

文章编号: 0253-2239(2007)03-0404-6

# 反射式光纤表面等离子体波共振传感器特性研究\*

曾 捷 梁大开 曾振武 杜 艳

(南京航空航天大学智能材料与结构航空科技重点实验室, 南京 210016)

**摘要:** 研究了一种基于表面等离子体波共振(SPR)光谱分析的折射率检测新方法。研究发现,表面等离子体波共振效应光谱特征的折射率灵敏度会随着液体性质变化而发生改变。根据折射率测量范围不同,分别选择共振波长和共振强度作为检测参量,实现理论折射率分辨力达到  $10^{-5}$  数量级以上。在理论分析和实验基础上,设计出一种基于共振光强检测的终端反射式光纤表面等离子体波共振效应传感系统,采用将传感信号和基准光信号的比值作为液体折射率变化的度量值。在 1.3325~1.3991 的折射率测量范围内,度量值与折射率之间呈现单调递减关系,线性相关系数为 0.9983。通过定义耦合系数,还可实现对表面等离子体波共振效应强弱和变化趋势的评估。

**关键词:** 光纤光学; 表面等离子体波共振; 共振光强检测; 液体折射率

中图分类号: TN253 文献标识码: A

## Reflective Optical Fiber Surface Plasma Wave Resonance Sensor

Zeng Jie Liang Dakai Zeng Zhenwu Du Yan

(Aeronautical Science Key Laboratory for Smart Material and Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

**Abstract:** A novel approach for measurement of refractive index based on analysis of surface plasma resonance (SPR) spectrum is proposed. It is found that the variety of liquid characteristics will lead to the change of refractive index sensitivity of SPR spectrum. According to the different range of refractive index, resonance wavelength and resonance intensity can serve as measuring parameters, respectively. The refractive index resolution can reach  $10^{-5}$  theoretically by using this method. Based on theoretical analysis and experiment, a reflective optical fiber SPR sensor system based on resonance light intensity interrogation is designed and demonstrated, and the ratio of sensing signal and reference signal is used as the measurement value of refractive index. In the refractive index range of 1.3325~1.3991, the measurement value decreases with the increase of refractive index, with a linearity of 0.9983. In addition, the coupling coefficient, which can be used to estimate intensity and change trend of SPR effect, is researched.

**Key words:** fiber optic; surface plasma wave resonance; resonance light intensity measurement; liquid refractive index

## 1 引 言

表面等离子体波共振效应(SPR)是一种发生在金属与电介质分界面的物理光学现象,它对环境液体介质折射率的变化非常敏感。以表面等离子体波共振效应作为传感原理的光学传感器已得到极大重

视和研究,并被广泛应用于诸如基因突变检测、生物分子反应动力学测定以及工业废水废气监控等<sup>[1~3]</sup>领域。为提高光波与金属表面等离子体波之间的能量耦合效率,必须设计合适的耦合基体,常见的主要有棱镜型、光栅型和光纤型等。

\* 国家自然科学基金(60477031)、国家自然科学基金重点项目(60535020)和江苏省自然科学基金(BK2004128)资助课题。

作者简介: 曾 捷(1976-),男,江西人,博士研究生,主要从事光纤传感与结构健康监测方面的研究。

E-mail: zengjiez@yahoo.com.cn

导师简介: 梁大开(1956-),男,山东人,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术及其在智能材料与结构健康监测领域的应用研究。E-mail: liangdk@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2006-03-07; 收到修改稿日期: 2006-05-30

光纤表面等离子体波共振传感器是一种将光纤技术和表面等离子体波共振效应巧妙结合在一起的新型光纤传感结构。与传统基于角度调制的棱镜表面等离子体波共振效应传感结构相比,它具有抗电磁干扰能力强、测量机构简单、传感探头尺寸小、可用于远程测量以及分布式检测等显著优点,因而正受到人们越来越多的关注<sup>[4,5]</sup>。目前对于光纤表面等离子体波共振传感器的研究工作大都集中在对表面等离子体波共振效应探头结构的优化设计和基于共振波长的调制测量。由于在实际检测环境中,往往会对被测量监测的可靠性和实时性提出较高要求,如何加强对表面等离子体波共振效应反射光谱特性的综合分析以及提高系统检测的效率,也成为亟待解决的关键问题。

