

## 两类典型光纤型 SPR 传感器的理论模型比较

蓝锦龙, 顾铮先, 唐 雄

(上海理工大学 理学院 光电功能薄膜实验室, 上海 200093)

**摘 要:** 针对基于 SPR 效应的两类典型光纤型传感器: 传统型包层腐蚀的镀金属多模光纤传感器、新型镀金属单模光纤光栅传感器, 指出其不同的 SPR 模型处理方法及传感特性。首先, 根据传统型 SPR 光纤传感器的结构特点, 利用平板 SPR 理论给出反射谱特性, 同时指出并证明薄膜光学理论在平板 SPR 结构中 与平板 SPR 理论的等价性。其次, 针对新型 SPR 光纤光栅传感器结构特点, 依据模式耦合思想, 结合 SPW 模式特征, 提出了光纤光栅 SPR 结构的理论处理方法, 得到了镀金膜三包层 LPFG 结构的透射谱。最后, 对基于 SPR 效应的两类典型光纤型传感器的传感特性进行了比较分析, 结果表明, 两类传感器对环境折射率均具有较高的分辨率, 但新型光纤光栅 SPR 传感器的分辨率高出传统 SPR 光纤传感器 3 个数量级。

**关键词:** 表面等离子共振; 光纤 SPR; 光纤光栅 SPR; 传感器; 分辨率

**中图分类号:** O484; O435 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0922001

## Comparison of theory model for two typical optical fiber sensors based on SPR

Lan Jinlong, Gu Zhengtian, Tang Xiong

(Laboratory of Photo-electric Functional Films, College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Aiming at two kinds of typical optical fiber sensor based on SPR effect, which are traditional multimode optical fiber sensor coated with metal film whose cladding is corrosion, and a novel single-mode optical fiber grating sensor coated with metal film, SPR theoretical model and processing method were presented. First of all, according to the structural characteristics of traditional fiber SPR sensor, using the theory of plate SPR effect, reflection spectra of this sensor were given. Meanwhile, it is pointed out and proved that thin film optical theory and theory of SPR are equivalent in the flat structure. Secondly, according to the structure characteristics of novel SPR fiber grating sensor based on mode coupled theory, combined with the feature of SPW mode, the theory processing method of SPR in fiber grating was put forward, the transmission spectra of triple-cladding LPFG coated with gold film were given. Finally, the comparative analysis on the sensing characteristic of two kinds of typical optical fiber

收稿日期: 2016-01-05; 修订日期: 2016-02-03

基金项目: 国家自然科学基金(60777035); 教育部科学技术研究重点项目(208040); 上海市教育委员会科研创新重点项目(11ZZ131); 上海市重点学科建设项目(S30502); 上海市研究生创新基金项目(JWCXSL1402); 沪江基金(B14004)

作者简介: 蓝锦龙(1990-), 男, 硕士生, 主要从事长周期光纤光栅传感理论及应用方面的研究。Email: jin\_long\_lan@163.com

导师简介: 顾铮先(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电工程与测量、光电功能薄膜、光纤传感器等方面的研究。

Email: zhengtiangu@163.com

sensor based on the SPR effect was carried out, and the results show that two kinds of structure have high resolution of environment refractive index, but the resolution novel optical fiber grating SPR sensor is higher 3 orders of magnitude than that of traditional fiber SPR sensor.

**Key words:** surface plasmon resonance; SPR of fiber; SPR of fiber grating; sensor; resolution

## 0 引言

1983 年, Liedberg 等<sup>[1]</sup>将表面等离子体共振 (Surface Plasmon Resonance, SPR) 用于免疫球蛋白与其抗原的反应中, 自此, SPR 应用于化学生物传感领域的研究越来越受到国内外学者的关注<sup>[2-4]</sup>。由于 SPR 的表面增强效应等性质, 使得 SPR 在越来越多的领域受到关注<sup>[5-6]</sup>。而近年来, 纳米技术的发展, 使得生成纳米量级的金属微粒成为可能, 在提升了 SPR 性能的同时也扩展了 SPR 的应用范围<sup>[7-8]</sup>。

