技术, 由于其大动态测量范围、超高灵敏度及适用于各种恶劣环境等优点已成为该领域最具潜力的发展方向之一. 其基本原理是输入光在 MF 和金属交界面处产生的倏逝波会引发自由电子相干振荡而产生表面等离

子体波. 当倏逝波与表面等离子体激元 (surface plasmon polaritons, SPP) 产生共振时, 能量会从光子转移到表面等离子体中, 这样等离子体波就可以吸收入射光的大部分能量, 从而导致检测到的反射光强会形成一个损耗峰值, 最后通过测量共振波长或损耗峰的位置来检测分析物质的属性. 如今, SPR-MF 传感器已成为痕量检测领域内的研究热点<sup>[4]</sup>.

SPR-MF 传感器最先由 Hassani 和 Skorobogatiy 在 2006 年提出<sup>[5]</sup>, 研究发现该传感器的波长灵敏度与折射率分辨率分别为 984 nm/RIU 和  $8 \times 10^{-5}$ . 随后, 各种结构新颖性能优越的 SPR-MF 传感器不断被提出. 如早在 2010 年, Yu 等<sup>[6]</sup>提出了一种可工作在可见光区域范围内的选择性

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61765003)、江西省自然科学基金 (批准号: 20181BAB202029) 和赣南师范大学研究生创新基金 (批准号: YCX19A043) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: [jfliao@126.com](mailto:jfliao@126.com)

镀金属层 SPR-MF 传感器, 该传感器实现了高达 5500 nm/RIU 的波长灵敏度. 到了 2013 年, Shuai 等<sup>[7]</sup> 提出了一种双通道近红外 SPR-MF 传感器. 该传感器在自参考模式下的平均灵敏度为 7533 nm/RIU, 而在同时测两种待测样品模式下的最高灵敏度则高达 10200 nm/RIU. 在 2014 年, Otipiri 等<sup>[8]</sup> 提出了一种可用于可见光区域范围内的新型开槽型 SPR-MF 传感器, 其  $x$  偏振模和  $y$  偏振模的折射率分辨率分别为  $5 \times 10^{-5}$  RIU、 $6 \times 10^{-5}$  RIU. 2015 年, Liu 等<sup>[9]</sup> 提出了一种可工作在可见光区域范围内的多芯多孔银膜 SPR-MF 传感器. 研究表明该传感器的平均灵敏度为 4500 nm/RIU. 2017 年, Huang<sup>[10]</sup> 提出了一种 D 型近红外 SPR-MF 传感器. 该传感器可以实现单偏振模传感, 且其平均波长灵敏度高达 6000 nm/RIU. 为了能扩大此类传感器的应用范围, Chen 等<sup>[11]</sup> 在 2018 年设计了一种新型中红外 SPR-MF 传感器. 该传感器的波长灵敏度最高可达 11055 nm/RIU. 到了今年, Li 等<sup>[12]</sup> 提出了一种 H 型 SPR-MF 传感器, 其最大灵敏度可达 12600 nm/RIU. 综上所述, 现在所报道的 SPR-MF 传感器通常只能工作在可见光和近红外区域, 很少能工作中红外区域, 而同时能工作在近红外和中红外区域的 SPR-MF 传感器至今尚未见报.

为了进一步扩大 SPR-MF 传感器的应用范围, 本文提出了一种镀氧化锡 (indium tin oxide, 记为 ITO) 的双芯单通道 SPR-MF 传感器. 利用全矢量有限元法, 系统研究了传感器结构参数和待测样品折射率对其传感特性的影响. 研究发现: 该传感器的平均灵敏度、最大灵敏度和折射率分辨率分别高达 13964 nm/RIU, 17900 nm/RIU,  $5.59 \times 10^{-7}$  RIU. 此外, 该传感器还可以同时工作在近红外和中红外区域.

