

基于双峰谐振效应的镀金属长周期光纤光栅 液体浓度传感器

顾铮天¹ 张江涛¹

(上海理工大学理学院, 上海 200093)

摘要 利用长周期光纤光栅(LPG)中的双峰谐振效应,结合表面等离子体共振(SPR)传感器的高灵敏度,提出了一种新型镀金属光纤光栅液体浓度传感器。采用双包层结构模型和耦合模理论,分析了镀金属长周期光纤光栅双峰效应的谐振特性,环境折射率的传感特性以及金属膜厚对双峰 LPG 灵敏度的影响。实验上制作了具有双峰效应的镀银膜长周期光纤光栅,并进行了 NaCl 盐溶液浓度的监测实验。结果表明,随着盐溶液浓度的增大,双峰谐振峰相互远离,各自向短波和长波方向偏移。选择银膜厚为 103 nm 的光纤光栅传感器,对溶液折射率分辨率可达 1.8×10^{-5} 。进一步通过与基于双峰效应的无镀膜光纤光栅和普通单峰光纤光栅的盐溶液传感实验的比较,表明基于双峰效应镀金属长周期光纤光栅传感器对溶液浓度的监测灵敏度明显高于前两者。

关键词 光纤光学;双峰谐振效应;镀金属长周期光纤光栅;液体浓度传感器

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0305003

Metal-Coated Long-Period Fiber Grating Liquid Sensor Based on Dual-Peak Resonance

Gu Zhengtian¹ Zhang Jiangtao¹

(College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract A novel metal-coated long period fiber grating (LPG) liquid concentration sensor is presented, which is based on dual-peak resonance combined with high sensitivity of surface plasmon resonance (SPR). On the basis of double-clad structural model and coupled-mode theory of LPG, the dual-peak resonant characteristics and refractive index sensing properties of metal-coated LPG are analyzed, and the influence of metal film thickness on sensitivity of dual-peak based LPG is discussed. Experimentally, the dual-peak resonance-based LPG with silver film coating has been fabricated, and the salt solution concentration monitoring test was performed. The results show that dual resonant peaks are far away from each other, and shift in opposite directions with increase of salt solution concentrations. The resolution of liquid refractive index is available to 1.8×10^{-5} for a LPG with silver film thickness of 103 nm. Furthermore, compared with the dual-peak based non-coated LPG and general single peak based LPG, the metal-coated LPG based on dual-peak resonance has higher refractive index sensitivity.

Key words fiber optics; dual-peak resonance; metal-coated long-period fiber grating; liquid sensor

OCIS codes 050.2770; 060.2370; 060.2430; 160.6060; 310.1860

1 引言

长周期光纤光栅(LPG)是光纤纤芯折射率沿轴向受到周期性调制而形成的^[1],相比光纤布拉格光栅(FBG)有较长的周期,一般在几十至几百微米,其光谱移动比短周期光纤光栅传感器高一个数量

级,对环境折射率的微小变化($10^{-4} \sim 10^{-6}$)非常敏感,非常适用于化学量的传感测量^[2]。据此,国内外研究人员对 LPG 在液体、气体、湿度以及 pH 值的传感应用方面,开展了广泛而深入的研究,取得了一定的成果^[3~7]。

收稿日期: 2010-06-07; **收到修改稿日期**: 2010-07-13

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)、上海市教委科研创新重点项目(11ZZ131)和上海市重点学科建设(S30502)资助课题。

作者简介: 顾铮天(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事光电功能薄膜、光纤光栅及光化学传感器等方面的研究。

E-mail: zhengtiangu@163.com

当光栅周期较短(约 $100 \mu\text{m}$)时,某些次数较高的包层模式将对应于两个谐振峰,双峰在外界折射率变化时呈现出相反的波长漂移特性,即各自分别向短波及长波方向偏移。X. W. Shu 等^[8,9]发现并利用这一特性制作了一种高灵敏度液体浓度传感器,其灵敏度比利用单个高次模损耗峰的方案高出一个数量级。顾铮先等^[10]则进一步研究了镀膜 LPFG 双峰谐振效应,并基于此效应提出了双峰谐振传感器模型,研究表明此种传感器具有很高的灵敏度,对折射率的分辨率可达 10^{-7} 数量级。

