

# 契形结构光纤表面等离子体共振传感器研究\*

冯李航<sup>1)2)</sup> 曾捷<sup>1)</sup> 梁大开<sup>1)†</sup> 张为公<sup>2)</sup>

1) (南京航空航天大学, 机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016)

2) (东南大学仪器科学与工程学院, 南京 210096)

(2013年1月28日收到; 2013年2月27日收到修改稿)

提出了一种契形端面结构的光纤表面等离子体共振 (SPR) 传感器激励模型. 采用时域有限差分法对契形 SPR 波导的共振模型进行数值模拟, 通过在光纤出射端抛磨契形角度并进行敏感膜修饰, 制出具有契形端面结构的类 Kretschmann 微棱镜式光纤 SPR 传感器, 实现激发 SPR 的光波调制. 结果表明, 在 1.3330—1.4215 折射率范围内, 制备的契形光纤 SPR 传感器相对于常规光纤 SPR 传感器, 其平均灵敏度提高了近 1—6 倍, 1 倍和 6 倍分别出现在小角度结构 (15° 契形) 传感器和大角度结构 (60° 契形) 传感器, 且仍保持  $10^{-5}$  等级的分辨率. 该类型结构的传感器具有契形端面激励模式, 设计灵活性高、制备工艺简单、可微量检测样本等优点, 能够很好地适应于不同环境和测量条件的实际生化检测、环境监测需求.

**关键词:** 光纤传感器, 表面等离子体共振, 契形端面结构, 折射率灵敏度

**PACS:** 42.81.Pa, 07.60.-j, 78.20.Ci, 73.20.Mf

**DOI:** 10.7498/aps.62.124207

## 1 引言

表面等离子体共振效应 (surface plasmon resonance, SPR) 是存在于金属与非导电介质界面处的物理现象, 对界面附近介质成分的微小变化非常敏感<sup>[1,2]</sup>. 结合了高灵敏度 SPR 传感技术与低能耗光纤传输技术的光纤 SPR 传感技术已在生化检测等多个领域应用<sup>[3-5]</sup>. 光纤 SPR 传感器 (fiber-optic SPR sensor, FO-SPR) 具有传输损耗小、能量利用率高、体积小、集成性好等诸多优点, 受到了广泛关注, 而如何提高光纤 SPR 传感器的灵敏度和分辨率一直为研究的热点<sup>[6]</sup>.

通过改进传感结构达到共振激励模型优化的方法为实现光纤 SPR 传感器灵敏度提高的主要方式之一<sup>[7,8]</sup>. Cahill 等<sup>[9]</sup> 在一段多模光纤上磨成半锥形结构, 制成可灵活替换的 SPR 探头, 分辨率达  $3.36 \times 10^{-5}$  RIU, 但其周向全面抛磨, 加工复杂, 难度较高. Piliarik 等<sup>[10]</sup> 采用单模光纤侧面抛磨的方

法来增大 SPR 耦合强度, 传感器灵敏度高达 3200 nm/RIU, 分辨率为  $4 \times 10^{-5}$  RIU; Wang 等<sup>[11]</sup> 直接将单模光纤侧面抛成 D 型槽状, 并配合外差干涉法以提高灵敏度. 但这类单模光纤传感器常为在线传输式, 且侧面抛磨使整根光纤变得更加脆弱易折, 不易使用. 近年来, Booksh 课题组<sup>[12]</sup> 又采用了高硬度的蓝宝石单晶材料光纤双面抛磨成斜锥形结构, 制成高灵敏度的多模光纤 SPR 传感器, 但经济成本较高.

为了进一步提高监测精度和灵敏度, 设计满足灵活性和经济性、具有高分辨率等要求的光纤 SPR 传感器, 本文提出了契形端面结构的光纤 SPR 共振激励模型. 本文采用时域有限差分法 (FDTD) 对契形波导模型进行数值模拟, 在此基础上制备具有契形端面激励模式的类 Kretschmann 微棱镜式光纤 SPR 传感器, 以期有相对常规光纤 SPR 传感器更优的灵敏度和灵活性, 能够更好地满足环境监测等领域对折射率检测的需求.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 60906037, 51161120326) 和江苏省科技支撑计划 (批准号: BE2011181) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: liangdk@nuaa.edu.cn

## 2 契形光纤 SPR 传感器原理

SPR 传感原理为入射光场以金属/介质光学器件 (棱镜、光纤、光栅等) 为 SPR 激励结构 (如图 1 为 Kretschmann 三层介质波导模型) 在介质与金属膜界面发生衰减全反射, 其本质是使入射光子动量提高以穿透金属膜, 倏逝波  $k_{EW}$  与金属表面等离子体波矢 (surface plasmon wave, SPW)  $k_{spz}$  相匹配, 两种电磁波模式强烈耦合, 部分光子能量被吸收导致光强度明显降低, 从而实现环境介质参量的检测 [13].

