

# 基于光栅的表面等离子体共振传感器的原理及进展

帅彬彬<sup>1</sup> 夏历<sup>1,2</sup> 张雅婷<sup>1</sup> 周驰<sup>1</sup> 刘德明<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>华中科技大学光电科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)  
(<sup>2</sup>武汉光电国家实验室(筹), 湖北 武汉 430074)

**摘要** 基于光栅的表面等离子体共振(SPR)传感技术是近年来光纤传感领域的研究热点。论述了SPR传感器的工作原理、调制方式和光栅耦合式SPR传感器的理论。介绍了该领域的研究成果,包括利用光纤布拉格光栅(FBG)的空芯光纤SPR传感器、利用FBG或长周期光栅(LPG)的普通光纤SPR传感器、利用平面波导光栅的SPR传感器、利用金属表面光栅的SPR传感器及多通道光栅SPR传感器。总结了部分结构优化之后的典型参数,给出了基于光栅的SPR传感器的研究现状和发展方向。

**关键词** 衍射与光栅;表面等离子体共振;耦合模理论;折射率传感器;结构优化

**中图分类号** TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.100502

## Principle and Study Progress of Surface Plasmon Resonance Sensors Based on Gratings

Shuai Binbin<sup>1</sup> Xia Li<sup>1,2</sup> Zhang Yating<sup>1</sup> Zhou Chi<sup>1</sup> Liu Deming<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>College of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)  
(<sup>2</sup>Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract** The surface plasmon resonance (SPR) sensing technology based on gratings is the research focus in the optical fiber sensing field in recent years. The general principle and modulation methods of SPR sensors as well as the theory on grating-coupled SPR sensors are discussed. Moreover, the research achievements are comprehensively introduced, including SPR refractive index hollow core fiber sensors assisted by a fiber Bragg grating (FBG), standard optical fiber SPR sensors employing FBG or long period grating (LPG), SPR sensors based on planar integrated waveguide gratings and corrugated metal gratings, and multi-channel grating-based SPR sensors. The typical structural parameters after optimization are also summarized. Besides, the current research status and expectations of grating-based SPR sensors are given.

**Key words** diffraction and gratings; surface plasmon resonance; coupled mode theory; refractive index sensor; structural optimization

**OCIS codes** 050.2770; 280.4788; 280.5395

## 1 引言

近年来,生化传感技术在环境监测、生化检测、医疗诊断和食品安全等领域得到了广泛应用。同时,电化学传感、压电传感、光学传感等各种不同的传感技术应运而生,这些传感器被用于探测各种生化成分及其变化。表面等离子体共振(SPR)传感技术在各种传感技术中最具应用前景,它具有高灵敏度、免标记、非破坏性、可远程实时监测等优点,日益受到人们的关注<sup>[1]</sup>。为了实现局部测量和远程监测,早在1990年就有学者

**收稿日期**: 2011-04-12; **收到修改稿日期**: 2011-05-30; **网络出版日期**: 2011-08-06

**基金项目**: 华中科技大学2009年自主创新基金(0109182929)、华中科技大学2009年人才引进基金(0124182015)、科技部中新合作项目(2009DFA12640)资助课题。

**作者简介**: 帅彬彬(1987—),女,硕士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: sustsbb1124@163.com

**导师简介**: 夏历(1976—),男,副教授,主要从事光纤通信无源器件设计及制作和光纤传感应用等方面的研究。

E-mail: xiali@mail.hust.edu.cn

提出了将光纤作为激励介质的光纤 SPR 传感器,通常是先将普通光纤的包层去掉,再在裸露的纤芯上镀一层具有圆对称性的金膜或银膜作为表面等离子体波的载体,这类光纤 SPR 传感器结构优化之后折射率分辨率为  $1 \times 10^{-6}$  RIU(RIU 为折射率单位)<sup>[2~4]</sup>。在过去 10 年中,为了解决传统光纤 SPR 传感器相位匹配的难题,一些研究者尝试了在光纤纤芯中引入周期性的折射率调制,即通过写入光纤光栅来更高效地激发表面等离子体并使其满足相位匹配条件。随着光纤光栅制作技术和集成光波导技术的日臻完善,人们提出了在光纤或平面光波导中写入光纤布拉格光栅(FBG)或长周期光栅(LPG)来实现 SPR 传感<sup>[5~24]</sup>。其中,Shevchenko 等<sup>[7,16,17]</sup>已于 2007 年从实验上验证了在普通单模光纤中写入倾斜布拉格光栅(TFBG)的 SPR 现象。

本文介绍了 SPR 传感器的基本原理,光栅耦合式 SPR 传感器的理论及常见的调制方法,总结了国内外基于光栅的光纤/光波导 SPR 折射率传感器在提高灵敏度和解决相位匹配方面的新进展,并介绍了国内外当前研究现状及今后的发展方向。

## 2 表面等离子体共振传感的原理

表面等离子体激发(SPP)是在金属/电介质界面上由表面电荷的集体振荡与电磁场耦合所形成的沿着金属/电介质界面传播的一种电磁波。SPP 的场分量在金属/电介质界面上取得最大值,在金属两侧的介质中场分量呈指数衰减。在可见光及近红外波段内,绝大多数金属介电常数的实部为负数,因此金属与其相邻介质的介电常数异号,只有 p 偏振光(TM)才能激发出 SPP。当 p 偏振光以大于全反射临界角的角度入射介质时将会发生全反射,一部分入射光以倏逝波的形式渗透入金属膜。当入射角满足一定条件时,倏逝波平行于金属/电介质界面的波矢分量与 SPP 的波矢相等,这两种模式会发生强烈的耦合,入射光的能量将有一部分转移到 SPP 中,导致反射光强度显著降低,反射率出现最小值,这种现象被称为 SPR<sup>[25]</sup>。

能够激发 SPR 效应的一种最简单的装置是如图 1 所示的 Kretschmann 棱镜模型<sup>[25]</sup>,它由棱镜、金属薄膜、环境介质组成,入射光发生全反射时渗透入金属膜的倏逝波沿  $x$  轴方向上平行于表面的波矢大小为

$$k_x = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_0} \sin \theta_0, \quad (1)$$

金属薄膜/环境介质界面上被激发出的表面等离子体波的波矢大小为

$$k_{sp} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}}. \quad (2)$$

式中  $\omega$  为入射光角频率, $c$  为真空中光速, $\theta_0$  为光在棱镜/金属界面的入射角, $\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2$  分别为棱镜、金属薄膜、环境介质的介电常数。在不同入射条件下光波的色散曲线(DR)如图 2 中直线所示<sup>[25]</sup>,其中  $c$  对应于沿  $x$  轴方向在空气中传播的光波, $c/(\sqrt{\epsilon_0} \sin \theta_0)$  对应于介质中入射角为  $\theta_0$  的光波,DR 对应于表面等离子体波(SPW)的色散曲线。通过控制入射角  $\theta_0$  和棱镜介电常数  $\epsilon_0$  的大小来改变入射光波的色散曲线,当其与表面等离子体波的色散曲线相交时,相位匹配条件  $k_x = k_{sp}$  得到满足,可以观察到 SPR 现象。SPR 现象对金属周围介质的折射率变化非常敏感,环境介质折射率的任何微小变化都将导致 SPR 共振曲线的漂移,通过观察反射谱随待测液折射率的变化实现传感功能,这一特性被用来设计各种 SPR 折射率传感器。

