

# 基于调频光谱原理的在线式表面等离子体 共振光纤传感器

付丽辉<sup>1,2</sup> 尹文庆<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 南京农业大学工学院 江苏省智能化农业装备重点实验室, 江苏 南京 210031)

<sup>2</sup> 淮阴工学院电子与电气工程学院, 江苏 淮安 223003

**摘要** 基于调频光谱原理,提出一种可用于在线测量的表面等离子体共振光纤传感器结构。理论分析、数值仿真和实测结果表明,基于表面等离子体共振效应的光纤传感头,相当于具有中心对称吸收谱的吸收介质,且吸收峰中心波长随待测折射率的增加而红移;基于此吸收谱函数,以微分光谱替代直接光谱测量,可有效克服吸收峰处一阶微分谱为零对测量灵敏度的消极影响;参考光路及闭环负反馈结构的引入,可有效抑制源于光源和光路中光强波动等的影响。以镀有50 nm厚金薄膜的多模石英光纤组成传感头,搭建相应的闭环系统,对折射率为1.33000~1.43000范围内不同液体进行折射率测量,并与阿贝折射率仪、光纤光谱仪及理论仿真结果进行比较。结果表明,在1.33200~1.37580 RIU(RIU表示单位折射率)范围内,测量精度可达0.00016 RIU,与波长分辨率为0.4 nm的光谱仪测量结果精度相当;在1.37500~1.42640 RIU范围内,测量精度可达0.00071 RIU,优于0.00090 RIU的光谱仪测量结果,较好地验证了该方案用于在线测量的可行性和检测结果的可靠性。

**关键词** 测量;折射率;表面等离子共振;调频光谱;闭环

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0612004

## Investigation on On-Line Optical Fiber Surface Plasma Resonance Sensors Based on Frequency Modulation Spectroscopy

Fu Lihui<sup>1,2</sup> Yin Wenqing<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Industry School, Jiangsu Key Laboratory for Intelligent Agricultural Equipment,  
Nanjing Agriculture University, Nanjing, Jiangsu 210031, China

<sup>2</sup> College of Electronic and Electric Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huaian, Jiangsu 223003, China

**Abstract** An optimal structure of on-line optical fiber surface plasma resonance (SPR) sensors is proposed based on principle of frequency modulation. On the basis of theoretical analysis, numerical simulation and measured results, the optical fiber SPR sensing probes can be regarded as an absorbing medium with a centro symmetric absorption spectrum function, whose central wavelength at absorbing peak has a red-shift as increasing the refractive index of measured medium. The features of this centro symmetric absorption spectrum function make it possible to overcome the negative effect on measurement sensitivity originating from zero-value point of differential spectra at absorbing peak in directly measuring spectral method by the application of frequency modulation principle. And the adverse effects, rising from the intensity fluctuation of light source and in light propagating paths, can be suppressed by introduction of reference light path and negative feedback closed-loop system structure. The probes, which are made

收稿日期: 2013-01-01; 收到修改稿日期: 2013-03-12

基金项目: 国家大学生创新创业训练计划项目(201211049009)、江苏省普通高校研究生科研创新计划(CXLX12\_0277)、江苏省教育厅自然科学基金项目(12KJD510003)和淮安市科技支撑计划农业项目(SN1161)资助课题。

作者简介: 付丽辉(1975—),女,博士研究生,副教授,主要从事光学传感与智能检测等方面的研究。

E-mail: flh3650326@163.com

导师简介: 尹文庆(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机器人、智能检测与控制等方面的研究。

E-mail: Yingwq@nau.edu.cn(通信联系人)

up of 15-mm long silica multi-mode optical fiber plated with 50-nm thick gold film, are applied in the proposed model, the corresponding experiments are arranged to measuring different liquid mediums with the index range of 1.33000~1.43000 refractive index unit (RIU). Then, discussion and analysis are carried out based on the data, which are got from the proposed method and other methods, such as Abbe refractometer, optical fiber spectrometer and numerical emulation. The results indicate that the precision of the proposed model is 0.00016 RIU at the range of 1.33200~1.37580 RIU, which is the same as measured results by applying optical fiber spectrometer with 0.4 nm wavelength resolution, and the precision is 0.000710 RIU at the range which is better than measured results by using optical fiber spectrometer with 0.0009 RIU. Therefore, the feasibility and reliability of the proposed method and the application for on-line measurement can be confirmed.

**Key words** measurement; refractive index; surface plasmon resonance; frequency-modulation spectroscopy; loop-closed

**OCIS codes** 130.6010; 050.1950; 280.4788; 130.3120

## 1 引 言

在可选择的表面等离子共振 (SPR) 传感方案中, 波长调制型 SPR 光纤传感器, 具有体积小、易集成、测量精度高和灵敏度高特点而成为优先选择方案<sup>[1~9]</sup>。SPR 光纤传感器集光纤传感与 SPR 效应于一体; 与波分复用技术结合, 可实现大空间范围内分布式测量; 视单传感单元为“味蕾”, 结合人工智能技术, 则可组成“光子舌”, 实现对混合液体介质体系组分测定, 是光学传感领域多技术交叉与融合的典型<sup>[9~15]</sup>。