光纤 SPR 传感器是 SPR 应用的一个重要拓展, 目前采用的理论解释主要是基于平板结构的 SPR 理论提出的<sup>[9]</sup>。曹振新等<sup>[10-11]</sup>运用该类理论得到的 SPR 谱线与镀银膜光纤 SPR 传感器的反射谱线能够很好地吻合。光纤光栅 SPR 是光纤 SPR 传感器的重要结构之一, He 等<sup>[12]</sup>运用耦合模理论对长周期光纤光栅 SPR 传感器进行了理论分析, 但文中只是将某个包层模当作表面等离子波 (Surface Plasmon Wave, SPW) 处理, 这是不合理的。Li 等<sup>[13]</sup>则基于平板波导模型给出了长周期光纤光栅 SPR 的理论处理方法。由于光纤光栅是一种圆柱形波导, 且涉及到模式间的耦合, 平板结构的 SPR 理论将不再适用。因此亟需提出一种新的 SPR 理论对 SPR 光纤光栅的特性进行研究。

文中从光纤 SPR 结构的理论模型出发, 分析该模型中的主要理论基础: 传统 SPR 理论, 并给出其反射谱特性。同时指出并证明薄膜光学理论与传统 SPR 理论处理该结构的等价性。进一步地, 根据模式耦合思想, 提出了处理光纤光栅 SPR 结构的理论模型, 给出了该结构的透射谱及其环境折射率响应特性, 并对光纤 SPR 与光纤光栅 SPR 的折射率传感特性进行了比较分析。

## 1 光纤 SPR 传感器理论模型分析

目前, 所报道的光纤 SPR 传感器理论所能解释的实验现象则是局限于一定实验条件的: 较大芯径

尺寸的光纤(即多模光纤), 同时需要将光纤的包层腐蚀掉<sup>[10,11,4-15]</sup>。参考文献[10]的实验中利用纤芯直径为 600 μm, 纤芯折射率  $n_1=1.458$ , 数值孔径  $NA=0.37$  的多模光纤。在光纤中<sup>[16]</sup>,  $NA=\sqrt{n_1^2-n_2^2}$ , 所以代入各项数值可以解得  $n_2=1.4103$ , 临界角  $\theta_c=\arcsin(n_2/n_1)=75.3^\circ$ , 即纤芯模在入射角为  $75.3^\circ\sim 90^\circ$  范围内都是可以存在的, 但各个纤芯模对应的入射角是不连续的。由于纤芯直径足够大, 多模光纤中可以存在足够多的纤芯模式, 而其中也就包含了与 SPW 波矢匹配的模式; 另一方面, 腐蚀掉包层使纤芯模式的倏逝波可以到达金属膜层与待测介质的界面处, 从而激发 SPR, 运用光谱仪即可在光纤的反射谱或透射谱中检测出 SPR 现象。该种光纤 SPR 结构与平板 SPR 结构棱镜模型在结构和机理上非常类似, 所以运用基于平板结构的传统 SPR 理论可以得到较好的解释<sup>[10,15]</sup>。

### 1.1 光纤 SPR 传感器理论基础

光纤 SPR 传感器的结构主要分为两类: 传输型及终端反射型。图 1 给出了终端反射型光纤 SPR 传感器结构的示意图。图中, 采用  $n_0, n_1$  和  $n_2$  表示纤芯、金属膜层和环境的折射率;  $\epsilon_0$  和  $\epsilon_2$  表示纤芯和环境的介电常数,  $\epsilon_1=\epsilon_{1r}+\epsilon_{1i}$  表示金属膜层的介电系数;  $d$  表示厚度;  $L$  表示金属膜层镀制在纤芯上的长度;  $D$  表示纤芯的直径。

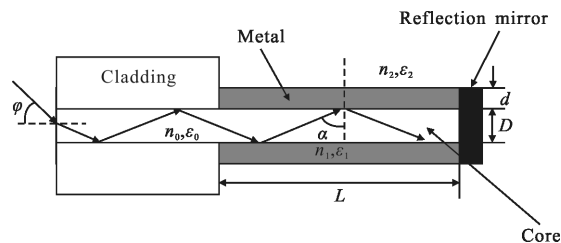


图 1 终端反射型光纤 SPR 结构示意图

Fig.1 Scheme diagram of terminal reflective optical fiber SPR sensor

该结构的反射公式为<sup>[17]</sup>:

$$R(d, n_0(\lambda), n_1(\lambda), n_2(\lambda)) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M R_p(\alpha_i, d, n_0(\lambda), n_1(\lambda), n_2(\lambda))^{N(L, D, \varphi)} I(\alpha_i) \quad (1)$$