## 3 光栅耦合式 SPR 传感器的理论

由图 2 中的色散曲线可知光波不能直接与光滑金属表面上的 SPP 发生耦合,要引发 SPR 效应必须使用

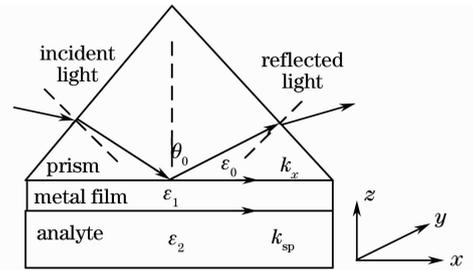


图 1 Kretschmann 模型结构

Fig. 1 Kretschmann prism coupled model

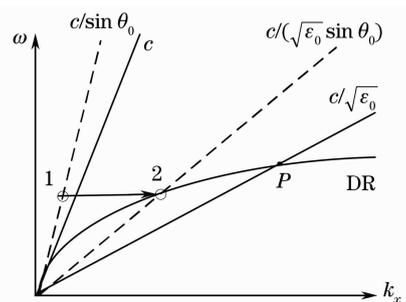


图 2 表面等离子体波的色散曲线

Fig. 2 Dispersion relations of SPP

耦合器件,常用的耦合器件有棱镜、光纤和光栅。Kretschmann 棱镜耦合模型 SPR 传感器有移动的部分,体积大,需要对角度精确控制,不便于集成<sup>[24]</sup>,在这里讨论光栅作为耦合器件时 SPR 传感器的相关理论、结构与性能。

金属的复介电常数可表示为  $\epsilon_m = \epsilon_{mr} + i\epsilon_{mi}$ ,待测液的折射率为  $n_a$ ,则(2)式为

$$k_{sp} = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_m n_a^2}{\epsilon_m + n_a^2}}, \quad (3)$$

式中  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  是自由空间中光波波矢, $\lambda_0$  为入射光波长。由于金属的复介电常数对入射光波长具有很大依赖性,但当金属的复介电常数实部与虚部比值的绝对值 ( $|\epsilon_{mr}/\epsilon_{mi}|$ ) 较大时,表面等离子体波波矢的实部可以近似为<sup>[26]</sup>

$$\bar{k}_{sp} = \text{Re}(k_{sp}) \approx k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_{mr} n_a^2}{\epsilon_{mr} + n_a^2}}. \quad (4)$$

由于金属介电常数的实部为负数 ( $\epsilon_{mr} < 0$ ),表面等离子体波的波矢通常比介质中光波的波矢大,介质中的光波不能直接激发表面等离子体波,因此有必要借助光栅来增加入射光波的动量,使其与 SPP 的动量匹配。

对于使用衍射光栅的情形,如图 3 所示<sup>[26]</sup>,入射光和衍射光的波矢满足光栅方程

$$k_x + mG = k'_{xm}, \quad (5)$$

式中  $k_x$  是入射光沿光栅表面的波矢分量,整数  $m$  是衍射级次, $G = 2\pi/\Lambda$  为光栅的波矢, $\Lambda$  为光栅周期, $k'_{xm}$  为衍射光波的波矢。入射光波通过衍射光栅激发 SPP 这一过程可用动量守恒描述为<sup>[26]</sup>

$$n_a \sin \theta + m \frac{\lambda}{\Lambda} = \pm \sqrt{\frac{\epsilon_{mr} n_a^2}{\epsilon_{mr} + n_a^2}}, \quad (6)$$

式中  $\theta$  为光波的入射角,“+”与  $m > 0$  相对应,“-”与  $m < 0$  相对应,(6)式是任何光栅条件下入射光波与表面等离子体波的相位匹配条件,光栅周期  $\Lambda$  和入射角  $\theta$  是控制激发 SPR 效应的关键因素。在满足(6)式的条件下,入射光波的能量会有一部分转移到 SPP 中,反射光谱中将会出现与共振角度或共振波长相对应的凹陷,凹陷位置会随着周围待测溶液折射率的变化而变化,进而实现检测待测液折射率微小变化的功能。

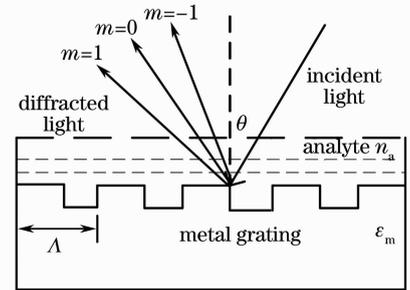


图 3 光栅耦合模型

Fig. 3 Grating coupled model

## 4 SPR 光谱分析方法

SPR 光谱的性质可由共振角、共振半峰全宽和共振深度描述。这 3 个特征参数与所镀的金属薄膜的厚度、折射率、吸收系数和表面介质的光学性质密切相关。SPR 传感器的灵敏度定义为待测参数对折射率的微分,既可由理论推得灵敏度的计算公式,也可由实验曲线得到<sup>[27]</sup>。SPR 传感器主要有 4 种调制方式:角度调制法、波长调制法、强度调制法和相位调制法<sup>[28]</sup>,对于不同的 SPR 激励结构,4 种调制方法的灵敏度各不相同。

## 5 基于光栅的 SPR 传感器的结构及原理

### 5.1 利用 FBG/LPG 的空芯光纤 SPR 传感器

在空芯光纤的波导层中刻入布拉格(Bragg)光栅,在波导层的内壁镀上金属膜,纤芯中通入待测溶液,形成利用 FBG 的空芯光纤 SPR 传感器,如图 4 所示<sup>[8]</sup>。图中波导层(WL)是结构中折射率最大的介质层,光纤波导模式(FWM)在 WL 中电磁场的振幅呈振荡形式,在其他波导层中指数衰减。

