

# 基于 LabVIEW 搭建光纤 SPR 虚拟仿真设计平台<sup>①</sup>

汪余聪, 林钰城

(铭传大学电子工程学系, 桃园 333)

**摘要:** 光纤表面等离子体共振(Surface plasmon resonance, SPR)传感器是一种将光纤纤芯作为激发 SPR 效应基体的新型传感器. 本论文基于 LabVIEW 搭建虚拟仿真设计平台, 依照材料参数与组件结构做理论计算, 可即时改变尺寸及材料参数, 了解 SPR 组件参数对感测效果的影响, 找到最佳参数. 以 PMMA 塑料光纤虚拟仿真结果显示, 镀银薄膜 40nm 于光纤研磨表面上, 能够制造出一个较佳的光纤 SPR 传感器; 最后, 以不同折射率的待测物进行仿真计算, 得到共振波长与折射率关系.

**关键词:** 光纤; 表面等离子体共振(SPR); LabVIEW; 虚拟仿真设计平台

## To Build the Optic Fiber SPR Virtual Simulation Design Platform Based on LabVIEW

WANG Yu-Cong, LIN Yu-Cheng

(Department of Electronic Engineering, Ming Chuan University, Taoyuan 333, China)

**Abstract:** The surface plasmon resonance (SPR) based optical fiber sensor is a novel sensor, which takes optical fiber core as a substrate to excite SPR effect. This paper demonstrates a virtual simulation platform for design of optical fiber SPR devices on the basis of LabVIEW, and makes theoretical calculations according to material parameters and component architecture, which can change the size and material parameters in situ to understand the impact on SPR effect, and furthermore to find the optimum parameters. Finally, based on side-polished PMMA plastic optical fiber, the simulation shows that 40nm silver-plated thin film on the grinding surface results in a better performance of optic fiber SPR sensor. In terms of the optimum parameters of the sensor, the relationship between the resonance wavelength and the refractive index of sampling solution can be obtained.

**Key words:** optical fiber; surface plasmon resonance(SPR); LabVIEW; virtual simulation design platform

表面电浆共振(Surface plasmon resonance, SPR)传感器可以测量微量改变, 在生物、化学领域的应用相当广泛, 如:生物传感器、葡萄糖检测、金黄葡萄球菌检测等<sup>[1,2]</sup>. 近十年来有相当多的文献深入探讨 SPR 传感器, 但大多数对于传感器组件参数的制作只限于数学上的推导<sup>[3]</sup>, 较少有一个完整的虚拟仿真平台. 本文尝试搭建 LabVIEW 平台, 制作一个光纤 SPR 仿真设计软件, 在实际制作 SPR 传感器前先通过这个软件进行初步仿真计算, 输入不同参数可以分析当下 SPR 效果的优劣. 该软件可以初步指导 SPR 传感器之设计和制作.

## 1 基于LabVIEW仿真软件设计

### 1.1 光纤表面等离子体波共振及强度调制原理理论推导

依据光波导相关理论, Fresnel 公式和 SPR 理论为基础<sup>[4,5]</sup>, 首先运用转移矩阵(transfer matrix)的方法计算 p-polarized 入射光波导的反射系数, 光纤 SPR 传感器如图 1 之结构, 第一层波导在纤芯介质与金属镀膜的边界切向场与最外层金属镀膜与待测物之切向场可以用一个  $2 \times 2$  的特征矩阵(characteristics matrix)来关联. 定义这三层中任意之厚度为  $d_k$ , 折射率为  $n_k$ , 介电系数为  $\epsilon_k$ , 磁导率为  $\mu_k$ ,  $k$  取不同的值(1、2、3)分别对应

<sup>①</sup> 收稿时间:2015-08-20;收到修改稿时间:2015-11-30

不同层介质的参数.