## 2 传感器结构设计

我们所设计的 SPR-MF 传感器的结构如图 1 所示. 该双芯 MF 包含 3 层按正三角形晶格排列的空气孔, 其晶格常数为  $\Lambda$ , 空气孔直径为  $d_2$ . 光纤的两个纤芯位于第 2 层空气孔的相应位置, 并分别标记为 1 和 2. 为了能够更好地调节纤芯基模的模有效折射率, 使传感器能够在更宽的波长范围内进行工作, 我们在纤芯的中心区域引入了 2 个填充待测样品的小孔, 其直径为  $d_3$ . 此外, 为了提高传感

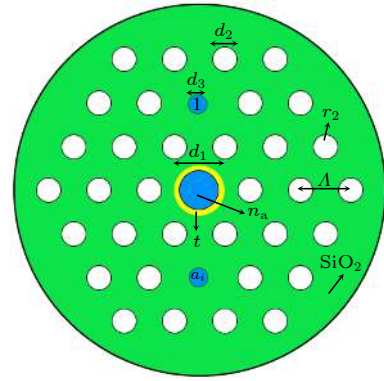


图 1 SPR-MF 传感器的横截面示意图

Fig. 1. Cross section of the proposed multi-core PCF sensor based on SPR.

器的信噪比和消除样品通道间的串扰, 该光纤的中心区域只有 1 个直径为  $d_1$ , 内表面镀 ITO (厚度为  $t$ ) 的大圆形空气孔用来作为待测样品的传感通道.  $n_a$  为待测样品的折射率, 其值在 1.423—1.513 之间; 空气的折射率为 1. 光纤的衬底材料为  $\text{SiO}_2$ , 其折射率由 Sellmeier 方程计算可得<sup>[13]</sup>:

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{0.6961663\lambda^2}{\lambda^2 - (0.0684043)^2} + \frac{0.4079426\lambda^2}{\lambda^2 - (0.1162414)^2} + \frac{0.8974794\lambda^2}{\lambda^2 - (9.896161)^2}, \quad (1)$$

其中:  $\lambda$  为入射光波长. ITO 作为等离子体材料, 其相对介电常数  $\epsilon$  可以由 Drude 模型计算获得<sup>[14]</sup>:

$$\epsilon = \epsilon_\infty - \omega_p^2 / (\omega^2 + i\omega\Gamma), \quad (2)$$

$$\omega_p^2 = ne^2 / (\epsilon_\infty m^*), \quad (3)$$

其中:  $\epsilon_\infty = 3.9$ ;  $\omega_p$  为等离子体频率;  $\omega$  为角频率;  $\Gamma$  为电子散射率,  $\Gamma = 1.8 \times 10^{14}$  rad/s;  $m^*$  为电子的有效质量,  $m^* = 0.35m_0$ ,  $m_0 = 9.1 \times 10^{-31}$  kg 为电子质量;  $n$  为 ITO 的载流子浓度,  $n = 1.8 \times 10^{21}$   $\text{cm}^{-3}$ ;  $e$  为电子电荷.

## 3 仿真结果与讨论

利用全矢量有限元法<sup>[15]</sup>, 我们首先研究了双芯 SPR-MF 传感器的模式共振特性, 研究发现 X 偏振基模无法有效的与 SPP 模进行耦合共振. 基于此, 本文只研究 Y 偏振基模与 SPP 模之间的共振特性, 具体研究结果由图 2 给出. 其中传感器的损耗  $\alpha$  计算表达式为<sup>[16]</sup>:

$$\alpha \text{ (dB/cm)} = 8.686 \times (2\pi/\lambda) \text{Im}(n_{\text{eff}}) \times 10^4, \quad (4)$$

其中,  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 为模有效折射率的虚部. 光纤的结构参数为:  $\Lambda = 2 \mu\text{m}$ ,  $d_1 = 2 \mu\text{m}$ ,  $d_2 = 1 \mu\text{m}$ ,  $d_3 = 0.5 \mu\text{m}$ ,  $t = 50 \text{ nm}$ ,  $n_a = 1.423$ . 从图 2(a) 中可以看出: 在短波长处, SPP 模的模有效折射率实部比 Y 偏振模的要大, 但随着波长的增大, 两模的模有效折射率都会逐渐减小, 并且它们之间的差值也在逐渐减小. 当波长增大到  $1.548 \mu\text{m}$  时, SPP 模和 Y 偏振模的模有效折射率相等, 即满足了两模的耦合共振条件. 从该图中的电场分布插图可以清晰的看出 SPP 模和 Y 偏振模之间的耦合共振特性. 如在波长  $1.46 \mu\text{m}$  处, 由于不满足耦合共振条件, SPP 模和 Y 偏振模的能量分别被限制在芯区和金属层表面. 然而, 随着波长的增大, Y 偏振模的能量会逐渐耦合到 SPP 模中, 并在波长  $1.548 \mu\text{m}$  处, 两模实现耦合共振, 此时两模的能量分布几乎一样. 当波长进一步增大到  $1.66 \mu\text{m}$  时, Y 偏振模的能量又会因为不满足耦合条件而返回纤芯区域. 图 2(b) 给出了 SPP 模和 Y 偏振模的损耗特性. 从此图可