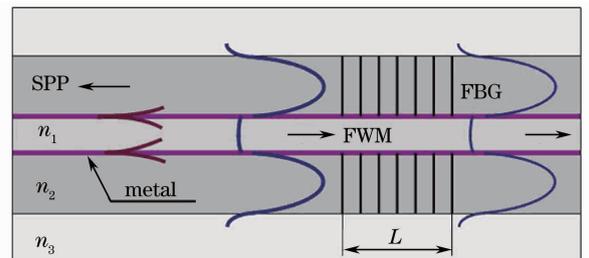


图 4 空芯光纤 FBG-SPR 传感器结构图

Fig. 4 Schematic of hollow core fiber SPR sensors assisted by a FBG

这一结构的有关参数为:溶液通道半径  $r_1 = 7 \mu\text{m}$ ,待测液折射率  $n_1$ ;金膜厚度  $\Delta$  介于  $2 \sim 15 \text{ nm}$  之间,其介电常数由 Drude 公式给出为  $\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty [1 - \omega_p^2 / (\omega(\omega + i\Gamma))]$ ,其中常数  $\epsilon_\infty$  是  $\epsilon(\omega)$  的高频值, $\omega_p$  是等离子体的振荡频率, $\Gamma$  为等离子体的衰减速度,对于某种确定的金属而言这 3 个量为常数;WL 层半径  $r_2 - r_m = 10 \mu\text{m}$ ,折射率  $n_2 = 1.442$ ;WL 层外面是折射率为  $n_3 = 1.4$  的包层。在金属表面被激发的 SPP 的有效折射率与待测液折射率  $n_1$  和金属层的厚度  $\Delta$  密切相关。FBG 在光纤的模式耦合方面发挥了重要作用,在 WL 层中写入的 FBG 起到了反射镜的作用,它使前向传播的 FWM 与后向传播的 SPP 模式在一定条件下发生能量耦合。运用耦合模理论对 FBG 进行分析表明 SPP 模式的激发效率是光栅反射率的函数,要高效地激发 SPP 模式需要满足两个条件:1) 相位匹配条件,即 FWM 和 SPP 模式的传播常数要相等;2) FWM 和 SPP 模式要有较大的耦合常数。这两个条件均可通过合理地设计光纤及 FBG 的参数来满足。FWM 与 SPP 发生耦合时共振波长的位置由光栅的相位匹配条件得出<sup>[8]</sup>

$$\delta_{\text{co-p}} + \kappa_{\text{co-co}}/2 = 0, \quad (7)$$

$$\delta_{\text{co-p}} = (\beta_{11}^f + \beta_{11}^s - 2\pi/\Lambda)/2, \quad (8)$$

式中  $\kappa_{\text{co-co}}$  是 FWM 的自耦合常数,与 FBG 的折射率调制强度成正比, $\beta_{11}^f, \beta_{11}^s$  分别为 FWM 和 SPP 模式的传播常数。当待测液折射率  $n_1$  发生变化时,FBG 反射谱的峰值波长  $\lambda_{\text{res}}$  就会漂移,可以定义 SPR 传感器的灵敏度为

$$S = \frac{d\lambda_{\text{res}}}{dn_1}, \quad (9)$$

假设折射率  $n_1 = 1.33$ ,设计 FBG 的参数使反射谱峰值波长为  $\lambda_{\text{res}} = 1550 \text{ nm}$ ,同时使 FBG 的反射率  $R = 70\%$  保持不变,则有接近  $30\%$  的透射光可以用于观测。为了对 SPR 传感器进行优化,假设  $n_1$  变化量为  $10^{-5}$  RIU,分析金属膜厚  $\Delta$ ,光栅长度  $L$ ,折射率调制强度  $\sigma$ ,光栅周期  $\Lambda$  等结构参数变化时,FBG 反射谱峰值波长的漂移量  $\Delta\lambda_{\text{res}}$ ,得出相应的折射率灵敏度如表 1 所示<sup>[8]</sup>。

表 1 不同结构参数对应的 FBG-SPR 传感器折射率灵敏度

Table 1 Sensitivity of FBG-SPR sensors corresponding to different structural parameters

Structural parameter	$\Delta / \text{nm}$	$L / \text{cm}$	$\sigma$	$\Lambda / \text{nm}$	$\Delta\lambda_{\text{res}} / \text{nm}$	$S / (\text{nm}/\text{RIU})$
(a)	8	7	$5 \times 10^{-4}$	477	0.28	280
(b)	10	6	$3 \times 10^{-4}$	497	0.23	230
(c)	12	5	$2.3 \times 10^{-4}$	509	0.19	190
(d)	15	4	$2 \times 10^{-4}$	519	0.15	150

对于以上的 4 种结构,当待测液折射率  $n_1$  由 1.33 变化到 1.334 时,相应的共振波长发生变化,如图 5 所示<sup>[8]</sup>。

这种利用 FBG 来有效激发 SPP 并使其与 FWM 发生耦合的传感器相比于传统的棱镜结构具有结构紧凑、没有移动的部分、可以实现远程实时检测、需要样品量少等优点。实际应用中通常是测量 FBG 透射谱的凹谷来确定共振波长的漂移,进而得知待测液折射率的变化,因此测量灵敏度较高。如果采用强度调制方式,当待测液折射率变化量为  $10^{-6}$  RIU 时,共振波长处透射率随共振波长的变化率为  $3/28 \text{ dB/pm}$ ,假设接收单元光强分辨率和波长分辨率分别为  $0.01 \text{ dB}$  和  $0.1 \text{ pm}$ ,那么折射率的分辨率为  $0.1 \text{ pm} / [(0.01 \times 28/3) / 10^{-6} (\text{pm}/\text{RIU})] = 1.07 \times 10^{-6} \text{ RIU}$ 。除此之外还可以在 WL 中写入 LPG<sup>[9~11]</sup>,FWM 与同向传播的 SPP 模式共振耦合,采用波长调制方式的折射率灵敏度为  $817 \text{ nm}/\text{RIU}$ <sup>[9]</sup>。

## 5.2 利用 FBG 的单模光纤 SPR 传感器

在空芯的光纤内壁镀金属膜实现起来比较困难,而且不能保证金属膜的厚度与均匀性,而这些参数对于

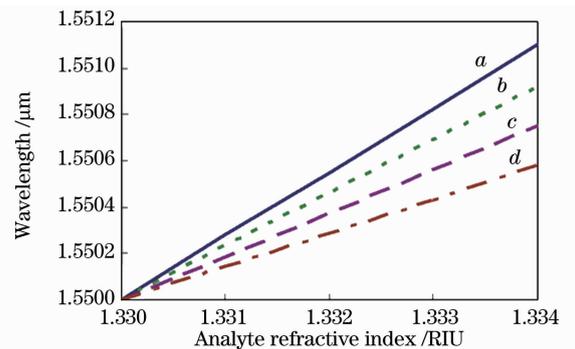


图 5 FBG-SPR 传感器共振波长随待测液折射率的变化曲线

Fig. 5 Resonant wavelength corresponding to (a), (b), (c) and (d) versus the refractive index of the analyte

SPR 传感器的性能至关重要。Špačková 等<sup>[12]</sup>于 2009 年提出在普通单模光纤(SMF)纤芯写入 FBG 实现 SPR 传感,并运用耦合模理论和场扩展方法分别对 FBG 的衍射效率、光谱特性及光场分布、模式色散曲线进行了分析,所提出的结构如图 6 所示。图中 FBG 写在普通单模阶跃折射率分布光纤的纤芯,在光纤包层外面镀上一层化学稳定性良好的金膜,与金膜相接触的是待测溶液。当包层模传播常数的轴向分量(包层模的相位在光纤轴线方向上单位长度的变化量)与 SPP 模式的传播常数相等时,包层模首先与 SPP 模式发生耦合,形成 SPP-光纤包层模这种混合模式(SPP-FC),SPP-FC 模式对金属周围待测液的折射率变化非常敏感,因此可以用来进行折射率传感。

