

面向海上溢油的 SPR 原理折射率检测实验系统

高 璐, 高文智, 罗政纯, 常天英, 崔洪亮

(吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130012)

摘 要: 为有效地预防、控制海上溢油事件对经济和海洋生态环境造成的严重影响, 针对不易被早期发现的小面积溢油, 结合表面等离子体共振(Surface Plasmon Resonance, SPR)传感技术的实时性、灵敏度高、样品消耗少等特点, 提出了一种新颖的小型海上溢油监测系统。具体而言, 根据所采用的非扫描角度调制模式下的四层 Kretschmann 型棱镜耦合传感结构和原油样品折射率变化范围, 通过 MATLAB 仿真确定传感装置中各元件最优参数和相对固定位置, 得到理论检测灵敏度为 6.094×10^{-5} RIU。依仿真结果搭建实验装置, 对蔗糖溶液和原油样品进行了实验分析。实验表明: 蔗糖溶液检测灵敏度与理论仿真灵敏度同数量级, 达到 9.017×10^{-5} RIU, 证实实验装置有效, 原油检测结果符合 SPR 响应趋势, 验证了该系统方案的可行性。

关键词: 表面等离子体共振; 溢油监测系统; SPR 传感单元; MATLAB 仿真; 实验分析
中图分类号: TP212; TN29 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0813006

SPR principle refractive index testing system for offshore oil spill

Gao Lu, Gao Wenzhi, Luo Zhengchun, Chang Tianying, Cui Hongliang

(College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: In order to effectively prevent and control the serious impact of the oil spill incident on the economy and the marine environment, and aiming at the detection of small area oil spills which were not easily detected in the early stage, an original minitype offshore oil spill monitoring system combined with the characteristics of Surface Plasmon Resonance (SPR) sensing technology, such as instantaneity, high sensitivity and low sample consumption was proposed. Specifically, the optimal parameters and relative fixed positions of the components in the sensing device were determined by simulating with MATLAB on the basis of an adoptive four-layer Kretschmann prism-coupled sensing structure in a non-scanning angle modulation mode and the range of refractive index of crude oil samples. The theoretical detection sensitivity was 6.094×10^{-5} RIU (Unit: Refractive Index). Under the guidance of the simulation results, an

收稿日期: 2019-03-05; 修订日期: 2019-04-10

基金项目: 海洋公益性行业科研专项(201405026-01)

作者简介: 高璐(1988-), 男, 硕士生, 主要从事 SPR 传感技术及应用方面的研究。Email: gaolu880810@126.com

导师简介: 崔洪亮(1956-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光纤通信和传感、太赫兹科学与技术、纳米光学和纳米电子学等方面的研究。Email: hcui@jlu.edu.cn

通讯作者: 常天英(1981-), 女, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事光纤传感技术与应用、光纤分布式传感(拉曼、布里渊技术、BOTDR)等方面的研究。Email: tchang@jlu.edu.cn

experimental device was set up and the experimental analysis for sucrose solutions and crude oil samples was conducted. The experimental results show that the detection sensitivity of sucrose solution is the same as theoretical simulation sensitivity, which corresponded to 9.017×10^{-5} RIU. The experimental device is effective, and the crude oil detection result conformed to the SPR response trend. The feasibility of the system solution is verified.

Key words: Surface Plasmon Resonance (SPR); monitor system of oil spill; SPR sensor element; matlab simulation; experimental analysis

0 引言

表面等离子体共振 (Surface Plasmon Resonance, SPR) 是一种用于表征金属膜表面折射系数改变的物理光学现象。早在 1902 年, Wood 通过光学实验发现了这种现象并公开描述^[1]; 到 20 世纪 70 年代, Otto 和 Krestschmann 通过衰减全反射的方式论证了 SPR 现象的存在, 确定了易于控制、制作、使用的 Krestschmann 型棱镜耦合传感结构^[2-3]; 随后, 在 90 年代初, SPR 传感技术得到了很好地应用, 瑞典 BIACORE AB 公司研发了首台 SPR 生化分析仪器, 其具有无需标记、灵敏度高、检测快速、可实时定量测试等优势^[4-6]。

近年来, SPR 传感技术凭借这些优势已逐步应用到多个领域。例如, 在生物和医学领域中, 用于预防和诊断疾病^[7-8]; 在环境检测领域中, 可快速确认生物战现场因细菌和孢子等引起的污染情况^[9], 以及实现对靶场环境的连续监测^[10]; 在食品安全领域中, 利用 SPR 传感器检测食物中可能含有的真菌毒素, 可避免食物中毒的现象出现^[11]。文中的研究思路正是利用 SPR 这些独特优势对原油进行检测分析, 确定适用于海上溢油监测的系统方案, 进而实现对海上溢油的实时监测。

目前, 传统海上溢油监测方式包括遥感监测、定点监测和浮标跟踪等^[12]。其中, 遥感监测手段多作为国家层面海上溢油监测手段, 设备成本高, 投资大, 不易于民用监测的推广和应用实施^[13]; 定点监测属于非接触式海上溢油监测手段, 该方式常用于港口、码头等海面监测, 有较高的监测精度, 但监测海域范围较小^[14]; 而采用浮标跟踪的方法进行溢油监测时

