

新型双通道可选择性 SPR 光纤传感器的研究

李文超¹, 何家欢², 李志全², 王亚娟², 冯丹丹², 顾而丹²

(1. 东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004;
2. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 设计了一种双通道表面等离子体共振光纤传感器, 分析了 Au、Cu 两种材料对波长调制型表面等离子体共振光纤传感器的影响, 优化了金属厚度并且选取优化后的金属厚度 $d_{Au}=47$ nm, $d_{Cu}=53$ nm 进行数值仿真分析。结果表明, 金属层为金的通道比金属层为铜的通道灵敏度高, 但是金属层为铜的通道比金属层为金的通道检测精度高 4 倍; 金属层为金的传感通道适合检测折射率较低的物质, 而金属层为铜的传感通道适合检测折射率较高的物质, 该传感器的提出扩大了单一传感器的应用范围, 并且文中提出的传感器比传统的 SPR 传感器检测精度高, 灵敏度和单通道传感器一样。

关键词: 表面等离子体共振; 光纤传感器; 双通道; 灵敏度

中图分类号: O433 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0322002

Research on novel two-channel selective SPR optical fiber sensor

Li Wenchao¹, He Jiahuan², Li Zhiquan², Wang Yajuan², Feng Dandan², Gu Erdan²

(1. School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China;
2. Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: A two-channel fiber optic sensor based on surface plasmon resonance was developed. The effects of two materials of Au and Cu on the performances of the fiber optic sensor modulated by incident wavelength were analyzed. The thickness of metal was optimized, and the optimized thickness of the metal $d_{Au}=47$ nm and $d_{Cu}=53$ nm was chosen to carry out numerical simulation. And the results show that, the sensitivity of the channel of Au is higher than the sensitivity of the channel of Cu, on the other hand, the detection precision of the channel of Cu is four times higher than the detection precision of the channel of Au. The sensing channel of Au is suitable for the detection of the lower refractive index of sensing medium, and the sensing channel of Cu is suitable for the detection of higher refractive index of sensing medium. The proposed sensor has expanded the detection range, compared with the single channel sensor. The detection accuracy of the two-channel SPR fiber sensor is higher than that of the single channel sensor. The measuring sensitivities of two-channel SPR fiber sensor and conventional single channel sensor are the same.

Key words: surface plasmon resonance; optical fiber sensor; two-channel; sensitivity

收稿日期: 2016-07-13; 修订日期: 2016-08-24

基金项目: 河北省百人计划(4570018); 河北省自然科学基金(F2014501150)

作者简介: 李文超(1981-), 男, 讲师, 博士, 主要从事于非线性光电方面的研究。Email: chao121328@sohu.com

0 引言

表面等离子体共振(Surface Plasmon Resonance, SPR)是利用入射光在介质与金属两种具有不同介电性质的介质分界面发生全反射时产生的倏逝波激发金属表面的自由电子,在金属与介质的分界面产生表面等离子体波(Surface Plasmon Wave, SPW),当满足 SPW 波矢与入射光在水平方向的波矢相等时,就会发生 SPR 效应^[1-2],使全反射光中相应的波矢光强有显著下降出现凹谷,在透射光谱中会出现共振吸收峰,此共振吸收峰位置与外界介质折射率有关,当外界介质折射率发生变化时,会导致共振吸收峰位置的变化,以此实现对外界环境介质参量的检测^[3]。表面等离子体共振传感器由于快速、精确的特点,在物理、化学、生物传感等方面得到了广泛的关注和应用^[4-7]。