近年来,通过在 LPFG 包层上镀一层金属膜用来改变光纤光栅的传输特性,引起了科学家的关注。K. Kalli 等^[11]在聚合物光纤内写入布拉格光栅,且在包层上镀金属 Pd/Cu 薄膜,采用电热效应进行波长调谐,获得了 2 nm 的波长漂移。G. Nemova 和 Y. J. He^[12,13]利用镀金属 FBG 和 LPFG 中的表面等离子波共振(SPR)效应对表面待测介质组分的微小变化响应灵敏的特性,从理论上提出了镀金属膜光纤光栅的传感原理,可适用于介质溶液中的微量生物和化学活性物质的定量测定。可以设想,如果将双峰谐振效应应用在镀金属膜长周期光纤光栅结构中,则可以综合利用双峰及 SPR 效应对外界环境(如溶液)折射率灵敏响应的优势,构建新型结构的光纤光栅液体浓度传感器,但有关这方面的研究至

今未见报道。

本文首先利用耦合模理论分析基于双峰效应镀金属膜 LPFG 的谐振特性,给出不同环境折射率下具有双谐振峰的高次模透射谱的变化曲线,并讨论金属膜厚对该结构 LPFG 液体浓度传感器灵敏度的影响。实验上采用离子溅射法在 LPFG 上镀制银膜,利用镀银膜 LPFG 中的双谐振峰间隔随液体浓度的变化进行传感实验研究。通过选择两种不同银膜厚度的 LPFG 对不同盐溶液浓度进行监测,获得了灵敏度的不同响应。同时进一步与不镀金属膜的双峰 LPFG 传感器和普通 LPFG 传感器的灵敏度进行比较,证实这种新型结构的液体浓度传感器具有更高的灵敏度。上述分析研究,可为这种新型传感器的实用化提供可靠的理论支持和实验依据。

2 双峰谐振镀金属膜 LPFG 理论

2.1 长周期光纤光栅耦合模理论

图 1 为具有两包层结构的镀金属薄膜 LPFG 的示意图。其中芯层折射率 n_1 ,半径为 a_1 ;内包层折射率为 n_2 ,半径为 a_2 ;金属薄膜(外包层)折射率 $N_3 = n_3 + ik_3$,半径为 a_3 ;厚度为 $h_3 = a_3 - a_2$;周围环境折射率为 n_4 ;光栅区域的平均折射率改变量为 σ ,数量级为 10^{-4} 。

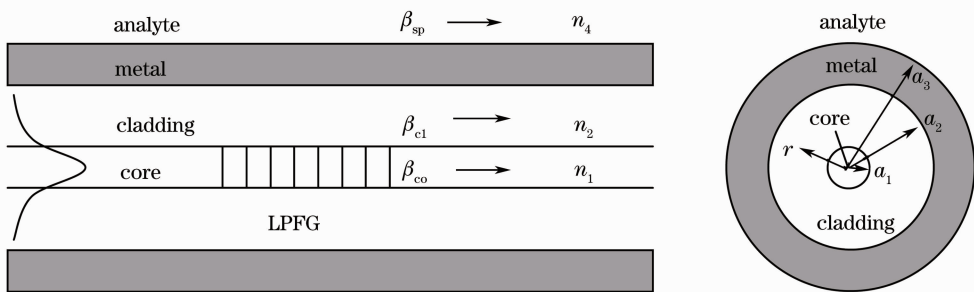


图 1 两包层长周期光纤光栅结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of a double-clad long-period fiber grating (LPFG)

对于单模长周期光纤光栅,根据模式耦合理论,前向传播的纤芯导模与同向传播的一阶包层模式之间的耦合模方程^[14]为

$$\frac{dA^{\text{co}}}{dz} = ik_{11}^{\text{co-co}} A^{\text{co}} + \frac{i}{2} \sum_{\nu} k_{1\nu}^{\text{cl-co}} A_{\nu}^{\text{cl}} \times \sum_{m=1}^{+\infty} [A_m \exp(-i2\delta_{1\nu}^{\text{cl-co}} z)], \quad (1)$$

$$\sum_{\nu} \left\{ \frac{dA_{\nu}^{\text{cl}}}{dz} = ik_{1\nu}^{\text{cl-co}} A^{\text{co}} \times \sum_{m=1}^{+\infty} [A_m \exp(-i2\delta_{1\nu}^{\text{cl-co}} z)] \right\}, \quad (2)$$