SPR 波矢匹配公式为 [14]

$$\begin{aligned} k_{EW} &= \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_0} \sin \theta = \text{Re}\{k_{spz}\} \\ &= \text{Re} \left\{ \frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_1 \cdot \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2} + \Delta k} \right\}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $\omega$ ,  $c$ ,  $\theta$  分别为入射光频、光速、入射角,  $\epsilon_0$ ,

$\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  分别为波导介质、金属膜、待测介质的介电常数,  $\Delta k$  为材料引起的波矢失配量. 契形端面结构的光纤 SPR 激励模型如图 2 所示, 其中契形光纤端面与 Kretschmann 结构中棱镜斜边底面所起作用相仿, 都是作为 SPR 效应激励面. 通过改变光纤端面契形角和棱镜底边角均可调整光波信号到达两者激励面的入射/反射角度, 类似于在光纤端面制作出一个微型棱镜 SPR 激励结构, 激发 SPR 效应及效果由倏逝波与 SPW 的匹配程度决定.

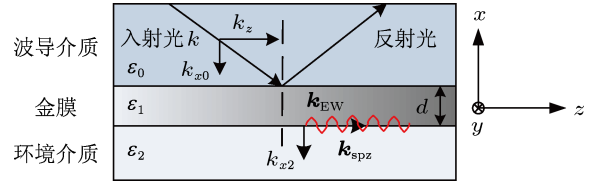


图 1 Kretschmann 三层波导模型

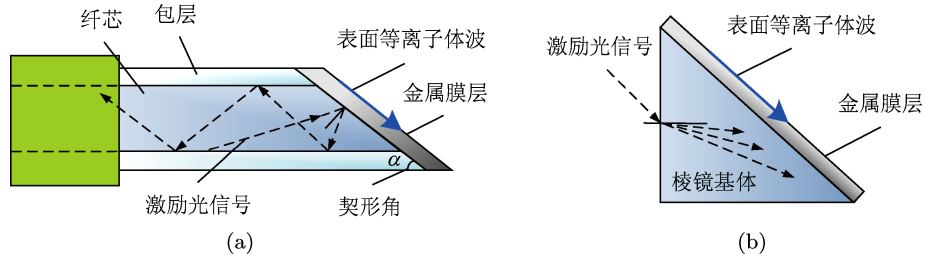


图 2 契形端面结构光纤 SPR 激励模型 (a) 契形端面 SPR 效应激励模型; (b) 棱镜结构 SPR 效应激励模型

Kretschmann 型三层结构 SPR 模型的单次 SPR 激励效应所对应光强反射率为 [15]

$$R^p = |r_{012}^p|^2 = \left| \frac{r_{01}^p + r_{12}^p \exp(2ik_{z1}d_1)}{1 + r_{01}^p r_{12}^p \exp(2ik_{z1}d_1)} \right|^2, \quad (2)$$

式中,

$$r_{ij} = \frac{\epsilon_j k_{iz} - \epsilon_i k_{jz}}{\epsilon_j k_{iz} + \epsilon_i k_{jz}} \quad (i = 0, 1; j = i + 1), \quad (3)$$

$$k_{iz} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_i(\lambda) - \epsilon_0 \sin^2 \theta}. \quad (4)$$

由电磁场边界条件, 可得到光纤内 p 光传播的光强总反射率是一个涉及多变量的函数:

$$\begin{aligned} R_p &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M r_p[\theta_i, L, d, \epsilon_1(\lambda), \epsilon_2(\lambda), \\ &\quad \epsilon_3(\lambda)]^{N(L, D, \theta)} I(\theta_i), \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $k_{iz}$  表示介质  $i$  中垂直于界面的波矢量,  $r_{ij}$  为相邻 2 层之间反射系数;  $N = l/(D \tan \theta_i)$  为近轴光线反射次数;  $d, L, D, N, M$  分别为金膜厚度、敏感段长度、纤芯直径、反射次数、传播模式数;  $I(\theta_i)$  为模式密度分布函数.

当光纤 SPR 传感探针结构固定时, 模型相关参数均已知, 光路反射角度  $\theta_i$  由契形端面倾角决定, 即  $\theta_i = \theta_i(\alpha)$ . 则上述复杂的函数关系可简化为

$$R_p = R[\theta_i(\alpha), \lambda_s, \epsilon_2(\lambda)]. \quad (6)$$

## 3 契形光纤 SPR 传感器数值模拟

FDTD 是将 Maxwell 方程式在时间和空间领域上进行差分化, 利用空间领域内的电场和磁场进行交替计算, 以达到数值计算目的 [16]. 本文利用基于时域有限差分方法的 OptiFDTD 软件 [17] 对契形光纤 SPR 传感器的传输特性进行研究.

### 3.1 契形端面结构光纤 SPR 激励特性数值模拟

本文仿真与实验所选用多模光纤参数主要有 [13]: 纤芯折射率为 1.4638, 芯径 0.6 mm; 包层

折射率为 1.5050, 厚度 0.2 mm; 金属层为 Lorentz-Drude 金膜, 厚度 50 nm, 环境介质为空气, 光源选用 TM 波 (即垂直极化波), 传输方向沿  $z$  向. 对  $10^\circ$ — $90^\circ$  各契形结构的纤芯 - 金膜 - 环境介质三层光纤 SPR 波导模型进行数值模拟, 得到  $z$  方向的坡印亭

矢量  $S_z$  分布关系, 如图 3 (为  $\alpha = 15^\circ$  契形结构光纤 SPR 波导典例分析) 和图 4 (典型契角  $\alpha = 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ ) 所示. 其中, 坡印亭矢量表示电磁波传输能流密度, 即  $S = E \times H$ , 反映波导内传输光的能量变化 [18].