易受到漂移速度和漂移方向的影响, 主要用于溢油跟踪, 不易于大规模的组网和铺设^[15]。该系统结合 SPR 传感技术的优势特点着重针对运油船、海底输油管道及海上开采油田的早期小面积溢油的微量油量及超薄油层进行高灵敏度的探测, 进而弥补上述传统监测手段的不足, 做到海上溢油的早发现、早预警、早处理。目前, 国内外对 SPR 传感技术在溢油监测应用方面的研究相对较少, 而作为第二代海上溢油监测体系的重要一环, SPR 小型海上溢油监测系统具有很大地研究和应用价值。

在 SPR 传感技术应用于溢油监测的初步尝试中, 郑妍等提出了采用点光源贴合入射 Krestschmann 型四边六面体棱镜耦合结构的小型化 SPR 实时在线海上溢油监测系统设计方案^[16], 由于点光源出射光线在 SPR 传感面形成的光斑较大, 溢油发生时需原油覆盖整个光斑才可做出准确检测, 且棱镜不规则不易固定, 发散光线经四边六面体棱镜到达线阵 CCD 探测处的光程较大, 会造成部分光功率弱的有用信号无法检测到, 存在检测精度降低, 难以覆盖原油折射率范围的问题。

文中在基于 SPR 传感原理的基础上, 提出了一种新的海上溢油监测系统方案。针对郑妍等方案中“光斑较大”、“光功率不稳定”的问题, 文中选用等腰直角棱镜代替四面六面体棱镜, 并通过仿真光路确定了光源结构, 最终加工制作了电源恒流驱动电路驱动会聚光源 (由功率 5 mW 的平行光管+线偏振片+平凸柱面镜制成), 提高了光功率稳定性且适用于小型化后的装置, 光源输出稳定的 P 偏振光折入棱镜后在传感检测面上形成一条会聚光束, 减少了光斑的面积。文中系统采用了四层 Krestschmann 型等

腰直角棱镜耦合结构, 仿真得出棱镜、光源及金属膜等传感组件的最优参数, 计算出光源、棱镜、线阵 CCD 相对位置(棱镜、光源及线阵 CCD 等共同组成了 SPR 传感单元), 确定了共振角与共振像元的对应关系, 检测精度可覆盖原油折射率范围。搭建 SPR 小型海上溢油折射率检测实验系统, 进行验证性实验, 最终拟实现小面积溢油早期预警、早期应急处理的目的。

1 SPR 传感原理及系统设计

当前研究中, 大多数 SPR 传感器都采用了 Krestschmann 棱镜耦合结构, 结构模型如图 1 所示。其中棱镜、金属膜、待测样品的介电常数分别为 ϵ_0 、 ϵ_1 、 ϵ_2 , k_x 为光线在棱镜与金属膜界面的水平波矢, k_{spw} 为光线在金属膜与待测样品界面波矢。单色光线以一定角度入射棱镜与金属膜界面, 在此界面发生全内反射时, 其 P 偏振分量以消逝波形式穿透金属导电层到达待测样品层, 消逝波激发电子振荡, 产生表面等离子波(SPW), 当消逝波与 SPW 相遇发生共振时(即 $k_x = k_{spw}$), 入射光的大部分能量被吸收, 因此检测到的反射光强大幅减弱, 发生衰减式全反射 SPR 现象, 此时对应的入射角 θ 为 SPR 共振角, 理论计算表明^[17], 当样品折射率发生变化时, 对应的共振吸收峰位置相应改变。

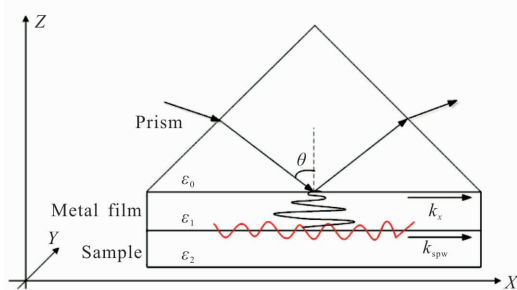


图 1 Krestschmann 型棱镜耦合结构

Fig.1 Krestschmann prism coupling structure

文中基于 SPR 传感技术, 结合应用环境提出了一种新颖的 SPR 小型海上溢油监测系统。图 2 所示为 SPR 小型海上溢油监测系统原理框图, 虚线框内各部分共同组成了小型 SPR 溢油传感装置。图 3 所示为 SPR 小型海上溢油监测系统结构示意图。