式中 A^{co} 是纤芯导模的正 z 向振幅, A_{ν}^{cl} 是一阶 ν 次包层模的正 z 向振幅。 $k_{11}^{\text{co-co}}$ 和 $k_{1\nu}^{\text{cl-co}}$ 分别为纤芯模的自耦合常数和纤芯模与一阶 ν 次包层模之间的互耦合常数。耦合常数 $k_{1\nu}^{\text{cl-co}}$ 决定了长周期光纤光栅中纤芯导模与包层模式之间耦合的强弱。 $\delta_{1\nu}^{\text{cl-co}}$ 是纤芯导模与一阶 ν 次包层模式间的解调参量,定义为

$$\delta_{1\nu}^{\text{cl-co}} = \frac{1}{2} \left(\beta_{11}^{\text{co}} - \beta_{1\nu}^{\text{cl}} - \frac{2\pi}{\Lambda} \right), \quad (3)$$

式中 Λ 为光栅周期, β_{11}^{co} 和 $\beta_{1\nu}^{\text{cl}}$ 分别为纤芯导模和一阶包层模的传播常数, $\delta_{1\nu}^{\text{cl-co}} = 0$, 即满足长周期光纤

光栅包层模耦合的相位匹配条件

$$n_{\text{eff,co}}(\lambda) - n_{\text{eff,cl}}^{\nu}(\lambda) = \frac{\lambda}{\Lambda}, \quad \nu = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

式中 $n_{\text{eff,co}}(\lambda)$ 为前向传输导模在波长 λ 处的有效折射率, 可由纤芯模式的特征方程^[15] 求得; $n_{\text{eff,cl}}^{\nu}(\lambda)$ 为 1 阶 ν 次包层模式在波长 λ 处的有效折射率, 由包层模特征方程得到^[16]。

由(4)式相位匹配条件可知, 导模和包层模的有效折射率都是波长的函数, 满足上述等式的波长 λ 为 1 阶 ν 次谐波中心波长, 简称谐振波长。不同的包层模谐振波长不同。包层模式序数越高, 与芯模产生谐振耦合所需的光栅周期越小^[14], 当包层模式序数较高时, 将会出现 2 个谐振波长均满足(4)式表达的相位匹配条件, 即发生双峰谐振效应。

若以光栅中点为 z 轴原点, 长周期光纤光栅的边界条件为

$$A^{\text{co}}(z = -L/2) = 1, \quad A_{\nu}^{\text{cl}}(z = -L/2) = 0, \quad (5)$$

式中 L 为光栅长度, 长周期光纤光栅的透射率定义为

$$T = A^{\text{co}}(L/2)/A^{\text{co}}(-L/2). \quad (6)$$

2.2 双峰镀金属长周期光纤光栅特性

2.2.1 双峰谐振效应

理论模拟所用光纤参数和光栅参数为 $a_1 = 4.15 \mu\text{m}$, $a_2 = 62.5 \mu\text{m}$, 金属膜厚 $h_3 = 100 \text{ nm}$; $n_1 = 1.4681$, $n_2 = 1.4628$, 金属复折射率 $N_3 = 1.58 + 5i$, $n_4 = 1.57$, 纤芯平均折射率的改变量为 4×10^{-4} , 光栅长度 $L = 1.0 \text{ cm}$ 。

双峰谐振波长, 可据(4)式定义 $\Delta n_{\text{eff}} = n_{\text{eff,co}}(\lambda) - n_{\text{eff,cl}}^{\nu}(\lambda) - \lambda/\Lambda$, 由满足 $\Delta n_{\text{eff}}(\lambda) = 0$ 的根确定。金属镀膜 LPFG 光栅周期与 21~25 次包层模式的谐振波长之间的关系, 如图 2 所示。图中的光波长根据宽带光源和光谱仪的光谱范围确定为 900~1700 nm。由图可知, 对于图 2 中 21~25 次包层模式, 只需选择合适