液体介质折射率的任何细微变化均会对表面等离子体波共振效应共振光谱的位置和形状产生影响,进而引起共振波长(反射光谱波谷对应的波长)、共振强度(反射光谱波谷对应的光强反射率)和半波宽度等光谱特征参量发生改变。不同测量环境所对

应的表面等离子体波共振效应光谱同时包含有三个方面的检测信息,因此综合分析这些参量将能够有效提高系统的检测精度和可靠性。由于在不同液体环境中所对应的表面等离子体波共振效果不同,从而导致纤芯中光波传输能量也随之发生改变。由此,提出并设计了一种基于共振光强检测的终端反射式光纤表面等离子体波共振效应传感器。

## 2 基本原理

光纤表面等离子体波共振传感器结构如图 1 所示。当纤芯中传播的宽带 p 偏振光信号到达表面等离子体波共振效应敏感部位时,由于金属本身的复介电性,将会部分渗透入金属内部形成隐失波。当某一波长入射光的水平方向波矢  $k_x$  与处于金层/液体分界面的表面等离子体波矢量  $k_{sp}$  相匹配时,自由电子吸收此波长光子的能量,导致反射光强在对应波长附近出现大幅能量衰减,形成特有的表面等离子体波共振效应共振波谷<sup>[5,6]</sup>。

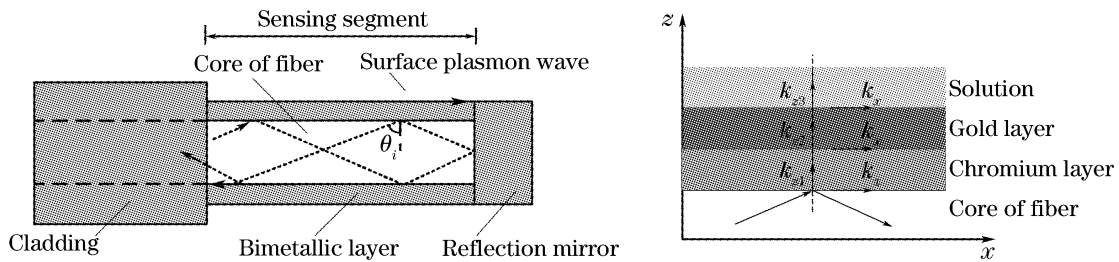


图 1 光纤表面等离子体波共振效应传感器探头结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical fiber SPR sensor probe

根据麦克斯韦方程和边界条件可推知,纤芯内部入射光波水平方向矢量  $k_x$  和金层表面等离子体波矢量  $k_{sp}$  分别为<sup>[7]</sup>

$$k_x = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_0(\lambda)} \sin \theta_i, \quad (1)$$

$$k_{sp} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\epsilon_2(\lambda)\epsilon_3(\lambda)}{\epsilon_2(\lambda) + \epsilon_3(\lambda)}}, \quad (2)$$

式中  $\theta_i$  为不同波长入射光线到达纤芯-金属层分界面的角度。 $\epsilon_0(\lambda)$ 、 $\epsilon_2(\lambda)$ 、 $\epsilon_3(\lambda)$  分别表示纤芯、金层和液体介质所对应的介电常量。对于单色光波而言,当纤芯、金属膜层和液体介质的介电常量等发生变化时,会对入射光水平方向矢量  $k_x$  和表面等离子体波矢量  $k_{sp}$  产生影响,这将引起两束波矢量间匹配程