表面等离子体共振光纤传感器因为它的体积小,样品取样少,价格便宜,能实时传输的特点越来越被关注^[8]。自从 1993 年 Jorgenson 和 Yee 提出将表面等离子体传感技术应用于光纤技术中,许多光纤类型(单模浸渍光纤、D 型单模光纤、D 型光纤)的表面等离子体传感器被提出^[9],B.D.Gupta 等人提出了表面等离子体共振 U 型光纤传感器,传感器的灵敏度比传统的光纤传感器提高了 25 倍左右^[10],2011 年曾捷,梁大开等人提出了一种基于空分复用原理的多通道光纤 SPR 传感器模型,并构建了由 2×2 型耦合器和光纤 SPR 探针组成的准分布式表面等离子体波共振激励结构,实现了对光波信号的连续调制^[11]。2012 年赵华新、蒋永翔等人设计了一种基于表面等离子体共振原理的空心光纤传感器,使用空心光纤作为光波导,外表面镀金属膜的圆柱体作为探头,可以针对不同折射率的检测物质灵活的更换探头材料,相对传统的表面等离子体共振传感器性价比更高^[12]。由于在 SPR 光谱中共振波长的位置由金属的消光系数 k 决定,光谱的半峰宽由折射率 n 决定,光谱的共振深度由金属层厚度 d 决定^[13]。每种金属适应的波长有限,而且每种金属检测精度和灵敏度各有不同,对不同检测物质有不同灵敏度和检测精度要求时,要同时需要几根光纤传感器。基于这些问题,文中提出了一种可见光及近红外

波长范围内可选择高灵敏度/高检测精度两用表面等离子体共振光纤传感器。文中介绍了传输矩阵法,并且优化了两种金属层厚度,将文中设计的双通道传感器的灵敏度和检测精度与单金属材料的光纤传感器进行了对比。

1 理论

文中基于多层棱镜结构和衰减全反射理论提出的传感器结构如图 1 所示。光纤纤芯为棱镜,去掉传感区域纤芯周围的包层,在纤芯两侧分别镀金和铜,厚度分别记为 d_{Au} 和 d_{Cu} ,由于金属铜的化学性质活泼,为了防止金属被氧化分别在金属层上覆一层硅,厚度记为 d_{Si} ,同时硅的高折射率也提高了传感器的灵敏度,忽略各层表面粗糙度的影响。

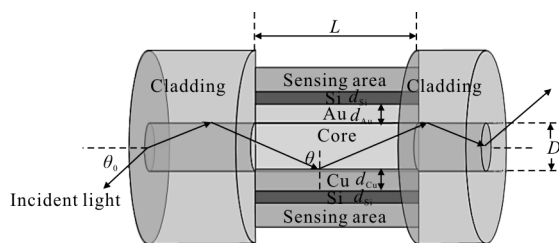


图 1 基于 SPR 的光纤传感器的原理图

Fig.1 Schematic diagram of fiber optic sensor based on SPR

传感器由光纤纤芯-金-硅-待测物质层和光纤纤芯-铜-硅-待测物质层两部分组成,纤芯为石英玻璃(光纤直径 2 μm),而且折射率随波长变化而变化。折射率表达式为:

$$n_1(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{a_1 \lambda^2}{\lambda^2 - b_1^2} + \frac{a_2 \lambda^2}{\lambda^2 - b_2^2} + \frac{a_3 \lambda^2}{\lambda^2 - b_3^2}} \quad (1)$$

式中: λ 的单位是 μm, a_1, a_2, a_3, b_1, b_2 和 b_3 均为 Sellmeier 系数 $a_1=0.696\ 166\ 3, a_2=0.407\ 942\ 6, a_3=0.897\ 479\ 4, b_1=0.068\ 404\ 3\ \mu\text{m}, b_2=0.116\ 241\ 4\ \mu\text{m}, b_3=9.896\ 161\ \mu\text{m}$ ^[14]。金属的介电常数为:

$$\varepsilon_m(\lambda) = \varepsilon_{mr} + i\varepsilon_{mi} = 1 - \frac{\lambda^2 \lambda_c}{\lambda_p^2 (\lambda_c + i\lambda)} \quad (2)$$

式中: λ 单位为 m; λ_p 为金属的等离子体波长; λ_c 为碰撞波长。金属 Cu: $\lambda_p=1.361\ 7 \times 10^{-7}\ \text{m}; \lambda_c=4.085\ 2 \times 10^{-5}\ \text{m}$; 金属 Au: $\lambda_p=1.682\ 6 \times 10^{-7}\ \text{m}; \lambda_c=8.934\ 2 \times 10^{-6}\ \text{m}$; 硅的折射率为^[15]:

$$n_3(\lambda) = A + A_1 e^{-\lambda/t_1} + A_2 e^{-\lambda/t_2} \quad (3)$$

式中： λ 的单位为 μm , $A=3.449\ 04$, $A_1=2\ 271.888\ 13$, $A_2=3.395\ 38$, $t_1=0.058\ 304$, $t_2=0.303\ 84$ 。样品水的折射率为 1.33。