式中： $M$  为多模光纤的纤芯模式数； $N(L, D, \varphi) = L/D \tan(\varphi)$  为光线在传感器中的反射次数， $I(\alpha) = (18\ 510 + 369.4\alpha - 1\ 071\alpha^2 + 133\alpha^3 - 4.754\alpha^4) / 103\ 760$  为传播模式密度分布函数， $R_p$  为两层界面时  $P$  光反射一次的反射率。如下所示：

$$R_p = |r_{sp}|^2 = \left| \frac{B_0}{A_0} \right|^2 = \left| \frac{r_{01} + r_{12} e^{-2k_{1z}d}}{1 + r_{01}r_{12}e^{-2k_{1z}d}} \right|^2 \quad (2)$$

其中，

$$r_{01} = \frac{\varepsilon_1 k_{0z} - \varepsilon_0 k_{1z}}{\varepsilon_1 k_{0z} + \varepsilon_0 k_{1z}}$$

$$r_{12} = \frac{\varepsilon_2 k_{1z} - \varepsilon_1 k_{2z}}{\varepsilon_2 k_{1z} + \varepsilon_1 k_{2z}}$$

公式(2)即为传统 SPR 理论所得的反射率公式。从公式(1)中可以看出，要求得图 1 所示结构的反射率，其主要还是要求解  $R_p$ 。由此，终端反射型光纤 SPR 传感器的理论基础最终归结于传统 SPR 理论。

图 2 为运用公式(1)得到的不同环境折射率下光纤 SPR 传感器的反射谱图。模拟所用参数参照参考文献[10]中的参数，图中反射率曲线与参考文献[10]中图 2 的理论曲线相符。从图中可以看出，当环境折射率发生微小改变时，光纤 SPR 结构的 SPR 峰的峰值及位置都将发生较大的变化。具体表现为，随着环境折射率的增大，SPR 谐振峰位置向长波长方向偏移，而峰值则随之减小。定义灵敏度为损耗峰位置及环境折射率相对变化率的比值即  $S_\lambda = \left| \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot \frac{n}{\Delta n} \right|$ ，计算可得该结构的灵敏度为  $8.96 \times 10^{-4}$ 。

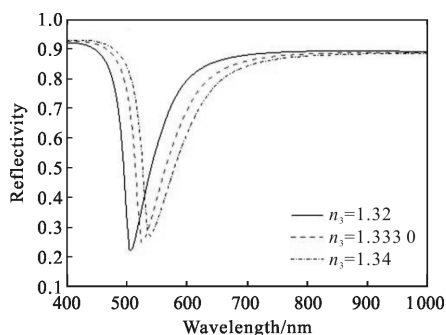


图 2 不同环境折射率下光纤 SPR 传感器反射谱

Fig.2 Reflectance spectra of optical fiber SPR sensor with different environment refractive index

### 1.2 传统 SPR 理论与薄膜光学理论的等价性

传统 SPR 理论根据金属与介质在界面处形成的 SPW 的性质，假设出 SPW 的磁场分布，进而利用

边界条件得到 SPR 的反射率公式。由薄膜光学理论可以知道，递推法中描述膜层特性的组合导纳同样也是根据薄膜与入射介质或基底介质中的电场分布，利用边界条件所得的。传统 SPR 理论中的关键参数衰减系数  $\alpha$  表达形式可以在递推法组合导纳中的位相厚度  $\delta$  中找到，而衰减系数和组合导纳均是描述膜层特性的重要参数。既然膜层的特性都是采用相同的数学表式描述的，所以利用传统 SPR 理论和递推法求解单层金属 SPR 结构在物理本质上是一致的，由此得到的物理结果也应是一致的。

递推法是利用单层膜组合导纳公式，由基底逐层向上得到多层膜系的组合导纳，进而得到多层膜系的反射率公式。

薄膜光学理论中，运用递推法得到单层膜反射率公式如下<sup>[18]</sup>：

$$R = |r_{d1}|^2 \quad (3)$$

$$r_{d1} = \frac{\eta - Y_1}{\eta + Y_1} \quad (4)$$

$$Y_1 = \frac{\eta_2 \cos \delta_1 + i \eta_1 \sin \delta_1}{\cos \delta_1 + i (\eta_2 / \eta_1) \sin \delta_1} \quad (5)$$