度变化,进而导致表面等离子体波共振效应的强弱改变。因此,为评估传感器结构参量和环境因素改变对共振效果和趋势的影响,可定义耦合系数  $\eta$  为

$$\eta(\lambda) = \frac{|k_x|}{|k_{sp}|} = \sin \theta_i \sqrt{\frac{\epsilon_0(\lambda)[\epsilon_2(\lambda) + \epsilon_3(\lambda)]}{\epsilon_2(\lambda)\epsilon_3(\lambda)}}, \quad (3)$$

式中耦合系数  $\eta$  值越接近 1,则表示表面等离子体波共振效应共振效果越好。根据不同的测量环境要求选择合适的传感结构,就能够获得最佳耦合系数,提高系统检测效果。

图 1 中给出具有纤芯-铬层-金层-液体介质四层结构的表面等离子体波共振效应激励模型,单次表面等离子体波共振效应效应的光强反射率<sup>[8~10]</sup>可表示为

$$R_{pl} = \left| \frac{r_{01} + r_{12} \exp(i2k_{z1}d_1) + r_{23} \exp[i2(k_{z1}d_1 + k_{z2}d_2)] + r_{01}r_{12}r_{23} \exp(i2k_{z2}d_2)}{1 + r_{01}r_{12} \exp(i2k_{z1}d_1) + r_{12}r_{23} \exp(i2k_{z2}d_2) + r_{01}r_{23} \exp[i2(k_{z1}d_1 + k_{z2}d_2)]} \right|^2, \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} r_{01} = \frac{\varepsilon_0 k_{z1} - \varepsilon_1 k_{z0}}{\varepsilon_0 k_{z1} + \varepsilon_1 k_{z0}}, \\ r_{12} = \frac{\varepsilon_1 k_{z2} - \varepsilon_2 k_{z1}}{\varepsilon_1 k_{z2} + \varepsilon_2 k_{z1}}, \\ r_{23} = \frac{\varepsilon_2 k_{z3} - \varepsilon_3 k_{z2}}{\varepsilon_2 k_{z3} + \varepsilon_3 k_{z2}}, \end{cases} \quad (5)$$

$$k_{zi} = \sqrt{(2\pi/\lambda)^2 \varepsilon_i - k_x^2}, \quad (6)$$

式中  $k_{zi}$  表示介质  $i$  中垂直于界面的波矢矢量,  $i = 0, 1, 2, 3$  分别为纤芯、铬层、金层和液体介质;  $d_1, d_2$  分别表示铬层和金层的厚度; 根据多次反射理论, 可以得到 p 光在光纤中传播的光强总反射率为<sup>[11]</sup>

$$R_{p2} = R_{p1}^N =$$

$$[\theta_i, d_1, d_2, l, \varepsilon_0(\lambda), \varepsilon_1(\lambda), \varepsilon_2(\lambda), \varepsilon_3(\lambda)]^{N(\theta_i, l, r)}, \quad (7)$$

式中  $N = l/(r \tan \theta_i)$  为传感区域内近轴光线反射次数,  $\theta_i$  为反射角,  $l$  为传感段长度,  $r$  为纤芯直径。液体介质折射率在一定条件下与其介电常数存在平方关系, 即  $\varepsilon_i = n_i^2$ 。因此由(7)式可知, 当传感探头结构固定时, 表面等离子体波共振效应共振光谱的位置和形状不仅对液体折射率  $n_3$  的变化非常敏感, 而且它们之间存在确定的对应关系。

环境因素改变引起的共振效果不同, 也会使得在纤芯中以不同反射角度传播的 p 光能量发生变化, 其传输功率可表示为<sup>[12]</sup>

$$P_p = \int_{\theta_{cr}}^{\pi/2} R_{p2} \frac{\varepsilon_0 \sin \theta_i \cos \theta_i}{(1 - \varepsilon_0 \cos^2 \theta_i)^2} d\theta_i, \quad (8)$$