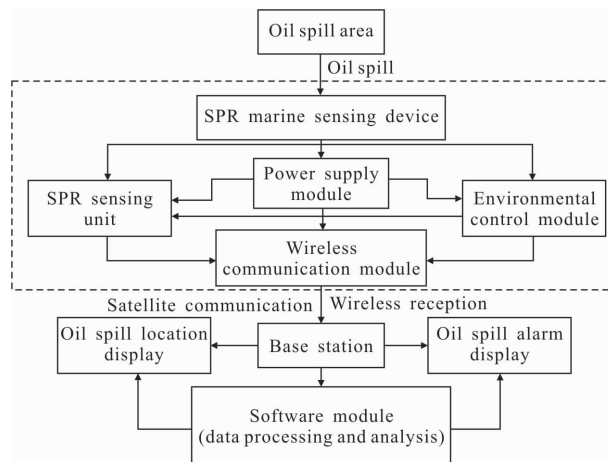


图 2 SPR 小型海上溢油监测系统原理框图

Fig.2 Block diagram of a minitype oil spill monitoring system based on SPR

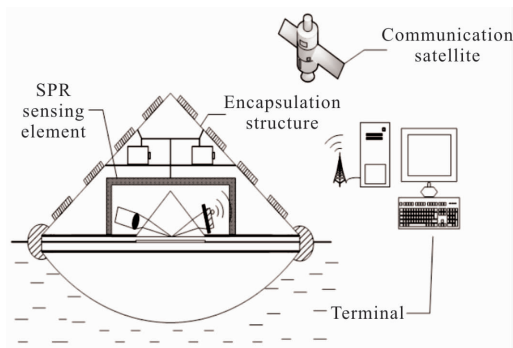


图 3 SPR 小型海上溢油监测系统结构示意图

Fig.3 Structure diagram of a minitype oil spill monitoring system based on SPR

将封装好的溢油传感探头布放在海上钻井平台、运油船周边, 或通过海洋浮标布放在溢油易发区, 如图 3 所示, 以海水作为溢油检测背景, 显示在终端采集界面上近似为一条平行直线, 当海上溢油事件发生时, 油层随海水通过封装底座表面的小孔进入, 底座内的疏水亲油薄层吸收漂浮在海水表面的原油, 实际应用中可结合聚结法改性手段获取的滤柱来过滤掉浮游物, 使原油附着在传感检测面上^[18-19], 在该面发生 SPR 现象, 传感信号经线阵 CCD 探测模块接收采集, 通过无线通信的模式传输至基站的数据处理终端。此时, 终端采集界面上的水平线渐变为共振吸收峰, 根据预警界限系统可实时在线判定溢油发生, 确定发生位置并发出预警信息实现预警目的。

其中, SPR 传感单元是整个系统的技术核心, 需做到各组件的高度匹配, 因此, 在 SPR 小型溢油传

感装置搭建前要进行各组件的参数分析和选取。如图 4 所示,根据原油折射率确定出光源、棱镜、金属膜、线阵 CCD 各组件的参数指标,整体系统依据仿真研究和实验判断出溢油监测的预警界限。

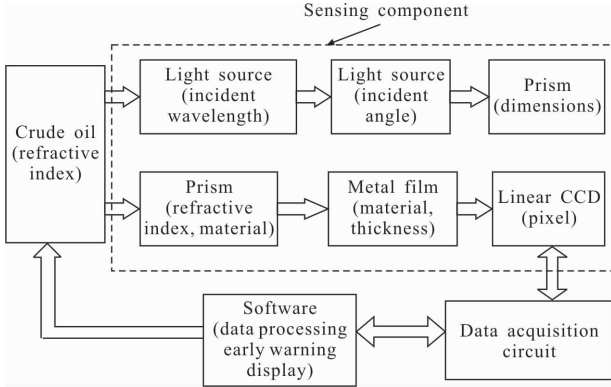


图 4 SPR 传感单元各组件参数选取流程框图

Fig.4 Flow chart of parameters selection for each component of SPR sensor unit

2 系统器件仿真及实现

结合实际,该系统采用非扫描角度调制模式下的四层 Kretschmann 型棱镜耦合结构,如图 5 所示,由棱镜、玻片、金属膜层、待测样品层组成,选取入射波长确定的单色光源(P 偏振输出),并以一定角度会聚入射棱镜,在界面处发生全内反射,由线阵 CCD 接收反射光强信号经采集后传至上位机进行处理。根据系统设计方案和原油折射率范围 1.4~1.55^[16],结合菲涅耳定理分析仿真得到光源、棱镜、金属膜最优参数以及光源、棱镜、线阵 CCD 三者位置关系。

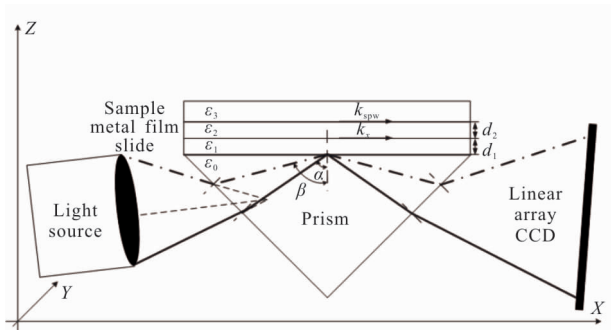


图 5 非扫描角度调制四层 Kretschmann 型棱镜耦合结构
Fig.5 Four-layer Kretschmann prism coupling structure based on non-scanning angle modulation