目前, 波长调制型 SPR 光纤传感器采用单光路直接光谱法系统设计。信号采集与处理模式为: 在宽带光源作用下, 基于光谱仪测量 SPR 共振吸收峰对环境折射率 (RI) 变化的响应, 反映待测介质折射率。这种信号采集与处理模式对光源波动、光路及光、电模块间耦合等因素引致的噪声, 缺乏相应抑制机制; 且因吸收峰处一阶微分值为零, 吸收峰的确定精度与灵敏度均受制约。已有报道的实验室中实测精度, 远不及  $10^{-9}$  RIU (RIU 表示单位折射率) 数量级的 SPR 效应理论预期测量精度<sup>[16,17]</sup>。而且依赖专门的光谱测量设备, 不能满足现场在线测量需要。

本质上, 波长型 SPR 光纤传感器, 其原理为通过待测介质折射率对传感头共振吸收波长的调制, 以共振波长变化反映待测介质折射率。该传感器相当于一个测定传感头共振波长变化的光谱仪。据此, 基于调频 (FM) 光谱原理, 可实现 SPR 光纤传感器性能优化; 无需专门的光谱测量设备, 在结构上可较好地满足在线测量需要。

本文在对光纤 SPR 传感头共振吸收效应分析的基础上, 提出一种可用于在线测量的数字调制闭环光纤 SPR 传感器结构, 结合仿真与实验研究, 进行了其可行性与有效性的研究。

## 2 原 理

### 2.1 SPR 光纤传感头的共振吸收特性

SPR 效应共振现象激励光场在金属/介质界面处, 与表面等离子波 (SPW) 间通过“量子隧道效应”, 实现光子能量向 SPW 共振转移现象, 即表面等离子共振 (SPR) 吸收。SPR 效应的实现, 需要光场与 SPW 间满足能量、动量匹配。

图 1 中曲线 a 表示真空中光的色散特性, b, c 光纤中不同入射角情形下光色散特性, d 表示 SPW 波的色散特性。在自由空间中, 光场波矢量始终大于 SPW 波矢量, 不能实现 SPR 效应。仅当基于一定机制, 如光波导中的倏逝波, 使得光场具有图 1 中曲线 b, c 所示的色散特性时, 可在特定频率  $\omega_1$  或  $\omega_2$  处使光场与 SPW 间波矢量匹配, 实现 SPR 效应。此时, 相应波长的导模能量因 SPR 效应而显著衰减, 类似于被介质共振吸收。

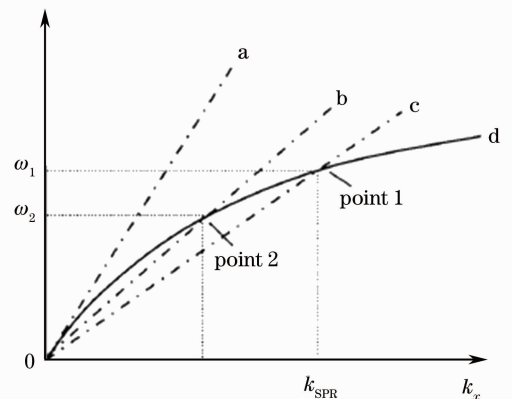


图 1 金属薄膜表面等离子共振原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SPR effects on the metal films

据此, 对图 2 所示透射式 SPR 光纤传感头, 当环境介质折射率满足一定条件时, 特定波长倏逝波的波矢量与金属表面 SPW 波矢量匹配, 形成 SPR 效应。在纤芯与外部介质间形成量子隧道, 纤芯中

光子“逃逸”至外部介质,实现能量转移。因而使纤芯内对应波长的导波光强最弱。该波长即为光纤 SPR 传感头中心吸收波长。给定纤芯、金属薄膜几

何结构折射率后,SPR 吸收中心波长由待测介质折射率唯一确定<sup>[2,8,9,16~19]</sup>。这是 SPR 光纤传感器的物理基础。

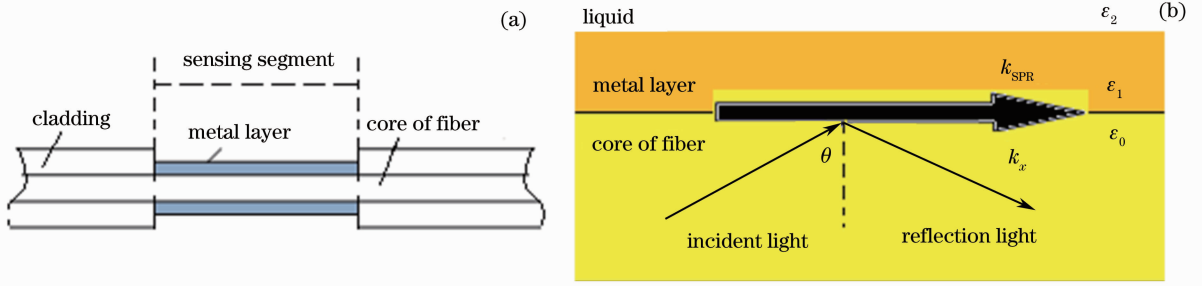


图 2 透射式 SPR 光纤传感头原理示意图。(a)结构示意图；(b) SPR 原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of SPR sensing probes. (a) Structure; (b) SPR schematic diagram

何结构折射率后,SPR 吸收中心波长由待测介质折射率唯一确定<sup>[2,8,9,16~19]</sup>。这是 SPR 光纤传感器的物理基础。

SPR 发生于光场与 SPW 间动量匹配时,即

$$k_x = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_0(\lambda)} \sin \theta = k_{\text{SPR}} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_1(\lambda)\epsilon_2(\lambda)}{\epsilon_1(\lambda) + \epsilon_2(\lambda)}}, \quad (1)$$