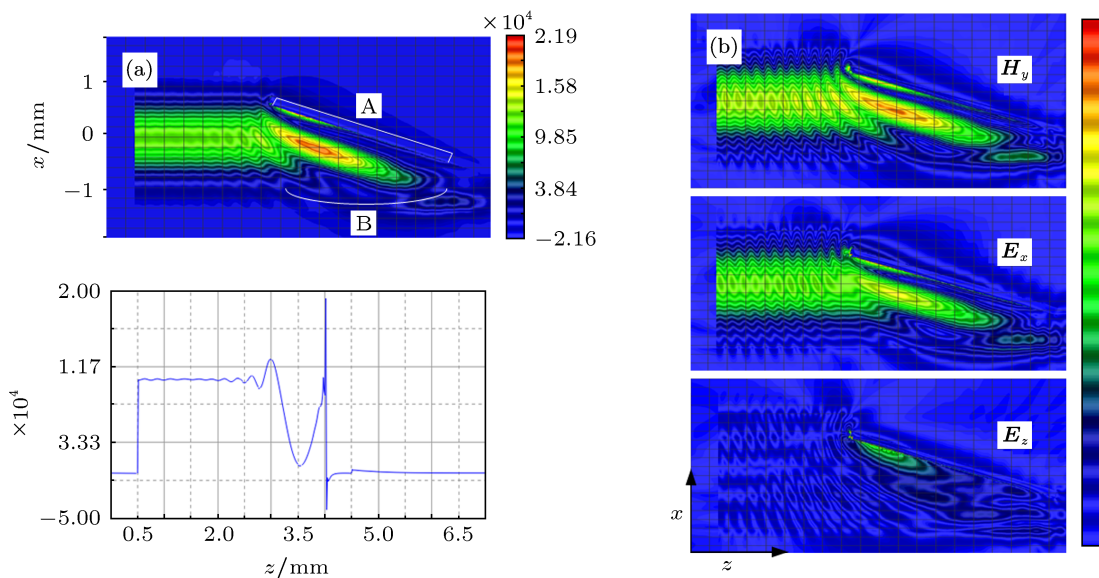


图 3 (a) 契形光纤 SPR 波导坡印亭矢量分布与截面强度曲线 ( $y = 0.2$  mm); (b) 契形 SPR 波导 TM 电磁分量强度分布 (磁矢量  $H_y$ , 电矢量  $E_x$ , 轴向电场矢量  $E_z$ )

由图 3 可知, 在靠近入射端的包层 - 纤芯段 (光波传输区域), 能量集中于纤芯内部分布对称, 即光波在纤芯中传播; 入射光在金膜 - 纤芯 AB 段 (契形共振激励区域) 发生急剧变化, 尤其在金膜修饰 A 区为共振激励峰值较高, 这是由于 SPR 效应使得光波能量外泄并聚集在金膜与纤芯的交界面, 可设置

AB 段为观察区域做后续计算. 并且, 由图 3(a) 截面  $y = 0.2$  mm 强度曲线可知, 共振强度峰值出现在金膜表面约中点处. 为了更清晰地说明契形敏感面的 SPR 激励特性, 给出 TM 模式的各电磁场分量强度分布如图 3(b), 可见激励光能量集中在横磁场  $H_y$ ; 分量  $E_z$  在契形金膜表面有微小能量分布近似为 0.

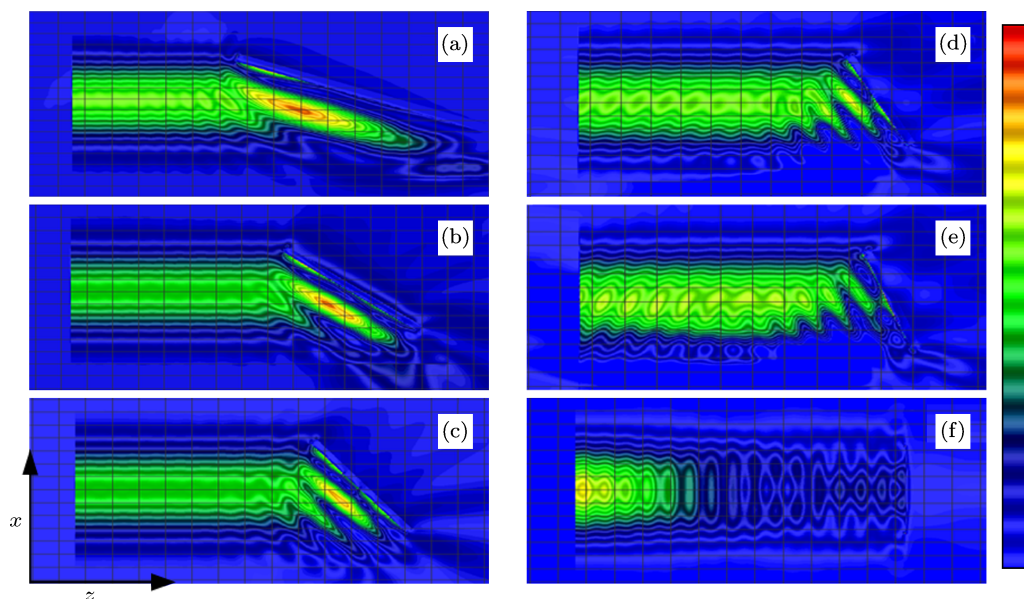


图 4 不同契形结构光纤 SPR 波导坡印亭矢量分布 (a)  $20^\circ$ ; (b)  $30^\circ$ ; (c)  $45^\circ$ ; (d)  $60^\circ$ ; (e)  $75^\circ$ ; (f)  $90^\circ$