根据传播过程中电场与磁场的分布，将光波分解为电场矢量垂直于入射面的 s 偏振光（或称 TE 波）和电场矢量平行于入射面的 p 偏振光（或称 TM 波）。在分界面处 s 光电场分量 E 的振动方向平行于分界面，电子的运动未受到阻碍，因此在分界面不会产生 SPR；而 p 偏振光的电场振动方向垂直于分界面，由 p 光形成的倏逝波激发出金属表面的自由电子，在金属和介质分界面形成表面等离子体波。因此在光路中只有 p 光可以产生 SPR 效应， s 光不能产生 SPR 效应所以文中只分析 p 光的反射系数和传输功率^[6]。文中传感器结构类似四层棱镜结构选用传输矩阵法分析。每层介质的厚度为 d_k ，介电常数为 ε_k ，磁导率为 μ_k ，折射率为 n_k 。切向场的第一个边界条件 $Z=Z_1=0$ ，最后一个的边界条件 $Z=Z_{N-1}$ 与下式相关。

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ V_1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} U_{N-1} \\ V_{N-1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： U_1 和 V_1 分别为第一层的电场和磁场边界的分量； U_{N-1} 和 V_{N-1} 为第 N 层的分量； M 是这个矩阵的特征向量， $M = \prod_{K=2}^{N-1} M_K$, $M_K = \begin{pmatrix} \cos\beta_k & -\sin\beta_k/q_k \\ -iq_k \sin\beta_k & \cos\beta_k \end{pmatrix}$, $q_k = (\varepsilon_k - n^2 \sin^2 \theta)^{1/2} / \varepsilon_k$, $\beta_k = d_k (2\pi/\lambda) (\varepsilon_k - n^2 \sin^2 \theta)^{1/2} / \varepsilon_k$, θ 为入射角， p 光的振幅反射系数为：

$$r_p = \frac{(M_{11} + M_{12} q_N) q_1 - (M_{21} + M_{22} q_N)}{(M_{11} + M_{12} q_N) q_1 + (M_{21} + M_{22} q_N)} \quad (5)$$

p 光 N 层结构的反射系数为：

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

光线从光纤传感器的一端进入光纤，传感器的另一端连接检测系统记录输出信号。光源采用平行光源，显微物镜将光束聚集在光纤末端的轴点上^[7]。当光线与光纤纤芯-包层界面的入射角为 θ 时，功率的分布为：

$$dP \propto \frac{n_1^2 \sin\theta \cos\theta}{(1-n_1^2 \cos^2 \theta)^2} d\theta \quad (7)$$

式中： θ 为光纤-包层界面的光线与法线的夹角； n_1 为纤芯的折射率，为了计算有效传输功率，反射率从

单一反射增加到一定数量，光线以特定传输角度经历传感器接口。因此，基于双通道光纤 SPR 传感器的 p 偏振光的规范化传输功率为：

$$P_{\text{trans}} = \frac{\int_{\theta_{cr}}^{\pi/2} R_1^{N_{\text{ref}}(\theta)} R_2^{N_{\text{ref}}(\theta)} \frac{n_1^2 \sin\theta \cos\theta}{(1-n_1^2 \cos^2 \theta)^2} d\theta}{\int_{\theta_{cr}}^{\pi/2} \frac{n_1^2 \sin\theta \cos\theta}{(1-n_1^2 \cos^2 \theta)^2} d\theta} \quad (8)$$

$$N_{\text{ref}}(\theta) = \frac{L}{2D \tan\theta} \quad (9)$$

$$\theta_{cr} = \sin^{-1} \left(\frac{n_{cl}}{n_1} \right) \quad (10)$$

式中： $N_{\text{ref}}(\theta)$ 传感区域内入射角为 θ 光线在纤芯-金属层界面的反射次数； R_1 和 R_2 分别为金属层是铜和金时传感器对应的 p 光的反射系数； L 和 D 分别为传感区域的长度和光纤纤芯的直径； θ_{cr} 为全反射的临界角； n_{cl} 为光纤包层的折射率。以待测介质为水 ($n_s=1.33$) 为例对文中设计的光纤传感器的传输功率光谱进行仿真分析，结果表传输功率在 644 nm 和 744 nm 处出现两处显著下降，即共振吸收峰，此共振吸收峰位置与传感器金属层材料的消光系数 k 有关系，当金属层材料不同时，共振吸收峰位置也不同，而且金属层材料不同传感器传输功率谱的两个半峰宽也不同，如图 2 所示。