在 FBG 的作用下,当光纤中前向传播的基模的传播常数与后向传播的 SPP-FC 模式的传播常数相等时,这两种模式又会发生耦合,基模的能量将有一部分转移到 SPP-FC 模式中,包层模的透射谱中将会出现与共振波长相对应的透射凹谷。由耦合模理论可得共振波长为

$$\lambda_{\text{res}}'' = \text{Re}(n_{\text{eff}}^1 + n_{\text{eff}}^{\mu})\Delta, \quad (10)$$

式中  $n_{\text{eff}}^1, n_{\text{eff}}^{\mu}$  分别是基模和第  $\mu$  阶包层模的有效折射率。

为了研究这种 SPR 传感器对待测液折射率变化的响应情况,运用耦合模理论分析得出与  $\mu=134, 136, \dots, 144, 146$  对应的包层模满足(10)式所确定的共振条件,SPR 传感器在不同待测液折射率时光纤中第 134~146 阶包层模的归一化透射率如图 7 所示<sup>[12]</sup>。图中周期性地出现了透射极大极小值,归一化透射率极大值与第 135~145 阶奇数阶包层模相对应,当待测液折射率变大时,与透射率极大值对应的峰值波长并不发生变化;归一化透射率极小值与第 134~146 阶偶数阶包层模相对应,其相应的共振波长随待测液折射率的增大而往长波长方向移动。进一步对这些结构参数进行优化设计后 SPR 传感器的分辨率高达  $2 \times 10^{-6}$  RIU。

大多数基于光纤结构的 SPR 传感器工作波长在可见光-近红外波段(600~800 nm),SPP 在这一波段内穿过金属表面而渗透进入待测液的深度为 200~300 nm,渗透深度与工作波长成正比,可见光-近红外工作波段限制了灵敏度的提高。Allsop 等<sup>[13,14]</sup>提出一种工作在红外波段的 SPR 传感器,在标准单模光纤中写入倾斜布拉格光纤光栅(TFBG),其光栅平面相对于光纤轴线有  $1^{\circ} \sim 10^{\circ}$  的倾斜角,导模被散射形成包层模和辐射模。在 1200~1700 nm 波段内 SPP 模式可以与反向传播的包层模满足相位匹配条件发生共振耦合,折射率在 1.34~1.38 范围内的灵敏度为 3365 nm/RIU<sup>[13,14]</sup>。利用表面等离子体共振荧光效应和近场扫描光学显微镜,TFBG 还可以进行待测液厚度测量、实时监测金属表面化学反应、定点监测聚合物电解质分子层厚度,空间分辨率为纳米量级<sup>[15~17]</sup>。TFBG-SPR 传感器中有多个包层模可以与 SPP 模式共振耦合,折射率测量范围宽,工作波长可利用通信系统的红外波段以降低成本。不需要对光纤进行拉锥、腐蚀去包层或端面打磨抛光等后处理,具有很好的应用前景。

### 5.3 利用 LPG 的光纤 SPR 传感器

光栅耦合型 SPR 传感器不仅可以测量溶液折射率、聚合物分子层厚度,还广泛用于测量化学溶液的浓度、Au 胶体表面抗原/抗体相互作用、DNA 分子监测等。2006 年 Tang 等<sup>[18]</sup>采用紫外曝光方法在康宁 SMF-28 光纤纤芯中写入周期为 550  $\mu\text{m}$ ,22 mm 长的 LPG,并去掉 LPG 上面的包层,再在 LPG 表面涂覆一层平均直径为  $(8.4 \pm 2.8)$  nm 的 Au 胶体,在对二硝基苯酚(DNP)溶液的浓度测量实验中获得的浓度检测极限为  $1.4 \times 10^{-7}$  g/mL。这种 LPG-SPR 传感器结构简单,易于使用,制作成本较低,可广泛用于生物医学病变检测<sup>[18~20]</sup>。

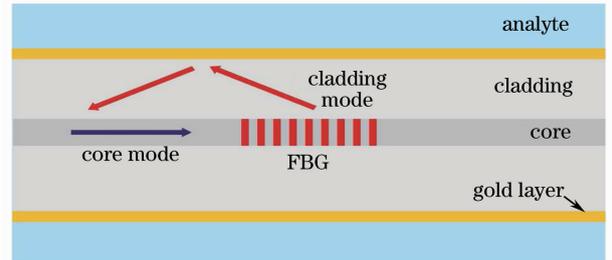


图 6 利用 FBG 的单模光纤 SPR 传感器结构图  
Fig. 6 Schematic of a SMF SPR sensor utilizing FBG

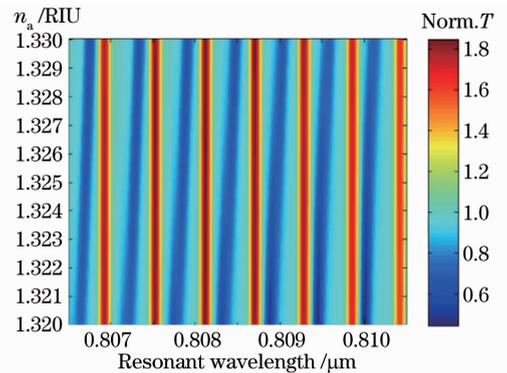


图 7 归一化透射率随待测液折射率的变化  
Fig. 7 Normalized transmission spectrum as a function of refractive index of analyte

在同一根光纤纤芯中写入若干个级联的光纤光栅 SPR 传感器也得到了人们的关注,如图 8 所示<sup>[5,29]</sup>。在光纤的纤芯写入两段长周期光纤光栅 LPG1 与 LPG2,周期分别为  $\Lambda_1, \Lambda_2$ ,光栅长度分别为  $L_1, L_2$ ,构成两段 LPG 复用的光纤 SPR 传感器。纤芯半径  $r_1 = 2.25 \mu\text{m}$ ,折射率  $n_1 = 1.4602$ ,包层半径  $r_2 = 62.5 \mu\text{m}$ ,折射率  $n_2 = 1.4443$ ,包层外面镀上一层厚度为  $d = r_3 - r_2 = 36 \text{ nm}$  的金属薄膜,设其折射率为  $n_3 = 0.00298 + 13.4857i$ ,整个传感单元浸没在折射率为  $n_4 = 1.33061$  的待测溶液中。通过合理地设计  $\Lambda_1, \Lambda_2$  的大小,在某一预先设定的波长(如  $1550 \text{ nm}$ )处 LPG1 将使导模与包层模耦合,但耦合之后包层模含有的 SPP 成分很少,也叫混杂模。