式中  $c$  为真空光速, $\omega$  为光角频率, $\lambda$  为光波长, $\theta$  为纤芯 / 金属薄膜界面光线入射角, $\epsilon_i(\lambda)$  ( $i = 0, 1, 2$ ) 分别为纤芯、金属薄膜和环境介质介电常数, $k_x$ 、 $k_{\text{SPR}}$  分别为倏逝场波矢量  $x$  方向分量和 SPW 的波矢量。

设传感区长度为  $L$ ,纤芯半径为  $r$ ,金属薄膜厚度为  $d$ ,根据多次反射理论、转移矩阵法和菲涅耳公式<sup>[19]</sup>,考虑到 p 型、s 型偏振作用不同,纤芯 / 金属界面反射率  $R$  可表示为

$$R = \left| \frac{r_{01} + r_{12} \exp(j2k_{z1}d)}{1 + r_{01}r_{12} \exp(j2k_{z1}d)} \right|^2, \quad (2)$$

式中  $j$  为虚数符号, $k_{z1}$  为界面波矢法向分量,下标  $i = 0, 1, 2$  分别代表纤芯、金属薄膜和环境介质; $r_{01}$ 、

$r_{12}$  分别为纤芯 / 金属和金属 / 环境介质界面上反射系数,分别为

$$k_{zi} = \sqrt{\frac{2\pi}{\lambda^2 \epsilon_i(\lambda)} - k_x^2}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} r_{01} = \frac{\epsilon_0(\lambda)k_{z1} - \epsilon_1(\lambda)k_{z0}}{\epsilon_0(\lambda)k_{z1} + \epsilon_1(\lambda)k_{z0}} \\ r_{12} = \frac{\epsilon_1(\lambda)k_{z2} - \epsilon_2(\lambda)k_{z1}}{\epsilon_1(\lambda)k_{z2} + \epsilon_2(\lambda)k_{z1}} \end{cases} \quad (4)$$

由(2)~(4)式可知,经  $N = L / (r \tan \theta)$  次反射后,传感区总归一化透射光强为

$$R_S = R^N. \quad (5)$$

## 2.2 调频光谱原理

设  $f$ 、 $f'_0$  分别为探测光和介质吸收峰中心频率,对具有中心对称吸收谱函数  $h(f - f'_0)$  的介质,采用扫频法监测光强,直接光谱测量确定其吸收峰。取  $f = f'_0 + \Delta f$ ,相应地, $h(f - f'_0) = h(\Delta f) = h'(0)\Delta f$ 。当探测光频率逼近吸收峰时,与谱函数取值成正比的透射光强随之趋于最小值。单位频率变化对应的透射光强

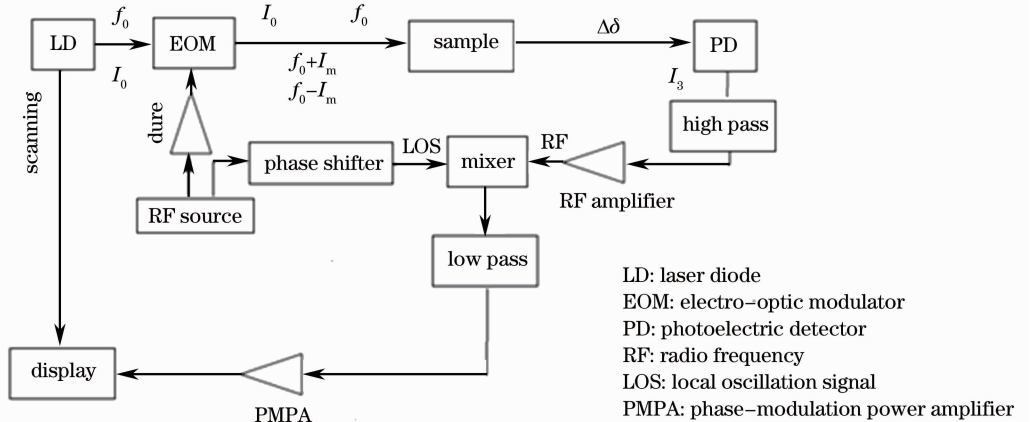


图 3 基本调频光谱测量示意图

Fig. 3 Schematic diagram of an essential frequency-modulation spectroscopy measurement

减小, 正比于邻近吸收峰的一阶微分吸收谱值 $h'(0)$ 。理论上愈接近吸收峰, $h'(0)$ 的取值愈小, 据之确定吸收峰时, 其灵敏度与精度愈低。

根据 FM 光谱原理, 当吸收谱半峰全宽 (FWHM) 与调制频率可比拟时, 采用图 3 所示结构, 以 FM 信号为探测光, 将一阶边带处微分谱取代吸收峰处值, 可实现理论上仅受限于光电探测器量

子噪声的极限灵敏度<sup>[20~22]</sup>。

设可调谐激光器 (LD) 输出中心频率为  $f_0$  的可调谐单色光, 其光场可表示为

$$E_1(t) = E_0 \exp(i2\pi f_0 t + \varphi_0), \quad (6)$$

经电光调制器 (EOM) 进行射频 (RF) 窄带调频后, 有

$$E_2(t) = E_0 \exp(i2\pi f_0 t + M \sin 2\pi f_m t + \varphi_0) = E_0 \sum_{j=-\infty}^{j=\infty} J_j(M) \exp[i2\pi(f_0 + f_m)t + \varphi_0], \quad (7)$$

式中  $E_0$  为电场振幅;  $\varphi_0$  为初相位;  $M$  为调制系数;  $f_m$  为调制频率;  $J_j$  为第  $j$  阶贝塞尔函数。