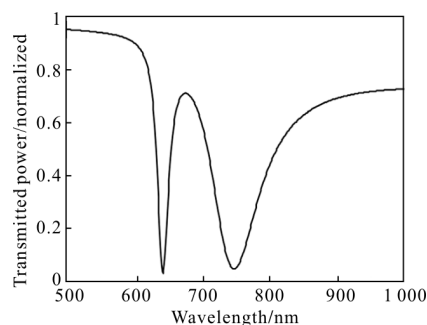


图 2 双通道表面等离子体共振光纤传感器传输功率谱
Fig.2 Transmission power spectrum for two-channel surface fiber optic sensor based on SPR

灵敏度和检测精度是传感器的两个重要特征。在波长调制型表面等离子共振传感器中，反射系数 R 是入射波长的函数，当反射系数最小时对应的入射波长就是产生 SPR 的共振波长 λ_{SPR} ，共振波长随着待测介质折射率的变化而变化，如果待测介质折射率变化 Δn_s ，共振波长变化 $\Delta \lambda_{\text{SPR}}$ ，其比值

被定义为 SPR 传感器的灵敏度^[18], 则传感器的灵敏度为:

$$S = \frac{\Delta\lambda_{SPR}}{\Delta n_s} \quad (11)$$

传感器的检测精度是关于半峰宽(FWHM)的函数, 是半峰宽的倒数^[19], 即:

$$D.A. = \frac{1}{\Delta\lambda_{0.5}} \quad (12)$$

式中: $\Delta\lambda_{0.5}$ 为半峰宽。半峰宽越窄, 确定的共振波长位置越准确, 检测精度越高。

2 分析与讨论

在之前的研究中证明, 在波长范围为 500~600 nm 之间金属铜的光学常数与阈值相关, 带间的电子跃迁使光学常数的虚部突然变化, 波长在 600 nm 之后铜可以完全看成电子气, 计算介电常数时不考虑其他电子的影响^[19]。因此文中将 SPR 传感器的共振波长控制在 600 nm 之后。棱镜、金属、硅及待测介质受热光效应的影响其光学参数均发生变化, 同时随着温度的增加金属的等离子频率下降, 共振频率增加, SPR 共振曲线变宽, 检测精度下降^[20]; 温度对传感器的影响不是文中研究的重点, 选择室温下对传感器的性能进行性分析。金属层的厚度影响表面等离子体的共振强度、半峰宽, 首先对金属层厚度进行优化, 选取最优的厚度。传感区域长度 $L=50 \mu\text{m}$, 硅层厚度为 5 nm, 待测介质折射率为 1.33。

图 3 为金属铜的厚度的优化曲线, 随着金属厚度增加共振波长发生红移, 最小传输功率先减小再增加, 半峰宽减小。当 $d_{Cu}=53 \text{ nm}$ 时, 传输功率最小, 半峰宽也相对较窄。金层厚度的优化采用和铜一样的优化方法, 金层的优化厚度为 $d_{Au}=47 \text{ nm}$ 。图 4 为双通道表面等离子体共振光纤传感器传感区域的横

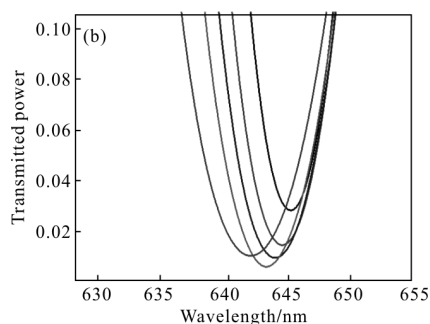
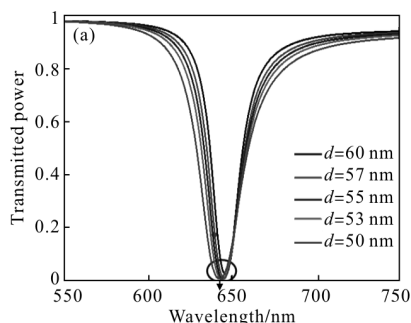