非扫描角度调制四层 Kretschmann 型耦合结构下的反射率 $R^{[20]}$ 如下:

$$R=|r_{0,3}|^2 = \left| \frac{r_{0,1}+r_{1,3}\exp(2ik_1d_1)}{1+r_{0,1}r_{1,3}\exp(2ik_1d_1)} \right|^2,$$

$$r_{1,3} = \frac{r_{1,2}+r_{2,3}\exp(2ik_2d_2)}{1+r_{1,2}r_{2,3}\exp(2ik_2d_2)} \quad (1)$$

$$r_{j,j+1} = \frac{\epsilon_{j+1}k_{jz} - \epsilon_j k_{(j+1)z}}{\epsilon_{j+1}k_{jz} + \epsilon_j k_{(j+1)z}}, j=0, 1, 2 \quad (2)$$

$$k_{jz} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_j - \epsilon_0 \sin^2 \theta}, j=0, 1, 2, 3 \quad (3)$$

式中: $r_{0,3}$ 表示光波在棱镜到样品层间的振幅反射比; $r_{1,3}$ 表示光波在玻片层到样品层间的振幅反射比; $r_{j,j+1}(j=0, 1, 2)$ 表示光波在相邻介质层间的振幅反射比; $k_{jz}(j=0, 1, 2, 3)$ 表示相应介质层中 Z 轴方向光波矢量; d_1, d_2 分别表示玻片和金属膜的厚度; λ, θ 分别表示入射波长和入射角度; $\epsilon_j(j=0, 1, 2, 3)$ 表示相应介质层的介电参数。

由公式(1)~(3)可知,总反射率 $R=f(\lambda, d, \theta, \epsilon)$,系统选用非扫描角度调制模式,在后续的仿真过程中可依此函数关系计算出各传感元件的最优参数。

2.1 棱镜(折射率)

系统设计选用等腰直角棱镜,反射率高且便于夹持固定。已知原油折射率范围为 1.4~1.55,基于棱镜 SPR 传感原理,棱镜的折射率选取需大于 1.55。已有研究表明^[21],入射光波长在 630~670 nm 时,SPR 共振吸收峰明显。文中棱镜参数仿真中选用光源入射波长 650 nm,金属膜厚 50 nm^[22-23],金膜介电常数 $-12.2275 + 1.05i$ ^[24],玻片与棱镜同材质、厚度 0.55 mm,如图 6 所示,得到了相应棱镜折射率、样品折射率与反射率三者关系。

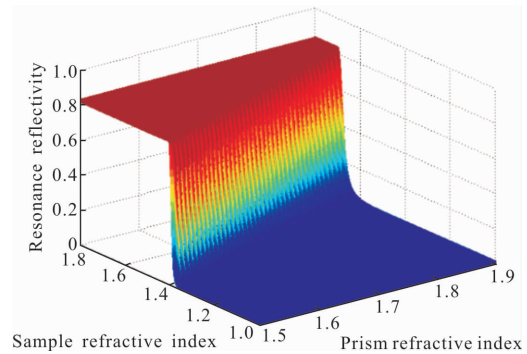


图 6 棱镜折射率、样品折射率与共振反射率的关系曲线
Fig.6 Relationship among prism's refractive index, sample's refractive index and resonant reflectivity

结合实际,棱镜材质选择重火石玻璃 ZF13,折射率为 1.78472,如图 7 所示,得到了样品折射率与共振

反射率、共振角度的关系,可覆盖原油折射率范围。

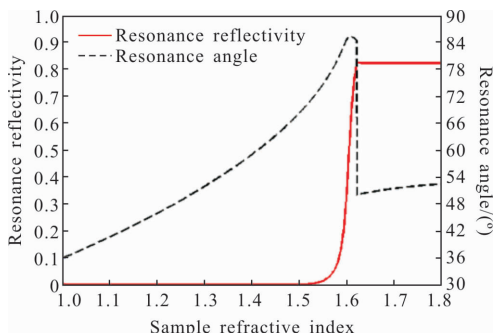


图 7 样品折射率与共振反射率、共振角度的关系曲线

Fig.7 Relationship among sample's refractive index, resonant reflectivity and resonant angle

2.2 光源(入射波长、会聚角)

在上述条件下,给定样品折射率为 1.5299。如图 8 所示,得到入射波长、入射角度与反射率三者关系。从图 8 中可以看到入射波长在 630~670 nm 范围内 SPR 共振吸收峰尖锐,共振反射率最低。给定入射波长 632.8、635、650、670 nm,分别得到了入射角度和反射率二者关系,如图 9 所示,波长 650、670 nm