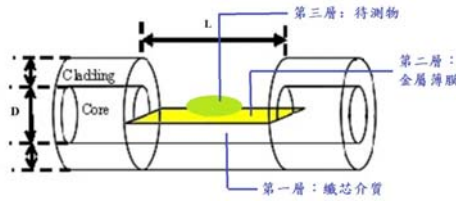


图 1 后面板部分程序

式(1)即为基于这种结构的特征矩阵(characteristic matrix), 可以通过该矩阵计算波导结构的反射率

$$M = \sum_{k=2}^{N-1} M_k \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$M_k = \begin{bmatrix} \cos \delta_k & -i \sin \frac{\delta_k}{\eta_k} \\ -i \eta_k \sin \delta_k & \cos \delta_k \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中  $\eta_k$  称为光学导纳(optically admittance),  $\delta_k$  称为相位因子(phase factor), 会因介电系数、厚度、入射角、波长的变化而改变. 它们的定义如下:

$$\eta_k = \frac{(\epsilon_k - n_1^2 \sin^2 \theta_1)^{\frac{1}{2}}}{\epsilon_k} \quad (3)$$

$$\delta_k = \frac{2\pi d_k}{\lambda} (\epsilon_k - n_1^2 \sin^2 \theta_1)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

由此可得 p-polarized 光之反射系数为:

$$r_p = \frac{(M_{11} + M_{12}\eta_k)\eta_1 - (M_{21} + M_{22}\eta_k)}{(M_{11} + M_{12}\eta_k)\eta_1 + (M_{21} + M_{22}\eta_k)} \quad (5)$$

多层结构之总反射率:

$$R_p = |r_p|^2 \quad (6)$$

如图 1 所示, 我们定义光在感测区范围内反射次数为 N, 感测长度为 L, 光纤的纤芯直径为 D,  $\theta$  为入射角, 由式(7)可算出反射次数 N.

$$N_{ref} = \frac{L}{D \tan \theta} \quad (7)$$

依据文献[6], 光纤出射端的光强可表示为

$$dp \propto \frac{n_1 \sin \theta}{(1 - n_1 \cos^2 \theta_i)^{\frac{3}{2}}} d\theta_i \quad (8)$$

所以归一化光强(normalized transmitted power)为:

$$P_{trans} = \frac{\int_{\theta_{cr}}^{\pi/2} R_p^{N_{ref}(\theta)} (n_1^2 \sin \theta \cos \theta) / (1 - n_1^2 \cos^2 \theta)^2 d\theta}{\int_{\theta_{cr}}^{\pi/2} (n_1^2 \sin \theta \cos \theta) / (1 - n_1^2 \cos^2 \theta)^2 d\theta} \quad (9)$$

### 1.2 通过 LabVIEW 制作光纤 SPR 仿真设计平台

根据理论推导建立之模型, 依照每一步骤公式的推导依序撰写相关程序并借助 MathCript 导入 LabVIEW, 制作一个仿真设计平台来呈现. 如图 2 为平台之开启界面, 共有起始波长、结束波长、间隔波长、临界角、镀膜材料、镀膜厚度、待测物折射率、元件长度以及光纤直径九个参数可供输入, 使用者根据想要调整的参数做输入就会输出相应的 SPR 图(x 轴为波长, y 轴为归一化光强(normalized transmitted power)), 以及发生共振的波长和相应的 SPR 效果百分比. 图 3 即为 LabVIEW 后面板的部分相关程序.

归一化光强( $p_{trans}$ )越小, 则 SPR 的曲线图会下降的越低, SPR 效果会越接近一百, 即 SPR 效果越佳. (SPR 效果= $(1-p_{trans}) \times 100\%$ )