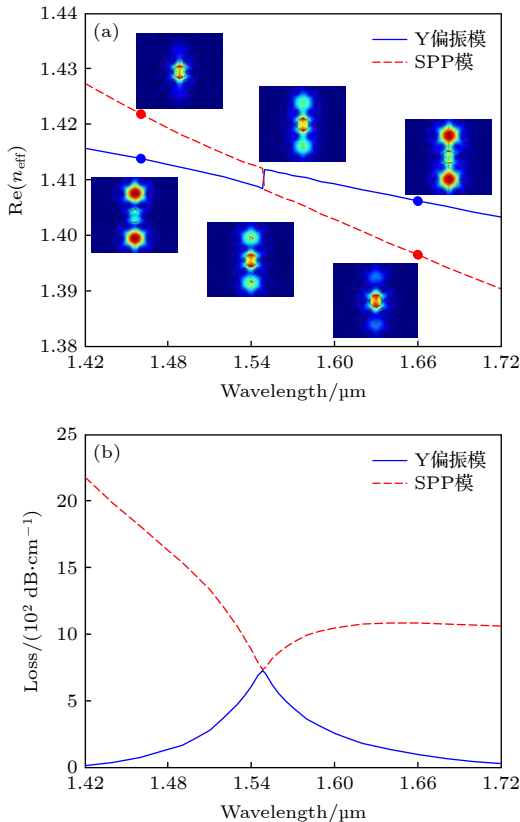


图 2 (a) Y 偏振模与 SPP 模的色散曲线; (b) Y 偏振模与 SPP 模的损耗曲线

Fig. 2. (a) The dispersion curve of Y-polarized mode and SPP mode; (b) the loss curve of Y-polarized mode and SPP mode.

以看出: 在整个仿真波长范围内, SPP 模的损耗先减小后增大, 而 Y 偏振模的损耗却先增大后减小, 并且在共振波长  $1.548 \mu\text{m}$  处, 两模的损耗会相等, 这也就意味着我们所设计的传感器能满足损耗匹配条件, 实现完全耦合, 使 SPP 模和 Y 偏振模之间的耦合达到最佳状态. 此外, 除了耦合共振点, SPP 模的损耗都要大于 Y 偏振模的损耗.

接下来我们研究了待测样品折射率  $n_a$  对传感器共振特性的影响, 其仿真结果如图 3 所示. 光纤的其他结构参数为:  $\Lambda = 2 \mu\text{m}$ ,  $d_1 = 2 \mu\text{m}$ ,  $d_2 = 1 \mu\text{m}$ ,  $d_3 = 0.5 \mu\text{m}$ ,  $t = 50 \text{ nm}$ . 从图 3(a) 可以看出: 当  $n_a$  从  $1.423$  增大到  $1.513$  时, 其耦合波长会产生红移, 对应的共振波长从  $1.548 \mu\text{m}$  增加到  $2.796 \mu\text{m}$ . 其主要原因是 SPP 模的模有效折射率会随着  $n_a$  的增大而增大, 而 Y 偏振模的基本不变, 从而导致两模式之间的耦合共振波长产生红移. 此外, 传感器的损耗峰值会随着  $n_a$  的增大而减小. 其原因是当  $n_a$  增大时, SPP 模与 Y 偏振模之间的能量耦合减弱, 使从 Y 偏振模转移至 SPP 模的能量减小, 进而导致 Y 偏振模的损耗变小. 图 3(b) 为