### 3.2 契形端面角对 SPR 激励特性的影响

为了研究契角  $\alpha$  对契形波导的 SPR 激励特性的影响, 设定环境介质为水 ( $n = 1.3333$ ), 改变入射光为宽频范围 500—1000 nm, 步长为 20 nm, 分别对  $10^\circ$ — $90^\circ$  各契形 SPR 波导进行数值模拟. 在共振激励区沿纤芯径向处设置观察线, 计算观察域的平均坡印亭矢量强度  $S_z$ , 得各契形波导  $S_z$  随激励光波长关系如图 5 所示 (光谱曲线为非线性高斯拟合). 可见, 随着角  $\alpha$  的增大, 能量强度逐渐减小, 共振波长“红移”, 曲线展宽且规律性偏移. 即契角  $\alpha$  改变了该结构波导内光能量激励模式, 即使得 SPR 共振激励特性呈规律性.

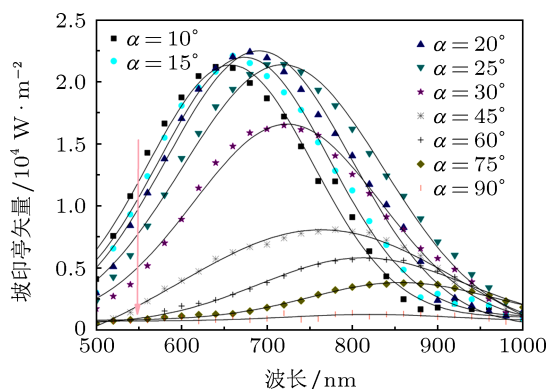


图 5 不同契形光纤 SPR 波导坡印亭矢量分布与波长关系

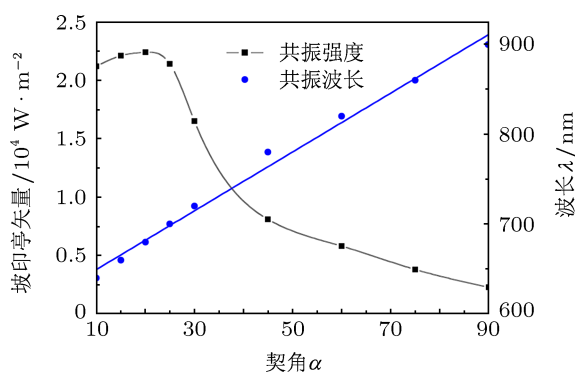


图 6 契角  $\alpha$  与观察线域共振激励特性关系

由图 5 可给出观察区能量传输强度、共振波长随契角  $\alpha$  变化关系如图 6 所示. 可见, 共振波长随着  $\alpha$  增加而不断“红移”; 当  $\alpha$  在  $15^\circ$ — $30^\circ$  之间时, SPR 激励强度较为显著, 可认为最优契角范围, 这与光纤  $N.A.$  值及其传播模式相关; 当  $\alpha = 90^\circ$  时, 即在常规光纤出射端面直接金膜修饰, 此时绝大多数光能量被吸收, 表面等离子体耦合较低, 能量传输在 FDTD 吸收边界条件下变得最小.

因此, 数值模拟计算表明, 通过契角可改变波

导内 SPW 耦合强度与共振激励模式, 可导致 SPR 光谱产生偏移、展宽等效果, 从而这将间接实现光纤 SPR 传感器增敏.

## 4 契形光纤 SPR 传感探针制备及实验系统

### 4.1 传感探针制备

本文分别制备了同批次的常规光纤 SPR 传感探针和契角为  $15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 65^\circ, 75^\circ$  的契形光纤 SPR 探针. 工艺流程为: 1) 使用光纤切割刀 (日本藤仓公司 CT-07) 截取 200 mm 光纤; 2) 光纤抛磨装置 (DR-QG8G 钻石激光切割机) 加工, 原始探针固定于夹具上匀速行进入抛磨面, 契角由角度板控制; 3) 将磨平抛光的探针于蒸馏水和丙酮溶液反复冲洗; 4) 采用真空电子束蒸镀法对探针增镀 50 nm 金膜, 同时内镀 1 nm Cr 以增加附着力, 延长探针使用寿命. 制备的契形 SPR 探针结构及其实物如图 7 所示.