图 3 $n_s=1.33$ 不同铜膜厚度下, 基于 SPR 光纤传感器传输功率与入射波长的关系。(b)为(a)的局部放大图

Fig.3 Relationship between transmitted power and wavelength of SPR-based optical fibre sensor with different thickness of Cu film when $n_s=1.33$. (b) is partial enlargement of (a)

截面示意图, 其中 $d_{Cu}=53 \text{ nm}$, $d_{Au}=47 \text{ nm}$, $d_{Si}=5 \text{ nm}$, 纤芯直径为 $r_1=2 \mu\text{m}$, $r_2=1.994 \mu\text{m}$ 。

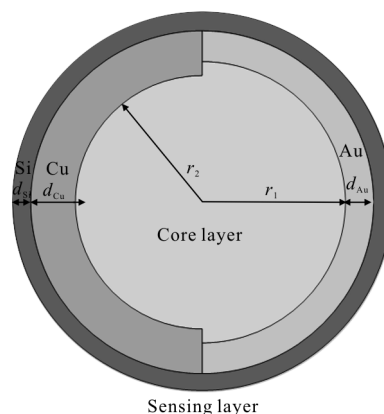


图 4 双通道光纤传感区域的横截面示意图

Fig.4 Schematic diagram of cross section of sensing part of two-channel optical fiber sensing

图 5 为单双通道光纤传感器优化金属层厚度之后的出射光谱, 曲线(a)为金属层为铜的单通道传感器的传输功率, 曲线(b)为双通道传感器的传输功率, 曲线(c)为金属层为金的单通道传感器的传输功率。曲线(b)有两个共振峰, 两个共振波长分别与曲线(a)和(c)一致, 共振波长随待测介质折射率变化而变化, 由灵敏度的定义式(11)可知, 单双通道传感器的灵敏度一样; 但是曲线(b)与曲线(a)、(c)相比半峰宽更窄, 而且与曲线(c)相比尤其明显, 双通道的半峰宽更窄, 检测精度较高; 对于曲线(b)两个共振峰的半峰宽不同, 前一个共振峰要比后一个窄很多, 所以前一个通道的检测精度要比后一个通道的检测精度高。

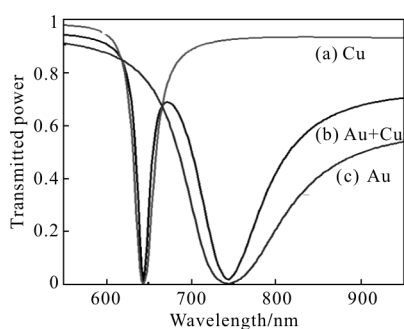
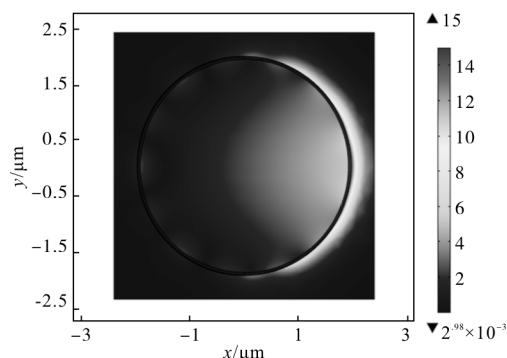


图 5 待测介质为水,金属层为铜的单通道传感器、金属层为铜和金属层为金的双通道传感器、金属层为金的单通道传感器的有效传输功率曲线

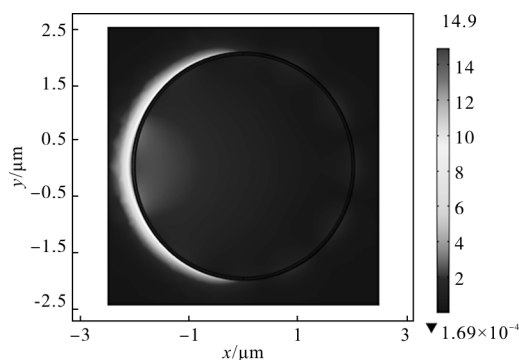
Fig.5 SPR response curves of single channel sensor with tested medium of water metallayer of Cu, dual channel sensor with metal layer of Cu and metal layer of Au and single channel sensor with metal layer of Au for the aqueous medium