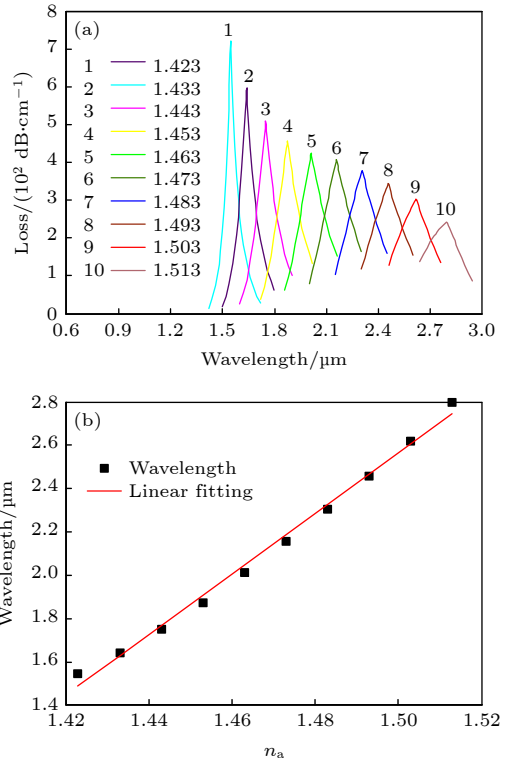


图 3 当  $n_a$  从  $1.423$  增加到  $1.513$  时, (a) Y 偏振模的损耗曲线和共振波长与 (b)  $n_a$  的线性拟合曲线

Fig. 3. (a) Loss curve of Y-polarized mode and (b) linear fitting line of the resonance wavelength versus  $n_a$  by changing  $n_a$  from  $1.423$  to  $1.523$ .

共振波长与  $n_a$  的线性拟合曲线, 其拟合方程为:  $\lambda(\mu\text{m}) = 13.964n_a - 18.384$ . 该方程的斜率就是传感器在该探测范围内的平均灵敏度, 所以其平均灵敏度为  $13964 \text{ nm/RIU}$ . 为了能够更好的研究传感器的灵敏度, 我们还计算了单个波长灵敏度  $S_\lambda$ . 其计算公式如下 [17,18]:

$$S_\lambda (\text{nm/RIU}) = \Delta\lambda_{\text{peak}}(n_a) / \Delta n_a, \quad (5)$$

式中,  $\Delta\lambda_{\text{peak}}$  为共振波长的变化量,  $\Delta n_a$  为  $n_a$  的变化量. 从图 3(b) 可以看出: 当  $n_a = 1.503$  时, 其共振波长为  $2.617 \mu\text{m}$ , 而当  $n_a$  增大到  $1.513$  时, 共振波长变为  $2.796 \mu\text{m}$ , 通过 (5) 式计算可得此时传感器的最大灵敏度为  $17900 \text{ nm/RIU}$ . 该灵敏度远大于其他多芯 SPR-MF 传感器 [19–21]. 若探测器的波长分辨率为  $0.01 \text{ nm}$  时, 则传感器的折射率分辨率高达  $5.59 \times 10^{-7}$ .

最后, 为了进一步分析光纤结构参数对传感器传感性能的影响, 我们重点研究了金属膜厚度  $t$  和填充样品小孔直径  $d_3$  对传感器损耗特性及波长灵敏度的影响.

图 4 为不同金属膜厚度下传感器的 Y 偏振模损耗曲线. 光纤的其他结构参数为:  $\Lambda = 2 \mu\text{m}$ ,  $d_1 = 2 \mu\text{m}$ ,  $d_2 = 1 \mu\text{m}$ ,  $d_3 = 0.5 \mu\text{m}$ ,  $n_a = 1.423$ . 由此图可以发现: 随着镀膜厚度的增加, 传感器的共振波长向长波长方向移动. 如当 ITO 的厚度分别为  $40 \text{ nm}$ ,  $45 \text{ nm}$ ,  $50 \text{ nm}$ ,  $55 \text{ nm}$ ,  $60 \text{ nm}$  时, 传感器所对应的共振波长分别为  $1.423$ ,  $1.493$ ,  $1.548$ ,  $1.599$ ,  $1.645 \mu\text{m}$ . 类似的现象也可以从其他 SPR-MF 传感器中看到 [22,23]. 其原因是 ITO 厚度的增大使得 SPP 模的模有效折射率也增大, 而 Y 偏振模的模有效折射率却几乎不受影响, 进而导致共振波长发生红移. 此外, 当 ITO 的厚度从  $40 \text{ nm}$  增大到  $60 \text{ nm}$  时, Y 偏振基模的损耗峰值几乎没有变化. 因此, 我们可以通过合理调节 ITO 的厚度来提高传感器的传感性能.