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} N_1 d \cos \theta_1 \quad (6)$$

对于具备 TM 波性质的 SPW，有：

$$\eta_0 = n_0 / \cos \theta_0$$

$$\eta_1 = n_1 / \cos \theta_1$$

$$\eta_2 = n_2 / \cos \theta_2$$

式中： $\theta_0, \theta_1, \theta_2$  为各膜层中光线的入射角。

根据公式(2)和公式(3)，可以得到传统 SPR 理论和递推法计算单层金属 SPR 结构的反射角谱图，如图 3 所示。从图中可以看出，运用两种方法计算得到的单层金属 SPR 结构的反射率曲线完全重合，进一步验证了传统 SPR 理论与薄膜光学理论的等价性。

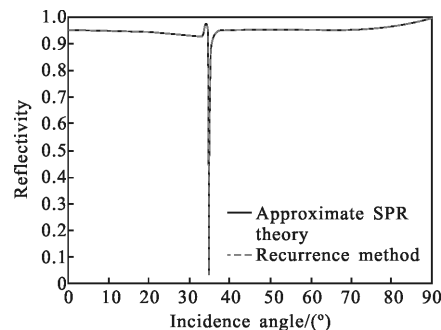


图 3 运用传统 SPR 近似理论与递推法得到的 SPR 角谱图

Fig.3 Angular spectrums of SPR of approximate SPR theory and recurrence method

## 2 光纤光栅 SPR 理论模型分析

### 2.1 光纤光栅 SPR 理论依据

对于在普通的光纤包层外镀制一层金属薄膜的结构,由于包层的作用,光纤纤芯模式无法到达金属层激发 SPR; 光纤包层中同样存在非常多的包层模式,而包层模式则可以到达金属层激发 SPR,但是由于正规光纤中纤芯模式和包层模式的正交性,两者之间无能量耦合,在光纤的透射谱中也就无法观察到 SPR 现象,这也是为何目前关于光纤 SPR 的实验中要将包层腐蚀掉的原因。

基于此,为使纤芯模式与包层模式能够相互耦合,从而使 SPR 也能与纤芯模发生能量耦合,可以将光栅引入至光纤中,此即为光纤光栅 SPR 结构。对于如图 4 所示的光纤光栅 SPR 结构,这是一种圆柱形波导结构,且涉及了模式间的耦合,所以平板结构的理论将不再适用,即基于平板结构的传统 SPR 理论和薄膜光学理论将不再适用。由于 SPW 存在于金属膜层与介质的界面处,因此可以将 SPW 作为圆柱型波导中的模式,基于此建立一种适用于圆柱型波导的新的 SPR 理论处理方法。

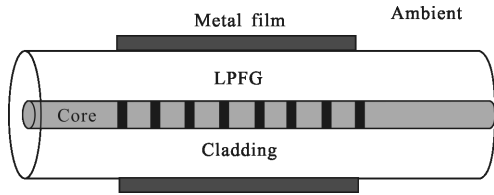


图 4 镀金属三包层 LPFG 结构示意图

Fig.4 Structure diagram of triple-clad LPFG coated with metal film

### 2.2 LPFG-SPR 结构的理论模型

依据 2.1 节中 SPR 在圆柱型波导结构内的理论处理思想,该节中采用在长周期光纤光栅(Long Period Fiber Grating, LPFG) 包层外直接镀制一层金膜的结构为例,构建镀金膜三包层(将金属膜层及环境也作为包层处理)LPFG 结构的 SPR 理论模型。

由于 SPW 也是存在于 LPFG 中的一种场分布,所以可以将其作为一种模式处理。光栅的作用可以使镀金属 LPFG 结构中的纤芯模式、包层模式和 SPW 模式发生相互耦合。而普通的镀膜 LPFG 耦合模方程并没有考虑 SPW 模,只涉及了纤芯模式和包