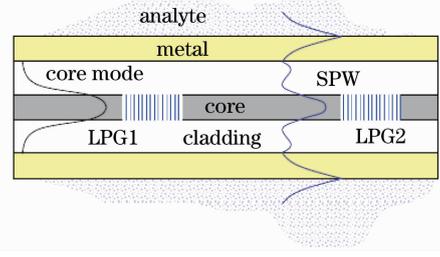


图 8 两段 LPG 级联的光纤 SPR 传感器结构图

Fig. 8 Schematic of optical fiber SPR sensor employing cascaded LPG

待测液折射率的任何变化将引起 SPP 模式传播常数的变化,这一变化将被转移至包层中传播的混杂模的相位变化上,LPG2 进一步使表面等离子体混杂模与前向传播的导模发生耦合。由于 SPP 模式传播常数的变化会引起导模与其耦合强度的变化,进而使共振波长处的透射率发生变化,采用强度调制方式时,在光纤输出端测量透射光强的变化可得知待测液折射率的变化情况<sup>[5]</sup>。

运用耦合模方程的非共轭形式对这一结构中的模式进行分析,得出两个 LPG 优化后的结构参数分别为: $L_1 = 6.925 \text{ cm}, \Lambda_1 = 17.620 \mu\text{m}, L_2 = 8.320 \text{ cm}, \Lambda_2 = 18.521 \mu\text{m}$ ,与这两个 LPG 相对应的折射率测量范围分别为  $1.35619 \leq n_4 \leq 1.35659$  和  $1.36041 \leq n_4 \leq 1.36081$ ,折射率测量范围精确到小数点后第 4 位,可见折射率分辨率为  $1 \times 10^{-4} \text{ RIU}$ 。这种结构虽然灵敏度不是很高,但却具有很多优点。首先,通过设计两个 LPG 的参数可以使传感器工作在一个预先设定的波长附近,而且不需要任何缓冲层来实现相位匹配条件;其次,可以实现对多个折射率范围的测量,这只需要在同一根光纤纤芯的不同部位写入不同周期、不同长度的 LPG 即可实现;除此之外,所用光纤不需要经过弯曲或抛光,当金属膜层厚度均匀时这种 SPR 折射率传感器不需要任何偏振控制单元。

#### 5.4 基于平面波导光栅的 SPR 传感器结构

以上几种基于光栅的 SPR 传感器都是在具有圆对称性的光纤中实现的,需要在空芯光纤内壁或普通石英光纤包层外表面镀上一层具有圆对称性的纳米量级金属薄膜,由于实际工艺限制很难保证金属薄膜厚度的均匀性,因此会对 SPR 折射率传感器的性能造成一定的影响。为了避免这一技术难题,Kashyap 等<sup>[29]</sup>提出在平面波导结构中实现光栅 SPR 传感的功能,如图 9 所示。传感器总长度为几厘米,体积小,结构紧凑,这种全平面结构易于集成和微型化<sup>[21~24]</sup>。

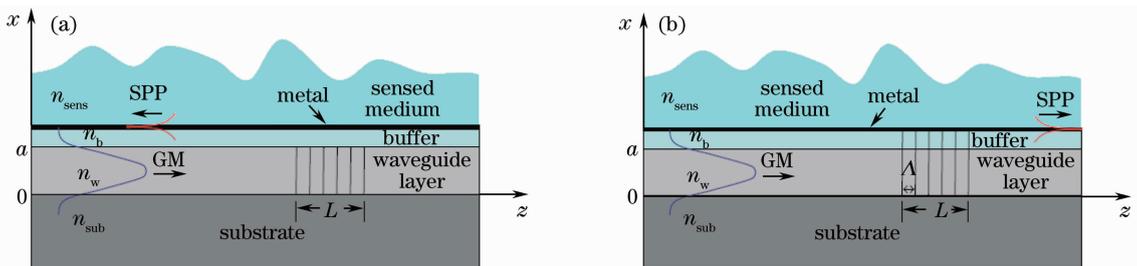


图 9 基于平面波导光栅的 SPR 传感器结构。(a)短周期光栅;(b)长周期光栅

Fig. 9 Schematic of SPR sensors based on planar integrated gratings. (a) Short period grating; (b) long period grating

在  $y$  方向上无限延伸的均匀五层平面结构由衬底、波导层、缓冲层、金属薄膜和待测溶液组成,分别在波导层或者波导层和缓冲层中刻入适当周期、长度的光栅。衬底折射率  $n_{\text{sub}} = 1.45$ ,波导层折射率  $n_w = 1.47$ ,厚度  $a = 3 \mu\text{m}$ ,缓冲层(降低导模传播损耗并控制导模和 SPP 模式耦合效率)折射率  $n_b = 1.45$ ,厚度  $b = 1 \sim 2 \mu\text{m}$ ,金属薄膜厚度  $\Delta = 10 \sim 13 \text{ nm}$ ,可以保证在某一预定波长下波导工作在单模状态,即只有基模可以与 SPP 模式发生耦合,这样可以有效地避免模式之间的干扰引入的噪声。合理设计光栅的长度、周期、折射率调制强度以满足相位匹配条件

$$(\beta^g + \beta^p - 2\pi/\Lambda)/2 + \kappa_{\text{co-co}}/2 = 0. \quad (11)$$

根据光栅周期的大小可将光栅分为短周期光栅和长周期光栅,短周期光栅的周期约为 500 nm,与工作波长处于同一量级,长周期光栅的周期在微米量级,从几微米至数百微米<sup>[30]</sup>。短周期光栅是反射型光栅,其光学特性是由传播方向相反的模式耦合的结果;长周期光栅是透射型光栅,其光学特性是由传播方向相同的模式耦合的结果<sup>[31]</sup>。当导模与 SPP 模式满足相位匹配条件(11)式时,在波导层中写入的短周期光栅使前向传播的导模与反向传播的 SPP 模式发生耦合,而长周期光栅则使前向传播的导模与同向传播的 SPP 模式发生耦合。待测液的折射率发生变化时,预先设计的光栅透射谱凹谷就会漂移,漂移量的大小与光栅参数密切相关。当缓冲层厚度  $b=1 \mu\text{m}$ ,待测液折射率  $n_{\text{sens}}=1.33$ ,预先设计的共振波长  $\lambda_{\text{res}}=1.55 \mu\text{m}$ ,并保证光栅透射率约为 30%可得到金属薄膜厚度  $\Delta$ 、光栅周期  $\Lambda$ 、长度  $L$ 、折射率调制强度  $\sigma$  的一系列组合,如表 2 所示<sup>[21]</sup>。

表 2 缓冲层厚度  $b=1 \mu\text{m}$ ,  $n_{\text{sens}}=1.33$ ,  $\lambda_{\text{res}}=1.55 \mu\text{m}$ , 透射率接近 30% 时光栅参数

Table 2 Different grating parameters for  $\lambda_{\text{res}}=1.55 \mu\text{m}$ ,  $b=1 \mu\text{m}$ ,  $n_{\text{sens}}=1.33$ , 30% transmission