图 5 为  $d_3$  对 Y 偏振模损耗的影响. 光纤的其他结构参数为:  $\Lambda = 2 \mu\text{m}$ ,  $d_1 = 2 \mu\text{m}$ ,  $d_2 = 1 \mu\text{m}$ ,  $t = 50 \text{ nm}$ ,  $n_a = 1.423$ . 从此图可以看出: 随着小孔直径的变大, Y 偏振模的共振波长向长波长移动, 但损耗峰值基本不变. 如当  $d_3$  分别为  $0.3$ ,  $0.4$ ,  $0.5$ ,  $0.6$ ,  $0.7 \mu\text{m}$  时, 传感器所对应的共振波长分别为  $1.538$ ,  $1.542$ ,  $1.548$ ,  $1.555$ ,  $1.563 \mu\text{m}$ . 这是因为小孔直径的增大只会影响 Y 偏振基模的模有效折射率, 使其模有效折射率减小, 进而导致耦合波长

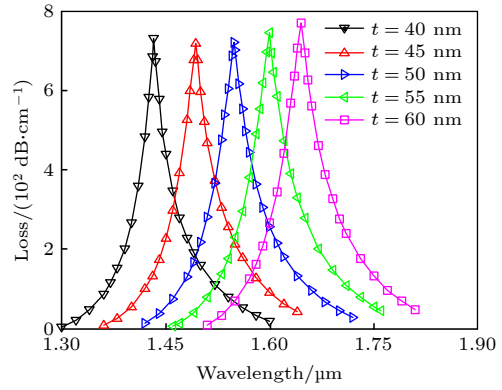


图 4 ITO 厚度对 Y 偏振模损耗的影响

Fig. 4. Influence of the thickness of ITO film on the loss of Y-polarized mode.

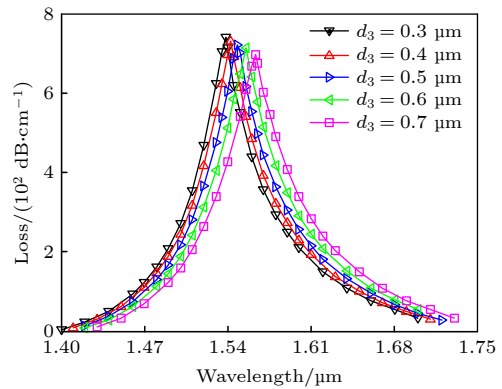


图 5  $d_3$  对 Y 偏振模损耗的影响

Fig. 5. The influence of  $d_3$  on the loss of Y-polarized model.

产生红移.

为了更好的分析光纤结构参数对传感器传感性能的影响, 我们还研究了  $t$  和  $d_3$  对传感器灵敏度的影响. 图 6(a) 给出了  $t$  对传感器灵敏度的影响. 光纤的其他结构参数为:  $\Lambda = 2 \mu\text{m}$ ,  $d_1 = 2 \mu\text{m}$ ,  $d_2 = 1 \mu\text{m}$ ,  $d_3 = 0.5 \mu\text{m}$ . 从图 6(a) 可以发现: 当 ITO 厚度从  $40 \text{ nm}$  增大到  $50 \text{ nm}$  时, 传感器的波长灵敏度保持不变. 这是因为当 ITO 厚度在  $40\text{--}50 \text{ nm}$  之间变化时, SPP 模与 Y 偏振模之间的耦合效率并不会受其影响 [16]. 然而, 当 ITO 厚度从  $50 \text{ nm}$  增大到  $60 \text{ nm}$  时, 对应的波长灵敏度会随之从  $9200 \text{ nm/RIU}$  减小到  $9000 \text{ nm/RIU}$ . 这也就意味着 SPP 模和 Y 偏振模之间的耦合效率变差了. 从图 6(b) 中可以看出: 当小孔直径  $d_3$  从  $0.3 \mu\text{m}$  增大到  $0.7 \mu\text{m}$  时, 传感器的灵敏度直接从  $9600 \text{ nm/RIU}$  减小到  $8600 \text{ nm/RIU}$ . 这说明 SPP 模与 Y 偏振模之间的耦合效率会随着  $d_3$  的增大而减小. 此时光纤的其他结构参数为:  $\Lambda = 2 \mu\text{m}$ ,  $d_1 = 2 \mu\text{m}$ ,  $d_2 = 1 \mu\text{m}$ ,  $t = 50 \text{ nm}$ .