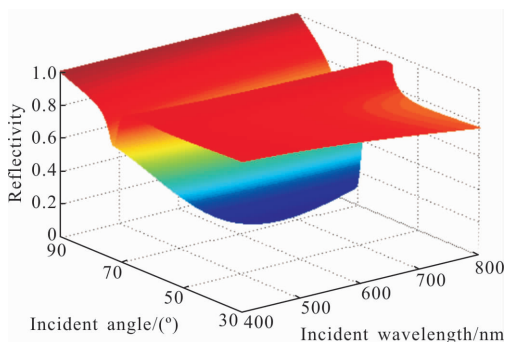


图 8 入射波长、入射角度与反射率关系曲线

Fig.8 Relationship among incident wavelength, incident angle and reflectivity

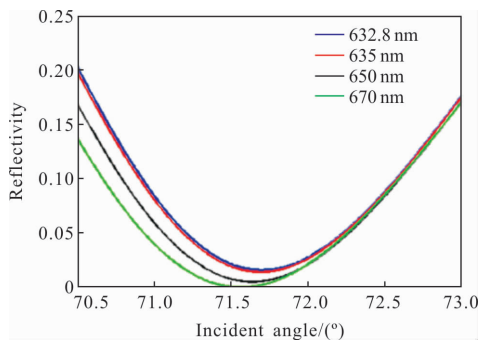


图 9 给定入射波长时入射角度与反射率关系曲线

Fig.9 Relationship between incident angle and reflectivity at a given incident wavelength

对应的 SPR 共振响应明显,结合共振深度和分辨率分析,系统选用入射波长为 650 nm 会聚光源。

图 10 为样品折射率与共振角度二者关系。给定样品折射率 1.4、1.414、1.5299、1.55,分别得到了对应的 SPR 曲线,如图 11 所示。结合图 10、11 可知,样品折射率为 1.4~1.55 时对应的共振角度范围 $\theta \in (58.89^\circ, 74.45^\circ)$ 。

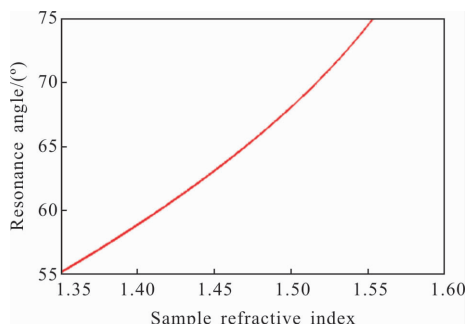


图 10 样品折射率与共振角度关系曲线

Fig.10 Relationship between refractive index and resonance angle of sample

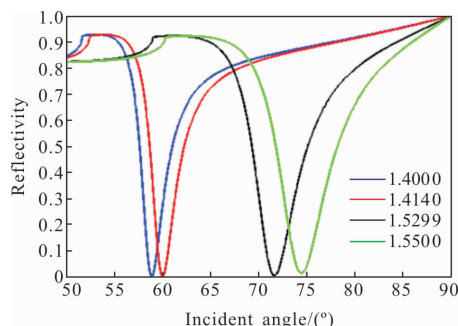


图 11 给定样品折射率的 SPR 曲线

Fig.11 SPR curves of given refractive index of sample

结合图 5 可知 $\theta_C(\alpha, \beta)$, 选定 $\alpha=55^\circ, \beta=75^\circ$, 覆盖原油样品折射率范围,运用菲涅耳公式 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ 计算得到光源的会聚角度为 45.12° 。

2.3 金属膜(材料、厚度)

SPR 传感结构中通常采用镀金膜或银膜的方式。给定样品折射率为 1.5299,银的介电常数 $-17.6351 + 0.588i^{[24]}$ 。在相同条件下分别得到了金膜、银膜的 SPR 反射光谱,如图 12 所示,银膜半峰宽度较金膜窄,灵敏度高,而金膜的共振峰深于银膜,共振角度大,SPR 信号明显,且金膜具有良好的化学钝性,结合实际应用,系统采用镀金膜的方式实现。

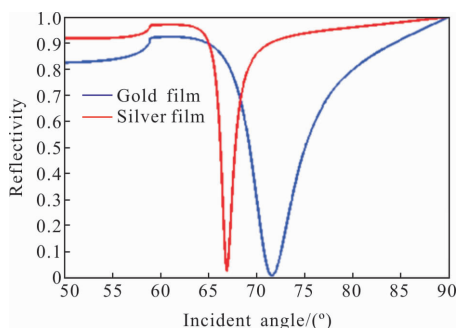


图 12 相同条件下金膜、银膜 SPR 曲线

Fig.12 SPR curves of gold film and silver film under the same condition

图 13 为连续变化金膜厚度、入射角度、反射率关系图,其中,计算得出最小反射率处的金膜厚度为 48.45 nm。入射波长 650 nm, 给定金膜厚度 30、40、50、60 nm, 分别得到了 SPR 曲线, 如图 14 所示, 可以看出金膜厚度在 50 nm 时, 共振反射率最低, 深度最大 SPR 信号明显。结合实际, 系统选用 48~50 nm 范围内厚的金膜作为传感膜层。