层模式的互耦合及自耦合。因此,对于基于 SPR 镀金属 LPFG 结构,需要运用耦合模理论重新建立含有 SPW 模式的耦合模方程。将一般的耦合模方程式作 LPFG 结构需要的一系列近似之后,得到 LPFG 中带有 SPW 模的耦合模方程,如下:

$$\frac{dA^{co}}{dz} = jk_{11-11}^{co-co} A^{co} + \frac{j}{2} \sum k_{1v-11}^{cl-co} A_v^{cl} \times \sum_{m=1}^{\infty} [A_m \exp(-j2\delta_{1v-11}^{cl-co} z)] + \frac{j}{2} k^{spw-co} A^{spw} \times \sum_{m=1}^{\infty} [A_m \exp(-j2\delta^{spw-co} z)] \quad (7a)$$

$$\sum_v \left\{ \frac{dA_v^{cl}}{dz} = \frac{j}{2} k_{1v-11}^{cl-co} A^{co} \times \sum_{m=1}^{\infty} [A_m \exp(-j2\delta_{1v-11}^{cl-co} z)] + jk_{1v}^{spw-cl} A^{spw} \exp(-j2\delta^{spw-cl} z) \right\} \quad (7b)$$

$$\frac{dA^{spw}}{dz} = \frac{j}{2} k^{spw-co} A^{co} \times \sum_{m=1}^{\infty} [A_m \exp(-j2\delta^{spw-co} z)] + j \sum k_{1v}^{cl-spw} k_v^{cl} \times \exp(-j2\delta^{spw-cl} z) + j^{spw-spw} A^{spw} \quad (7c)$$

其中,耦合系数

$$k_{11-11}^{co-co} = \frac{\omega \epsilon_0 n_1^2 \sigma(z)}{2} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{a_1} r dr (|E_r^{co}|^2 + |E_\phi^{co}|^2)$$

$$k_{1v-11}^{cl-co} = \frac{\omega \epsilon_0 n_1^2 \sigma(z)}{2} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{a_1} r dr (E_r^{cl} E_r^{co*} + E_r^{cl} E_\phi^{co*})$$

$$k^{co-spw} = \frac{\omega \epsilon_0 n_1^2 \sigma(z)}{2} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{a_1} r dr (E_r^{spw} E_r^{co*} + E_r^{spw} E_\phi^{co*})$$

$$k_{1v}^{cl-spw} = \frac{\omega \epsilon_0 n_1^2 \sigma(z)}{2} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{a_1} r dr (E_r^{cl} E_r^{spw*} + E_r^{cl} E_\phi^{spw*})$$

$$k^{spw-spw} = \frac{\omega \epsilon_0 n_1^2 \sigma(z)}{2} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{a_1} r dr (|E_r^{spw}|^2 + |E_\phi^{spw}|^2)$$

$k_{11-11}^{co-co}$  和  $k^{spw-spw}$  为纤芯模和 SPW 模的自耦合系数;  
 $k_{1v-11}^{cl-co}$ 、 $k^{co-spw}$  和  $k_{1v}^{cl-spw}$  为纤芯模与一阶  $v$  次包层模的互耦合系数、纤芯模与 SPW 模的互耦合系数和 SPW 模与一阶  $v$  次包层模的互耦合系数。

$\delta_{1v-11}^{cl-co}$  是纤芯模与一阶  $v$  次包层模之间的解调参量,定义如下:

$$\delta_{1v-11}^{cl-co} = \frac{1}{2} \left( \beta_{11}^{co} - \beta_{1v}^{cl} - \frac{2\pi}{\Lambda} \right) \quad (8)$$

$\delta^{spw-co}$  是纤芯模与 SPW 之间的解调参量,定义如下:

$$\delta^{spw-co} = \frac{1}{2} \left( \beta_{11}^{co} - \beta^{spw} - \frac{2\pi}{\Lambda} \right) \quad (9)$$

$\delta^{spw-cl}$  是包层模与 SPW 之间的解调参量,定义

如下:

$$\delta_{1v}^{spw-cl} = \frac{1}{2} (\beta_{1v}^{cl} - \beta^{spw}) \quad (10)$$