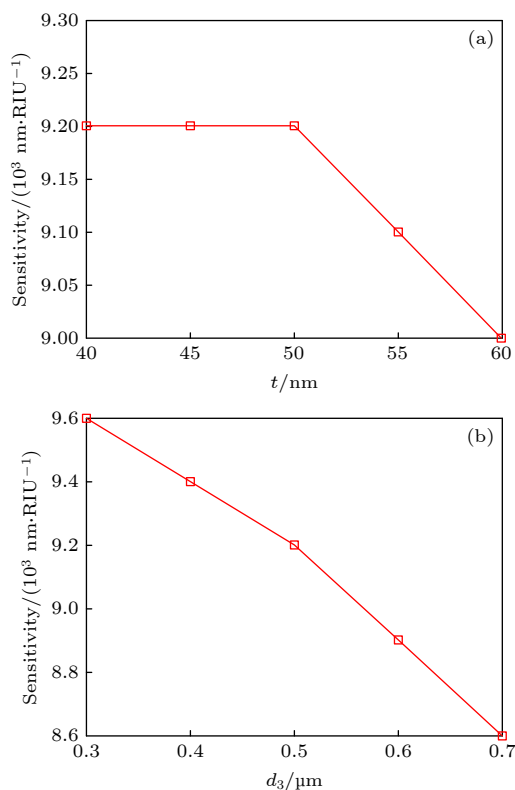


图 6 当  $n_a$  由 1.423 增大到 1.433 时, 结构参数  $t$  和  $d_3$  对波长灵敏度的影响 (a) 结构参数  $t$ ; (b)  $d_3$

Fig. 6. The influence of fiber parameters  $t$  and  $d_3$  on the wavelength sensitivity with  $n_a$  increasing from 1.423 to 1.433: (a) Fiber parameters  $t$ ; (b)  $d_3$ .

## 4 结 论

利用 MF 的多孔结构, 设计了一种可工作在近红外和中红外区域的新型 SPR-MF 传感器. 采用全矢量有限元法对其传感性能进行了系统的研究, 研究发现: 该传感器只能实现 Y 偏振模与 SPP 模之间的耦合共振, 且当待测样品折射率处于 1.423—1.513 范围内时, 传感器的平均灵敏度、最大灵敏度和折射率分辨率分别高达 13964 nm/RIU, 17900 nm/RIU,  $5.59 \times 10^{-7}$  RIU. 因此, 我们所设

计的 SPR-MF 传感器在安全生产、药物筛选、环境检测等领域都有广泛的应用前景.

## 参考文献

- [1] Liang R B, Sun Q Z, Wo J H, Liu D M 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 104221 (in Chinese) [梁瑞冰, 孙琪真, 沃江海, 刘德明 2011 物理学报 **60** 104221]
- [2] Li G C, Zhang W B 2011 *Computer Measurement and Control* **19** 1420 (in Chinese) [李桂成, 张微波 2011 计算机测量与控制 **19** 1420]
- [3] Guo S S, Hou J D 1996 *Aerospace China* **7** 25 (in Chinese) [郭双生, 侯继东 1996 中国航天 **7** 25]
- [4] Shi W H, You C J, Wu J 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 224221 (in Chinese) [施伟华, 尤承杰, 吴静 2015 物理学报 **64** 224221]
- [5] Hassani A, Skorobogatiy M 2006 *Opt. Express* **14** 11616
- [6] Yu X, Zhang Y, Pan S, Shum P, Yan M, Leviatan Y, Li C 2010 *J. Opt.* **12** 015005
- [7] Shuai B B 2013 *M. S. Thesis* (Wuha: Huazhong University of Science & Technology) (in Chinese) [帅彬彬 2013 硕士学位论文 (武汉: 华中科技大学)]
- [8] Otupiri R, Akowuah E K, Haxha S, Ademgil H, AbdelMalek F, Aggoun A 2014 *IEEE Photon. J.* **6** 1
- [9] Liu C, Wang F, Lv J, Sun T, Liu Q, Mu H, Chu P C 2015 *J. Nanophotonics* **9** 0930501
- [10] Huang T Y 2017 *Plasmonics* **12** 583
- [11] Chen X, Xia L, Li C 2018 *IEEE Photon. J.* **10** 6800709
- [12] Li T, Zhu L, Yang X, Lou X, Yu L 2020 *Sensor* **20** 741
- [13] Rifat A A, Mahdiraji G A, Shee Y G, Shawon M J, Adikan F R M 2016 *Procedia Eng.* **140** 1
- [14] Yang Z, Xia L, Li C, Chen X, Liu D, 2019 *Opt. Commun.* **430** 195
- [15] Petracek J, Selleri S 2001 *Opt. Quant. Electron.* **33** 373
- [16] Zhang Z, Li S, Liu Q, Feng X, Zhang S, Wang Y, Wu J 2018 *Opt. Fiber Technol.* **43** 45
- [17] Haque E, Hossain M A, Ahmed F, Namihira Y 2018 *IEEE Sens. J.* **18** 8287
- [18] An G, Li S, Yan X, Zhang X, Yuan Z, Wang H, Zhang Y, Hao X, Shao Y, Han Z 2017 *Plasmonics* **12** 465
- [19] Rifat A A, Mahdiraji G A, Chow D M, Shee Y G, Ahmed R, Adikan F R M 2015 *Sensor* **15** 11499
- [20] Tong K, Wang F, Wang M, Dang P, Wang Y 2018 *Opt. Fiber Technol.* **46** 306
- [21] Shuai B, Xia L, Zhang Y, Liu D 2012 *Opt. Express* **20** 5974
- [22] Rahman M M, Molla M A, Paul A K, Based M A, Rana M M, Anower M S 2020 *Results Phys.* **18** 103313
- [23] Abdullah H, Ahmed K, Mitu S A 2020 *Results Phys.* **17** 103151