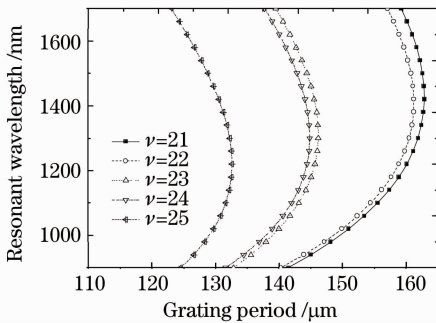


图 2 高次包层模谐振波长与周期关系图

Fig. 2 Dependence of resonant wavelength on grating period for higher cladding modes

的周期即可产生双峰谐振现象。图 3 是光栅周期为 $143 \mu\text{m}$ 时几个较高阶包层模对应的 Δn_{eff} 曲线。可以看出, 只有 $\nu = 23, 24$ 时才存在双谐振波长。

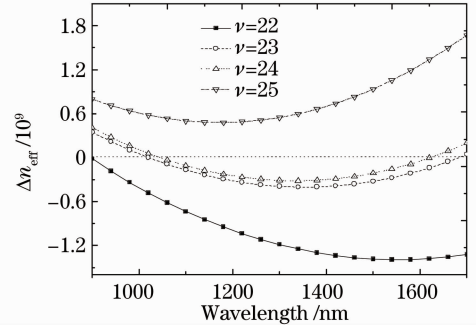


图 3 Δn_{eff} 与波长的关系曲线

Fig. 3 Plot of Δn_{eff} as a function of wavelength

2.2.2 环境折射率传感特性

LPFG 处于溶液环境中时, 溶液浓度的变化将带来环境折射率的变化。根据 LPFG 耦合理论, 环境折射率的变化会改变包层模的传播常数, 进而引起 LPFG 透射谱特性即传输特性的变化。而靠近金属薄膜与介质(液体)界面的介质层性能的任何微小变化, 必定会影响界面处等离子体激元的激发, 使透射谱中的衰减峰发生明显偏移。当镀金属 LPFG 中的高次模出现双峰现象时, 则相应的两个谐振峰的位置将随着环境折射率的变化向相反方向移动。

图 4, 5 为 $\text{HE}_{1,12}$ 模式在不同环境折射率下的光栅周期与谐振波长关系图以及透射谱。从图中可以看出, 随着环境折射率的增加, 双谐振峰彼此相互远离, 向两个相反方向(短波和长波)偏移。同时, 环境折射率对透射谱中谐振峰的高度也有一定的影响。表 1 给出了三种环境折射率下的双谐振波长及其间距数值。

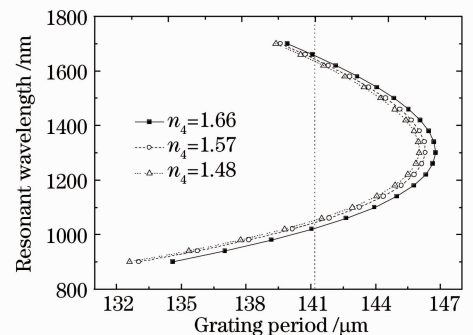


图 4 $\text{HE}_{1,12}$ 模式在不同环境折射率下的周期与谐振波长关系图

Fig. 4 Dependence of $\text{HE}_{1,12}$ resonant wavelength on period under different surrounding refractive indices

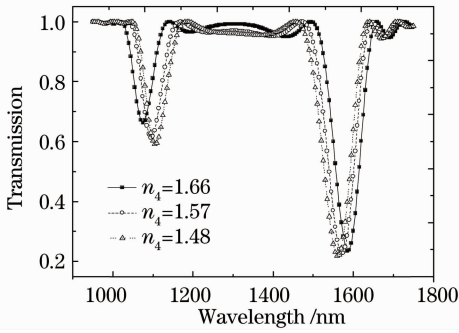


图 5 HE_{1,12} 模在不同环境折射率下的透射谱图

Fig. 5 Transmission spectra of the mode HE_{1,12} under different surrounding refractive indices

表 1 不同环境折射率时双峰位置及间距

Table 1 Position and interval of dual peaks under different surrounding refractive indices