式中  $\theta_{cr}$  为全反射临界角。

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 基于表面等离子体波共振效应共振光谱的测量

实验选用特种多模石英光纤作为表面等离子体波共振效应的激励基体, 其数值孔径为 0.3, 纤芯直径为 600  $\mu\text{m}$ , 以保证更多模式和强度的光波信号能够参与激发表面等离子体波共振。在纤芯和金属膜之间增覆有 5 nm 铬层, 主要是为了增强金属膜与纤芯之间吸附力, 起到延长探头使用寿命的作用, 并不会影响到其传感性能。图 2 给出了基于共振光谱特性检测的系统框图。光源为 HL2000 型宽带光源, 波长范围为 350~2000 nm, 功率为 20 W。采用 USB2000 微型光谱仪(美国 Ocean Optic 公司)作为检测器件。

光源发出的宽带光经 Y 型耦合器进入传感光纤, 光波信号在到达探头部分完成传感功能后将沿来路返回, 并再次通过 Y 型耦合器传输到光谱仪

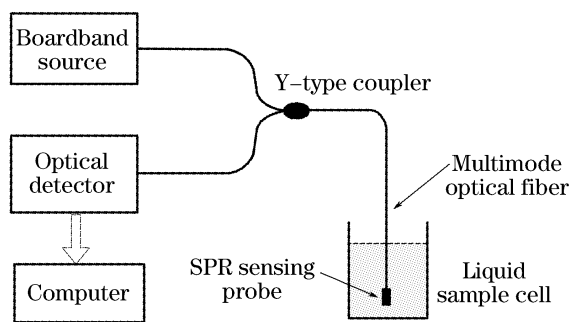


图 2 终端反射式光纤表面等离子体波共振效应传感系统框图

Fig. 2 Schematic diagram of reflective optical fiber SPR sensor system

中。在测量时, 首先将光纤探头置于空气中的反射光谱信号作为基准信号保存, 再将其置于装有待测液体的器皿中, 得到反射回的表面等离子体波共振效应光谱信号。通过将该信号与基准信号相比较, 就可获得反映不同共振效果的相对光谱检测。

实验中保持环境温度稳定, 分别按照不同比例配置 16 种类型的溶液, 再使用阿贝折光仪对它们的折射率进行测量。室温为 20  $^{\circ}\text{C}$  时, 测得这些液体介质对应的表面等离子体波共振效应光谱曲线族, 如图 3 所示。从图中可以看到, 当液体折射率在 1.3325~1.4265 范围变化时, 反射光谱均呈现出典型的表面等离子体波共振效应共振波谷。各共振光谱的位置也随着其对应折射率逐渐增大而出现红移。图中显示苯(折射率为 1.5005)对应的反射光谱曲线并未出现共振波谷, 这主要是因为苯的折射率大于纤芯折射率, 使得入射光波波矢不能和金属表面等离子体波矢量匹配。

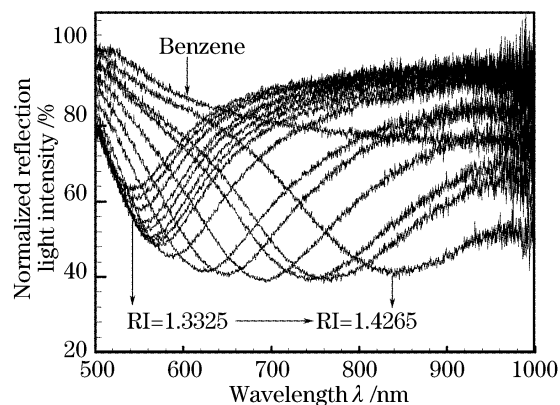


图 3 不同液体介质对应的相对反射光谱曲线  
Fig. 3 Relative reflection spectra for different liquid media

图 4 中实线为根据(7)式仿真计算得到的共振波长随液体折射率变化的理论曲线, 所作点标记表示原始数据中共振波长  $\lambda_{spr}$  和液体折射率  $n_3$  的对应