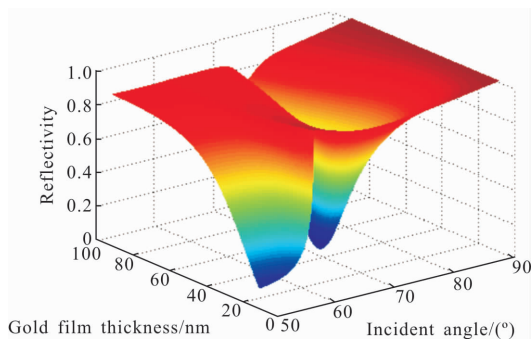


图 13 金膜厚度、入射角度与反射率关系曲线

Fig.13 Relationship among the thickness of gold film, incident angle and reflectivity

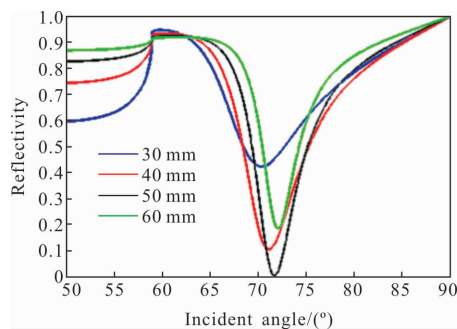


图 14 给定金膜厚度下的 SPR 曲线

Fig.14 SPR curves of given thickness of the gold film

2.4 共振角度与共振像元位置的对应关系

选定光源出射直径 21 mm, 棱镜尺寸 35 mm×

35 mm×35 mm, 线阵 CCD 型号 TCD1501(5 000 像元点、单位像元 7 μm×7 μm)。如图 15 所示, MN 为光源出射直径, ΔEAB 中 ∠E 的平分线 EH 过线阵 CCD 中点, 光源在线阵 CCD 上有效光照长度 AB=25 mm, 依照上述仿真得到的参数可确定出光源、棱镜、线阵 CCD 位置关系。

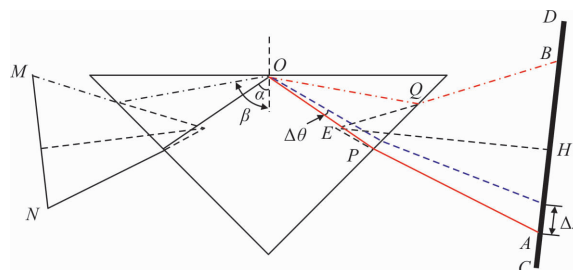


图 15 光源、棱镜、线阵 CCD 位置关系

Fig.15 Positional relationship among light source, prism and linear CCD

图 15 中 C 点为像元点起始位置, CA=5 mm, 根据菲涅耳定理及三角形正、余弦定理可计算共振角度 θ 与共振像元位置 x 的关系, $x(\theta)=0.000\ 945\ 4\theta^3-0.180\ 4\theta^2+12.62\theta-300.6$, 如图 16 所示。结合图 10、16, 得到共振像元 x_{pixel} 与样品折射率 n 的对应关系, 如图 17 所示, 线性拟合方程为: $n(x_{\text{pixel}})=(6.094\times 10^{-5})\cdot$

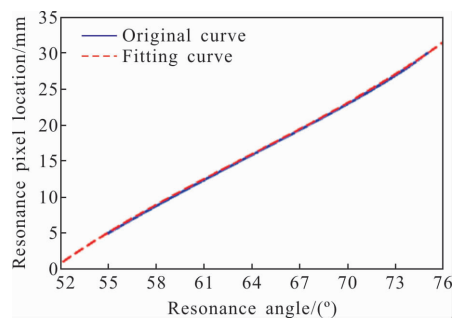


图 16 共振角度与共振像元位置对应关系

Fig.16 Congruent relationship between resonance angle and resonance pixel location

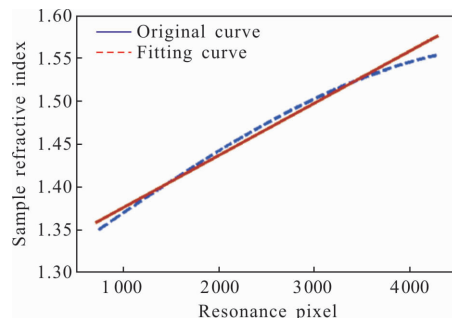


图 17 共振像元与样品折射率对应关系

Fig.17 Congruent relationship between resonance pixel and sample refractive index

$x_{\text{pixel}}+1.315$, 理论灵敏度值为 6.094×10^{-5} RIU。

3 实验装置及实验分析

依据仿真结果进行元件选型并搭建实验装置。该装置由会聚光源、棱镜、镀金膜玻片、样品池、电源恒流驱动电路、线阵 CCD 模块、数据采集电路及机械部件等共同组成。其中,光源由平行光管(650 nm、5 mW)、线偏振片(25.4 mm)及平凸柱面镜(25.4、 $f25.0$ mm)通过连接件构成;样品池由聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)材料制成贴合镀金膜玻片使用,实验时将其整体放于装置上面板的凹槽内通过恒流注射器添加样品溶液,样品溶液覆盖检测光线,其中,进行原油检测实验时将原油均匀涂抹在金膜表面覆盖检测光线。如图 18 所示,电源恒流驱动电路驱动(电流范围 0~60 mA)光源产生稳定的 P 偏振输出光,光线以 45.12° 会聚折入等腰直角棱镜到达传感检测面(传感检测面通过匹配液贴合棱镜直角对应面和镀金膜玻片组成),经全反射后形成一椭圆光斑,由线阵 CCD 接收其长轴方向的传感信号,经数据采集电路(12 Bit,采样频率最高达 20 MHz)采集通过高速 USB 传输的方式传送给上位机软件进行分析处理。对得到的实验数据在累加平均的基础上采用了小波+中值去噪的处理方法,并应用无基线质心法提高共振像元的分辨率。如图 19 所示,为实验装置实物图。