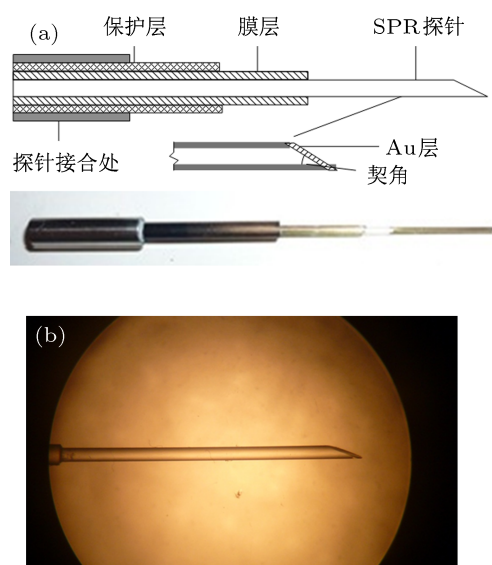


图 7 契形光纤 SPR 探针结构示意图 (a) 及显微图 (b)

### 4.2 实验系统构建

本文光纤 SPR 传感系统主要由宽带光源、SPR 传感探针、多模光纤耦合器、微型光纤光谱仪及计算机组成, 如图 8 所示. 入射光由宽带光源产生, 经多模光纤耦合进入 SPR 传感探头, 出射光从 SPR 传感探头经耦合器的另一端进入光谱仪, 用于采集反射光谱的变化.



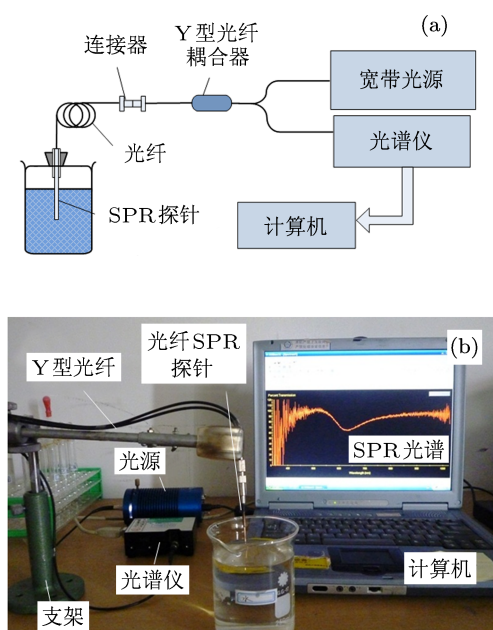


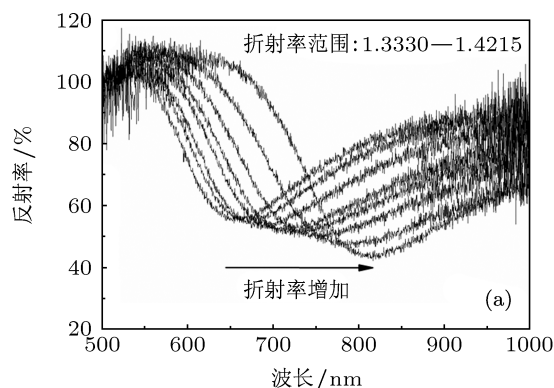
图8 契形结构光纤 SPR 传感系统框图 (a) 及其实物图 (b)

## 5 实验结果与讨论

### 5.1 制备的契形光纤 SPR 传感器光谱特性

本文实验于室温 20 °C 下配置标准溶液 (浓度分布范围 0%—55%, 对应折射率范围为 1.3330—1.4215), 将研制的契形光纤 SPR 传感器置于各溶液中做折射率测试. 以 15° 契形光纤 SPR 传感器为典例, 其不同折射率溶液下的 SPR 光谱如图 9(a) 所示. 可见, 随着溶液折射率的增加, 契形光纤 SPR 传感探针的共振光谱呈有规律的“红移”, 共振峰从 624.25 nm 逐渐增加为 811.09 nm. 事实上, 各契形光纤 SPR 传感器光谱均有相同的趋势.

为了考察制备的契形光纤 SPR 传感器光谱特



性, 以环境介质为水为检测条件, 给出常规结构和典型契形结构的光纤 SPR 传感器光谱, 如图 9(b) 所示. 可见, 由于契角的存在, 其共振光谱均位于常规结构光纤 SPR 传感器光谱右侧, 并且随着契角  $\alpha$  的增加, 共振光谱曲线“红移”, 光谱总反射率增加, SPR 共振强度降低, 光谱出现半波 (FWHM) 展宽.

### 5.2 契角影响共振激励特性的模拟与实际对比分析

SPR 共振激励模式及其耦合强度变化通常引起 SPR 光谱波长展宽等效应, 通过改变光谱特性从而可间接地提高传感器灵敏度等 [19,20]. 为了验证实际制备的契形光纤 SPR 传感器光谱特性, 由图 9(b) 得到反射强度、共振波长与契角关系曲线如图 10 所示.

由图 10(a) 可见, 契形光纤 SPR 传感器的光谱反射率/契角关系曲线与其 FDTD 数值模拟的能量传输强度/契角关系曲线呈对偶性. 容易理解到,  $\alpha$  越大, 反射回光纤内光波模式多, 反射率则高, 而数值计算的共振激励区 SPR 耦合强度则低.  $\alpha \approx 90^\circ$  时近似于光纤端面截断, 实际共振反射率为 98.50% 近似于空置. 由图 10(b), 数值计算与实际测试的共振波长/契角关系曲线具有一定的一致性, 其中  $\alpha = 0$  为常规结构光纤 SPR 传感器水环境下共振波长, 均低于各契形光纤 SPR 传感器.