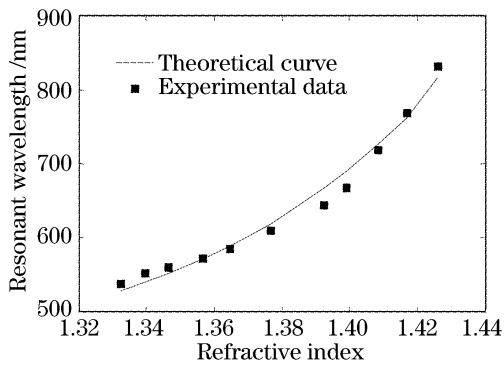


图 4 共振波长与液体折射率的关系曲线

Fig. 4 Relationship between resonance wavelength and liquid refractive index

关系。在模拟计算中,选取光纤传感探头长度为 15 mm,纤芯芯径和折射率分别为 600  $\mu\text{m}$  和 1.468RIU,金属膜层厚度为 50 nm。从图中可以发现,实验结果与理论计算的情况基本符合,两者间出现的偏差主要是由于理论计算参量和实际加工的表面等离子体波共振效应光纤探头参量间存在少许偏差的原因造成,但这并不影响利用理论模型来研究表面等离子体波共振效应共振光谱随液体折射率变化的特性。由图可知,共振波长随折射率增大呈指数增长。当液体折射率处于 1.3325~1.3768 之间变化时,对应的共振波长依次从 537.99 nm 逐渐增至 588.96 nm;而当继续增大时,共振波长变化明显加快,并迅速增至 831.46 nm。根据共振波长偏移量约为 243 nm,当光谱仪波长检测精度达到  $0.48\text{ nm}$  时,可推算出对应理论折射率分辨力达到  $10^{-5}$  数量级。通过在相同条件下测量所得的多组实验数据,进行拟合得到标定方程。通过将共振波长的测量值代入该方程,即可转换为折射率的测量值,最后将该值与标准值比较。当液体折射率处于 1.3768~1.4265 之间时,对应的折射率测量精度约为  $\pm 0.0009\text{ RIU}$ 。

图 5 中所作点标记为原始数据中共振强度  $R_{\text{spr}}$  随液体折射率  $n_3$  变化的关系,实线为依据最小二乘估计原理对所测实验数据拟合得到的曲线。由图中可知,当  $n_3$  从 1.3325 增至 1.3925 时,对应共振强度从 62.501% 急剧下降至 41.177%,表面等离子体波共振效应光谱整体幅度下降,可推知此阶段的理论折射率分辨力达到  $10^{-5}$  数量级;而随着  $n_3$  继续增大时,共振强度下降趋势明显减缓。整个过程,液体折射率和共振强度之间呈单调递减的非线性关系。由实验数据得到的标定曲线为

$$n_3 = 1.70274 - 0.01058R_{\text{spr}} + 7.3289 \times 10^{-5} R_{\text{spr}}^2,$$