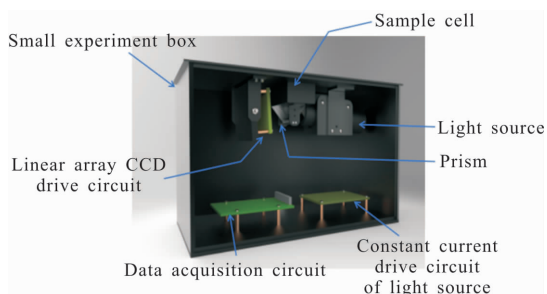


图 18 实验装置结构示意图

Fig.18 Structure diagram of experimental device

为了验证实验装置的有效和系统方案的可行,常温下,首先采用蒸馏水与蔗糖按质量配比出原油折射率范围内的 8 种不同浓度蔗糖溶液,用阿贝折光仪测定其折射率并进行编号,同时取折射率为 1.445 1、1.477 4、1.529 9(RA-600 全自动折光仪标定,

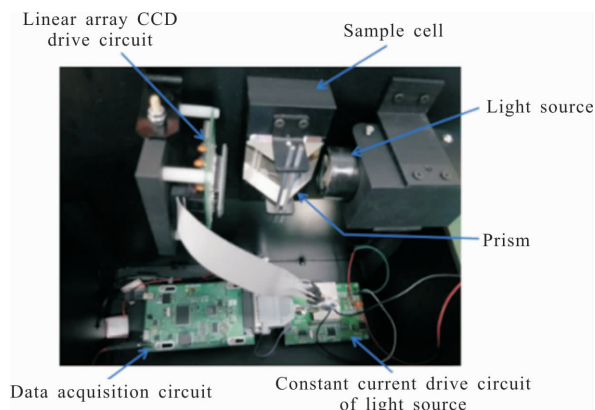


图 19 实验装置实物图

Fig.19 Physical diagram of experimental device

日本)原油样品,通过文中设计的实验装置检测上述样品的 SPR 点(即共振像元点)。将每种样品测量数据取 20 个点,得到平均值和方差如表 1 所示。

表 1 不同折射率 8 种折射率蔗糖溶液和 3 种折射率原油对应的共振像元点位置的平均值和方差

Tab.1 Mean and variance of the resonant pixel positions for 8 kinds of sucrose solution and 3 kinds of crude oil with different refractive index

Sample	Serial number	Refractive index	Resonance pixel point	Variance
			Mean	
Sucrose solution	1	1.404	2 240.65	0.765 8
	2	1.407	2 280.50	2.263 2
	3	1.414	2 332.45	1.628 9
	4	1.421	2 447.25	0.723 7
	5	1.433	2 503.50	1.210 5
	6	1.442	2 613.70	1.273 7
	7	1.450	2 747.65	0.765 8
	8	1.467	2 948.90	0.515 8
Crude oil	1	1.445 1	2 354.60	3.305 3
	2	1.477 4	2 501.70	1.694 7
	3	1.529 9	2 532.85	2.976 3

根据表 1 中蔗糖溶液数据运用最小二乘法进行拟合,如图 20 所示,得到拟合直线方程为: $y=(9.017 \times 10^{-5}) \cdot x+1.203$,相关系数 $R=0.987 1$,斜率为 9.017×10^{-5} ,即灵敏度为 9.017×10^{-5} RIU,与理论仿真

的灵敏度在同数量级上, 图中原油样品 SPR 响应较为缓慢, 但与理论仿真有相同趋势。实验表明, 蔗糖溶液的检测结果证实了实验装置的有效, 而对原油的检测结果则验证了系统方案的可行。

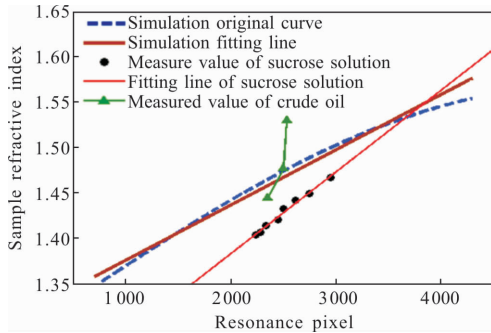


图 20 共振像元与样品折射率关系曲线

Fig.20 Relationship between resonance pixel and sample refractive index

4 结 论

文中对四层 Kretschmann 型棱镜耦合传感结构进行了仿真, 并搭建实验装置进行实验分析。从实验结果中可以看到随着蔗糖溶液折射率增大, SPR 点 (共振像元点) 拟合后呈线性增大的趋势, 灵敏度为每个像元对应 9.017×10^{-5} RIU, 与理论仿真同数量级, 证实本实验装置有效, 原油的检测结果符合 SPR 响应趋势, 验证了 SPR 小型海上溢油监测系统方案的可行性。由于目前研究阶段进行 SPR 传感技术对原油检测的可行性验证, 所有实验均在实验室中完成; 针对实际海洋溢油监测及相关油层性质的定量分析将在下一步工作中展开。利用 SPR 实时、快速、灵敏度高等特点实现对小面积溢油事件预警, 为系统的研制奠定基础。值得注意的是, 由于光源、机械误差及环境温度等多种因素的影响造成了实验结果误差, 稳定性及精度均有待提高。