$\Delta / \text{nm}$	10	10	10	13	13	13
$\sigma / 10^{-4}$	10.5	8.0	6.0	3.1	2.2	1.7
$L / \text{cm}$	5	7	9	5	7	9
$\Lambda / \text{nm}$	492.5	492.5	492.5	508.8	508.8	508.8

当采用第二种组合时所得到的折射率灵敏度最高为 250 nm/RIU。基于长周期光栅和短周期光栅的 SPR 传感器的灵敏度之比为  $r = \frac{n^p + n^g}{n^p - n^g}$ , 其中  $n^p, n^g$  分别为 SPP 模式和导模的有效折射率,显然  $r > 1$ ,故采用长周期光栅的 SPR 传感器折射率灵敏度比利用短周期光栅要高很多<sup>[29]</sup>。对长周期光栅参数进行优化后可取  $L=2.5 \text{ cm}$ ,  $\Lambda=6.95 \mu\text{m}$ ,  $\sigma=1 \times 10^{-3}$ , 在相同条件下的折射率灵敏度高达 1100 nm/RIU。

## 5.5 基于金属表面光栅的 SPR 传感器

除了将光栅写在光纤纤芯或波导层中,还可以在金属薄层上制作金属表面皱褶光栅来实现 SPR 折射率传感,如图 10 所示<sup>[29]</sup>。衬底、波导层、缓冲层和金属薄层可以利用分子束外延(MBE)技术来制作,再在制作好的金属薄层上用反应离子刻蚀(RIE)技术制作出结构合适的金属光栅<sup>[32,33]</sup>。基于金属表面皱褶光栅的 SPR 传感器制作过程简单,金属光栅直接与待测溶液接触,可以提高导模和 SPP 模式之间的能量转换效率。与介质光栅相比,利用金属光栅的 SPR 传感器共振峰更尖锐,半峰全宽更小,灵敏度更高<sup>[34]</sup>。

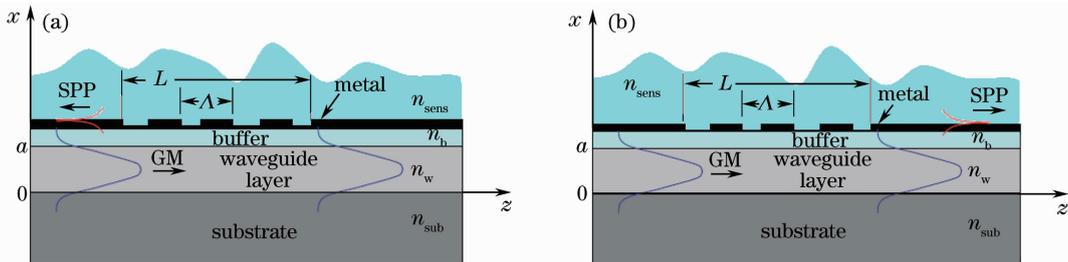


图 10 利用金属表面光栅的平面波导 SPR 传感器示意图。(a)短周期金属光栅;(b)长周期金属光栅

Fig. 10 SPR sensors based on integrated planar waveguide corrugated metal gratings. (a) Short period metal grating; (b) long period metal grating

金属薄层的厚度  $\Delta$ 、金属光栅的占空比、周期  $\Lambda$ 、长度  $L$  及缓冲层的厚度  $b$  都会影响传感器的性能。运用传输矩阵法对金属光栅的透射特性进行分析得知,当光栅的占空比为 0.5 时,光栅透射谱曲线的凹谷最深,有利于辨别共振波长的漂移。

取衬底和缓冲层折射率  $n_{\text{sub}}=n_b=1.45$ ,波导层折射率  $n_w=1.47$ ,厚度  $a=3 \mu\text{m}$ ,在待测液折射率  $n_{\text{sens}}=1.33$  时使得共振波长为  $\lambda_{\text{res}}=1.55 \mu\text{m}$ ,待测溶液折射率  $n_{\text{sens}}$  的任何微小变化都将导致光栅透射凹谷的漂移,如图 11 所示<sup>[32,33]</sup>。优化之后的结构参数及折射率灵敏度如表 3 所示<sup>[32,33]</sup>。

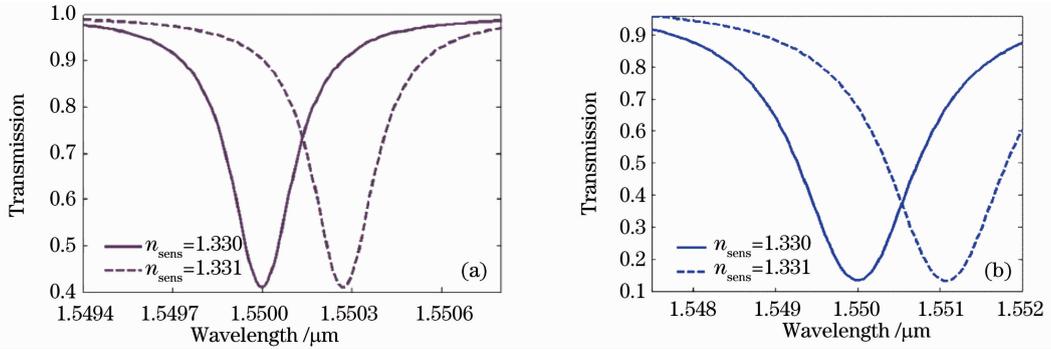


图 11 光栅结构参数优化之后透射率曲线随待测液折射率的变化。(a)短周期金属光栅;(b)长周期金属光栅

Fig. 11 Grating transmission spectra of different analyte refractive index after optimization.

(a) Short period metal grating; (b) long period metal grating

表 3 优化之后的金属光栅 SPR 传感器折射率灵敏度

Table 3 Sensitivity of SPR sensors based on metal corrugated gratings after optimization

Parameter	$\Delta$ /nm	$H$ /nm	$b$ / $\mu\text{m}$	$\Lambda$ / $\mu\text{m}$	$L$ /cm	$S$ /(nm/RIU)
Short period	10	1	4, 5	0, 485	5, 3	247
Long period	10	1	1	6, 1	4	1100

由此可见,这种金属表面皱褶光栅 SPR 传感器的折射率灵敏度和基于波导光栅的 SPR 折射率传感器灵敏度是相当的,只是制作技术上更容易实现,利用长周期光栅的灵敏度比短周期光栅要高,大约是后者的 4.5 倍。金属表面光栅除了制作成高度一致的“凸凹”结构外<sup>[32,33,35]</sup>,还可以制作成高度按一定规律变化的曲面结构<sup>[36,37]</sup>。Alleyne 等<sup>[37]</sup>在 Kretschmann 模型的基础上将金属银薄层制作成具有正弦曲线轮廓的金属表面光栅(银层厚度沿着光传播方向按正弦曲线规律变化)实现 SPR 传感,灵敏度是高度一致的“凸凹”型表面光栅的 6 倍。最近,Tripathi 等<sup>[38]</sup>提出了金-银表面光栅 SPR 传感器,其结构如图 12 所示。利用光刻技术在由衬底、芯区和包层构成的平面波导的上方交替制作 4~22  $\mu\text{m}$  长的厚度相同的金、银薄层,这两种金属折射率的差异使等厚度的金银薄层起到了光栅的作用。在  $x$  方向上,分别在金、银金属区域内激发起的 SPP 模式场分量在相同的位置存在最大值并由此最大值沿  $x$  方向指数衰减,因此,厚度相等的两种金属形成的光栅增强了 SPP 模式和导模之间的模场耦合强度<sup>[38]</sup>。在金属层厚度相同并保持灵敏度接近的前提下,图 12 这种结构光栅总长度约为 0.4 cm,而只用一种金属制作的表面光栅 SPR 传感器光栅总长度接近 2 cm,可见使用等厚度的两种金属制作的表面光栅 SPR 传感器能显著减小光栅长度,提高器件集成度。