当折射率处于 1.3325~1.3925 之间时,对应的折射率测量精度约为  $\pm 0.0007\text{ RIU}$ 。

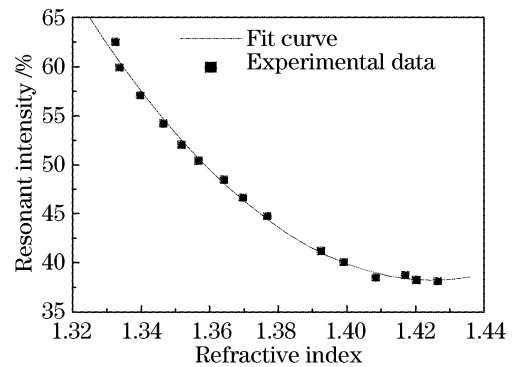


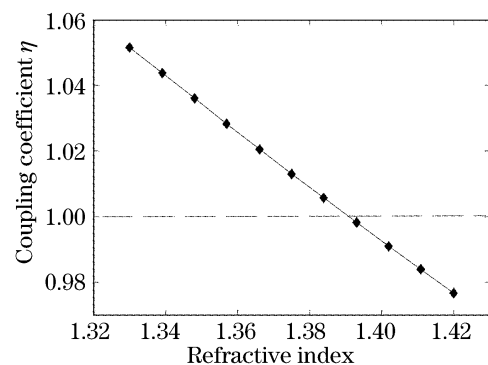
图 5 共振强度与液体折射率的关系曲线

Fig. 5 Relationship between resonance intensity and liquid refractive index

综合上述分析,共振强度和共振波长的折射率分辨力会随着液体折射率变化而发生改变。当液体折射率  $n_3$  在 1.3325~1.3925 之间变化时,共振强度  $R_{\text{spr}}$  具有较高灵敏度,可选作检测参量;而在  $n_3$  处于 1.3768~1.4265 之间时,可将共振波长  $\lambda_{\text{spr}}$  作为检测参量。选择更高分辨力的光谱分析仪还将进一步提高此类传感器的测量精度。

由于多模光纤的芯径比传输光信号波长大得多,光信号在其中的传播可以用几何光学模型来描述。当宽带光耦合进入光纤后,将会发生色散形成若干以不同全反射角  $\theta_i$  传播的单色光波,它们分别相应于一定的能量传播模式。这些不同波段光信号与金属表面等离子体波之间的匹配程度将会随环境因素发生变化,此过程可以通过耦合系数  $\eta$  来表征。对于某一特定波长而言, $\eta$  值越接近 1,则说明入射光波水平方向矢量与金属表面等离子体波矢量之间的匹配程度越高,此光波的能量衰减越大,对应波长的反射光强越小。

图 6 给出了 700 nm 波长光信号对应的耦合系

图 6 耦合系数  $\eta$  与液体折射率的关系曲线Fig. 6 Relationship between coupling coefficient  $\eta$  and liquid refractive index, at  $\lambda = 700\text{ nm}$

数随液体折射率变化的情况。图中显示当液体折射率  $n_3$  在 1.3325~1.3925 之间变化时,耦合系数逐渐减小并趋近于 1,这将导致对应波长的反射光能量不断减小;而当  $n_3$  继续增大时, $\eta$  值继续减小,这表明此刻共振效果正不断减弱,对应波长的反射光能量应不断增大。以上分析也与图 3 中所显示的结果基本吻合。

#### 4.2 基于表面等离子体波共振效应共振光强的测量

图 3 中显示液体折射率增大不仅使得共振光谱波谷不断加深,而且对应的半波宽度也随之变宽。这说明此过程的共振效果不断增强,纤芯中传输的光信号能量衰减逐渐增大。图 7 给出了绝对光谱检测模式下得到的曲线族。从中可以看到,反射光谱整体幅度呈现下降趋势。因此,通过检测反射光强度变化情况,也应能够实现对液体折射率的测量。

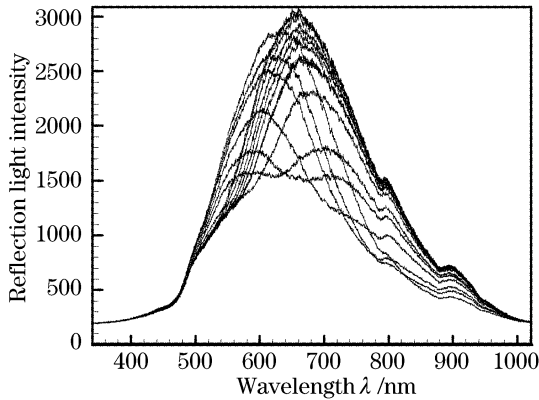


图 7 不同液体介质对应的绝对反射光谱

Fig. 7 Absolute reflection spectra for different liquid media

通过改进图 2 所示测试系统,将反射回来的传感光信号改由光功率计 PD(灵敏度为 0.001 nW)直接接收,即可构成基于光强检测的终端反射式光纤表面等离子体波共振效应传感系统。实验中,将光纤探头置于空气中所得到的反射光强度作为基准信号,再把其置于不同待测液体中所得到的反射光强度作为传感信号。将传感信号和基准信号的归一化比值  $P$  作为液体折射率变化的度量值,这样可以减少由于光源功率漂移、光纤微弯损耗等引入的干扰。