因此, 本次实验与数值模拟得到了能量传输强度/契角  $\alpha$  曲线的对偶关系、共振波长/契角  $\alpha$  对应关系, 佐证了契形光纤 SPR 传感器通过契形端面角改变了 SPW 耦合强度与激励模式, 从而可实现光谱展宽等效应以期提高传感器灵敏度.

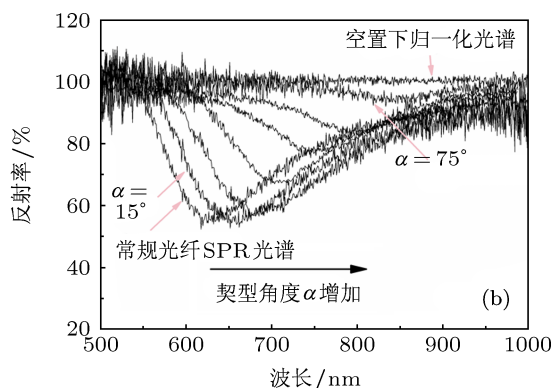


图9 (a) 15° 契形光纤 SPR 传感器的典型 SPR 光谱; (b) 不同契形 SPR 传感器折射率关系曲线

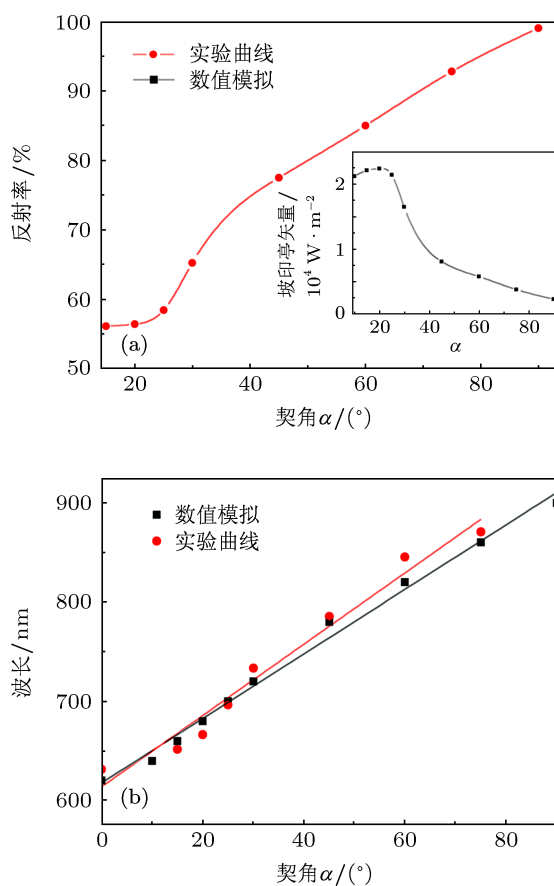


图 10 (a) 契形 SPR 传感器共振强度与契角关系曲线 (嵌入图 6 为数值模拟图 6); (b) 契形 SPR 传感器共振波长与契角关系曲线

### 5.3 契形光纤 SPR 传感器折射率响应性能评价

为了讨论制备的各契形光纤 SPR 传感器的灵敏度特性, 由各光纤 SPR 探针在标准溶液下的光谱 (如图 9(a)), 得传感器共振波长与待测溶液折射率二次拟合曲线如图 11(a) 所示. 对各个传感器的波长/折射率拟合曲线求导, 即得灵敏度响应关系如图 11(b) 所示.

由图 11(a) 可见, 各传感器测量曲线中, 共振波长随着折射率增加而增加相一致, 且非线性; 契形结构传感器测量曲线高于常规结构传感器, 如在折射率  $n = 1.3506$  时, 两类传感曲线波长均差达 121.35 nm. 图 11(b) 可见, 在 1.3330—1.4215 折射率范围内, 各契形结构光纤 SPR 器相对于常规光纤 SPR 传感器, 其灵敏度提高 1—6 倍, 提高等级与角度  $\alpha$  相关: 如在折射率  $n = 1.3510$  时, 常规光纤 SPR 传感器波长灵敏度为 1212.02 nm/RIU, 15° 契形 SPR 传感器灵敏度为 2109.62 nm/RIU, 相

对常规结构的 1.74 倍, 45° 契形 SPR 传感器灵敏度为 7132.92 nm/RIU, 相对于常规模型提高约 5.88 倍. 且经计算, 各契形激励结构的 SPR 传感器仍保持大于  $10^{-5}$  等级的高分辨率, 最小分辨率约为  $1.06 \times 10^{-5}$  RIU.