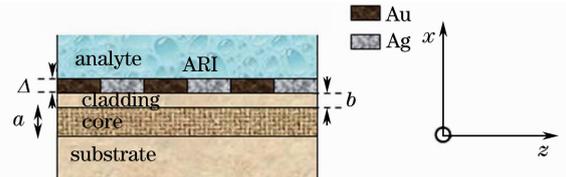


图 12 金-银表面光栅 SPR 传感器横截面示意图  
Fig. 12 Transverse section schematic of Au-Ag surface grating-based SPR sensor

## 5.6 多通道光栅 SPR 传感器

在近几年提出的众多基于光栅的 SPR 传感器中,Shevchenko 等<sup>[7,16,17]</sup>成功地从实验上验证了标准单模光纤中写入 TFBG 的 SPR 现象,并在 100 nm 宽的光谱范围内观察到了包层模和 SPP 模式共振耦合的一系列共振窄谱线。然而这些光纤或平面波导 SPR 传感器都缺乏参考通道,参考通道在生物监测中为待测量的变化提供了比较基准,在传感应用中是必不可少的。Špačková 等<sup>[6]</sup>于 2009 年提出一种基于 FBG 的多通道 SPR 传感器,通过在同一根光纤纤芯写入不同周期、不同长度的 FBG,将其中一个 FBG 对应的溶液通道作为参考基准通道,另一个 FBG 对应的溶液通道作为监测待测溶液折射率变化的测量通道,利用波分复用技术(WDM)可以对两个通道的共振光谱进行观察。在对这一结构进行优化之后折射率灵敏度可达 200 nm/RIU,当波长分辨率为 1 pm 时折射率分辨率高达  $5 \times 10^{-6}$  RIU。早在 2006 年 He 等<sup>[5]</sup>提出的在同一根光纤纤芯写入两个不同参数的 LPG 也具有相同的功能。

## 6 我国研究现状及展望

国内关于利用光栅来激发 SPR 现象进行折射率传感的研究尚处于起步阶段,中国科学院电子学研究

所、中国科学技术大学、合肥工业大学、上海大学、南京航空航天大学等对 SPR 传感器在生物、化学及工业检测等方面的应用进行了研究<sup>[27,39~42]</sup>。中国科学技术大学的 Lin 等<sup>[41]</sup>在金属光栅的表面涂覆一层厚度约为 8 nm 的金属钯(Pd)实现对氢气浓度的检测,金属钯与氢气之间通过吸附作用和解吸附作用使钯的介电常数发生变化,进而引起 SPR 共振凹谷的漂移,理论上可以检测到的氢气体积分数为 0.001%。这一研究成果对开发新能源、火灾预警、煤矿安全检测具有重要意义。该课题组还研究了 H 型金属光栅 SPR 传感器的结构参数、温度对传感器性能的影响,所得结论对实际光栅 SPR 传感器的设计与制作有指导意义。中国计量大学的 Shao 等<sup>[42]</sup>用紫外曝光法制作出基于 TFBG 的 SPR 传感器实现液体折射率和环境温度的同时探测,实验结果分别为 571.5 nm/RIU、6.3 pm/°C。在实际应用中环境温度的变化不仅影响待测液体的折射率,而且影响金属的物理性质,这一实验结果对设计带有温度补偿单元的 SPR 传感器具有参考价值。

当前众多学者对基于光子晶体光纤(PCF)的 SPR 传感器做了大量理论研究,利用实芯蜂窝状空气孔阵列的光子晶体光纤 SPR 传感器折射率灵敏度高达 14000 nm/RIU,如果检测单元波长分辨率为 0.1 nm,对应的折射率分辨率达  $7.2 \times 10^{-6}$  RIU,是进一步提高 SPR 传感器分辨率的研究方向<sup>[43]</sup>。若将光子晶体光纤与光纤光栅结合起来进行 SPR 传感将会是一个有意义的探索。目前亟待解决的问题主要有镀膜效率低,金属膜厚的均匀性难以保证,金属表面质量较差,整个 SPR 传感系统成本高,传感探头可重复性有待提高。在今后要进一步降低光栅 SPR 传感器的成本,减小传感探头尺寸,实现 SPR 传感器的商品化、微型化、芯片化。要进一步提高探测灵敏度,降低传感单元和接收单元的响应时间,增强传感探头的可重复性,实现多通道、多参量同时监测。在可以预见的将来,SPR 传感器将会有广阔的应用前景。

### 参 考 文 献

- 1 J. Homola, H. Vaisocherová, J. Dostálek *et al.*. Multi-analyte surface plasmon resonance biosensing[J]. *Methods*, 2005, **37**(1): 26~36
- 2 R. C. Jorgenson, S. S. Yee. A fiber optic chemical sensor based on surface plasmon resonance[J]. *Sens. Actuators B Chem.*, 1993, **12**(3): 213~220
- 3 J. Homola. Optical-fiber sensor based on surface-plasmon excitation[J]. *Sens. Actuators B Chem.*, 1995, **29**(1-3): 401~405
- 4 J. Dostálek, J. Čtyroký, J. Homola *et al.*. Surface plasmon resonance biosensor based on integrated optical waveguide[J]. *Sens. Actuators B Chem.*, 2001, **76**(1-3): 8~12
- 5 Yue-Jing He, Yu-Lung Lo, Jen-Fa 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
- 6 B. Špačková, M. Piliarik, P. Kvasnička *et al.*. Novel concept of multichannel fiber optic surface plasmon resonance sensor [J]. *Sens. Actuators B Chem.*, 2009, **139**(1): 199~203
- 7 Y. Y. Shevchenko, J. Albert. Plasmon resonances in gold-coated tilted fiber Bragg gratings[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(3): 211~213
- 8 Galina Nemova, Raman Kashyap. Modeling of plasmon-polariton refractive-index hollow core fiber sensors assisted by a fiber Bragg grating[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(10): 3789~3796
- 9 Li Xia, Yating Zhang, Chi Zhou *et al.*. Numerical analysis of plasmon polariton refractive index fiber sensors with hollow core and a long period grating[J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(12): 2835~2838
- 10 S. M. Tripathi, A. Kumar, E. Marin *et al.*. Side-polished optical fiber grating-based refractive index sensors utilizing the pure surface plasmon polariton[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(13): 1980~1985
- 11 Gu Zhengtian, Deng Chuanlu. Application and development of coated fiber grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1317~1326
- 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
- 12 B. Špačková, Jiří Homola. Theoretical analysis of a fiber optic surface plasmon resonance sensor utilizing a Bragg grating [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(25): 23254~23264
- 13 T. Allsop, R. Neal, S. Rehman *et al.*. Generation of infrared surface plasmon resonances with high refractive index sensitivity utilizing tilted fiber Bragg gratings[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(22): 5456~5460
- 14 T. Allsop, R. Neal, S. Rehman *et al.*. Characterization of infrared surface plasmon resonances generated from a fiber-optical sensor utilizing tilted Bragg gratings[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2008, **25**(4): 481~490