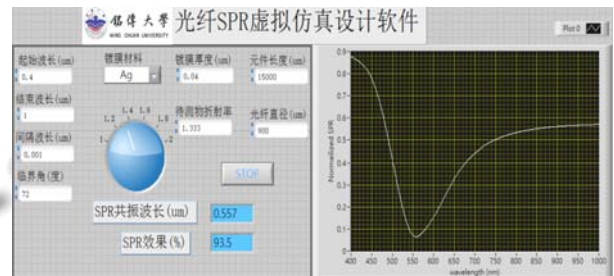


图 2 软件开启界面图

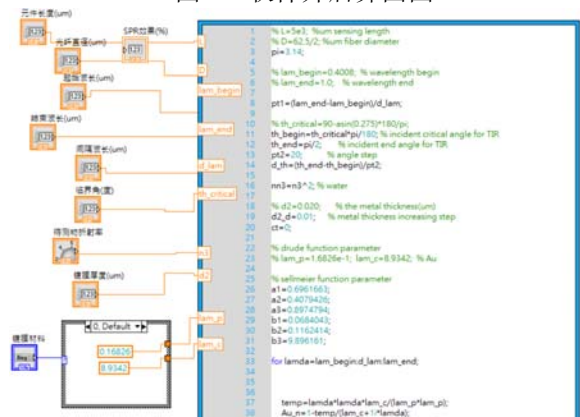


图 3 后面板部分程序

采用光纤纤芯材质 PMMA 的折射率( $n=1.4914$ )来撰写程序. 输入相应仿真参数: 起始波长  $0.4\mu\text{m}$ , 结束波长  $1.2\mu\text{m}$ , 间隔波长  $0.001\mu\text{m}$ , 临界角  $72^\circ$ , 镀膜材料选择银(Ag)、镀膜厚度  $0.04\mu\text{m}(40\text{nm})$ , 待测物折射率  $1.333$ (纯水), 元件长度  $15000\mu\text{m}$ , 光纤直径  $900\mu\text{m}$ . 按下 LabVIEW 执行按钮 run, 输出仿真 SPR 图如图 2, 并且得到共振波长在  $0.557\mu\text{m}$  处, 此时的 SPR 效果为  $93.5\%$ .

## 2 仿真结果与讨论

### 2.1 仿真计算塑料光纤镀银最佳厚度

通过这个仿真平台, 可以设定其中一个输入参数作为变量, 剩余的参数固定, 借由单变量的改变来找到 SPR 效果最佳或则相应共振波长时, 这个参数的值为何. 如图 4 控制其他参数不变, 只改变参数镀膜厚度. 通过仿真不同厚度的银膜, 来找到最佳 SPR 效果时的镀膜厚度. 首先输入区间为  $[10, 60](\text{nm})$ , 以  $10\text{nm}$  为间隔的仿真结果如下:

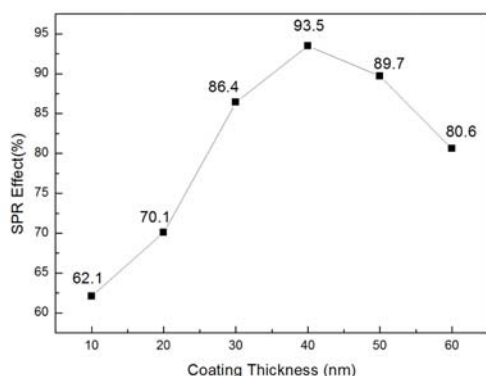


图 4 虚拟仿真镀银厚度与 SPR 效果关系图之一

如图 4 所示镀膜厚度在  $30\text{nm}$  到  $50\text{nm}$  之间 SPR 效果较佳, 于是选定这个区间  $[30, 50]$ , 因为已经到奈米级别, 如果以单个奈米为间隔来仿真, 实验操作上有难度, 精确度也达不到, 所以单位间隔为  $5\text{nm}$ , 分别取  $30\text{nm}$ ,  $35\text{nm}$ ,  $40\text{nm}$ ,  $45\text{nm}$ ,  $50\text{nm}$  作图如下:

从图中可以得知在银膜厚度为  $40\text{nm}$  时, SPR 效果达到最佳. 在进行塑料光纤银膜镀膜实验时, 将依照此结果, 以  $40\text{nm}$  厚度为基准进行镀膜作业.