对于均匀 LPFG, 考虑金属镀层与介质产生 SPW 之后, 谐振条件变为:

$$\delta_{1v}^{cl-co} = \frac{1}{2} \left( \beta_{11}^{co} - \beta_{1v}^{cl} - \frac{2\pi}{\Lambda} \right) = 0$$

$$\delta_{1v}^{spw-co} = \frac{1}{2} \left( \beta_{11}^{co} - \beta^{spw} - \frac{2\pi}{\Lambda} \right) = 0$$

$$\delta_{1v}^{spw-cl} = \frac{1}{2} (\beta_{11}^{cl} - \beta^{spw}) = 0$$

整理得:

$$\begin{cases} \beta_{1v}^{cl} = \beta^{spw} \\ \beta_{11}^{co} - \delta_{1v}^{cl} = \frac{2\pi}{\Lambda} \\ \beta_{11}^{co} - \beta^{spw} = \frac{2\pi}{\Lambda} \end{cases} \quad (11)$$

求解耦合模方程即可得到基于 SPR 镀金属 LPFG 结构的透射谱。

若以光栅中点为 z 轴原点, LPFG 的边界条件如下:  $A^{co}(z=-L/2)=1, A_v^{cl}(z=-L/2)=0, A^{spw}(z=-L/2)=0$ 。

即在光栅输入端, 纤芯模振幅为 1, 而各次包层模和 SPW 模的振幅均为 0。求解耦合模方程(2-2)可得波长为  $\lambda$  的光经过长度为  $L$  的光栅后纤芯模、各次包层模和 SPW 模的振幅  $A^{co}(z=L/2), A_v^{cl}(z=L/2)$  和  $A^{spw}(z=L/2)$ , 则 LPFG 的透过率可以被定义为<sup>[19]</sup>:

$$T = \left| \frac{A^{co}(z=L/2)}{A^{co}(z=-L/2)} \right|^2$$

SPW 模的能量可以定义为:

$$I = |A^{spw}(z=L/2)|^2$$

以  $a_1, a_2$  和  $a_3$  分别表示纤芯、包层和金属膜层的半径,  $h_3 = a_3 - a_2$  表示金属膜层厚度,  $n_1, n_2, n_3$  和  $n_4$  分别表示纤芯、包层、金属膜层和环境折射率。模拟计算时采用的光纤结构参数如下:  $n_1 = 1.4681, n_2 = 1.4628, n_3 = 0.559 + 9.81i (\lambda = 1550 \text{ nm}), a_1 = 4.15 \mu\text{m}, a_2 = 62.5 \mu\text{m}, h_3 = 50 \text{ nm}$ ; 光栅的结构参数如下:  $\sigma = 4 \times 10^{-4}, L = 4 \text{ cm}, \Lambda = 450 \mu\text{m}$ , 其中  $\sigma$  表示光纤纤芯的平均折变量,  $L$  表示光栅长度,  $\Lambda$  表示纤芯折射率调制周期。

根据上述 LPFG-SPR 结构内含有 SPW 的耦合模方程, 求解该耦合模方程可以得到 LPFG-SPR 结构的透射谱。图 5 给出了镀金膜三包层 LPFG 结构纤芯的透射谱及 SPW 能量谱, 图中实线表示的是纤

芯模与包层模和 SPW 作用后纤芯的透射谱, 虚线表示的是 SPW 模与包层模和纤芯模作用后的反射谱。从图中实线可以看出, 长波长段的小衰减峰位置与 SPW 模能量峰相对应, 由此认为该衰减峰即为 SPR 峰。通过计算相位匹配条件, 可以知道, 实线短波长段的衰减峰对应的是纤芯模与包层模耦合作用后得到的衰减峰。

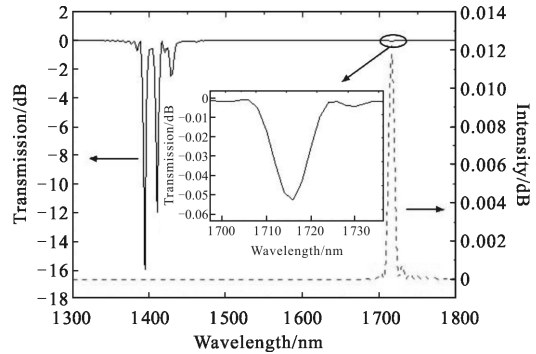


图 5 镀金膜三包层 LPFG 结构纤芯透射谱及 SPW 反射谱  
Fig.5 Transmission and SPW reflectance spectrums of triple-cladding LPFG coated with metal film