测量获得的度量值  $P$  随液体折射率变化的曲线如图 8 所示。图中点标记表示原始数据,直线为拟合曲线。可以发现随着液体折射率  $n_3$  从 1.3325 开始依次增大到 1.3991,度量值  $P$  也从 0.855 逐渐下降至 0.625,两者之间具有良好的线性关系。可得如下拟合方程为: $P=5.6-3.55n_3$ ,两者的线性相关系数达到 0.9983,拟合标准偏差为 0.004。从

(8)式也可知,液体折射率  $n_3$  的变化会引起不同波长  $p$  光的光强反射率改变,进而导致在光纤中传播的  $p$  光能量发生改变。这种基于反射光强检测的方法实际上是对各波长的光信号因为共振效应而发生能量衰减程度的综合考察。

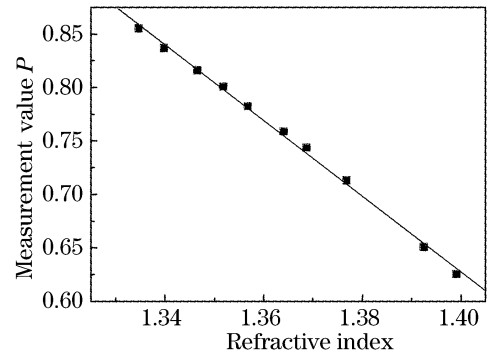


图 8 度量值  $P$  与液体折射率的关系曲线

Fig. 8 Relationship between measurement value  $P$  and liquid refractive index

图 9 给出了传感器在甲醇、丙酮和正庚烷三种类型液体中的实时输出特性。图中显示传感器在不同测量环境中具有良好的重复性和稳定性。在不同液体溶液之间的切换时,存在略微迟滞现象,主要是因为光纤探头外表面覆有少许其它液体所致。通过采用稳定性更高的光源和具有差分结构的光路设计,将能够进一步提高检测精度和系统稳定性。

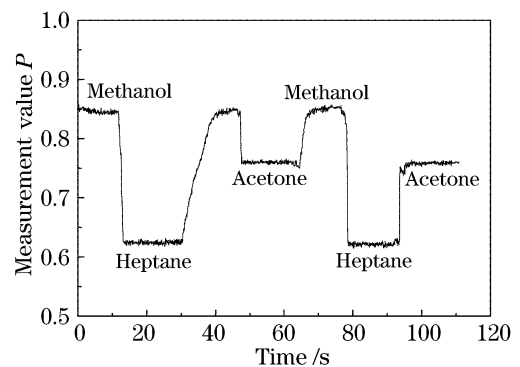


图 9 度量值  $P$  随折射率不同而变化的实时检测曲线

Fig. 9 Real-time testing curve of measurement value variety with change of liquid refractive index

应当指出的是表面等离子体波共振效应还会受到传感器结构参量变化的影响。如蒸发条件不稳定会引起所镀膜层的非均匀性,探头使用环境和保存条件的不同也会导致内外过渡层的出现。这些问题都会对传感器输出的同一性和稳定性产生负面影响。为此,可以考虑采取以下措施:1)进一步优化镀膜工艺和夹具结构,保证探头表面膜层的均匀性和强吸附性;2)根据测量环境的多样性,在探头表面增覆保护膜,这样做不仅可以保护金属膜层免受腐蚀