对理想窄带调频, 已调信号光强  $I_2(t) = \frac{cE_0^2}{8\pi} = I_0$ , 即为一常数, 仅含基频和一阶边带信号。据此, (7) 式可改写为

$$E_2(t) = E_0 \left\{ \frac{M}{2} \exp[i2\pi(f_0 + f_m)t + \varphi_0] + \exp(i2\pi f_0 t + \varphi_0) + \frac{M}{2} \exp[i2\pi(f_0 - f_m)t + \varphi_0] \right\}. \quad (8)$$

设样品介质色散吸收特性为

$$T_j = T_{\text{less}} \exp(-\delta - i\phi_0), \quad (9)$$

式中  $T_{\text{less}}$  代表无色散,  $\delta$  与  $\phi_0$  分别代表光强与相位的色散吸收特性, 下标  $j$  表示探测光边带中频率阶次, 与贝塞尔函数阶次相对应。取  $j=0, 1, -1$ , 分别对应基频和上、下边带。

经样品吸收后, 光场为

$$E_3(t) = E_0 \left\{ T_1 \frac{M}{2} \exp[i2\pi(f_0 + f_m)t + \varphi_0] + T_0 \exp(i2\pi f_0 t + \varphi_0) + T_{-1} \frac{M}{2} \exp[i2\pi(f_0 - f_m)t + \varphi_0] \right\}. \quad (10)$$

作用于光电探测器 (PD), 将输出大小正比于下式光电流<sup>[18~20, 23]</sup>:

$$I_3(t) = I_0 \exp(-2\delta_0) (I_{\text{less}} - \Delta\delta \cdot M \cos 2\pi f_m t + \Delta^2\phi M \sin 2\pi f_m t), \quad (11)$$

式中  $\Delta\delta = \delta_1 - \delta_{-1}$ , 为吸收后两边带处光强差;  $\Delta^2\phi$  为吸收后两边带信号相对于基频信号相位延迟之差;  $\Delta\delta$  和  $\Delta\phi$  分别代表介质吸收的光强色散和相位色散特性;  $I_{\text{less}}$  代表无色散吸收光强直流分量。

$I_3(t)$  经高通滤波、射频放大, 再与本地振荡信号 (LOS) 经混频器作外差检测后, 输出包含吸收特征信息的直流分量为

$$I'_s(t) = I_0 \exp(-2\delta_0) \times (\Delta\delta \cdot M). \quad (12)$$

根据介质吸收谱, 有

$$\Delta\delta = \delta_1 - \delta_{-1} \propto [h(f_0 + f_m - f'_0) - h(f_0 - f_m - f'_0)]. \quad (13)$$

设  $\Delta f = f_0 - f'_0$ , 根据连续微分定义, 有

$$\Delta\delta = \delta_1 - \delta_{-1} \propto [h(f_0 + f_m - f'_0) - h(f_0 - f_m - f'_0)] = h(f_m + \Delta f) - h(-f_m + \Delta f) = [h(f_m) + h'(f_m)\Delta f] - [h(-f_m) + h'(-f_m)\Delta f], \quad (14)$$

式中  $h(f_m)$ 、 $h(-f_m)$  为上、下边带处吸收谱值,  $h'(f_m)$ 、 $h'(-f_m)$  分别为上、下边带处微分吸收谱。基于对称性, 有

$$\Delta\delta = \delta_1 - \delta_{-1} \propto h'(f_m)\Delta f - h'(-f_m)\Delta f = 2 \cdot h'(f_m)\Delta f. \quad (15)$$

结合 (12)、(15) 式, 有

$$I'_s(t) = I_0 \exp(-2\delta_0) M [2h'(f_m)\Delta f]. \quad (16)$$

据此, 当探测光频率逼近吸收峰时,  $h'(0)\Delta f$  被

$h'(f_m)\Delta f$  所替代, 单位频率致透射或吸收光强变化正比于固定值  $h'(f_m)$ 。该测量为 FM 光谱测量, 理论上会有更高的测量灵敏度。图 4 为 FM 光谱