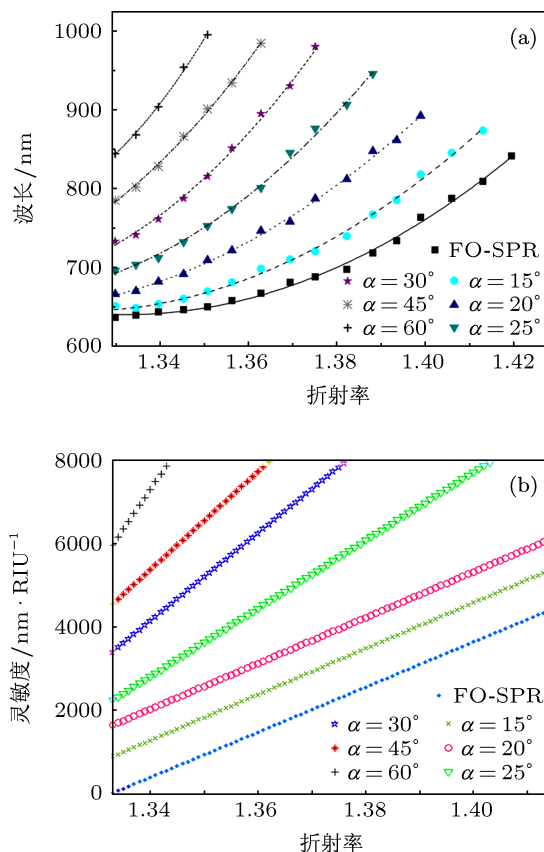


图 11 契形光纤 SPR 传感器共振波长与折射率关系曲线 (a) 及灵敏度关系曲线 (b)

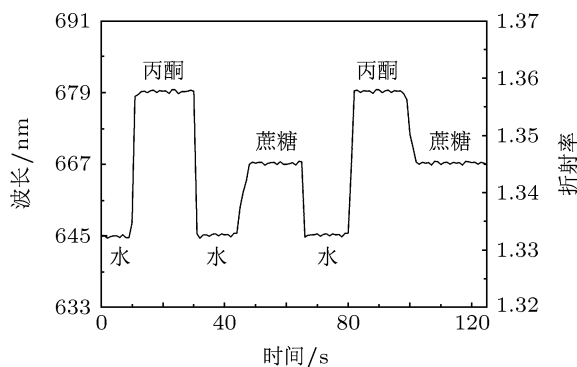


图 12 不同折射率溶液下契形光纤 SPR 传感器实时检测曲线

契形光纤 SPR 传感器类似常规结构光纤 SPR 传感器, 具有良好的重复性和稳定性. 以 15° 契形光纤 SPR 传感器为例, 对不同折射率液体水、10%蔗糖溶液 ( $n = 1.3468$ )、丙酮 ( $n = 1.3575$ ) 做实时检

测,结果如图 12 所示. 契形 SPR 传感器在不同液体溶液之间的切换时,同样存在略微迟滞现象,为探头外表面覆有少许其他液体所致.

事实上,由于契角存在引起 SPR 共振光谱的逐渐展宽和不断“红移”,很容易使其超出光谱仪检测范围(约 300—1100 nm),导致检出上限降低,这由图 9(b), 11(a) 可观察到. 但在可用的折射率检测范围内,制备的契形光纤 SPR 传感器灵敏度得到了显著提高. 为了进一步说明契形光纤 SPR 传感器灵敏

度各参数关系,取折射率范围为 1.3350—1.3520,给出各传感器灵敏度具体参数见表 1. 由表可见,在本文现有设备下,60° 契形结构光纤 SPR 传感器可检测折射率上限虽低于 1.3500,但其灵敏度相对提高了近 7 倍. 因此,在考虑测量范围和实际系统设备(光谱仪)条件下,契形光纤 SPR 传感器应用也具有很大的设计灵活性,可根据实际情况计算并制备出最优契角的传感器.

表 1 折射率 1.3350—1.3510 范围内契形与常规结构光纤 SPR 传感器灵敏度参数对比

项目	常规结构		契形结构				
	无	15	20	25	30	45	60
最小灵敏度/nm·RIU <sup>-1</sup>	332.88	1011.10	1757.61	2400.52	3610.14	4730.72	6240.70
最大灵敏度/nm·RIU <sup>-1</sup>	1212.02	2109.62	2853.63	4029.82	5712.26	7132.92	—

## 6 结论

本文提出了一种契形端面结构的光纤 SPR 传感器模型. 通过在普通光纤探针端面抛磨契形角度并沉积敏感金膜,制出了具有契形端面结构的类 Kretschmann 微棱镜 SPR 激励模型,实现激发 SPR 的光波调制. 研究结果表明: 1) 契形波导的 FDTD 数值模拟与实验相一致,表明了契角对 SPR 光谱激励耦合模式的影响——引起光谱共振波长展宽和波长“红移”,从而可间接提高传感器的灵敏度; 2) 制备的契形光纤 SPR 传感器相对于常规光纤 SPR 传感器,其平均灵敏度随契角提高了 1—6 倍,且仍保持 10<sup>-5</sup> 等级的分辨率. 在折射率  $n = 1.3510$  时,小角度结构(15° 契形) SPR 传感器灵敏度为 2109.62 nm/RIU,为常规结构的 1.74 倍;大角度结

构(45° 契形) SPR 传感器灵敏度为 7132.92 nm/RIU,为常规模型的约 5.88 倍. 该类型结构设计传感器的契形端面激励模式,设计灵活、工艺简单、经济性强、可微量样本检测等优点,能很好地适应于不同环境和测量条件的实际生化检测、环境监测需求.