### 3 光纤 SPR 与光纤光栅 SPR 结构传感特性比较

图 6 给出了不同环境折射率下镀金膜三包层 LPFG 的透射谱图。插图中给出的是 SPR 峰的峰值及位置随环境折射率的变化情况, 从图中可以看出, SPR 峰处于 1835 nm 附近, 当环境折射率发生微小变化(0.000 01)时, SPR 峰的位置偏移明显, 偏移量达到 2 nm, 即 SPR 峰对环境折射率响应度非常高。这与平板结构的 SPR 和光纤 SPR 峰对环境折射率灵敏的特点是一致的。

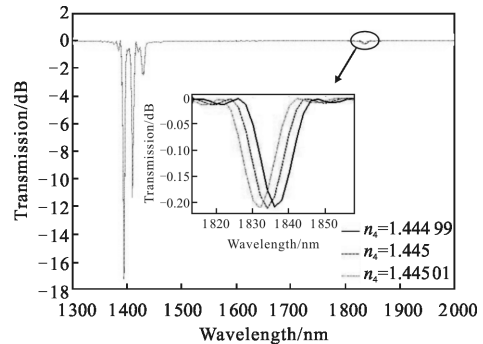


图 6 不同环境折射率下镀金膜三包层 LPFG 透射谱  
Fig.6 Transmission spectrums of triple-clad LPFG coated with metal film when the environment reflection index is different

对于采用衰减峰位置偏移来描述灵敏度的传感器, 基于 SPR 镀金属三包层 LPFG 传感器将具有非常高的灵敏度。图 6 中峰值位置及环境折射率相对变化率的比值即灵敏度可达 157.6。与灵敏度对应的分辨率运用公式  $\delta_\lambda = S_\lambda^{-1} n_4 \Delta\lambda / \lambda$ , 对于常用的光谱检测仪器, 谐振波长测量精度  $\Delta\lambda$  取 0.01 nm。计算得到, 分辨率高达  $5 \times 10^{-8}$ , 与 RONOT-TRIOLI C. 等报道的分辨率为  $8 \times 10^{-5}$  的镀金膜光纤 SPR 环境折射率传感器相比<sup>[20]</sup>, 两者均具有较高的分辨率, 但基于 SPR 镀金膜三包层 LPFG 传感器的分辨率要高出 3 个数量级。表明基于 SPR 的镀金属膜 LPFG 结构非常适合用作高灵敏度传感器, 检测环境折射率的微小变化。

#### 4 结 论

从光纤 SPR 结构的理论模型出发, 指出光纤 SPR 传感器及光纤光栅 SPR 传感器的理论模型的处理方法异同, 证实了传统平板 SPR 理论用于光纤 SPR 传感器的合理性及正确性, 同时说明了薄膜光学理论与传统 SPR 理论的等价性; 依据模式耦合思想, 提出了处理光纤光栅 SPR 传感器的一种新的理论模型, 成功获得了具有 SPR 谐振峰的透射谱, 为设计新型高灵敏光纤光栅 SPR 传感器提供了理论基础; 光纤 SPR 与光纤光栅 SPR 理论模型比较表明, 两种结构的环境折射率均具有较高的分辨率, 但 LPFG-SPR 传感器的分辨率较光纤 SPR 高出 3 个数量级。