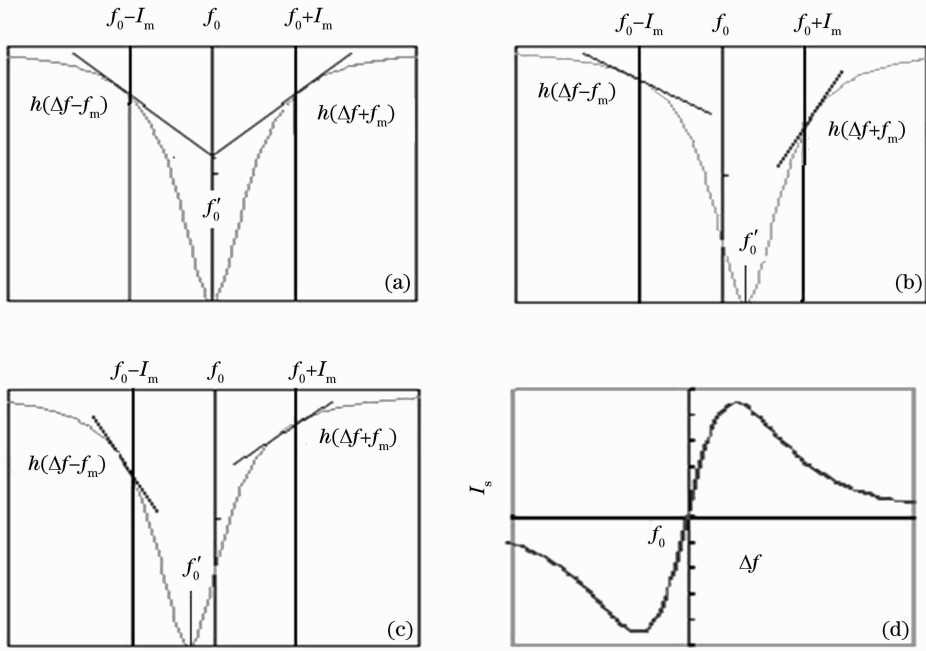


图4 调频光谱测量原理示意图。(a)  $\Delta f=0$ ; (b)  $\Delta f<0$ ; (c)  $\Delta f>0$ ; (d)  $I_s$  versus  $\Delta f$

Fig. 4 Schematic diagrams of principle of FM spectroscopy. (a)  $\Delta f=0$ ; (b)  $\Delta f<0$ ; (c)  $\Delta f>0$ ; (d)  $I_s$  versus  $\Delta f$

测量结果示意图。

相对于(16)式所示理想调频结果,实际的窄带调频存有残余振幅调制(RAM)。此时,(12)式应修正为<sup>[21,23]</sup>

$$I'(t) = I'_s(t) + \exp(-2\delta_0)B(t), \quad (17)$$

式中  $I'_s(t)$  为(12)式表示的理想窄带调频情形对应光强;  $B(t) = I_0 2\gamma \sin(2\pi f_m t + \Psi)$  为 RAM 成分影响;  $\gamma$  为 RAM 的等效调制系数,代表由 RAM 引致的、与调制频率一致的、与共振吸收无关的光强波动。该波动与混频器中本振信号频率相同,外差检测技术亦无法消除,被视为介质吸收所致,反映在(12)式输出中。这需利用如图5所示原理结构,引入参考光路,构成双光束调频光谱测量予以克服<sup>[21,23]</sup>。采用双频率调制,EOM以重复频率为  $\omega_{\text{chop}}$  脉冲光形式、分两束输出窄带调频光。分别记为经介质吸收的探测光  $I_s$  和参考光  $I_r$ ,原始光强分别为

$$I_s(t) = P_s [1 - \cos \omega_{\text{chop}} t], \quad (18)$$

$$I_r(t) = P_r [1 + \cos \omega_{\text{chop}} t]. \quad (19)$$

两光路对称设计,则当  $P_r = P_s \exp(-2\delta_0)$  时,两束光经 PD 后输出的光电流为

$$I_{\text{tot}}(t) = P_r [1 + 2B(t)] + P_s I(t) (1 + \cos \omega_{\text{chop}} t). \quad (20)$$

式中第一项为 RAM 的影响;第二项为理想调频结果,受脉冲重复频率调制。经混频、滤波和锁相放大

器(LIA)放大后,可获幅值由(16)式决定、频率为  $\omega_{\text{chop}}$  的方波信号<sup>[20,21,23]</sup>。

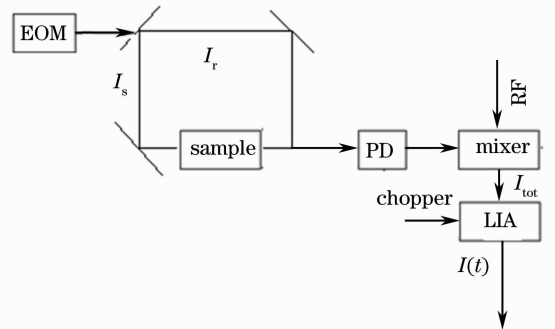


图5 双光束调频光谱测量系统框图

Fig. 5 Schematic diagram of two-beam frequency-modulation spectroscopy

### 2.3 数字调制闭环光纤 SPR 传感器结构设计

基于上述原理分析,借鉴光纤陀螺、光纤光电互感器等高精度传感系统信号检测方法,设计如图6所示的数字调制闭环控制结构光纤 SPR 传感器<sup>[20~23]</sup>,ADC 和 DAC 分别表示模数转换器和数模转换器。其原理与信号处理过程为:以可调激光器为单色光源,输出光经 EOM 窄带调频后,由 Y 型耦合器分为等相位差、等光强两束光,进入两结构对称的光纤光路。一路为含有 SPR 传感头的探测光纤,另一路为参考光纤。经介质吸收后,两光纤再经另一 Y 型耦合器“合二为一”,相互干涉后作用于 PD。



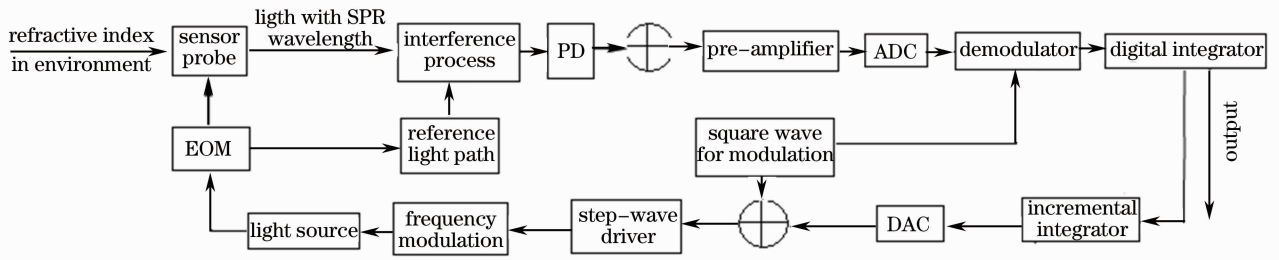


图 6 闭环 SPR 光纤传感器原理结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of loop-closed SPR fiber optic sensors