图 6 中对在共振波长下单双通道传感器的电场强度进行了模拟,其中图(a)、(c)为金属层材料为金在入射波长 744 nm 下的电场分布,(b)、(d)为金属层材料为铜在入射波长 644 nm 下的电场分布,(a)、(b)为单通道,(c)、(d)为双通道。由图 6(c)、(d)给出了在



(c) 双通道中金属层为金的通道, $\lambda=744$ nm

(c) Two-channel sensor with metal layer of Au, $\lambda=744$ nm

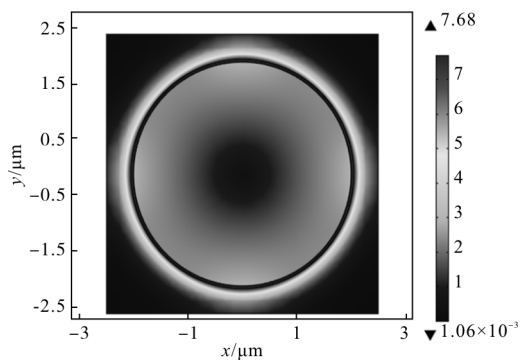


(d) 双通道中金属层为铜的通道, $\lambda=644$ nm

(d) Two-channel sensor with metal layer of Cu, $\lambda=644$ nm

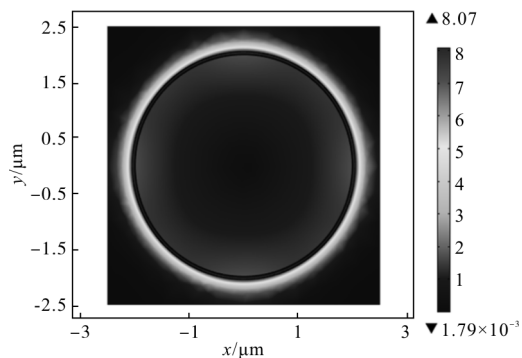
图 6 在共振波长下单双通道传感器电场分布图

Fig.6 Electric field distribution of single and double channel sensors at resonance wavelength



(a) 单通道金属层为金, $\lambda=744$ nm

(a) Single channel sensor with metal layer of Cu, $\lambda=744$ nm



(b) 单通道金属层为铜, $\lambda=644$ nm

(b) Single channel sensor with metal layer of Cu, $\lambda=644$ nm

入射波长下两种不同金属层材料激发 SPR 的电场图,当入射波长为 744 nm 时,只有金通道激发了 SPR,铜通道没有产生 SPR 效应,当入射波长为 644 nm 时,铜通道激发了 SPR,金通道没有产生 SPR,文中正是利用不同金属材料的共振波长不同实现波分复用,设计了双通道传感器。

接下来对单双通道传感器在最优金属厚度下共振波长、半峰宽进行分析,并进行了对比。

由图 7 可知,传感器的灵敏度等于波长随折射率变化的斜率,待测物质的折射率从 1.32 RIU 变化到 1.38 RIU,步幅为 0.01。两个通道中金属层为金的通道最高灵敏度为 7 400 nm/RIU,而金属层为铜的通道最高灵敏度为 5 700 nm/RIU,金属层为金的通道比金属层为铜的通道灵敏度高;共振波长随着待测介质折射率的增加均增加,金属层为金的通道增加较明显,但是单双通道传感器的共振波长相同,即双通道传感器能达到与单通道一样的灵敏度。

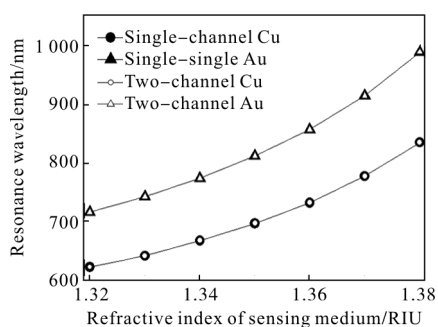


图 7 $d_{Au}=53\text{ nm}$, $d_{Cu}=47\text{ nm}$, $d_{Si}=5\text{ nm}$, 单双通道传感器的共振波长

Fig.7 Resonance wavelength of single-channel sensor and of two-channel sensor with refractive index of sensing medium for 47 nm thick Au layers and 53 nm thick Cu layers with fixed 5 nm thick Si layers