# A new type of ultra-broadband microstructured fiber sensor based on surface plasmon resonance\*

Ding Zi-Ping   Liao Jian-Fei<sup>†</sup>   Zeng Ze-Kai*(College of Physics and Electronic Information, Gannan Normal University, Ganzhou 341000, China)*

( Received 6 September 2020; revised manuscript received 24 November 2020 )

## Abstract

Microstructured fiber (MF) sensors based on surface plasmon resonance (SPR) have been widely investigated because they have many merits including high sensitivity, label-free and real-time detection and so on, thus they possess extensive applications such as in food safety control, environmental monitoring, biomolecular analytes detection, antibody-antigen interaction, liquid detection and many others. However, most of reported SPR-based MF sensors can only work in the visible or near-infrared wavelength region. Hence, the investigation of high-performance mid-infrared SPR-based MF sensors is a challenge task. In this paper, with the aim of overcoming the above limitation, a new type of high-sensitivity SPR-based MF sensor coated with indium tin oxide (ITO) layer is proposed. The proposed sensor can work in both the near-infrared and mid-infrared wavelength region. Benefitting from its two-core and single analyte channel structure, our proposed sensor can effectively eliminate the interference among neighboring analyte channels, improving its signal-to-noise ratio, and achieving high-sensitivity detection in ultra-broadband wavelength range. By using the full-vector finite method with the PML boundary conditions, the sensing properties of our proposed sensor are numerically studied in detail. The numerical results show that the resonance wavelength of the proposed sensor shifts toward a long wavelength region as the refractive index of analyte increases from 1.423 to 1.513, and a similar phenomenon can be found if the thickness of the ITO layer increases from 40 nm to 60 nm. Nevertheless, the wavelength sensitivity of the proposed sensor decreases with the increase of the diameter of the hole located in the fiber core region. On the other hand, when the refractive index of analyte varies in a large range of 1.423–1.513, the proposed sensor can operate in an ultra-broad wavelength range of 1.548–2.796  $\mu\text{m}$ , and the average wavelength sensitivity is as high as 13964 nm/refractive index unit (RIU). Moreover, the maximum wavelength sensitivity and refractive index resolution increase up to 17900 nm/RIU and  $5.59 \times 10^{-7}$  RIU, respectively. Hence, our proposed SPR-based MF sensor can be applied to environmental monitoring, biomolecular analyte detection and chemical detection.

**Keywords:** fiber optics, microstructured fiber, surface plasmon resonance, sensor**PACS:** 42.81.-i, 42.81.Bm, 73.20.Mf, 42.81.Pa**DOI:** [10.7498/aps.70.20201477](https://doi.org/10.7498/aps.70.20201477)

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61765003), the Natural Science Foundation of Jiangxi Province, China (Grant No. 20181BAB202029), and the Graduate Innovation Foundation of Gannan Normal University, China (Grant No. YCX19A043).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [jfliao@126.com](mailto:jfliao@126.com)