如 2.2 节中分析,当探测光与共振吸收峰间存在频率差时,基于 SPR 效应输出一幅值正比于该频率偏差方波光电流信号;该信号经增量积分器、模数(D/A)转换后,作为负反馈控制信号作用于光源,对光源调谐使其输出频率向共振峰逼近,直至二者一致。此时,方波光电流幅值为零,负反馈结构将使光源输出锁定于共振吸收峰。外部待测折射率变化反映共振峰改变。当其与光源输出频率不一致时,将重复上述负反馈过程,通过控制信号变化使光源输出锁定于新的吸收峰。用已知折射率的介质进行系统标定后,即可实现待测介质介电常数/折射率及其变化的测量。

### 3 实验结果与讨论

选择芯区直径为  $600\ \mu\text{m}$ 、数值孔径为 0.3、纤芯介质折射率为 1.46800 RIU 的多模石英光纤;在传输光强监测条件下,进行光纤包层的氢氟酸腐蚀剥离;自制自转、公转平台,利用 JSD560-V 型真空磁控溅射仪剥离处理后光纤并镀上金薄膜,制备了如图 2 所示的透射式光纤 SPR 传感头。其中传感区长度取 15 mm,金属膜为金膜,厚度为 50 nm。

按文献[9,19]所述的基于光谱仪的直接测量方法,用制备好的传感头对相同液体多次重复测量,以共振波长是否红移判断传感头的镀膜质量,筛选出

重复性好的传感头备用。

用工作波长为  $360\sim 2000\ \text{nm}$  的 HL-2000 型宽带光源(美国 Ocean Optics 公司),配合 Semrock Versa Chrome 系列射频可调谐窄带滤波片(Photonics 公司),构成可调谐单色脉冲光源,脉冲重复频率取 5 kHz;参照文献[20,22]方案,以现场可编程门阵列(FPGA)为主体,实现阶梯波驱动的电光调制信号产生、光电流相干解调等信号采集与处理功能;检测与参考光路由保偏光纤组成,满足 SPR 效应对光偏振特性要求,搭建如图 6 所示原理结构的闭环检测系统,进行共振峰锁定测量。

在相同光源条件下,应用 USB4000 型光纤光谱仪及相应分析软件(美国 Ocean Optics 公司),用经筛选后性能一致的传感头,对同批次液体样品,基于直接光谱测量法测定共振峰,用以与闭环结构测量结果相对比。

同时,基于(5)式,金属复介电常数采用 Drude 模型,采用 Rsoft 软件,用严格耦合波法,对上述结构参数传感头,在  $1.33000\sim 1.43000$  RIU 折射率变化范围内进行仿真计算,模拟折射率变化对 SPR 共振峰影响情况。具体的仿真数据与实测结果如图 7 所示。

由图 7 可见,基于 SPR 效应的共振吸收谱,具有关于吸收中心波长对称的类洛伦兹函数形状,仿真数据与实测结果一致性较好;共振吸收波长与环

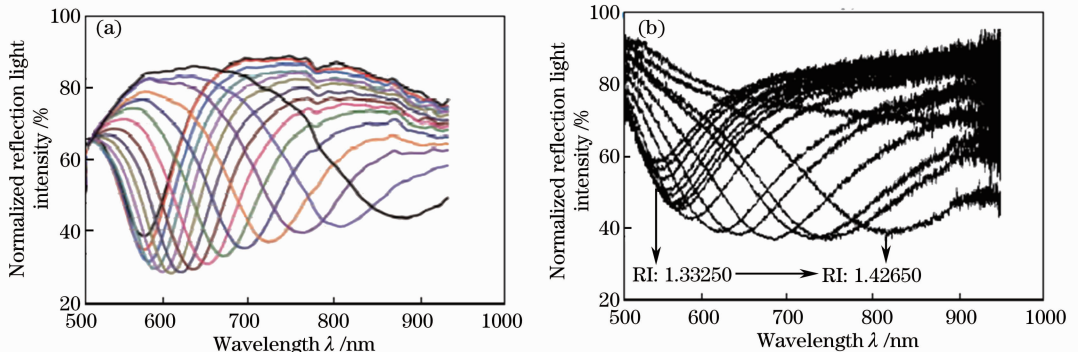


图 7 透射式 SPR 光纤传感头共振吸收特性。(a) 仿真结果; (b) 实验结果

Fig. 7 Absorbing characteristics of SPR sensing probes. (a) Simulation results; (b) experimental results

境介质折射率间有一一对应关系；共振吸收波长随折射率增加而红移，且吸收谱具有明显展宽；源于全反射条件，受限于纤芯折射率值，在高折射率段共振吸收特性劣化，直至共振吸收情形消失。从图7中还可看出，待测折射率增加时，SPR共振吸收谱的对称性，在高透射率区间，即探测光频率相对于共振峰有较大偏离时，有不同程度的劣化。实测谱的劣化程度比仿真结果的劣化程度更为严重。