#### 参 考 文 献:

- [1] Lieberg B, Nylander C, Lundstrom I. Surface plasmon resonance for gas detection and biosensing [J]. *Sensors and Actuators*, 1983, 4: 299-304.
- [2] He Hao, Zhang Tao, Yao Jia, et al. Surface plasmon resonance sensor coated with porous MIPs for microcystin-LR detection [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(3): 723-728. (in Chinese)  
何皓, 张涛, 姚佳, 等. 多孔分子印迹膜修饰的表面等离子体共振微囊藻毒素 LR 检测传感器 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(3): 723-728.
- [3] Mu Haiwei, Duan Yubo, Zhang Kun, et al. Experimental study of oil and water hold-up sensor based on surface plasmon resonance technique [J]. *Optical Instruments*, 2012, 34(2): 80-84. (in Chinese)  
牟海维, 段玉波, 张坤, 等. 基于表面等离子体共振技术油水持率传感器的实验研究 [J]. *光学仪器*, 2012, 34(2): 80-84.
- [4] Fu Yunliang, Lin Hong. Surface plasmon resonance biochemical analysis instrument and its application in the samples concentration detection [J]. *Optical Instruments*, 2013, 35(1): 30-33. (in Chinese)  
符运良, 林红. SPR 生化分析仪及其在样品检测中的应用 [J]. *光学仪器*, 2013, 35(1): 30-33.
- [5] Chen Yongyi, Qin Li, Tong Cunzhu, et al. Dual grating based on surface plasmons for optical beam shaping [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(6): 1462-1468. (in Chinese)  
陈泳屹, 秦莉, 佟存住, 等. 用于光束整形的表面等离子体双光栅结构 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(6): 1462-1468.
- [6] Li Zhiquan, Niu Liyong, Yan Lei, et al. Propagation properties of a dielectric-loaded hybrid surface plasmonic waveguide [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 677-681. (in Chinese)  
李志全, 牛力勇, 严蕾, 等. 介质加载型混合表面等离子体波导的损耗特性 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(2): 677-681.
- [7] Zheng Yan, Sun Yufeng, Xing Liyun, 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. (in Chinese)  
郑妍, 孙玉峰, 邢砾云, 等. 基于表面等离子体共振原理的小型化实时在线海上溢油监测系统 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(11): 3446-3453.
- [8] Wang Erwei, Yu Weixing, Wang Cheng, et al. Nanogap measurement by using surface plasmon resonance sensor [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 259-266. (in Chinese)  
王二伟, 鱼卫星, 王成, 等. 用表面等离子体共振传感器检测纳米间距 [J]. *中国光学*, 2013, 6(2): 259-266.
- [9] Berger C E H, Baumer T A M, Kooyman R P H, et al. Surface plasmon resonance multi-sensing [J]. *Anal Chem*, 1998, 70: 703-706.
- [10] Cao Zhenxin, Wu Lenan, Liang Dakai. Gold and silver film optical fiber SPR sensors [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.
- [11] Cao Zhenxin, Wu Lenan, Wang Xing, et al. Theoretical study on optical fiber surface plasmon resonance sensors [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2004, 34(5): 582-584. (in Chinese)

- 曹振新, 吴乐南, 王兴, 等. 光纤表面等离子体波传感器的理论研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2004, 34(5): 582-584.
- [12] He Y J, Lo Y L, Huang J F. Optical-fiber surface-plasmon-resonance sensor employing long-period fiber gratings in multiplexing [J]. *J Opt Soc Am B*, 2006, 23: 801-811.
- [13] Li D H, Zhu R, Wu P, et al. An implantable fiber-optic surface plasmon resonance glucose sensor based on LPFG [C]//SPIE, 2012, 82180: 1-6.
- [14] Wang Wusong, Zhang Liwei, Zhang Yewen. Surface plasmon waveguide and its applications [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 329-339. (in Chinese)  
王五松, 张利伟, 张冶文. 表面等离子体波导及应用 [J]. 中国光学, 2015, 8(3): 329-339.
- [15] Mishra S K, Tripathi S N, Choudhary V, et al. SPR based fibre optic ammonia gas sensor utilizing nanocomposite film of PMMA/reduced graphene oxide prepared by in situ polymerization [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014, 199: 190-200.
- [16] Zhang Weigang. Principle and Application of Optical Fiber [M]. Tianjin: Nankai University Press, 2008: 65. (in Chinese)
- 张伟刚. 光纤光学原理及应用 [M]. 天津: 南开大学出版社, 2008, 65.
- [17] Yang Jun, Zhan Lei, Wu Song, et al. Theoretical study on the light-propagation property of an optical fiber surface plasmon resonance sensor [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2010, 23(10): 1421-1425. (in Chinese)  
杨军, 战磊, 吴松, 等. 光纤表面等离子体共振传感器中光传播特性的理论分析 [J]. 传感技术学报, 2010, 23(10): 1421-1425.
- [18] Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu, et al. Modern Technology of Optical Thin Film [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. (in Chinese)  
唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
- [19] Erdogan T. Cladding-mode resonance in short-and-long-period fiber grating filters [J]. *J Opt Soc Am A*, 1997, 14(8): 1760-1773.
- [20] Ronot-Trioli C, Trouillet A, Veillas C, et al. Monochromatic excitation of surface plasmon resonance in an optical-fibre refractive-index sensor [J]. *Sensors and Actuators A*, 1996, 54: 589-593.