- 15 Pavel Tománek, Lubomír Grmela, Pavel Škarvada *et al.*. Optical fiber Bragg grating used in the sensing of surface plasmon resonance[C]. *SPIE*, 2007, **6716**: 67160K
- 16 Y. Y. Shevchenko, D. A. D. Blair, M. C. Derosa *et al.*. DNA target detection using gold-coated tilted fiber Bragg gratings in aqueous media[C]. *Lasers and Electro-Optics 2008 and 2008 Conference on Quantum Electronics and Laser Science*, 2008 CMJ4
- 17 Y. Shevchenko, N. U. Ahamad, G. Galway *et al.*. Surface plasmon resonance fiber sensor for *in situ* monitoring of the deposition of nm-scale polymer films[C]. *SPIE*, 2009, **7503**: 750311
- 18 Jaw-Luen Tang, Shu-Fang Cheng, Wei-Ting Hsub *et al.*. Fiber-optic biochemical sensing with a colloidal gold-modified long period fiber grating[J]. *Sens. Actuators B Chem.*, 2006, **119**(1): 105~109
- 19 Gu Zhengtian, Zhang Jiangtao. Metal-coated long period liquid sensor based on dual-peak resonance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0305003  
顾铮先, 张江涛. 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[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0305003
- 20 Deng Chuanlu, Gu Zhengtian, Zhang Jiangtao. Resonant characteristics of long period fiber grating coated with double layer films including metal film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2656~2664  
邓传鲁, 顾铮先, 张江涛. 金属镀层两层膜系长周期光纤光栅谐振特性研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2656~2664
- 21 Galina Nemova, Raman Kashyap. Theoretical model of a planar integrated refractive index sensor based on surface plasmon polariton excitation[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **275**(1): 76~82
- 22 Galina Nemova, Raman Kashyap. Theoretical model of a planar integrated refractive index sensor based on surface plasmon-polariton excitation with a long period grating[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(10): 2696~2701
- 23 Galina Nemova, Raman Kashyap. Novel fiber Bragg grating assisted plasmon-polariton for bio-medical refractive-index sensors[J]. *Mater. Electron.*, 2007, **18**(s1): S327~S330
- 24 Galina Nemova, Raman Kashyap. Surface plasmon-polariton Mach-Zehnder refractive index sensor[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2008, **25**(10): 1673~1677
- 25 Raether H.. *Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings*[M]. Berlin: Springer-Verlag Publishers, 1988. 7~13
- 26 J. Homola, I. Koudela, S. S. Yee. Surface plasmon resonance sensors based on diffraction gratings and prism couplers; sensitivity comparison[J]. *Sens. Actuators B Chem.*, 1999, **54**(1-2): 16~24
- 27 Zeng Jie, Liang Dakai, Cao Zhenxin. Study on liquid refractive index measured by the optical fiber surface plasmon wave sensor[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2005, **27**(1): 18~20  
曾捷, 梁大开, 曹振新. 光纤 SPR 传感器测量液体折射率的研究[J]. *压电与声光*, 2005, **27**(1): 18~20
- 28 Zhang Jiangtao. Principle and study progress of fiber optic chemical sensor based on surface plasmon resonance[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(10): 24~31  
张江涛. 光纤表面等离子体共振光化学传感器的原理及进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(10): 24~31
- 29 Raman Kashyap, Nemova Galina. Surface plasmon resonance-based fiber and planar waveguide sensors[J]. *J. Sensors*, 2009, **2009**: 645162
- 30 Liu Deming, Sun Junqiang, Lu Ping *et al.*. *Fiber Optics*[M]. Beijing: Science Press, 2008. 144~146  
刘德明, 孙军强, 鲁平等. *光纤光学*[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 144~146
- 31 T. Erdogan. Fiber grating spectra[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 32 Galina Nemova, Raman Kashyap. A compact integrated planar waveguide refractive-index sensor based on a corrugated metal grating[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(8): 2244~2250
- 33 Galina Nemova, Raman Kashyap. Theoretical model of a planar waveguide refractive index sensor assisted by a corrugated long period metal grating[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(6): 1522~1528
- 34 Kyung Min Byun, Sung June Kim, Donghyun Kim. Grating-coupled transmission-type surface plasmon resonance sensors based on dielectric and metallic gratings[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(23): 5703~5708
- 35 Xiaoyan Yang, Deming Liu. Sensitivity enhancement of surface plasmon resonance sensors through planar metallic film closely coupled to nanogratings[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(10): 563~565
- 36 F.-C. Chien, C.-Y. Lin, J.-N. Yih *et al.*. Coupled waveguide-surface plasmon resonance biosensor with subwavelength grating[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2007, **22**(11): 2737~2742
- 37 Colin J. Alleyne, Andrew G. Kirk, Ross C. McPhedran *et al.*. Enhanced SPR sensitivity using periodic metallic structures [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(13): 8163~8169
- 38 Saurabh Mani Tripathi, Arun Kumar, Emmanuel Marin *et al.*. Highly sensitive miniaturized refractive index sensor based

- on Au-Ag surface gratings on a planar optical waveguide[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**(17): 2469~2476
- 39 D. Zhang, P. Wang, X. Jiao *et al.*. Investigation of the sensitivity of H-shaped nano-grating surface plasmon resonance biosensors using rigorous coupled wave analysis[J]. *Appl. Phys. A*, 2007, **89**(2): 407~411
- 40 Kaiqun Lin, Yonghua Lu, Zhaofeng Luo *et al.*. Numerical and experimental investigation of temperature effects on the surface plasmon resonance sensor[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(5): 428~431
- 41 Kaiqun Lin, Yonghua Lu, Junxue Chen *et al.*. Surface plasmon resonance hydrogen sensor based on metallic grating with high sensitivity[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(23): 18599~185604
- 42 Li-Yang Shao, Yanina Shevchenko, Jacques Albert. Intrinsic temperature sensitivity of tilted fiber Bragg grating based surface plasmon resonance sensors[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(11): 11464~11471
- 43 Maksim Skorobogatiy. Microstructured and photonic bandgap fibers for applications in the resonant bio- and chemical sensors[J]. *J. Sensors*, 2009, **2009**: 524237