对此，结合文献[1,2,9,19]及相关理论分析可知，主要原因是待测折射率较高时，界面折射率差变小，相对于有较高折射率差情形，倏逝波模式更为丰富，非直接泄漏模增多，共振吸收对应模式的能量所占的比例下降，造成对共振吸收峰的不对称。在仿真模型中，对这种不对称性在光学处理中，通过倏逝波模式变化有所反映，故而优于实测结果。对此，可采用两种解决途径：1)控制调制频率大小，使一阶边带信号处于吸收谱对称性良好的区域，因为，由图7可见，仿真与实测谱在吸收峰两侧一定频率范围内仍有较好的对称性；2)提高光纤纤芯折射率，通过提高反射界面折射率差，可以抑制直接泄漏模数量。此外，无论直接光谱测量或FM法，最需关注的是探测光频率逼近共振吸收峰时共振峰的精度，而在此情形下，实测与仿真谱都具有良好的对称性。如上所述，这种不对称性对测量结果的影响，可通过选择适当的调制频率的适当选择来予以抑制。

最后，利用分析纯蔗糖、乙醇与去离子水配制折射率在1.33000~1.43000范围的不同浓度液体，用型号为2WJ的阿贝折射率仪测量相应折射率；以纯净去离子水对闭环传感系统进行标定后，在室温下对上述液体分别采用FM法和光谱仪直接测量法进行共振吸收峰测量，并得出折射率与共振波长之间的关系。具体结果如图8所示。

由图8可以看出，FM法、光谱仪测量与理论仿真结果具有良好一致性，证实了该方案的可行性在1.33200~1.37580 RIU范围内，FM法测量精度为0.00016 RIU，与波长分辨率0.4 nm光谱仪测量结果基本相当；在1.37500~1.42640 RIU范围内，FM法测量精度为0.00071 RIU，优于0.00090 RIU的光谱仪测量结果。分辨率测量精度在两个折射率范围内不同，主要是由于在低折射率范围，SPR吸收峰窄，两种方法的共振峰确定都可有较高的精度，且因为相对于商品化光谱仪，实验平台的噪声抑制与抗干扰能力较弱，导致实测结果基本持平；而在高折射率段，共振吸收谱展宽，两种方法确定吸收峰的

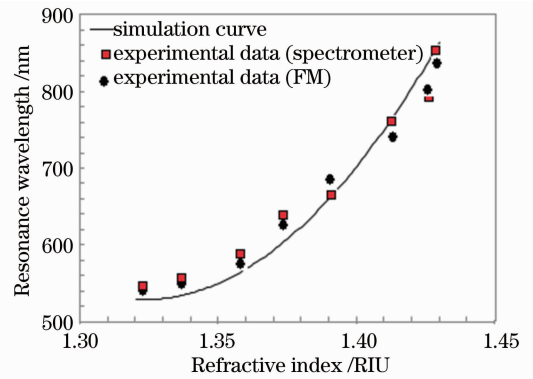


图8 两种测量方案实测数据及其与仿真结果比较

Fig. 8 Comparison of experimental data measured by different measuring methods and simulation results

精度均随之下降，折射率测定精度与灵敏度相应劣化。相比较而言，FM法以一阶边带处远大于零的微分谱  $h'(f_m)$  替代直接光谱测量的近似为零的吸收峰处微分谱  $h'(0)$ ，对吸收峰有更高的锁定精度。

## 4 结 论

在理论分析与实验基础上，分析了SPR光纤传感头共振吸收峰的对称特性，基于FM光谱原理，提出一种可用于在线测量性能优化的SPR光纤传感器方案。基于该方案搭建相应检测平台，对不同浓度蔗糖、乙醇等液体，通过共振吸收波长及其变化进行折射率测定，并对数值仿真结果、直接光谱测量结果进行了比较。对比结果表明，该方案所得结果与理论分析结果能够较好地吻合，与已有测量方案相比，在高折射率范围有着更好的测量结果。

## 参 考 文 献

- Li Haibo, Xu Shuping, Liu Yu *et al.*. Studies on the sensitivity of a wavelength-dependent PR sensor [J]. *Chemical J. Chinese Universities*, 2010, **31**(11): 2157~2161  
李海波, 徐抒平, 刘钰等. 波长型SPR检测仪的灵敏度探讨[J]. *高等学校化学学报*, 2010, **31**(11): 2157~2161
- Zhang Mei, Dai Jixiang, Yang Minghong *et al.*. Fiber-optic surface plasmon resonance hydrogen sensor based on palladium coating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1205005  
张美, 代吉祥, 杨明红等. 基于表面等离子体共振的钯膜氢气传感器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(12): 1205005
- Liu Kun, Liu Tiegeng, Jiang Junfeng *et al.*. Investigation of intracavity gas sensing technology based on wavelength modulation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0105008  
刘琨, 刘铁根, 江俊峰等. 基于波长调制技术的腔内气体传感研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1) 0105008
- Wang Lin, He Jun, Li Fang *et al.*. Ultra low-frequency phase generated carrier demodulation technique for fiber sensors [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0405001  
王林, 何俊, 李芳等. 用于探测极低频信号的光纤传感器相位生成载波解调方法[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0405001
- Yu Kuanglu, Wu Chongqing, Guo Xuan *et al.*. A novel multi-