由图 8 可知随着折射率的增加, 单双通道传感器的传输功率曲线的半峰宽都增加, 而且双通道的两个半峰宽大小相差很大, 两个通道中金属层为金的通道增加明显, 半峰宽越大, 传感器的共振波长越难于精确的测量, 传感器的检测精度减小, 金属层为铜的通道检测精度比金属层为金的通道至少高 4 倍; 其次双通道传感器的半峰宽都比单通道传感器窄, 因此双通道传感器比单通道传感器的检测精度更高, 其中金属层材料为金的通道更为明显。

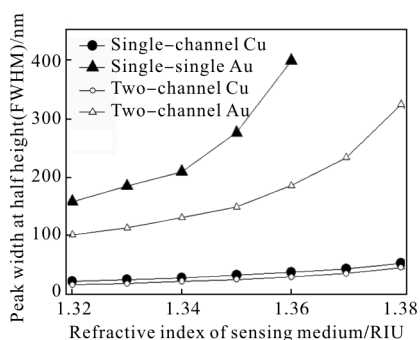


图 8 $d_{Au}=53\text{ nm}$, $d_{Cu}=47\text{ nm}$, $d_{Si}=5\text{ nm}$, 单双通道传感器的半峰宽

Fig.8 Variations of peak width at half height(FWHM)of single-channel sensor and of two-channel sensor with refractive index of sensing medium for 47 nm thick Au layers and 53 nm thick Cu layers with fixed 5 nm thick Si layers

结合图 7 和图 8, 待测介质折射率较高时与较低时相比, 双通道传感器金属层为金的通道灵敏度由 2600 nm/RIU 提高到 7400 nm/RIU , 但是半峰宽展宽很大, 检测精度由 0.010 nm^{-1} 严重下降到 0.003 nm^{-1} ; 而金属层为铜的通道灵敏度也有所提高, 由 2000 nm/RIU 提高到 5700 nm/RIU , 半峰宽展宽并不严重, 检测精

度由 0.040 nm^{-1} 下降到 0.020 nm^{-1} 。随着金通道半峰宽的展宽越来越大, 检测精度越来越低, 而铜通道的展宽变化并不大, 检测精度下降较小, 所以金属层为铜通道的检测精度比金属层为金通道的检测精度至少高 4 倍。在实际应用中不能过高地追求高灵敏度或高检测精度, 要根据检测的物质结合传感器的综合性能合理选择传感器。综合考虑传感器灵敏度和检测精度两方面的影响, 文中设计的双通道传感器中, 金属层为金的传感通道更适合检测折射率较低的物质, 而金属层为铜的传感通道更适合检测折射率较高的物质。

3 结论

文中提出了基于棱镜多层结构和不同金属在相同条件下共振波长、半峰宽不同而设计的可见光及近红外波长下双通道可选择性光纤传感器。文章中优化了金属厚度并且选取优化后的金属厚度 $d_{Au}=47\text{ nm}$, $d_{Cu}=53\text{ nm}$, 硅层厚度 $d_{Si}=5\text{ nm}$, 进行 MATLAB 仿真分析, 双通道的灵敏度能达到与单通道一致的灵敏度, 而且检测精度比单通道有所提高; 双通道中光纤纤芯-金-硅通道最高灵敏度可达 7400 nm/RIU , 光纤纤芯-铜-硅通道的最高灵敏度可达 5700 nm/RIU , 双通道传感器的灵敏度随着待测介质折射率的增加而增加, 检测精度随着待测介质折射率的增加而减小, 光纤纤芯-铜-硅通道的检测精度比光纤纤芯-金-硅通道至少高了 4 倍; 双通道传感器的优点在于使用时可以根据待测介质折射率的大小灵活选择两种通道, 获得最适合的灵敏度或者检测精度, 提高了传感器的利用率, 为进一步研究开发集成化多通道传感器提供技术储备。

参考文献:

[1] Zeng Jie, Liang Dakai, Zeng Zhenwu, et al. Study on measurement of liquid refractive index by analyzing SPR spectrum character [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, 26(4): 723-727. (in Chinese)
曾捷, 梁大开, 赠振武, 等. 基于 SPR 光谱分析的液体折射率测量研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(4): 723-727.