另外,实验还表明: 1) 契形 SPR 传感器灵敏度的提高部分程度上改变了传感器检测范围和分辨率,对检测系统设备性能(尤其光谱仪)提出了更高的要求,这是共振光谱展宽的结果; 2) 实际测量光谱具有明显的噪声干扰,与敏感层均匀程度、探头表面平整度、环境(温度、湿度)等有关,会对传感器输出稳定性和分辨率有负面影响. 为此,可考虑采取采用高分辨率和高带宽的光谱仪、进一步优化工艺并改进光谱信号处理过程等措施.

- [1] Gupta B D, Sharma A K 2005 *Sens. Actuators B* **107** 40
- [2] Zhao H J 2012 *Chin. Phys. B* **21** 087104
- [3] Wang G P, Zhang J, Long Y B 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7722 (in Chinese) [汪国平, 张剑, 龙拥兵 2009 物理学报 **58** 7722]
- [4] Jia Z X, Duan X, Lü T T, Guo Y N, Xue W R 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 057301 (in Chinese) [贾智鑫, 段欣, 吕婷婷, 郭亚楠, 薛文瑞 2011 物理学报 **60** 057301]
- [5] Yang G J, Kong F M, Li K, Mei L M 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4252 (in Chinese) [杨光杰, 孔凡敏, 李康, 梅良模 2007 物理学报 **56** 4252]
- [6] Homola J 2008 *Chem. Rev.* **108** 462
- [7] Obando L A, Booksh K S 1999 *Anal. Chem.* **71** 5116
- [8] Obando L A, Gentleman D J, Holloway J R, Booksh K S 2004 *Sens. Actuators B* **100** 439
- [9] Cahill C P, Johnston K S, Yee S S 1997 *Sens. Actuators B* **45** 161
- [10] Piliarik M, Homola J, Manfková Z, Čtyroký J 2003 *Sens. Actuators B* **90** 236
- [11] Wang S F, Chiu M H, Chang R S 2006 *Sens. Actuators B* **114** 120
- [12] Kim Y C, Masson J F, Booksh K S 2005 *Talanta* **67** 908
- [13] Sun X M, Zeng J, Zhang Q Y, Mu H, Zhou Y B 2013 *Acta Opt. Sin.* **33** 128 (in Chinese) [孙晓明, 曾捷, 张倩昀, 穆昊, 周雅斌 2013 光学学报 **33** 128]
- [14] Mishra S K, Kumari D, Gupta B D 2012 *Sens. Actuators B* **171** 976
- [15] Feng L H, Zeng J, Liang D K, Liu H Y 2012 *Spectrosc. Spect. Anal.* **32** 2929 (in Chinese) [冯李航, 曾捷, 梁大开, 刘宏月 2012 光谱学与光谱分析 **32** 2929]
- [16] Sha W, Huang Z X, Wu X L, Chen M S 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 103
- [17] [http://www.optiwave.com/products/fdtd\\_overview.html](http://www.optiwave.com/products/fdtd_overview.html)[2012.12.28]
- [18] Shams R, Sadeghi P 2011 *J. Parallel. Distr. Com.* **71** 584
- [19] Anatoly V Z, Igor I S, Alexei A M 2005 *Phys. Reports* **408** 131
- [20] Maier S A 2007 *Plasmonics: Fundamentals and Applications* (Berline: Springer)

# Development of fiber-optic surface plasmon resonance sensor based on tapered structure probe\*

Feng Li-Hang<sup>1)2)</sup> Zeng Jie<sup>1)</sup> Liang Da-Kai<sup>1)†</sup> Zhang Wei-Gong<sup>2)</sup>

1) (State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

2) (School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

( Received 28 January 2013; revised manuscript received 27 February 2013 )

## Abstract

A fiber-optic surface plasmon resonance sensor (SPR) based on tapered structure probe is studied. The incentive mode of tapered probe calculated by finite-difference time-domain method serves as design references, and the tapered structure of sensor probe fabricated by polishing and grinding at the end of a fiber is similar to Kretschmann prism SPR model, which can realize the modulation of SPR wave. The results show that in the refractive index detection range from 1.3330 to 1.4215, tapered structure FO-SPR sensor has a sensitivity of 1–6 times higher than common FO-SPR sensor and it still keeps a limiting resolution level of  $10^{-5}$  RIU. The designed tapered structure SPR sensor, which has the advantages of tapered incentive mode, design flexibility, user practical applicability, simple preparation process, a relatively small sample need, and high stability, will fulfill different environment and measuring conditions of biochemical testing and environment monitoring.

**Keywords:** fiber-optic sensor, surface plasmon resonance, tapered structural model, sensitivity of refractive index

**PACS:** 42.81.Pa, 07.60.-j, 78.20.Ci, 73.20.Mf

**DOI:** 10.7498/aps.62.124207

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60906037, 51161120326) and the Science and Technology Program of Jiangsu Province, China (Grant No. BE2011181).

† Corresponding author. E-mail: liangdk@nuaa.edu.cn