和氧化,还能起到增敏作用。

## 5 结 论

理论分析和实验结果表明,表面等离子体波共振效应共振光谱特征(如共振波长、共振强度)的折射率灵敏度会随着液体性质变化而发生改变。一次测量获得的光谱信号实际包含有共振波长和共振强度两个检测信息。根据折射率测量范围不同,可分别选择其中之一作为主要检测参量,另一个作为辅助检测量,并对两者加以综合分析。

基于共振光强检测的终端反射式光纤表面等离子体波共振效应测试系统具有良好的传感性能,归一化度量值与折射率之间呈近似线性关系。由于该系统无须复杂的光谱分析和信号解调过程,因而在生物化工、环境监测等对实时性要求较高的领域具有相当的实用价值。

## 参 考 文 献

- 1 Q. Esteban, R. Alonso, M. C. Navarrete *et al.*. Surface plasmon excitation in fiber optic sensors; a novel theoretical approach[J]. *J. Lightwave Technology*, 2002, **20**(3): 448~452
- 2 Huang Huijie, Zhai Junhui, Zhao Yongkai *et al.*. Multi-probe fiber-optic evanescent biosensor and its characterization [J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(6): 718~722 (in Chinese)  
黄惠杰,翟俊辉,赵永凯等. 多探头光纤倏逝波生物传感器及其性能研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(6): 718~722
- 3 G. J. Ashwell, M. P. S. Roberts. Highly selective surface plasmon resonance sensor for NO<sub>2</sub> [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(22): 2089~2090
- 4 Cao Zhenxin, Liang Dakai, Guo Mingjiang. Experimental study on relationship between film thickness and wavelength based on optical fiber SPR sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 125~128 (in Chinese)  
曹振新,梁大开,郭明江. 光纤表面等离子体波传感器中膜厚与共振波长关系的实验研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(1): 125~128
- 5 J. Homola, H. B. Lu, S. S. Yee. Dual-channel surface plasmon resonance sensor with spectral discrimination of sensing channels using dielectric overlayer[J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(13): 1105~1106
- 6 Cao Zhenxin, Wu Lenan, Liang Dakai. Gold and silver film optical fiber SPR sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(10): 1169~1171 (in Chinese)  
曹振新,吴乐南,梁大开. 金膜与银膜光纤 SPR 传感器[J]. *光子学报*, 2004, **33**(10): 1169~1171
- 7 Wu Yingcai, Yuan Yifang. Research of a new principle on seawater salinity measurement based on refractive index change[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 199~202 (in Chinese)  
吴英才,袁一方. 基于折射率变化的一种新型盐度测量原理研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 199~202
- 8 S. Y. Wu, H. P. Ho. Sensitivity improvement of the surface resonance optical sensor gold-silver by using a transducing layer [C]. *Proc. IEEE Hong Kong Electron Devices Meeting*, 2002. 63~38
- 9 S. Patskovsky, A. V. Kabashin, M. Meunier. Surface plasmon resonance sensor with silicon-based prism coupling [C]. *Proc. SPIE*, 2003, **4958**: 144~148
- 10 Gu Zhengtian, Feng Shimeng, Liang Peihui *et al.*. Sol-gel film sensor based on surface plasmon resonance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 83~87 (in Chinese)  
顾铮先,冯仕猛,梁培辉等. 表面等离子体激元共振溶胶-凝胶薄膜传感器[J]. *光学学报*, 2001, **21**(1): 84~87
- 11 Matthias Niggemann, Andreas Katekamp, Maria Pellmann *et al.*. Intrinsic optical fiber gas sensor based on surface plasmon resonance spectroscope [C]. *Proc. SPIE*, 1995, **2508**: 303~307
- 12 B. D. Gupta, Anuj K. Sharma. Sensitivity evaluation of a multi-layered surface plasmon resonance-based fiber optic sensor; a theoretical study [J]. *Sensors and Actuators B*, 2005, **107**(1): 40~46