[2] Gupta B D, Verma R K. Surface plasmon resonance-based fiber optic sensors: principle, probe designs, and some applications [J]. *Journal of Sensors*, 2009, 47: 1-12.

- [3] Zhang Xiaoli, Liang Dakai, Zeng Jie, et al. Monitoring the sewage degradation by analyzing optic fiber SPR spectrum character [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(2): 532–536. (in Chinese)
张晓丽, 梁大开, 曾捷, 等. 基于光纤 SPR 光谱分析的污水降解过程监测研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(2): 532–536.
- [4] Bo L, Nylander C, Lunström I. Surface plasmon resonance for gas detection and biosensing [J]. *Sensors & Actuators*, 1983, 83(4): 299–304.
- [5] Harris R D, Wilkinson J S. Waveguide surface plasmon resonance sensors [J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 1995, 95(29): 261–267.
- [6] Homola J. On the sensitivity of surface plasmon resonance sensors with spectral interrogation [J]. *Sensors Actuators*, 1997, 41(1–3): 207–211.
- [7] Grouzis J P, Pouliquin P, Rigaud J, et al. Surface plasmon resonance spectroscopy as a tool for investigating the biochemical and biophysical properties of membrane protein systems. II: Applications to biological systems [J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Reviews on Biomembranes*, 1997, 1331(2): 131–152.
- [8] Pollet J, Delpont F, Janssen K P F, et al. Fiber optic SPR biosensing of DNA hybridization and DNA – protein interactions [J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2009, 25(4): 864–869.
- [9] Lee B, Roh S, Park J. Current status of micro- and nano-structured optical fiber sensors[J]. *Optical Fiber Technology*, 2009, 15(3): 209 – 221.
- [10] Verma R K, Gupta B D. Theoretical modelling of a bi-dimensional U-shaped surface plasmon resonance based fibre optic sensor for sensitivity enhancement [J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2008, 41(9): 1459–1469.
- [11] Zeng Jie, Liang Dakai, Zhang Xiaoli, et al. Study on multi-channel optical fiber sensor based on surface plasmon resonance [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(3): 508–513. (in Chinese)
曾捷, 梁大开, 张晓丽, 等. 多通道光纤表面等离子体波共振传感器研究[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(3): 508–513.
- [12] Zhao Huaxin, Jiang Yongxiang, Luo Tianqiong, et al. Hollow optical fiber sensor based on surface plasmon resonance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 232–237. (in Chinese)
赵华新, 蒋永翔, 罗天穹, 等. 基于表面等离子体共振原理的空芯光纤传感器[J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 232–237.
- [13] Salamon Z, Macleod H A, Tollin G. Surface plasmon resonance spectroscopy as a tool for investigating the biochemical and biophysical properties of membrane protein systems. I: Theoretical principles [J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Reviews on Biomembranes*, 1997, 1331(2): 117 – 129.
- [14] Shukla S, Sharma N K, Sajal V. Sensitivity enhancement of a surface plasmon resonance based fiber optic sensor using ZnO thin film: a theoretical study [J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2015, 206: 463–470.
- [15] Priya B, Gupta B D. Surface –plasmon –resonance –based fiber –optic refractive index sensor: sensitivity enhancement [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(14): 2032–2036.
- [16] Zhang Shaohua. Research on simulation and detection application of surface plasmon resonance sensor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
张少华. 表面等离子体波传感器数值仿真及其检测应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [17] Srivastava S K, Verma R, Gupta B D. Theoretical modeling of a self-referenced dual mode SPR sensor utilizing indium tin oxide film [J]. *Optics Communications*, 2016, 369:131–137.
- [18] Maharana P K, Jha R, Palei S. Sensitivity enhancement by air mediated graphene multilayer based surface plasmon resonance biosensor for near infrared [J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2014, 190(1): 494–501.
- [19] Li Songquan, Ye Hong'an, Liu Chunyu, et al. Low-cost, high performance surface plasmon resonance-compatible films characterized by the surface plasmon resonance technique[J]. *Chinese Physics B*, 22(22): 077302.
- [20] Li Kaiqun, Lu Yonghua, Luo Zhaofeng, et al. Numerical and experimental investigation of temperature effects on the surface plasmon resonance sensor[J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(5): 428–431.