Surrounding refractive index	λ_1 /nm	λ_2 /nm	$\Delta\lambda$ /nm
1.48	1102.57	1561.59	459.02
1.57	1092.20	1571.99	479.79
1.66	1070.38	1586.84	496.46

2.2.3 金属膜厚度对 LPFG 灵敏度的影响

定义双峰 LPFG 液体浓度传感器灵敏度 S 为双谐振峰中心波长的间距变化率与液体浓度折射率变化率的比值。显然它与金属膜厚度以及光栅参数等密切相关,通过优化选择光栅参数和金属膜厚,可以设计高灵敏度的液体浓度传感器。

图 6 给出了不同的金属膜厚和光栅周期在给定的光栅结构参数($\sigma=4 \times 10^{-4}$, $L=3$ cm)下,镀金属双峰 LPFG 对应的灵敏度 S 。图 7 给出的是此条件下灵敏度 $S=5$ 的等高线图。

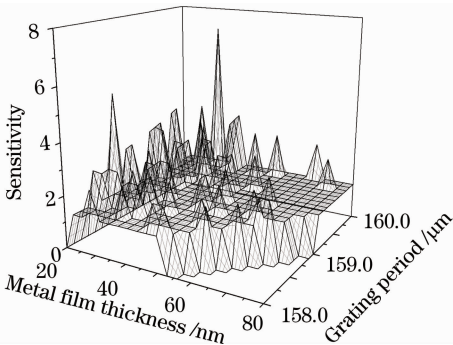


图 6 灵敏度 S 随金属膜厚的变化关系

Fig. 6 Dependence of S on metal film thickness

图 6 中金属厚度 h_3 取值从 20~80 nm,光栅周期 Λ 范围为 158~160 μm 。可以看出对于不同的(h_3, Λ)组合,所能达到的灵敏度 S 各不相同,在某些区域存在着较高的灵敏度。图 6 中的空白处的 S

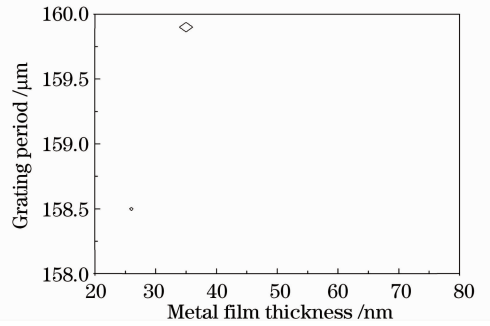


图 7 LPFG 传感器灵敏度 $S=5$ 的等高线

Fig. 7 Contour line of LPFG sensor sensitivity $S=5$ 值等于 0,表明对应于空白区域的金属厚度和光栅周期参数组合,在给定的光栅参数 σ 及 L 的情况下不存在双谐振峰,设计双峰传感器时需要避开这些区域。取 $h_3=35$ nm, $\Lambda=159.9$ μm 时,灵敏度最高, $S=7.22$ 。由此可知,要得到对外界环境折射率的变化响应灵敏的双峰 LPFG 传感器,镀制适当膜厚的金属薄膜,并对相关的光纤光栅参数进行优化设计是十分必要的。

3 双峰谐振镀金属膜 LPFG 液体浓度传感实验

3.1 双峰长周期光纤光栅刻写

实验中采用 KrF 准分子激光器,型号为 Braggstar industrial-200。工作波长为 248 nm,半峰全宽为 3 mm \times 6 mm,单脉冲能量为 16 mJ,最大频率为 200 Hz。使用 SMF-28 光纤刻制光栅。为提高普通光纤的光敏性,在室温下载氢一个月,载氢气压为 120 atm(1 atm=1.013 \times 10⁵ Pa)。将载氢光纤除去涂覆层的部分固定在移动平台上,采用逐点写入法制作光纤光栅。精密移动平台由计算机控制,通过预先设定的步长和移动时间间隔,来控制光栅周期和曝光时间。光纤的一端连接光源,另一端连接光谱仪。不断扫描,对透射谱进行实时观测。图 8 为观测记录的实