- point fiber optics acetylene sensing system based on dense wavelength division multiplexers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0506003
- 余颀球, 吴重庆, 郭旋等. 基于波分复用的多点光纤乙炔传感系统[J]. 光学学报, 2011, **31**(5): 0506003
- 6 Xie Zuosheng, Li Weiwen, Lin Weipeng *et al.*. Implementation of low-frequency periodic vibration sensor based on frequency-swept fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1205006
- 谢作生, 李伟文, 林伟鹏等. 利用扫频光纤激光器实现低频周期振动传感[J]. 中国激光, 2011, **38**(12): 1205006
- 7 Luo Binbin, Zhao Mingfu, Zhou Xiaojun *et al.*. Research on the refractive-index gradient sensor based on the structured fiber Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0306004
- 罗彬彬, 赵明富, 周晓军等. 基于结构化光纤 Bragg 光栅的折射率梯度传感器研究[J]. 光学学报, 2012, **32**(3): 0306004
- 8 Zhao Huaxin, Jiang Yongxiang, Luo Tianqiong *et al.*. Hollow optical fiber sensor based on surface plasmon resonance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 0628001
- 赵华新, 蒋永翔, 罗天穹等. 基于表面等离子体共振原理的空心光纤传感器[J]. 光学学报, 2012, **32**(6): 0628001
- 9 Zeng Jie, Liang Dakai, Zeng Zhenwu *et al.*. Study on measurement of liquid refractive index by analyzing SPR spectrum character [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, **26**(4): 723~727
- 曾捷, 梁大开, 曾振武等. 基于 SPR 光谱分析的液体折射率测量研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, **26**(4): 723~727
- 10 Huang Changchun, Li Yunmei, Sun Deyong *et al.*. Research of scattering spectrum characteristic and formative mechanism of Taihu lake waters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0501003
- 黄昌春, 李云梅, 孙德勇等. 太湖水体散射光谱特性及其形成机理研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(5): 0501003
- 11 Shi Kun, Li Yunmei, Wang Qiao *et al.*. Study of scattering coefficients model in inland eutrophic lake [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2478~2485
- 施坤, 李云梅, 王桥等. 内陆湖泊富营养化水体散射系数模型研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(9): 2478~2485
- 12 Y. Huot, A. Morel, M. S. Twardowski *et al.*. Particle optical backscattering along a chlorophyll gradient in the upper layer of the eastern South Pacific Ocean [J]. *Biogeosciences*, 2008, **5**(2): 495~507
- 13 Zhou Wen, Cao Wenxi, Li Cai *et al.*. Spectral scattering property of phytoplankton calculated by absorption coefficient and size distribution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1429~1432
- 周雯, 曹文熙, 李彩等. 由吸收系数与粒度分布计算浮游植物的散射光谱特征[J]. 光学学报, 2008, **28**(8): 1429~1432
- 14 Liu Chang, Zou Zhengfeng, Chen Shufeng *et al.*. Surface plasmon resonance sensor based on compact disk grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(3): 0314001
- 刘畅, 邹正峰, 陈淑芬等. 基于光盘光栅的表面等离子体共振传感器[J]. 中国激光, 2012, **39**(3): 0314001
- 15 Geng Junqing, Yu Xinglong, Zhang Enyao *et al.*. SPR biosensing method based on phase shift algorithm and its application [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2012, **33**(10): 2168~2174
- 耿俊清, 余兴龙, 章恩耀等. 基于相位解算的 SPR 传感方法及其应用[J]. 仪器仪表学报, 2012, **33**(10): 2168~2174
- 16 Shen Yun, Fan Dinghuan, Fu Jiwei *et al.*. Theoretical research on optical properties of gain-assisted plasmonic coupled resonator optical waveguides [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(11): 117302
- 沈云, 范定寰, 傅继武等. 加入增益介质的表面等离子体激元耦合共振波导传输特性理论研究[J]. 物理学报, 2011, **60**(11): 117302
- 17 Wu Yingcai, Gu Zhentian. Research on the optimum thickness of metallic thin films utilized to excited surface plasmon resonance [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(4): 2295~2298
- 吴英才, 顾铮先. 激励表面等离子体共振的金属薄膜最佳厚度分析[J]. 物理学报, 2008, **57**(4): 2295~2298
- 18 Lu Qijing, Wu Genzhu, Cheng Daru *et al.*. Optimal design and application of surface plasmon polaritons microdisk [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(7): 0714002
- 卢启景, 吴根柱, 陈达如等. 表面等离子体激元微盘的优化设计及应用[J]. 光学学报, 2012, **32**(7): 0714002
- 19 Ma Weitao, Zhou Jun, Huang Shuiping *et al.*. Characteristic of subwavelength dielectric grating with metal layer and its sensing application [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0905008
- 马伟涛, 周骏, 黄水平等. 金属膜衬底上亚波长介质光栅结构的特性及传感应用[J]. 中国激光, 2011, **38**(9): 0905008
- 20 Ma Huilian, Jin Zhonghe, Ding Chun *et al.*. Research on signal detection method of resonator fiber optic gyro [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8): 1001~1005
- 马慧莲, 金仲和, 丁纯等. 谐振腔光纤陀螺中信号检测方法的研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(8): 1001~1005
- 21 Y. Ohtsuka. Analysis of a fiber-optic passive loop resonator gyroscope: dependence on resonator parameters and light source coherence [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1985, **LT-3**(2): 378~383
- 22 Wang Mahua, Cui Yiping, Zhang Tong. Investigation on the optimization for the coupling coefficient of polymer integrated optic gyros [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1793~1796
- 王马华, 崔一平, 张彤. 聚合物集成光学陀螺耦合比优化的研究[J]. 光学学报, 2007, **27**(10): 1793~1796
- 23 Manfred Gehrtz, Gary C. Bjorklund. Quantum-limited laser frequency modulation spectroscopy [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1985, **2**(9): 1510~1525

栏目编辑: 王晓琰