### 2.2 仿真计算折射率对 SPR 共振波长之影响

尝试对不同溶度的甘油折射率, 先测量其折射率, 再仿真计算其分别的共振波长. 控制变量, 其他参数不变, 仅改变折射率之输入, 得到输出结果如下表:

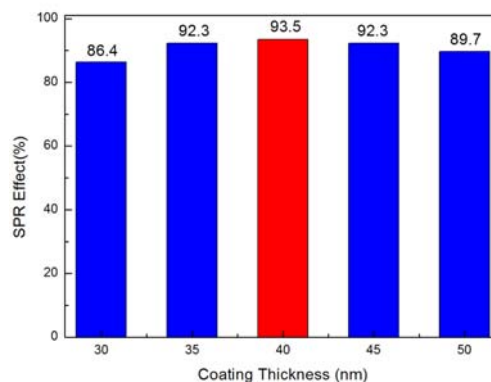


图 5 虚拟仿真镀银厚度与 SPR 效果关系图之二

表 1 甘油仿真数据表格

溶度	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%
折射率	1.339	1.349	1.358	1.367	1.376	1.386	1.395
波长 ( $\mu\text{m}$ )	0.580	0.619	0.669	0.728	0.805	0.928	NA

如表 1 所示, 溶度等于  $70\%$  的甘油虽然还有 SPR 效果以及共振波长, 但入射光的波长区间在  $0.4\mu\text{m}$  到  $1.0\mu\text{m}$  之间, 其共振波长大于  $1.0\mu\text{m}$ , 在此入射光下, 并不会发生共振, 故舍去. 将剩余数据作图:

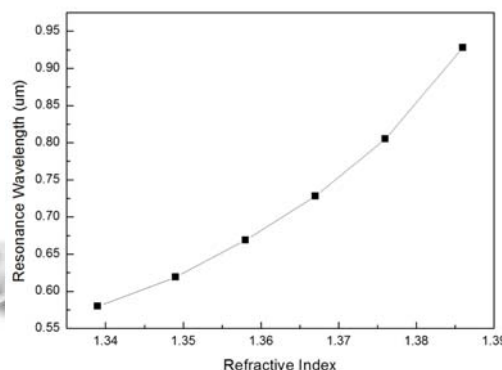


图 6 虚拟仿真折射率与共振波长关系图

由表 1, 图 6 可知, 随着甘油溶度递增, 相对应之折射率递增, 共振波长也逐渐增大.

## 3 结语

本文先通过数学推导, 再依照推导基于 LabVIEW 搭建光纤 SPR 仿真设计平台, 进行了塑料光纤镀银厚度以及不同折射率对共振波长的影响两个仿真计算, 得出塑料光纤银膜镀膜厚度为  $40\text{nm}$  时 SPR 效果最佳; 随着甘油溶度递增, 折射率递增, 共振波长也逐渐增大的虚拟仿真结论. 通过输入不同参数, 即可分析当

下 SPR 效果的优劣, 该软件可以初步指导 SPR 传感器之设计和制作.

#### 参考文献

- 1 Yong C, Hai M. Review of surface plasmon resonance and localized surface plasmon resonance sensor. *Photonic Sensors*, 2012, 2(1): 37-49.
- 2 Abdennour A, Matthew J. L, Quan C. New trends in instrumental design for surface plasmon resonance-based biosensors. *Biosensors and Bioelectronics*, 2011, 26: 1815-1824.
- 3 符运良,袁一方,陈抱雪.表面等离子共振(SPR)薄膜传感器的研究. *激光杂志*,2006,27(3):73-74.
- 4 Sharma AK, Gupta BD. Absorption-based fiber optic surface plasmon resonance sensor: A theoretical evaluation. *Sensors and Actuators B Chemical*, 2004, 100(3): 423-431.
- 5 Edy W, Cédric L, et al. Surface plasmon resonance-based biosensors: From the development of different SPR structures to novel surface functionalization strategies. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2011,15: 208-224.
- 6 Sushil K, Gaurav S, et al. Modelling of surface plasmon resonance sensor for detection of massconcentration of ethanol and methanol in a binary mixture. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 67: 190-196.