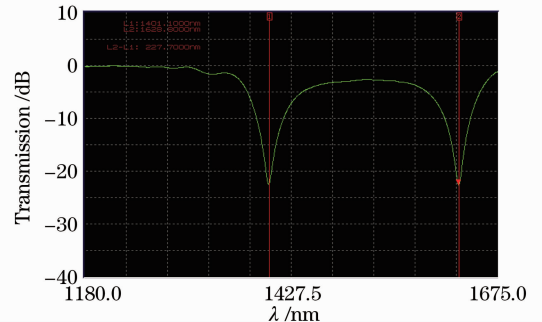


图 8 双峰 LPFG 透射谱

Fig. 8 Dual-peal LPFG transmission spectrum

验刻写的周期为 179 μm 的 LPFG 双峰谐振透射谱。

3.2 光纤光栅包层银膜镀制

实验中所用镀膜设备为德国 BESTEC GmbH 公司定制的 HV-Sputtering System-233 直流溅射镀膜机。镀膜机内部有特制的旋转装置,供在光纤上均匀镀制金属膜。膜层厚度用石英晶振法监控。靶材采用银靶,纯度为 IC-Ag99.99,横向平均晶粒度在 50~150 μm ,银靶表面粗糙度不大于 1.6 μm 。真空度 1×10^{-3} Pa, Ar^+ 离子直流溅射,充氩气压为 0.5 Pa。起始功率为 50/100 W。镀膜时旋转速度为 14.9 r/min,镀膜速率为 0.24 nm/s。

图 9 是镀制厚度为 40.9 nm,周期为 178.5 μm 双峰 LPFG 的横截面扫描电子显微镜(SEM)图。从图上可以看出,银膜与光纤包层的分界面明显,银膜原子排列紧密,膜层厚度均匀,膜层与光纤包层间紧密接合,表明采用真空溅射镀制的银膜厚度均匀,与光纤的结合力较好。

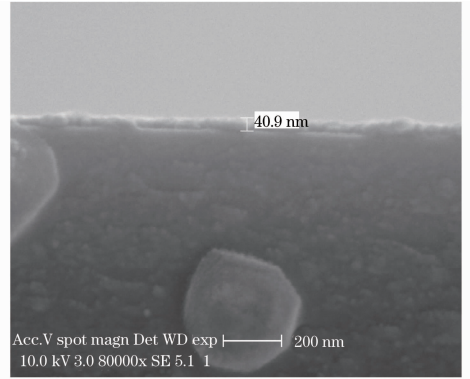


图 9 镀银膜 LPFG 的横截面 SEM 图

Fig. 9 SEM of cross section of Ag coated LPFG

3.3 光纤光栅监测液体浓度

3.3.1 双峰镀金属膜 LPFG

实验中对 NaCl 盐溶液浓度进行监测。分别配比浓度为 1%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% 的盐溶液,使用上海物理光学仪器厂生产的 WAY-1S 型数

字阿贝折射仪(光源为钠黄灯)测得这些浓度盐溶液的折射率。分别采用银膜厚为 103 nm 周期为 179 μm 和膜厚 40.9 nm 周期为 178.5 μm 的两个双峰 LPFG 进行实时监测。

图 10 给出了银膜厚为 40.9 nm 双峰 LPFG 传感器测量浓度为 1% 和 25% 盐溶液时的透射谱。随着浓度的增大,双峰间距逐渐拉大,左峰向短波方向移动,右峰长波移动,衰减峰幅度减小。表 2, 3 给出了上述两个 LPFG 传感器的双峰间距在不同浓度盐溶液下的改变量。