参考文献:

[1] Wood R W. On a remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum [J]. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1902, 4(21): 396-402.

[2] Otto A. Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection [J]. *Zeitschrift Physik A Hadrons and Nuclei*, 1968, 216 (4):

398-410.

[3] Kretschmann, Raether H. Radiative decay of nonradiative surface plasmons excited by light (Surface plasma waves excitation by light and decay into photons applied to nonradiative modes) [J]. *Zeitschrift Für Naturforschung*, 1968, 23(12): 2135-2136.

[4] Biacore A B. *Biotechnology Handbook* [M]. Sweden: Version A B, 1998.

[5] Li Wenchao, He Jiahuan, Li Zhiquan, et al. Research on novel two-channel selective SPR optical fiber sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(3): 0322002. (in Chinese)

[6] Liu Dachang, Fu Yuegang, Zhang Yunfang, et al. Windowed Fourier transform for surface plasmon resonance spectral interference signals [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2752-2756. (in Chinese)

[7] Priya V, Lucilla I, Giuseppe C, et al. Development and application of DNA molecular probes [J]. *Aims Bioengineering*, 2017, 4(1): 113-132.

[8] Zeng K, Li H Y, Peng Y Y. Gold nanoparticle enhanced surface plasmon resonance imaging of microRNA-155 using a functional nucleic acid-based amplification machine [J]. *Microchimica Acta*, 2017, 184(8): 2637-2644.

[9] Maciej Trzaskowski, Lidia Mizak, Romuald Gryko, et al. SPR system for on-site detection of biological warfare [J]. *Current Analytical Chemistry*, 2017, 13(2): 144-149.

[10] Brule T, Granger G, Bukar N, et al. A field-deployed surface plasmon resonance (SPR) sensor for RDX quantification in environmental waters [J]. *Analyst*, 2017, 142 (12): 2161-2168.

[11] Jeong M, Jihyun B, Hongkiong K, et al. On-site detection of aflatoxin B1 in grains by a palm-sized surface plasmon resonance sensor [J]. *Sensors*, 2018, 18(2): 598.

[12] Liu Kangwei, Yang Wenyu. The research progress of oil spill detecting technique [J]. *Safety Health & Environment*, 2012, 12(7): 1-3.

[13] Fingas M, Brown C E. A Review of oil spill remote sensing [J]. *Sensors*, 2017, 17(7): 18010091.

[14] Hou Y C, Li Y, Liu B X, et al. Design and implementation of a coastal-mounted sensor for oil film detection on seawater [J]. *Sensors*, 2018, 18(1): 1801007.

[15] Yu F J, Hu X L, Dong S Y, et al. Design of a low-cost oil spill tracking buoy [J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2018, 23(1): 188-200.

[16] Zheng Y, Sun Y F, Xing L Y, et al. Compact real-time

- online oil spill detection system based on surface plasmon resonance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (11): 3446–3453.
- [17] Raether H. Surface Plasmon on Smooth and Rough Surface and on Gratings[M]. Berlin: Spring-Verlag, 1988.
- [18] Wu Nianfen. Superficial modification of porous ceramics filter media and its treatment of simulating oil field produced water based on coalescence filter mechanism [D]. Changshai: University of Science and Technology of Hunan, 2013. (in Chinese)
- [19] Di X, Zhang W, Jiang Z, et al. Facile and rapid separation of oil from emulsions by hydrophobic and lipophilic Fe_3O_4 /sawdust composites [J]. *Chemical Engineering Research & Design*, 2018, 129: 102–110.
- [20] Raether H. Surface plasmon oscillations and their applications [J]. *Physics of Thin Films*, 1977, 9(2): 145–151.
- [21] Zeng Jie, Liang Dakai, Du Yan, et al. Prism surface plasmon resonance sensor based on reflection light intensity interrogation[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2007, 18 (2): 159–163.
- [22] Liu Peikun, Li Yan, Wei Yong, et al. Coating optimization and SPR wedge probe with single mode fiber[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(10z): 57–63.
- [23] Fan Z B, Gong X Q, Lu D F, et al. Surface plasmon resonance imaging sensor based on hue algorithm [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32 (5): 402–409.
- [24] Moriaki W, Takehisa S, Keiei K. Physical Properties and Data of Optical Materials [M]. Boca Raton: Crc Pri Llc, 2007.