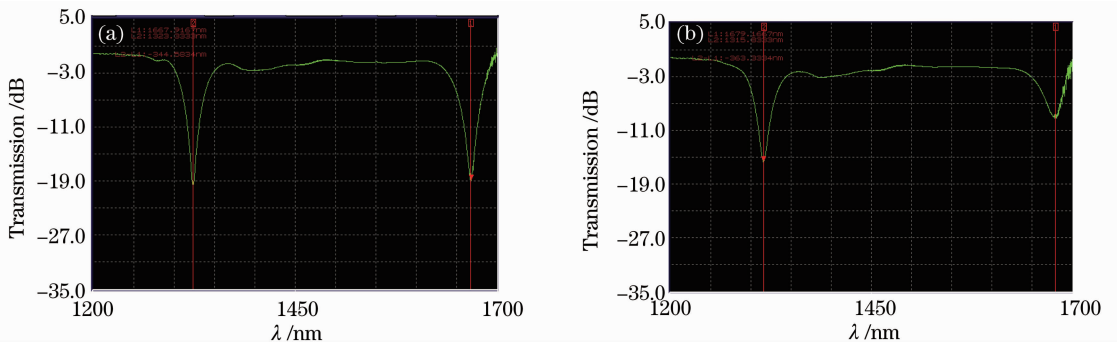


图 10 不同盐溶液浓度下双峰 LPFG 透射谱。(a) 1%, (b) 25%

Fig. 10 Transmission spectrum of dual-peak LPFG in different salt solution concentrations. (a) 1%, (b) 25%

表 2 不同盐溶液浓度下双峰间距的改变量(银膜厚:40.9 nm)

Table 2 Interval change of dual peaks in different concentrations of salt solution (Ag film thickness: 40.9 nm)

Concentration /%	Refractive index	Refractive index difference	Resonant wavelength /nm		Interval of dual peaks /nm	Interval change /nm
			λ_1	λ_2		
1	1.3352		1321.8	1668.6	346.8	
5	1.3424	0.0072	1321.0	1670.0	349.0	2.2
10	1.3510	0.0086	1320.4	1672.2	351.8	2.8
15	1.3609	0.0099	1319.8	1673.2	353.4	1.6
20	1.3708	0.0099	1317.8	1676.6	358.8	5.4
25	1.3792	0.0084	1315.6	1679.2	363.6	4.8

表 3 不同盐溶液浓度下双峰间距的改变量(银膜厚:103 nm)

Table 3 Interval change of dual peaks in different concentrations of salt solution (Ag film thickness: 103 nm)

Concentration /%	Refractive index	Refractive index difference	Resonant wavelength /nm		Interval of dual peaks /nm	Interval change /nm
			λ_1	λ_2		
1	1.3352		1356.8	1660.2	303.4	
5	1.3424	0.0072	1353.0	1670.2	317.2	13.8
10	1.3510	0.0086	1349.4	1676.8	327.4	10.2
15	1.3609	0.0099	1345.8	1681.2	335.4	8.0
20	1.3708	0.0099	1342.0	1685.2	343.2	7.8
25	1.3792	0.0084	1338.2	1690.0	351.8	8.6

比较表 2,3 知,在所给盐溶液浓度范围内,盐溶液浓度每变化 1%,引起两个 LPFG 传感器的双峰间距平均改变量为 0.67 nm 和 1.94 nm。可见,银膜厚 103 nm 的双峰 LPFG 传感器较膜厚 40.9 nm 的传感器灵敏度更高。不同浓度溶液的平均折射率差为 0.0088,若采用膜厚 103 nm 双峰 SPR 传感器和长波段分辨率可达 0.02 nm 的 AQ6370 光谱仪进行监测,则对溶液折射率的分辨率可达 1.8×10^{-5} 。

3.3.2 双峰无镀膜 LPFG 及单峰 LPFG

为了比较双峰镀金属 LPFG 传感器与双峰无镀膜 LPFG 传感器的灵敏度,选择周期为 178.5 μm 的双峰无镀膜 LPFG 传感器,观测浸没在浓度为 1%至 25%盐溶液中时的透射谱。同样观察到 LPFG 透射谱中的左、右双峰间随着浓度的增大,各自向短波和长波方向移动,且衰减峰幅度减小。但双峰间距的平均改变量 0.27 nm,明显低于镀银膜厚 40.9 nm、周期同为 178.5 μm 的 LPFG 传感器的平均改变量 0.67 nm。

进一步地观测了周期为 400 μm 普通长周期光纤光栅传感器浸没在浓度为 1%~25%盐溶液中的透射谱。由于在观测的谱段范围内不存在双峰谐振效应,只能观测单谐振峰的运动。随着溶液浓度的变化,谐振峰波长将向短波移动,衰减幅度逐渐减小,但谐振波长移动量和幅度衰减量显著减少。盐溶液浓度每变化 1%,引起平均漂移量只有 0.054 nm,远低于上述两种双峰 LPFG 传感器的双峰间距改变量。

综上所述可以看出,基于双峰谐振效应的镀银膜 LPFG 液体浓度传感器,相比于不镀膜的双峰传感器,对液体浓度具有更高的灵敏度;和普通单峰 LPFG 传感器相比,双峰传感器的灵敏度远优于单峰 LPFG 传感器的灵敏度。

4 结 论

理论分析了基于双峰谐振效应的镀金属膜 LPFG 传感器的谐振与传感特性,成功制备了镀银膜 LPFG 并进行了盐溶液浓度的传感实验。通过双峰间距的变化监测盐溶液的浓度变化,发现随溶液浓度的增大双峰向相反方向移动且间距增大。选择恰当的金属膜厚可以提高液相传感器的灵敏度。实验表明,银膜厚 103 nm 时,双峰 LPFG 传感器对溶液折射率的分辨率可达 1.8×10^{-5} 。镀膜双峰 LPFG 传感器灵敏度显著高于普通单峰 LPFG 传感器,与同结构的无镀膜双峰 LPFG 传感器相比也得到了明显提高。这种新型长周期光纤光栅液体浓度传感器集中了双峰效应和金属与介质界面处 SPR 效应的优点,对外界环境折射率变化更为灵敏,有望在光化学生物传感器中得到广泛应用。

参 考 文 献

- 1 A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins. Long-period fiber gratings as band-rejection filters [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(1): 58~65
- 2 J. H. Chong, P. Shum, H. Haryono, A. Yohana *et al.*. Measurements of refractive index sensitivity using long-period grating refractometer[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **229**: 65~69
- 3 Gu Zhengtian, Deng Chuanlu. Application and development of coated fiber grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1317~1326
- 4 顾铮先, 邓传鲁. 镀膜光纤光栅应用与发展[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1317~1326
- 5 C. C. C. Lam, R. Mandampambal, T. Sun *et al.*. Optical fiber refractive index sensor for chloride ion monitoring[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2009, **9**(5-6): 525~532
- 6 B. M. Lacquet, P. L. Swart, G. Ameerb. Long-period grating with sol-gel coating for CO₂ detection[C]. *SPIE*, 2004, **5502**: 287~290
- 7 M. Konstantaki, S. Pissadakis, S. Pispas *et al.*. Optical fiber long-period grating humidity sensor with poly (ethylene oxide)/cobalt chloride coating [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(19): 4567~4571
- 8 J. M. Corres, I. D. Villar, I. R. Matias *et al.*. Fiber-optic pH-sensors in long-period fiber gratings using electrostatic self-assembly[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(1): 29~31
- 9 X. W. Shu, X. M. Zhu, S. Jiang *et al.*. High sensitivity of dual

- resonant peaks of long-period fibre grating to surrounding refractive index changes [J]. *Electron. Lett.*, **35** (18): 1580~1581
- 9 X. W. Shu, D. X. Huang. Highly sensitive chemical sensor based on the measurement of the separation of dual resonant peaks in a 100- μm -period fiber grating[J]. *Opt. Commun.*, 1999, **171**: 65~69
- 10 Gu Zhengtian, Xu Yanping, Deng Chuanlu *et al.*. Dual peak resonance and transmission spectrum in coated long-period fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 219~225
顾铮先, 徐艳平, 邓传鲁. 表面镀膜长周期光纤光栅双峰谐振及其透射谱研究 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 219~225
- 11 K. Kalli, H. L. Dobb, D. J. Webb *et al.*. Development of an electrically tuneable Bragg grating filter in polymer optical fibre operating at 1.55 μm [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2007, **18**: 3155~3164
- 12 G. Nemova, R. Kashyap. Fiber-Bragg-grating-assisted surface plasmon-polariton sensor [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31** (14): 2118~2120
- 13 Y. J. He, Y. L. Lo, J. F. Huang. Optical-fiber surface-plasmon-resonance sensor employing long-period fiber gratings in multiplexing [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(5): 801~811
- 14 T. Erdogan. Cladding-mode resonances in short- and long-period fiber grating filters[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(8): 1760~1773
- 15 D. Gloge. Weakly guiding fibers [J]. *Appl. Opt.*, 1971, **10**(10): 2252~2258
- 16 C. Tsao. *Optical Fibre Waveguide Analysis*[M]. New York: Oxford Press, 1992